



PERÚ

Ministerio  
de Energía y Minas

SECTOR ENERGÍA Y MINAS  
**INGEMMET**  
INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO

**OVI**  
OBSERVATORIO  
VULCANOLÓGICO  
INGEMMET

# LIBRO DE **RESÚMENES**



## **IX FIPVO**

FORO INTERNACIONAL DE  
PELIGROS VOLCÁNICOS

**“VOLCANES Y SOCIEDAD:  
RIESGO Y PREVENCIÓN”**



**Abril 2023**









Volcán Sabancaya - Arequipa







LIBRO DE  
**RESÚMENES**



**IX FIPVO**

FORO INTERNACIONAL DE  
PELIGROS VOLCÁNICOS

**“VOLCANES Y SOCIEDAD:  
RIESGO Y PREVENCIÓN”**



Editores:  
Pablo Masías Álvarez,  
Mayra Ortega Gonzales



## **LIBRO DE RESÚMENES IX FORO INTERNACIONAL DE PELIGROS VOLCÁNICOS - IX FIPVO**

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2023-02989  
ISBN: 978-612-47898-3-0

Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (Ingemmet)  
Av. Canadá N° 1470, San Borja, Lima, Perú  
Primera edición abril 2023

© INGEMMET  
Presidente Ejecutivo  
Henry Jhon Luna Córdova

Gerente General  
Esteban Mario Bertarelli Bustamante

Dirección encargada del estudio  
Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico  
Lionel Fidel Smoll.

Edición  
Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico  
Pablo Masías Álvarez, Mayra Ortega Gonzales

Revisión Técnica  
Dolors Ferrés López, Mariana Patricia Jácome Paz, Ana María Lizeth Caballero García,  
Claudia Inés Rivera Cárdenas, Natalie Ortiz Guerrero, Rosario Vázquez Morales,  
Emilce Bustos, Eveling Espinoza Jaime, Amiel Nieto Torres, Giovanni Sosa Ceballos.

Corrección gramatical y de estilo  
Veronica Tito, Nely Sullca, David Valdivia, Gianella Paredes, Nadya Calderón, Cesar Quispe.

Unidad de Relaciones Institucionales  
Carlos Anthony Miranda Vargas

Diagramación  
Nuria Yanira Chambi Moloche

Referencia bibliográfica  
Masías, P. & Ortega, M., eds. (2023) – *Libro de Resúmenes IX Foro Internacional de Peligros Volcánicos – IX FIPVO*. Lima: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, 408 p.

Publicación disponible en libre acceso en el Repositorio Institucional del Ingemmet.  
(<https://repositorio.ingemmet.gob.pe>).

## PRESENTACIÓN

El desarrollo sostenible del país implica garantizar la seguridad de la población y de sus actividades económicamente productivas, ante posibles amenazas geológicas. Por ello, es imprescindible que los millones de habitantes y empresas que están expuestos a los peligros geológicos, conozcan oportunamente sobre la naturaleza y efectos de estos fenómenos destructivos que podrían afectar su integridad física, actividades económicas, así como la de sus bienes. En tal sentido, la difusión de la información generada por el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI), es vital, y contribuye con la reducción de riesgo de desastres por erupciones volcánicas en el Perú.

Sin importar qué tanto hayamos avanzado tecnológicamente, la humanidad entera sigue siendo vulnerable frente a los devastadores fenómenos naturales que se presentan con regularidad en nuestro planeta, y sin duda, las erupciones volcánicas son una de las más letales. Por esta razón, las instituciones encargadas de generar información técnico-científica sobre estos fenómenos naturales, vienen contribuyendo con sus productos para el diseño de planes de emergencia, ordenamiento territorial, implementación de medidas de prevención y mitigación. Sin embargo, estos productos son publicados mayormente en revistas científicas y eventos académicos, por el contrario, pocas veces son entregados y explicados a los usuarios. Por esta razón, dichos estudios son desconocidos por las autoridades, planificadores y la población en general.

Teniendo en cuenta que, en el Perú, más de 3 millones de personas conviven en zonas de influencia de los volcanes y que hay infraestructuras expuestas a peligros volcánicos, el OVI organiza el IX Foro Internacional de Peligros Volcánicos "Sociedad y Volcanes: Riesgo y Prevención", evento que se realizará del 02 al 04 de noviembre en la ciudad de Arequipa y donde se discutirán, con vulcanólogos nacionales y extranjeros, los últimos avances en el estudio, evaluación, monitoreo y difusión de los peligros volcánicos.

El Objetivo del Foro es generar un espacio científico-técnico, de discusión y análisis de los estudios geológicos de volcanes y peligros volcánicos, el cual contribuya en la educación y sensibilización de las autoridades, profesionales, funcionarios públicos y estudiantes, a fin de que adopten medidas de prevención y mitigación frente al riesgo de desastres. Además, establecer un espacio para compartir y difundir el conocimiento sobre herramientas de monitoreo multidisciplinario que contribuyen al pronóstico de erupciones volcánicas.



## ÍNDICE DE RESÚMENES

### SESIÓN 1 | MAPAS DE PELIGROS Y MONITOREO VOLCÁNICO MULTIDISCIPLINARIO

- Análisis de las emisiones de SO<sub>2</sub> durante la formación de domos de lava en el proceso eruptivo del volcán Sabancaya Período 2019 - 2022. **Jorge Alcántara, Fredy Apaza, Daniel Ramirez** 15
- Implementación de la red de monitoreo en tiempo real de gases volcánicos en el proceso de desgasificación en el volcán Misti. **Jorge Alcántara, Fredy Apaza, Daniel Ramirez** 21
- Caracterización del proceso eruptivo del volcán Ubinas 2013- 2017 mediante el monitoreo multiparamétrico. **Rosa Ancasi, Edu Taipe, Jersy Mariño, Fredy Apaza, Rafael Miranda, Domingo Ramos, Javier Calderón, Pablo Masías, Mayra Ortega, Beto Ccallata, Rosario Paxi, Saida Japura, David Valdivia, Luis Cruz** 25
- Señales de infrasonido asociadas a la actividad superficial en el volcán Sabancaya. **Rosa Ancasi, Mayra Ortega, Vídel Chavez, Rafael Miranda, Albert Ramos** 30
- Infraestructura de protección implementada por el observatorio vulcanológico del INGEMMET para equipos de monitoreo en volcanes activos en el sur del Perú. **Alfonso Añamuro, José Calderón, Edu Taipe** 36
- Emisiones de SO<sub>2</sub> en la erupción del volcán Ubinas en julio 2019. **Fredy Apaza, Jorge Alcántara, Daniel Ramirez** 39
- Construcción de mapas calibrados de probabilidad de inundación de corrientes de densidad piroclástica para el Complejo Volcánico San Salvador, El Salvador. **Alvaro Aravena, Raffaello Cioni, Andrea Bevilacqua, Augusto Neri, Dolors Ferrés, Demetrio Escobar y Alessandro Aiuppa** 42
- Mapa de peligros del complejo volcánico Chachani, Arequipa-Perú. **David Arteaga, Nélide Manrique, Rigoberto Aguilar, Yhon Soncco, Benjamin Van Wyk de Vries, Carla Palacios, Verónica Tito, Elizabeth Pacsi, Rosmery Delgado, Sandra Sanz** 49
- Diseño e implementación de un prototipo multiparámetro para monitoreo de fuentes termales volcánicas. **Gonzalo Borja, Javier Calderón, Albert Ramos, Pablo Masías y Roxana Flores** 55
- Modelos de fuente de sismicidad LP para la actividad del volcán Galeras 2004-2010 (Colombia). **Oscar Cadena, John Jairo Sánchez** 58
- Tefrocronología y frecuencia eruptiva en el holoceno superior del volcán Irazú, Costa Rica. **Daniela Campos-Durán, Guillermo E. Alvarado, Joan Marti** 61
- Gestión técnica en tres volcanes con estilos eruptivos diferentes, casos: Villarrica, Calbuco y Nevados del Chillán (Chile). **Carlos Cardona, Alvaro Amigo, Rodrigo Ordenes, Cintia Bengoa** 66
- Campo Magnético preliminar del Volcán Misti. **Beto Ccallata, Reynaldo Ccacyancco, Domingo Ramos, Rafael Miranda y Jorge Alcantara** 70
- Mecanismos de emplazamiento y destrucción de los domos de lava kimsa y tawa en el volcán Sabancaya, mediante el monitoreo volcánico multidisciplinario. **Jorge Chalco, Mayra Ortega, Rosa Ancasi, Vidél Chavez, Fredy Apaza** 73
- Monitoreo visual del volcán Sabancaya con imágenes térmicas en tiempo real. **Vidél Chavez** 79
- Actualización de mapas de Amenaza por flujos de lava del volcán de Pacaya, San Vicente Pacaya, utilizando modelos de procesos físicos y validación de campo. **Carla Chun, Rüdiger Escobar-Wolf, Gustavo Chigna** 83
- Influencia de la geología de la corteza en el emplazamiento y propagación de intrusiones magmáticas y en las señales de deformación en superficie. **Matías Clunes, John Browning, Carlos Marquardt, Kyriaky Drymon Agust Gudmundsson, Janine Kavanagh** 88
- Integrando los métodos geocronológicos y modelamiento probabilístico para el análisis de las amenazas volcánicas: el caso del volcán Galeras. **Ruby Alicia Criollo, Gustavo Córdoba Guerrero, Diana Rodríguez, Alejandra Guerrero, Antonio Costa y Jean-Claude Thouret** 94

■ Simulación de lahares en las microcuencas del volcán Misti, Arequipa - Perú. <b>Juan Cuno, Kevin Cueva, Jersy Mariño, Carla Arias, Andy Ancalle, Yhon Soncco</b>	99
■ Un sistema automatizado de pronóstico de dispersión de cenizas y su monitoreo en tiempo real para el volcán Popocatepetl. <b>Hugo Delgado Granados, Agustín García Reinoso, Eric Téllez Ugalde, Jorge Zavala Hidalgo y Adolfo Magaldi</b>	103
■ Análisis de las Caídas Piroclásticas "Sandwich" Originadas por Erupciones Plinianas del Volcán Misti en el Pleistoceno Superior, Para Evaluar el Peligro Volcánico en la Ciudad de Arequipa. <b>Gian Escobar</b>	105
■ Avances en el Monitoreo Volcánico Instrumental en la República Argentina. <b>Sebastian Garcia, Gabriela Badi, Victor Preatoni, Victoria Hipatia Olivera Craig, Fabricio Carbajal, Gemma Acosta, Augusto Casas, Nicolas Vigide, Pablo Forte</b>	111
■ Mapas de amenaza por caída de ceniza y proyectiles balísticos, volcán de Pacaya, Guatemala. <b>Dulce González, Rüdiger Escobar-Wolf y Gustavo Chigna</b>	118
■ La Inteligencia Artificial como herramienta de identificación de penitentes en el volcán nevado Coropuna: Primeros ensayos. <b>Joshua Iparraguirre, Pablo Masías, Jose Úbeda</b>	125
■ Inteligencia Artificial aplicada a la predicción de los niveles de alerta de actividad volcánica del volcán Sabancaya, Arequipa, Perú. <b>Guilherme Tomazi Klein, Viviane Todt</b>	129
■ Discontinuidades cosísmicas identificadas a partir de datos GNSS relacionadas a actividades sísmicas. <b>Rafael Miranda, Rosa Anccasi, Luis Cruz, Edu Taipe y Alfonso Añamuro</b>	134
■ Actividad volcánica asociada a procesos de formación y destrucción de domos de lava en el volcán Sabancaya, 2019 - 2022. <b>Mayra Ortega, Luis Cruz, Fredy Apaza, Rosa Anccasi, Rosario Paxi, Edu Taipe, Videl Chavez</b>	139
■ Monitoreo volcánico a través de infrasonido en volcanes de Colombia. <b>Carlos Ospina, Beatriz Galvis Arenas</b>	145
■ Determinación preliminar de parámetros morfométricos de los Domos Potrero - Complejo Volcánico Chachani. <b>Elizabeth Pacci, Nélica Manrique, Magdalena Oryaëlle Cheverel, Rigoberto Aguilar, Benjamin van Wyk de Vries</b>	151
■ Tufo Yura: la ignimbrita más joven de Arequipa, sur del Perú. <b>Carla Palacios, Nélica Manrique, Rigoberto Aguilar y David Arteaga</b>	156
■ Comunicación de peligros volcánicos a corto plazo mediante el uso de mapas dinámicos en los Reportes de Actividad Volcánica en Chile. <b>Constanza Perales, Virginia Toloza, Maira Figueroa, Gabriela Jara, Franco Vera, Felipe Flores, Laura Bono</b>	162
■ Características preliminares del sistema hidrotermal volcánico Casiri - Purupuruni. <b>Daniel Ramírez, Pablo Masías, Fredy Apaza, Jorge Alcántara y Gianella Paredes</b>	167
■ Diseño e implementación de un registrador de parámetros eléctricos para estaciones de monitoreo volcánico. <b>Juan Albert Ramos, Javier Calderón, Gonzalo Borja</b>	171
■ Mapa Regional y Ranking de Riesgos Volcánicos de la Zona Volcánica Central de los Andes. <b>María-Paz Reyes-Hardy, Luigia Di Maio, Lucia Dominguez, Corine Frischknecht, Sébastien Biass, Leticia Freitas Guimarães, Amiel Nieto-Torres, Manuela Elissondo, Maira Figueroa, Álvaro Amigo, Sebastián García y Costanza Bonadonna</b>	176
■ Mapas de dispersión de gases y de partículas: Un insumo que permite alertar a la población en caso de actividad de los volcanes Poás, Turrialba y Rincón de la Vieja. <b>José Pablo Sibaja Brenes, Rosa Alfaro Solís, María Martínez Cruz</b>	182
■ Cálculo de volumen de flujo de detritos (huaicos) y lahares secundarios. Considerando la infiltración según la teoría del número de curva (CN). <b>Yhon Soncco, Juan Cuno, Segundo Núñez y Kevin Cueva</b>	188
■ Análisis geológico y numérico del flujo de lodo de la quebrada El Tejado del 31 de enero de 2022, Quito - Ecuador. <b>Liliana Paulina Troncoso, Gustavo Córdoba Guerrero, Jorge Vallejo Morillo, Nicolás Rondal, Luis Pilatasig, Elías Ibadango, Stalin Solano, Andrés Gorki, Ruiz, Cristian Zura, Francisco Viteri, Alex Mateus, Rafael Alulema, Andrés Murillo, Rai Torres, Alexis Cantares, Jorge Ordóñez y Gustavo Pinto</b>	192
■ Análisis probabilístico de la amenaza por lahares del volcán Galeras en la Universidad de Nariño, sede Torobajo, mediante simulación en Titan2F. <b>Jorge Vallejo, Ivan Solarte</b>	200
■ Avances y Desafíos en la Evaluación de Peligros Volcánicos en la Red Nacional de Vigilancia Volcánica de Chile. <b>Franco Vera, Felipe Flores, Virginia Toloza, Gabriela Jara, Constanza Perales, Laura Bono, Lizette Bertin y Constanza Jorquera</b>	206
■ Evaluación de peligros de los volcanes Descabezado Grande, Quizapu, Cerro Azul y Centros Eruptivos Aledaños (Chile): resultados preliminares. <b>Franco Vera, Constanza Jorquera, Álvaro Amigo y Lizette Bertin</b>	212



## SESIÓN 2 | IMPACTO Y GESTIÓN DE ERUPCIONES VOLCÁNICAS RECIENTES

- Experiencia en los ascensos al volcán Ubinas - Moquegua entre los años 1992 y 2006. **Víctor Aguilar** 220
- Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico - Ckelar Volcanes: Investigación, vigilancia volcánica y contribuciones a la mitigación del riesgo. **Felipe Aguilera, Pablo Salazar, Daniel Díaz, Rodrigo González, Verónica Oliveros, Mahesh Shrivastava, Joseline Tapia, Manuel Inostroza, Susana Layana, Gabriel Ureta, Pablo Salas** 224
- Experiencia colombiana sobre gestión del riesgo volcánico. **Marta Lucia Calvache Velasco** 229
- Experiencia reciente de la gestión local del riesgo volcánico y sísmico. **Jackeline Choque** 232
- Estudio de la erupción del volcán Huaynaputina del año 1600 d.C. Características de la erupción e impacto en poblaciones y el clima. **K. Cueva, Jersy Mariño, Carla Arias, Juan Cuno, Andy Ancalle y Andrés Ticse** 238
- Impactos y gestión de erupciones volcánicas en Argentina: una mirada interdisciplinaria sobre el ciclo eruptivo 2018 - 2019 del volcán Peteroa. **Pablo Forte, Lucia de Abrantes y Amalia Ramires** 243
- Impacto de la ceniza volcánica en la salud de la población asentada alrededor del volcán Sabancaya 2015 - 2020. **Saida Japura, David Valdivia, Fredy Apaza, Haydee Huamani y Daniel Ramírez** 249
- Estrategias de intervención comunitaria para la reducción del riesgo asociado al volcán Lanín. **María Soledad Mele, Sebastián García, Manuela Elissondo, Johanna Kaufman** 259
- Afectación por ceniza volcánica distal a grande ciudad: el caso Sangay - Guayaquil (Ecuador). **Daniel Moran-Zuloaga, Maurizio Mulas, Wilson Merchan-Merchan, Emilio Rodríguez-Caballero, David Walter, Julio Cáceres, Mauricio Cornejo** 266
- Aportes del IRD para la evaluación de las amenazas volcánicas en Perú y Ecuador. **Pablo Samaniego** 270
- Análisis del contexto geodinámico e hidrometeorológico del centro poblado Arcata, para determinar el nivel de peligro al que está expuesto. **Yhon Soncco, Hammer Hojeda** 271
- Trabajos del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET para reducir los riesgos volcánicos en el Perú. **Edu Taipe Maquerhua** 276
- Peligros geológicos asociados a depósitos volcánicos en el sector de Tonohaya. **David Valdivia, Yhon Soncco, Segundo Nuñez, Magdie Ochoa** 282

## SESIÓN 3 | EXPERIENCIAS DE EDUCACIÓN Y DIFUSIÓN PARA LA MITIGACIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO

- **Volcán Ubinas:** Evolución de la percepción local del riesgo. **Roxana Amache Cutipa** 288
- Difusión y sensibilización del INGEMMET para un mejor entendimiento de los peligros del volcán **Marilyn Bautista, David Valdivia y Verónica Tito** 292
- **La Volcanoteca:** una propuesta desde la volcanología, las ciencias sociales y las artes para el fortalecimiento del conocimiento sobre peligros volcánicos en torno al Complejo Volcánico Nevados de Chillán, Chile. **Matías Clunes, Valentina Acuña** 298
- Comunicación del riesgo volcánico a través de la estrategia Volcán Riesgo y Territorio. **Lina Dorado, Sandra Mendoza & Luisa Cadena** 303
- **LA ALVO:** Un camino de cooperación. **Mariana Patricia Jácome Paz, Pablo Forte, Jorge Romero, Rosario Vázquez, Julián Ceballos, Daniel Bertí, Carla Chun, Camila Zúñiga, Yemerith Alpizar y Mariano Augusto** 308
- Comunicación del peligro volcánico en erupciones de larga data: caso de Complejo Volcánico Nevados de Chillán. **Gabriela Jara, Laura Bono, Gabriel Pedreros, Lizett Bertin** 313



► Fig. I.- Cráter del volcán Misti, al oeste se observa el volcán Pichu Pichu

- Difusión de la información volcánica generada por el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI) en el Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (COEN). **Julio Lara** 319
- Evolución de las prácticas de gestión del riesgo volcánico entre la vulnerabilidad y la resiliencia: el caso arequipeño. **Mérour, Eléonore** 325
- Conviviendo con el Ruka Pillán: “Clubes de vulcanología y gestión del Riesgo” **Manuel Morales Camaño** 328
- Estrategia de Divulgación y Comunicación para la Gestión del Riesgo Cuenca del Río Páez: fortaleciendo la resiliencia en la casa del Anciano Canoso (Ísis Thume) - volcán Nevadoo del Huila. **Andrés Narvaez , Adriana Agudelo y Yolanda Ramírez** 334
- Peligros volcánicos: Evidencias de conocimiento posterior a ferias informativas, Volcán Misti - Perú. **Nely Sullca, Nélica Manrique, Kevin Cueva, Evert Apaza, Jackeline Choque y Veronica Tito** 339
- Experiencias de divulgación de la vulcanología en Chile: propuestas innovadoras y desafíos. **Virginia Toloza, Gabriela Jara, Lizette Bertin, Loreto Córdova y Cristian Mardones** 345
- Contra el mal del olvido: relatos de convivencia con un volcán en erupción. **Liliana Paulina Troncoso, Andrés Ordóñez** 350
- Evaluación Geológica de Puntos de Encuentro Transitorio (PET) como un insumo base para la Gestión del Riesgo Volcánico en Chile. **Franco Vera, Constanza Perales, Virginia Toloza, Felipe Flores, Gabriela Jara y Laura Bono** 355

## SESIÓN 4 | GEOPATRIMONIO EN ÁREAS VOLCÁNICAS Y RESILIENCIA ANTE LOS PELIGROS

- Inventario del Patrimonio Geológico en Torno a la Ciudad de Arequipa, Perú. **Andy Ancalle, Jersy Mariño, Carla Arias** 360
- Propuesta de geositos alrededor del volcán Huaynaputina, para el desarrollo del geoturismo en la región Moquegua. **Carla Arias, Jersy Mariño, Kevin Cueva** 366
- Identificación de potenciales geositos alrededor del Complejo Volcánico Casiri - Tacna. **Nadya Calderón, Rigoberto Aguilar, Nélica Manrique, Carla Arias, Leonardo Zevallos, David Arteaga, Carla Palacios** 372
- Geopatrimonio del Pedregal del Xitle, Ciudad de México. **Marie-Noëlle Guilbaud, María del Pilar Ortega-Larrocea, Silke Cram, Gijon Escobar Emmanuel Sebastián, Días Contador Carla Marlen, Hernández Hernández Guadalupe, Galeana Cornejo Tenoch** 379
- Catacterización del Macizo Rocoso de las Canteras de Añashuayco. **Carlos Luza, Fernando Mango, José Castillo, Diory Cervantes, Rosa Ccalachua y Ana Tunquiya** 382
- Ruta del Sillar: Quebrada de Añashuayco, Arequipa - Perú. **Nélica Manrique, Carla Arias, Benjamín Van Wyk de Vries, Rigoberto Aguilar, Carla Palacios** 389
- Proyecto Geoparque Pillanmapu: Estrategia de Gobernanza local para la resiliencia ante escenarios multiamenaza en Chile Central. **Felipe Orellana, Rodrigo Pérez, Carlos Rungruangsakorn, Emil Stefani, Cristobal Salazar** 394
- Geoparque Mundial UNESCO Kütralkura: Laboratorio natural para la educación sobre los peligros volcánicos. **Manuel Enrique Schilling, María Angélica Contreras, Cristian Farías, Gabriela Tascón, y Diego Partarrieu** 401







# SESIÓN 1

**MAPAS DE PELIGROS  
Y MONITOREO VOLCÁNICO  
MULTIDISCIPLINARIO**







# Análisis de las emisiones de SO<sub>2</sub> durante la formación de domos de lava en el proceso eruptivo del volcán Sabancaya

Periodo 2019 - 2022

Jorge Alcántara<sup>1</sup>, Fredy Apaza<sup>1</sup>, Daniel Ramirez<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Observatorio Vulcanológico de INGEMMET, Barrio magisterial 2B-16 Yanahuara, Arequipa, Perú (\*proyectosdgar07@ingemmet.gob.pe)

Palabras clave: Desgasificación, Domo de lava, Dióxido de azufre, DOAS, TROPOMI.

## RESUMEN

Desde el inicio del periodo eruptivo del volcán Sabancaya en el 2016, se ha presentado 5 eventos de emplazamiento de domo de lava, los cuales han condicionado las características de las emisiones de productos volcánicos hacia la atmósfera, en especial la desgasificación volcánica que depende de las condiciones permeables del conducto superior del volcán. En cada emplazamiento de domo, el proceso de desgasificación puede ser explosiva o pasiva, varía según los periodos de formación y destrucción de domo.

Debido a eventos de intrusión magmática y emplazamiento de domo de lava, el sistema del conducto volcánico disminuye su permeabilidad, generando desgasificación explosiva en un sistema semiabierto, desgasificación pasiva en un sistema semicerrado de baja permeabilidad y con la destrucción del domo se evidencia un sistema semiabierto con desgasificación continua de SO<sub>2</sub>.

## I. INTRODUCCIÓN

El Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) es emitido a la atmósfera por procesos naturales y antrópicos (Theys et al., 2021). En el sur del Perú, las emisiones de SO<sub>2</sub> por procesos naturales se deben a la zona volcánica central de América del Sur, donde los volcanes Ubinas y Sabancaya (Mousallan et al., 2017) son los que tienen mayor aporte de SO<sub>2</sub> hacia la atmósfera.

Para el monitoreo de las emisiones de SO<sub>2</sub> se utilizan distintas técnicas para medir la concentración y flujos de SO<sub>2</sub> emitidos a la atmósfera. Uno de ellos es el instrumento de espectroscopia de absorción óptica diferencial ultravioleta (DOAS) que es un sistema

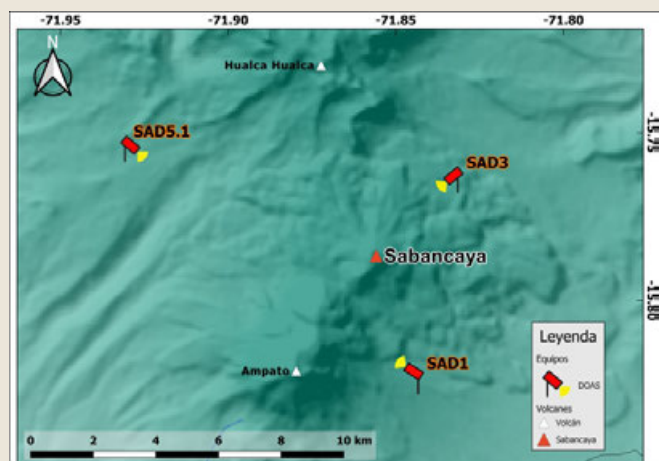
diseñado para medir los flujos de gases volcánicos mediante espectroscopia de absorción UV. Además, durante las últimas décadas se han desarrollado técnicas de detección por instrumentos a bordo de satélites como TROPOMI, que es un instrumento basado en la espectroscopía que permite monitorear las emisiones de SO<sub>2</sub> desde el satélite Sentinel-5p. En el volcán Sabancaya la red de monitoreo de gases volcánicos cuenta con tres instrumentos DOAS (Fig. 1) que están en funcionamiento desde el año 2016, por otro lado, el satélite Sentinel-5p proporciona información desde el año 2018, lo cual nos permite evaluar la desgasificación del presente proceso eruptivo del volcán Sabancaya.

## II. METODOLOGÍA

El uso de instrumentos de espectroscopia de absorción óptica diferencial ultravioleta (DOAS) para la medición de emisiones de gases volcánicos ha sido implementado en 42 volcanes alrededor del mundo mediante el proyecto NOVAC, como indica Galle et al. (2010) este instrumento utiliza la luz solar dispersa en la región UV para derivar la abundancia de SO<sub>2</sub> y posteriormente calcular el flujo de gas utilizando la información de velocidad y dirección del viento.

Se realiza el análisis de los flujos de SO<sub>2</sub> en las series temporales provenientes de la red de monitoreo de gases volcánicos del volcán Sabancaya para identificar el tipo de desgasificación magmática en periodos de formación y destrucción de domos de lava. Identificaremos los tipos de desgasificación ya sea pasiva o explosiva de SO<sub>2</sub>, en relación a la permeabilidad del sistema planteado por Campion et al. (2018).





► Fig. 1 – Red de monitoreo de gases volcánicos del volcán Sabancaya

Además, el Instrumento de monitoreo troposférico (TROPOMI) ha revolucionado las técnicas satelitales para el monitoreo de gases trazas en la atmósfera. Este instrumento identifica el  $\text{SO}_2$  volcánico emitido a la atmósfera mediante espectroscopía de absorción óptica diferencial a una resolución espacial de  $7 \times 3.5 \text{ km}^2$  y una resolución temporal de 1 día (Theys et al., 2021). Las imágenes provistas por el satélite Sentinel-5p proporcionan información parcial de la cantidad de  $\text{SO}_2$  emitido a la atmósfera, se seleccionan ciertos eventos para identificar la cantidad de toneladas de  $\text{SO}_2$  concentrados en la atmósfera.

### III. CARACTERÍSTICAS DE LA ACTIVIDAD ERUPTIVA

El volcán Sabancaya, ubicado a 75 km al NO de la ciudad de Arequipa, inició su proceso eruptivo el 06 de noviembre del 2016, este proceso eruptivo continúa en desarrollo hasta el momento de escribir este resumen. Según el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI), la erupción es de tipo vulcaniana con un IEV 2, caracterizado por explosiones moderadas con emisiones de gases, cenizas y proyectiles balísticos, que forman columnas eruptivas que alcanzan los 5.5 km sobre el cráter en algunas ocasiones.

Bajo el monitoreo multidisciplinario del volcán Sabancaya se evidenciaron distintos eventos de emplazamiento de domos de lava en el interior del

cráter del volcán, los cuales juegan un papel importante en las características de las emisiones volcánicas. Mediante el monitoreo volcánico de distintos parámetros y la correlación de imágenes satelitales y de sobrevuelos de inspección con dron, el OVI pudo seguir la evolución de estos eventos, como los periodos de formación, presencia y destrucción de 5 domos de lava.

#### DOMO I: HUK

En el inicio de las explosiones en noviembre del 2016, en las imágenes Planet Scope se logró identificar el cráter del volcán al SE, sin embargo, se observó la acumulación de material volcánico al NO; en meses posteriores. En febrero del 2017, se aprecia el crecimiento de un domo con un área aproximada de  $5674 \text{ m}^2$  al noreste, evidenciando la migración del conducto volcánico. En septiembre del 2018 la imagen satelital nos muestra las emisiones alrededor del domo que para ese momento cuenta con un área de  $18003 \text{ m}^2$ . Durante el 2019, el satélite Airbus muestra que el domo se encuentra emplazado en dirección noreste a sureste del cráter, en el mes de mayo el domo cuenta con un área mayor de  $21206 \text{ m}^2$  y hasta octubre llega a tener un área mucho mayor de  $51742 \text{ m}^2$ . De noviembre a diciembre del 2019, el domo de lava presenta un crecimiento acelerado llegando a tener un diámetro mayor de 367 m y un diámetro menor de 234 m con un área de  $67000 \text{ m}^2$ , logrando sobrepasar la altura del cráter siendo observado por una de las cámaras de vigilancia del OVI, en este periodo se generan explosiones moderadas. En los meses de diciembre y enero se registró el incremento de la duración de la sismicidad por circulación de fluidos (Tremor) y aumento de los sismos de tipo híbridos, además se presentaron dos eventos de flujos piroclásticos de corto alcance, siendo identificados por señales sísmicas de alta frecuencia de hasta 20 Hz y las imágenes de vigilancia, llegando así a una transición del inicio de la destrucción del primer domo de lava Huk.

En el año 2020, la correlación de parámetros de monitoreo evidencia la destrucción del domo de lava Huk, con la disminución de la energía de las explosiones, disminución de flujos de  $\text{SO}_2$ , mientras que la deformación no presenta cambios importantes hasta el mes de julio.

**DOMO II: ISKAY**

En los meses de julio a noviembre, se registró la formación, crecimiento y destrucción parcial del domo de lava denominado Iskay, iniciando con una inflación acelerada en las proximidades del cráter y posterior a

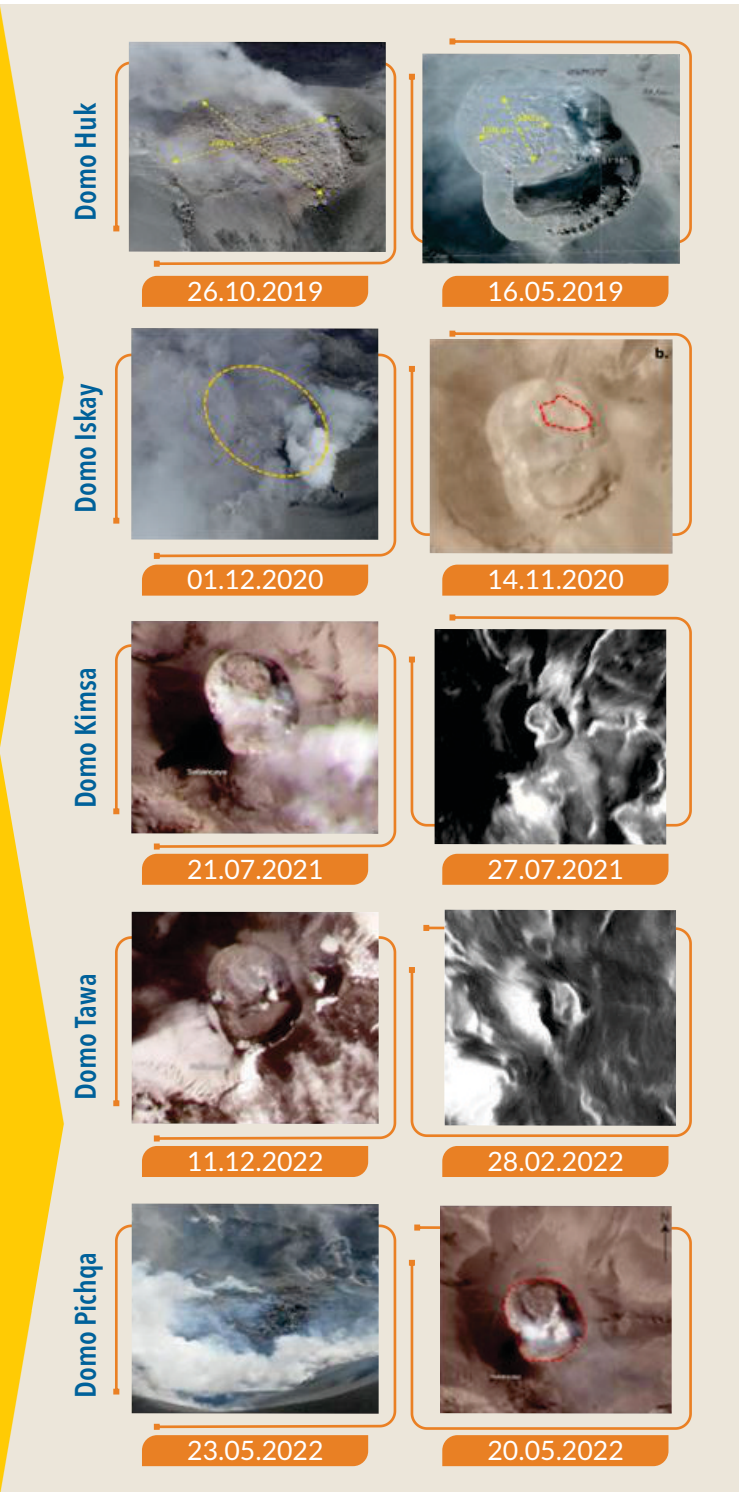
un enjambre sísmico, se comenzó a registrar un incremento en la sismicidad más cercana al volcán como sismos de largo periodo LP, explosiones y eventos acoplados. Por otro lado, la disminución de los flujos de SO<sub>2</sub> infiere la acumulación de gases por debajo de la superficie debido a la baja permeabilidad del nuevo domo. Por último, el descenso de la actividad explosiva y predominio de tremor volcánico, asociados a pequeños eventos tipo flujos piroclásticos y el cambio en la desgasificación volcánica (SO<sub>2</sub>), indican el proceso de destrucción parcial del domo de lava Iskay.

**DOMO III y IV: KIMSAYTAWA**

En el año 2021 se evidenció la formación de dos pequeños domos que condicionan el modo de desgasificación de SO<sub>2</sub>, uno de ellos es Kimsa, el tercer domo en el volcán Sabancaya, es identificado como un domo endógeno, que no se mostraba en superficie; desde fines de abril a mediados de junio se evidenció procesos de intrusión magmática que se evidenciaba con emisiones de SO<sub>2</sub> que iban de grandes a moderadas. Para el mes de julio se registró el incremento en la energía de las explosiones y anomalías térmicas con valores importantes en el cráter del volcán interpretado como el afloramiento del domo a superficie y su posterior destrucción parcial en los meses de julio y agosto. Ya en noviembre se evidencia cambio en los parámetros de monitoreo definiendo así el cuarto domo denominado Tawa, inicia su emplazamiento de manera endógena y su posterior destrucción en el mes de febrero del 2022, con un nivel de desgasificación pequeña a moderada y de la actividad volcánica en general.

**DOMO V: PICHQA**

A mediados de marzo del 2022 se evidencia el incremento de la actividad volcánica con la ocurrencia de un enjambre sísmico asociado a intrusión magmática de más de 30 millones de m<sup>3</sup> posterior a ello, la presencia de anomalías térmicas en el cráter del volcán (>60 MW), aumento en el flujo de So<sub>2</sub> (> 4000 Ton/día), aumento en la altura de la columna eruptiva (>3000 msc) e incremento en la energía de las explosiones (>10 MJ), da pie a la formación y



► Fig. 2 – Imágenes satelitales y de sobrevuelos con dron de los domos de lava del volcán Sabancaya

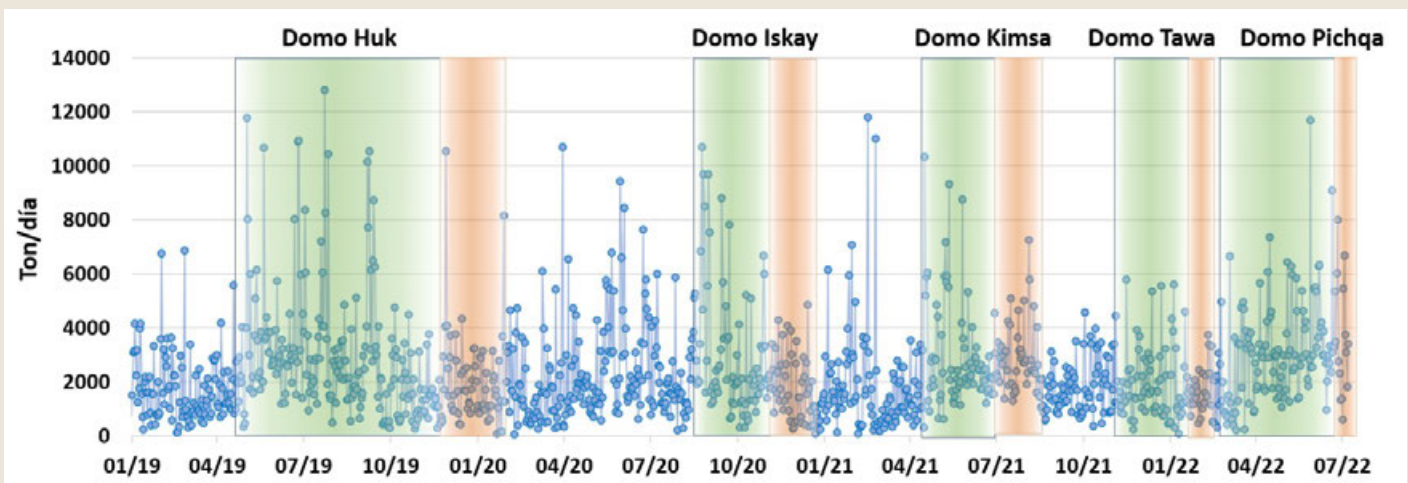
emplazamiento de un pequeño domo de lava denominado "Pichqa".

#### IV. FLUJOS DE SO<sub>2</sub>

La desgasificación volcánica presenta distintas características durante los 5 eventos de emplazamientos de domo en el volcán Sabancaya,

esto se evidencia en las series temporales de flujos de SO<sub>2</sub> donde se registran periodos de calma con procesos de desgasificación pasiva y periodos de aumento en flujo de SO<sub>2</sub> con procesos de desgasificación explosiva.

► Fig. 3 – Serie Temporal de los flujos de SO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera por el volcán Sabancaya - periodo 2019 - 2022.



Durante la formación del domo Huk, se presentan dos periodos claramente identificables en la serie temporal de desgasificación volcánica, en el primer periodo de mayo a octubre donde se observan cuatro procesos de desgasificación explosiva, con flujos de SO<sub>2</sub> de manera intermitente, que incluso superan las 10,000 Ton/día y con un promedio de 1000 Ton/día. En el segundo periodo de octubre a noviembre se evidenció un crecimiento acelerado del domo presentado un sistema parcialmente cerrado, con desgasificación pasiva, registrando emisiones de bajas a moderadas que no superaban las 5,000 Ton/día. Posterior a este proceso, a fines de noviembre se registraron flujos de SO<sub>2</sub> que superan las 10,000 Ton/día, marcando la destrucción parcial del domo Huk y un cambio en el proceso de desgasificación, asumiendo el comportamiento de un sistema semi abierto con desgasificación continua generando explosiones moderadas, esta destrucción fue progresiva hasta el mes de julio del 2020.

El segundo domo denominado Iskay, presentó un proceso similar al primero domo de lava; el incremento y cambio de la desgasificación volcánica para la formación del domo inició a fines de agosto del año 2020, posterior a un evento de intrusión magmática (78.6 millones m<sup>3</sup>) que fue evidenciado por un enjambre sísmico y un sismo sentido principal con magnitud máxima de 5.3; en este primer periodo de formación de domo se evidencia desgasificación explosiva con flujos intermitentes que van de pequeños a moderados, superando las 6,000 Ton/día, esto se mantiene hasta fines de octubre. Posterior a esto la desgasificación es pasiva y continua, con valores que no superan las 5,000 Ton/día, marcando el inicio de la destrucción parcial del segundo domo.

El domo Kimsa fue el tercer domo del volcán Sabancaya; este domo presenta un primer proceso de formación de manera endógena, en los meses de abril a junio del 2021, posterior a un evento de intrusión



magmática (130 millones m<sup>3</sup>). En este proceso se evidenció un periodo de desgasificación explosiva, registrándose flujos grandes de SO<sub>2</sub> que superan las 8,000 Ton/día y un periodo de impermeabilidad del conducto con flujos de SO<sub>2</sub> menores a 2,000 Ton/día. En un segundo proceso de afloramiento del domo de junio a julio, se presenta un sistema semicerrado poco permeable, con flujos de SO<sub>2</sub> que no superan las 4,000 Ton/día. En agosto del 2021 se incrementan las emisiones, presentando un flujo grande de SO<sub>2</sub> (7200 Ton/día) que marca el inicio de la destrucción parcial del domo Kimsa, generando un sistema semiabierto con desgasificación continua que no supera las 5,000 Ton/día en los próximos 5 meses.

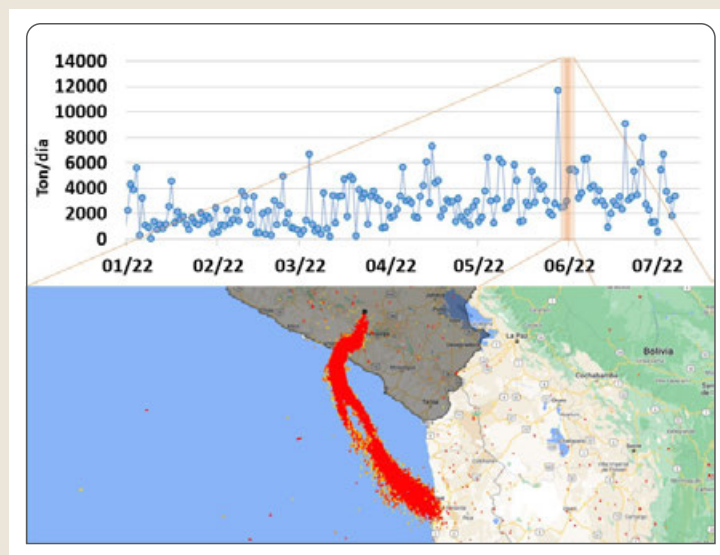
El cuarto domo nombrado Tawa, inicia su formación después de un evento de intrusión magmática en octubre del 2021, en este periodo los valores de flujo de SO<sub>2</sub> disminuyen por la baja permeabilidad del sistema, registrándose desgasificación pasiva con escasos eventos con flujos superiores a los 4,000 Ton/día. El domo Tawa tuvo un corto periodo hasta febrero del 2022 donde los parámetros sísmicos confirman su destrucción.

El domo Pichqa es el quinto domo en el volcán Sabancaya, este se encuentra en desarrollo desde mediados de marzo del 2022, registrándose un enjambre sísmico asociado a intrusión magmática de más de 30 millones de m<sup>3</sup>, lo que se vio reflejado en el incremento de las emisiones de SO<sub>2</sub> con flujos que

han llegado a superar las 10,000 Ton/día. El crecimiento y emplazamiento del domo Pichqa se da de marzo a mayo del 2022, produciendo desgasificación de tipo explosiva con periodos intercalados de acumulación de gases volcánicos (Flujos < 2,000 Ton/día), que genera aumento de presión en el sistema, y periodos de liberación de presión (Flujos > 6,000 Ton/día) que genera emisión de productos a mayor escala. A fines de mayo se registró el flujo más alto de este periodo eruptivo, 12,000 Ton/día de SO<sub>2</sub>, que marcó la destrucción parcial del domo, aumentando ligeramente la cantidad de proyectiles balísticos y el contenido de ceniza en las columnas eruptivas. Durante este último periodo, el conducto volcánico presenta un sistema semiabierto, con presencia del domo en condiciones semipermeables para la desgasificación.

## V. EMISIONES DE SO<sub>2</sub> CAPTADAS EN IMÁGENES TROPOMI

Las imágenes TROPOMI logran captar las emisiones de SO<sub>2</sub> concentradas en la atmósfera, debido a la resolución temporal del satélite sentinel-5P se cuenta con una imagen por día, lo cual limita de cierta manera captar las emisiones en su totalidad, sin embargo, al presentarse emisiones de gran magnitud, en la mayoría de las imágenes queda registrado las emisiones de SO<sub>2</sub> del volcán Sabancaya.



► Fig. 4 - Serie Temporal de los flujos de SO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera (DOAS), la imagen muestra la dispersión de SO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera por el volcán Sabancaya.

Se calcula el total de SO<sub>2</sub> en toneladas para cada imagen del área de estudio, obteniendo valores representativos por día. Como se logra apreciar en la figura 4, las imágenes logran captar las densidades de columna vertical (VCD) de SO<sub>2</sub> abarcando un área de

dispersión que llega a tener 26.98 Km<sup>2</sup> para el día 2 de julio, en el cual se calculó 11,500 toneladas de SO<sub>2</sub>, habiéndose calculado un flujo promedio de 2,300 Ton/día con los instrumentos DOAS.

### CONCLUSIONES

El proceso de formación, presencia y destrucción de domos de lava en el interior del cráter del volcán Sabancaya condiciona las emisiones de SO<sub>2</sub>, esto debido a la variación de permeabilidad del conducto volcánico, presentando un sistema semicerrado que limita y retiene las emisiones de SO<sub>2</sub> en el conducto generando desgasificación pasiva para luego liberar de manera rápida el gas, llegándose a registrar valores elevados de flujo, por otro lado un sistema semiabierto que libera de manera continua los gases volcánicos.

Las emisiones de SO<sub>2</sub> pueden ser identificadas en las imágenes TROPOMI de tal manera que las emisiones sean de gran magnitud como las emisiones del volcán Sabancaya, llegando a ser una importante técnica de monitoreo de la dispersión y cantidad de SO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece de manera especial al área de monitoreo volcánico del Observatorio Volcanológico del INGEMMET y a los colaboradores de este resumen.

### REFERENCIAS

- ▶ Galle, B. M. Johansson, C. Rivera, Y. Zhang, M. Kihlman, C. Kern, T. Lehmann, U. Platt, S. Arellano, S. Hidalgo Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change (NOVAC) – a global network for volcanic gas monitoring: network layout and instrument description. *J. Geophys. Res. – Atmos.*, 115 (D5)(2010), pp. 2156-2202, 10.1029/2009JD011823
- ▶ Campion, R., H. Delgado, D. Legrand, N. Taquet, T. Boulesteix, S. Pedraza y T. Lecocq (2018). Breathing and Coughing: The Extraordinarily High Degassing of Popocatepetl Volcano Investigated With an SO<sub>2</sub> Camera. *Frontiers in Earth Science*, 6, 163, <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00163>
- ▶ Theys, N., C. Lerot, M. Van Roozendaal, I. De Smedt, H. Yu (2021). S5P/TROPOMI SO<sub>2</sub> Algorithm Theoretical Document, <https://sentinel.esa.int/documents/247904/2476257/Sentinel-5PATBD-SO2-TROPOMI>
- ▶ Moussallam, Y., Perters, N., Masias, P. et al. Magmatic gas percolation through the old lava dome of El Misti. *Bull Volcanol* 79, 46. 2017, <https://doi.org/10.1007/s00445-017-1129-5>

# Implementación de la red de monitoreo en tiempo real de gases volcánicos en el proceso de desgasificación en el **volcán Misti**

Jorge Alcántara<sup>1\*</sup>, Fredy Apaza<sup>1</sup>, Daniel Ramirez<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Observatorio Vulcanológico de INGEMMET, Barrio magisterial 2B-16 Yanahuara, Arequipa, Perú  
(\*proyectosdgar07@ingemmet.gob.pe)

## INTRODUCCIÓN

El volcán Misti es el tercer volcán peruano que supone mayor amenaza volcánica al ser el volcán más próximo a la segunda ciudad más grande e importante del Perú, la cual cuenta con 1.2 millones de habitantes y con importante infraestructura económica y social.

En el Perú, el observatorio Vulcanológico del INGEMMET inició el estudio y monitoreo de los principales gases volcánicos H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, y SO<sub>2</sub> en los volcanes peruanos desde el año 2005 mediante el muestreo directo y remoto de los mismos. Desde el 2013 somos parte del proyecto de cooperación internacional NOVAC (Red para la Observación del Cambio Volcánico y Atmosférico) que mide las tasas de emisión de gases de los volcanes en todo el mundo, con el objetivo de evaluar la actividad volcánica, pronosticar erupciones, investigar los procesos volcánicos y estudiar el impacto atmosférico de la desgasificación volcánica. En el año 2016 se pone en marcha dos redes de monitoreo de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), la primera en el volcán Ubinas que cuenta con dos estaciones y la segunda en el volcán Sabancaya que actualmente cuenta con tres estaciones, en el año 2021 se implementa una tercera red de monitoreo de SO<sub>2</sub> en el volcán Misti que cuenta con dos estaciones NOVAC equipada con un escáner DOAS. Así mismo INGEMMET es parte del proyecto DECADE (Desgasificación de Carbono de la Tierra Profunda) del Observatorio de Carbono Profundo (DCO) que es una comunidad mundial para comprender las cantidades, movimientos, formas y orígenes del carbono en la Tierra, en el año 2022 se instala un equipo Multigas que mide la concentración de SO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en el cráter del volcán Misti que complementa la red de monitoreo de gases volcánicos. Estas redes cuentan con transmisión

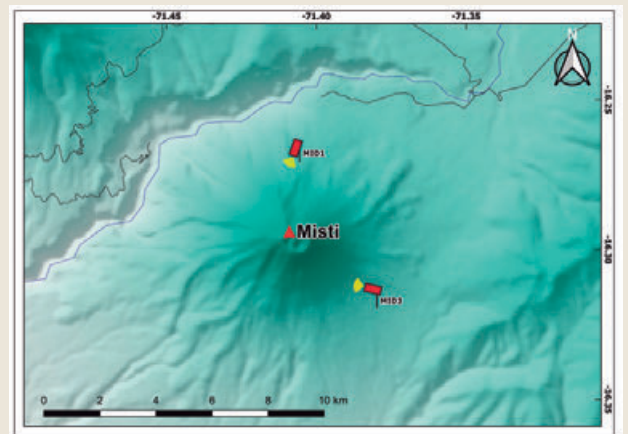
de datos en tiempo real para el monitoreo permanente del proceso de desgasificación volcánica.

El presente resumen presenta los resultados de las mediciones de flujos de SO<sub>2</sub> en el volcán Misti desde noviembre del 2021 con los instrumentos DOAS.

## METODOLOGÍA

El uso de instrumentos de espectroscopia de absorción óptica diferencial ultravioleta (DOAS) para la medición de emisiones de gases volcánicos ha sido implementado en 42 volcanes alrededor del mundo, como indica Galle et al. (2010) este instrumento utiliza la luz solar dispersa en la región UV para derivar la abundancia de SO<sub>2</sub> y posteriormente calcular el flujo de gas utilizando la información de velocidad y dirección del viento.

La red de monitoreo de SO<sub>2</sub> del volcán Misti cuenta con instrumentos DOAS que se componen de un



► Fig. 1 - Red de monitoreo de SO<sub>2</sub> del Volcán Misti



espectrómetro en miniatura (Ocean Optics Inc.), una PC integrada, una fibra óptica, un telescopio y un receptor GPS. El telescopio recoge la luz ultravioleta dispersada desde aerosoles y moléculas de gas en la atmósfera haciendo mediciones o escaneos de horizonte a horizonte, la fibra óptica transfiere la luz desde el telescopio al espectrómetro, el espectrómetro detecta la luz ultravioleta y la convierte en números digitales, estos números son los espectros para la evaluación posterior del gas; el GPS registra la posición del sistema y da la hora estándar universal y finalmente la PC integrada recoge los espectros y gestiona la comunicación de datos (Kern et al., 2016).

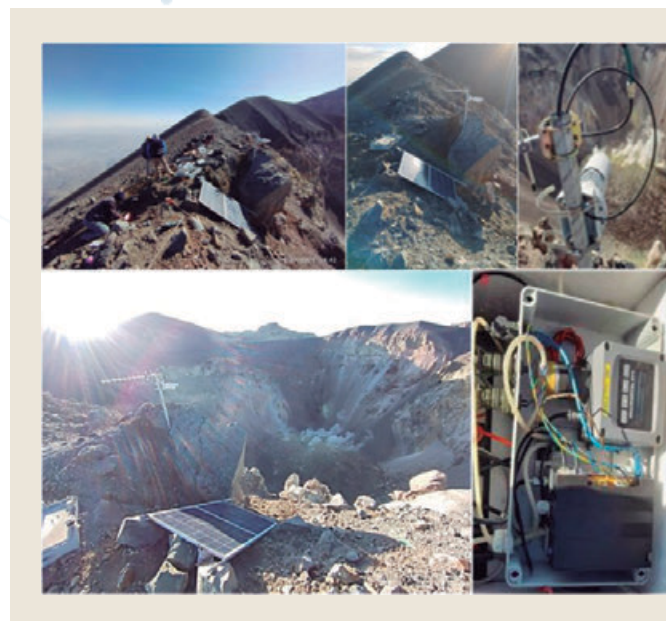
Se necesita dos paquetes de software para ejecutar los procesos del instrumento DOAS, descargar los datos y realizar el postproceso de los datos. El software Kongo se ejecuta en la PC integrada en el campo, este ejecuta las mediciones y guarda los datos en la tarjeta de memoria, por otro lado, el software NOVAC se ejecuta en la computadora del observatorio, este se conecta con el instrumento en campo a intervalos de tiempo y comprueba si hay nuevos datos para descargar. Los resultados de la tasa de emisión de  $SO_2$  se obtienen en el postprocesamiento de los datos, esto también se realiza en el software NOVAC (Kern et al., 2016).

Para complementar a esta red de monitoreo de  $SO_2$  se ha implementado un equipo Multigas de medición permanente, este está localizado en el cráter del volcán Misti (5600 m s.n.m). Esta estación proporcionará concentraciones de  $SO_2$  y  $CO_2$  emitidos por las fumarolas del antiguo domo de lava.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

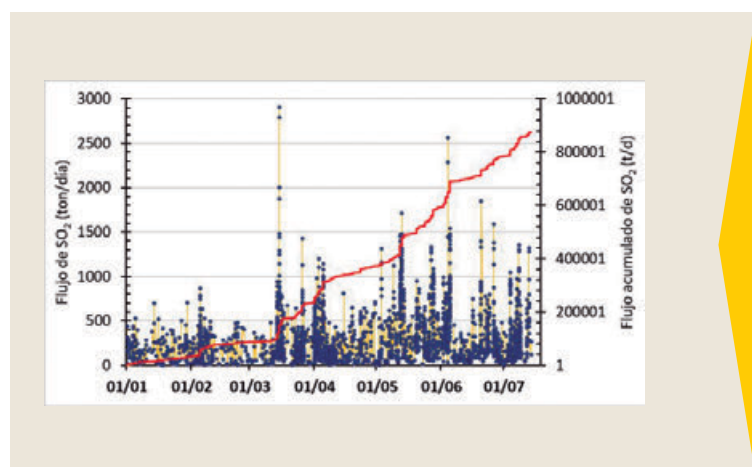
Durante el periodo de funcionamiento de la red de monitoreo de  $SO_2$  se ha logrado realizar 5,400 mediciones o escaneos, a razón de 20 escaneos por día en promedio, que lograron captar las emisiones de  $SO_2$  durante las horas de luz solar (~10h).

Desde noviembre del 2021 los dos instrumentos DOAS han ido trabajando en simultaneo desde distintos flancos del volcán (Fig. 1) con el fin de abarcar mayor área de medición, por lo que es posible que solamente uno de los instrumentos DOAS logre captar el  $SO_2$  en determinado momento, esto debido a que las emisiones cambian su dirección por las condiciones meteorológicas, dirección del viento. En la



► Fig. 2 - Fotografías de la instalación multiparamétrica en el cráter del volcán Misti, se muestran el equipo multigas, cámara de vigilancia y el sensor de presión y temperatura.

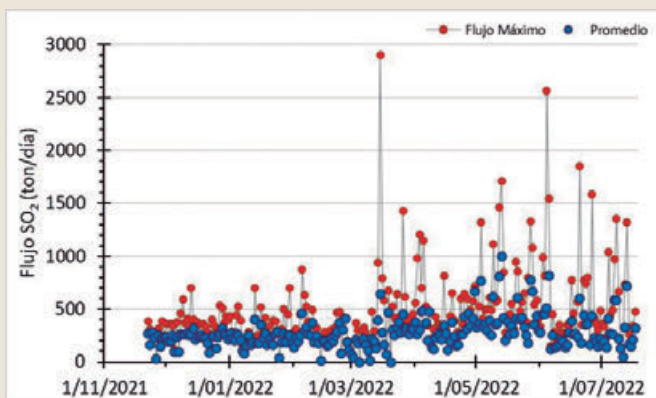
Figura 3 se muestran los flujos de  $SO_2$  durante el año 2022, aquí se puede observar que las emisiones de  $SO_2$  en los meses de enero a marzo no superan las 1,000 Ton/día, luego, a mediados de marzo se logra apreciar el incremento en los flujos llegando a registrar un máximo de 2,900 ton/día, posterior a esta fecha las emisiones han variado desde valores pequeños de flujo a valores moderados que superan las 1,000 ton/día. El flujo acumulado de  $SO_2$  (Línea roja) evidencia pequeñas tendencias de incremento en la desgasificación del volcán Misti.



► Fig. 3 - Flujos de  $SO_2$  medidos por los instrumentos DOAS de la red de monitoreo del volcán Misti.

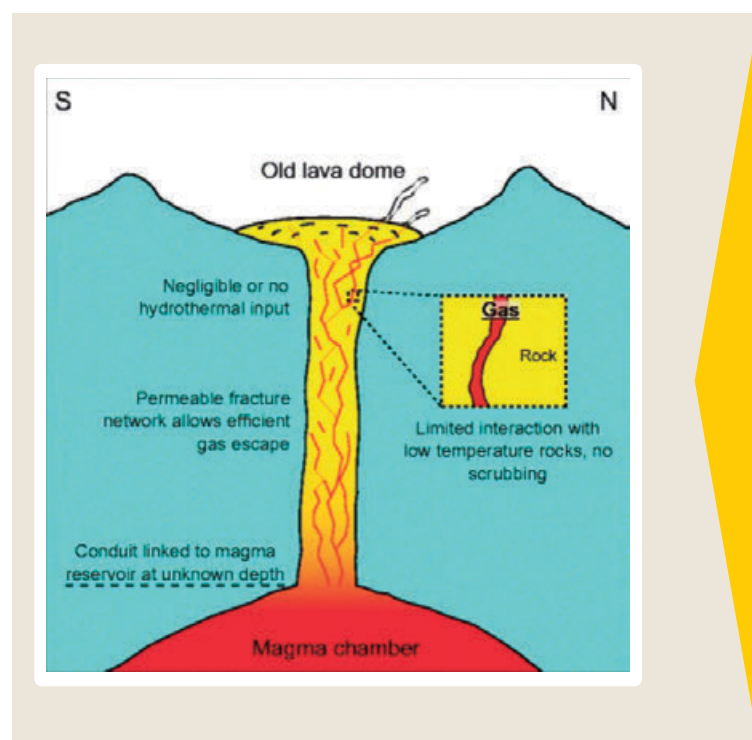
Según Moussallam et al. (2017) el volcán Misti presenta una fuente magmática relativamente poco profunda, un conducto permeable y una vía de desgasificación estable que permite la desgasificación continua, lo cual podemos observar durante los 9 meses del funcionamiento de la red de monitoreo de SO<sub>2</sub>, donde los promedios diarios de flujo superan las 100 ton/día (Figura 4).

Moussallam et al. (2017) cualquier cambio de la temperatura o composición del magma, después de un evento de recarga, debería producir un cambio resaltante en diversos parámetros, por ejemplo, la disminución en el flujo total de gases debido a un cambio en las vías de desgasificación o colapso de la red de poros del conducto (Figura 5), esto causaría la variación del domo ya que este no ha presentado ningún cambio en los últimos 15 años.



► Fig. 4 – Flujos Máximo y promedio por día de SO<sub>2</sub> medidos por los instrumentos DOAS de la red de monitoreo del volcán Misti.

El monitoreo de las emisiones de SO<sub>2</sub> del volcán Misti, en este periodo de estabilidad en el conducto volcánico con un sistema permeable que permite la desgasificación continua de gases, nos permitirá identificar cualquier cambio que ocurra en el sistema magmático o el conducto volcánico. Como plantea



► Fig. 5 – Esquema del sistema de desgasificación del volcán Misti, tomado de Moussallam et al. (2017).

## CONCLUSIONES

La red de medición de gases volcánicos instalada en el volcán Misti está registrando información muy valiosa para la comprensión del funcionamiento del sistema volcánico Misti, siendo una técnica complementaria a las demás técnicas del monitoreo multidisciplinario de volcanes.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece de manera especial al área de monitoreo volcánico del Observatorio Volcanológico del INGEMMET, al proyecto NOVAC y al proyecto DECADE.

## REFERENCIAS

- ▶ Galle, B., Johansson, M., Rivera, C., Zhang, Y., Kihlman, M., Kern, C., Lehmann, T., Platt, U., Arellano, S., Hidalgo, S. (2010). Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change (NOVAC)—A global network for volcanic gas monitoring: Network layout and instrument description, *J. Geophys. Res.*, 115, D05304, doi:10.1029/2009JD011823.
- ▶ Kern, C., Arellano, S. (2016). NOVAC Instrument User Manual. Optical Remote Sensing Group, Department of Radio and Space Sciences, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- ▶ Moussallam, Y., Perters, N., Masias, P., Apaza, D., Barnie, T., Ian Schipper, C., Curtis, A., Tamburello, G., Aiuppa, A., Bani, P., Giudice, G., Pieri, D., Gerard Davies, A., Oppenheimer, C. (2017). Magmatic gas percolation through the old lava dome of El Misti volcano. *Bull Volcanol* 79, 46, <https://doi.org/10.1007/s00445-017-1129-5>.



# Caracterización del proceso eruptivo del volcán Ubinas 2013- 2017 mediante el monitoreo multiparamétrico

Rosa Ancasi, Edu Taipe, Jersy Mariño, Fredy Apaza, Rafael Miranda, Domingo Ramos, Javier Calderón, Pablo Masías, Mayra Ortega, Beto Ccallata, Rosario Paxi, Saida Japura, David Valdivia, Luis Cruz.

<sup>1</sup> Observatorio Vulcanológico de INGEMMET, Barrio magisterial 2B-16 Yanahuara, Arequipa, Perú (autonomodgar06@ingemmet.gob.pe)

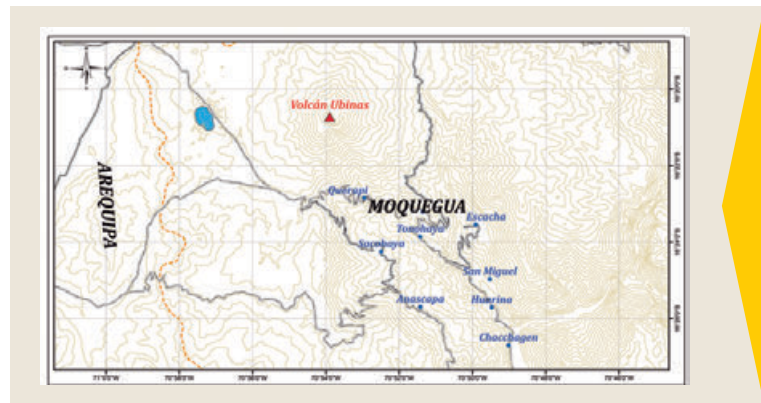
Palabras clave: Volcán Ubinas, explosiones, ceniza, proceso eruptivo.

## INTRODUCCIÓN

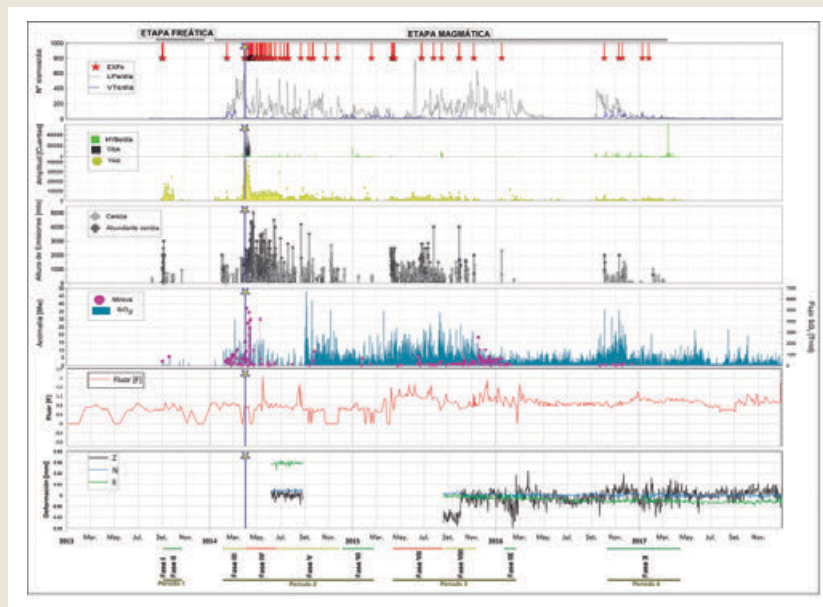
El volcán Ubinas ( $16^{\circ}22'S, 70^{\circ}54'O$ ; 5762 m s. n. m.) está localizado en la región Moquegua, a ~70 km al este de la ciudad de Arequipa. Políticamente, se encuentra en la jurisdicción de la región Moquegua, provincia General Sánchez Cerro, distrito de Ubinas (Fig.1).

Es considerado el volcán más activo del Perú, presentó al menos 26 erupciones desde el año 1550 d. C. hasta la actualidad, con una recurrencia de 2 a 6 erupciones por siglo, los cuales tuvieron un índice de explosividad

volcánica (IEV) entre 1 y 3, caracterizadas por un dinamismo vulcaniano (Rivera et al., 2011).



► Fig. 1 - Mapa de ubicación del volcán Ubinas



► Fig. 2 - Gráfico del análisis multiparamétrico del proceso eruptivo del volcán Ubinas 2013 - 2017. Se observa las etapas, periodos y fases de actividad. La estrella en amarillo representa el sismo de Iquique (Chile) de 8.2 MW.

## CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO ERUPTIVO 2013-2017

El proceso eruptivo del volcán Ubinas empezó en septiembre del 2013 y culminó en marzo del 2017, con una duración de tres años y medio, mediante el monitoreo multiparamétrico que realiza el Observatorio vulcanológico del INGEMMET, se pudo determinar etapas, periodos y fases de actividad (Fig. 2) que a continuación se describen:

### 1.1. ETAPA PRE-ERUPTIVA

El volcán Ubinas presentó un incremento en la ocurrencia y altura de las emisiones de gases y vapor de agua desde mayo del 2012, pasando de < 50 a 600 m sobre el cráter. Por otro lado, desde principios del 2013, se registraron sismos tipo tornillos (TOR), así como el aumento de la energía sísmica diaria y VTs (sismo volcano tectónico) a partir de julio del mismo año (Macedo et al., 2014). Lo descrito anteriormente indicaría un estado de presurización del sistema hidrotermal, el cual continuó hasta septiembre del 2013, en donde se inició el proceso eruptivo.

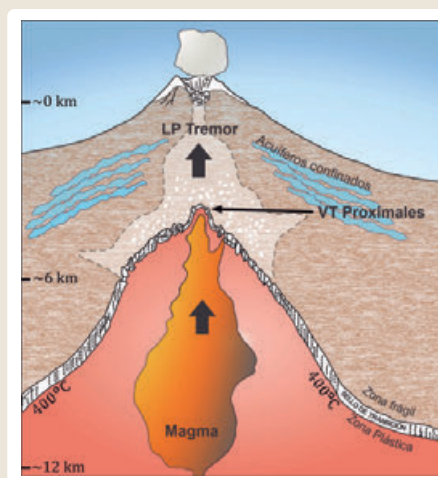
### 1.2. ETAPA ERUPTIVA FREÁTICA

Periodo 1: 01 de septiembre al 21 de octubre del 2013  
El periodo 1 corresponde al inicio del proceso eruptivo (01 de septiembre de 2013) y al inicio de la etapa freática; este periodo contiene las fases I y II, que corresponden a un nivel de actividad alta y baja, respectivamente. La fase I (alta) comprende las 9 explosiones registradas entre el 01 y 07 de septiembre de 2013 (Fig. 3), cuyas alturas máximas alcanzaron los 3000 m sobre el cráter y sus direcciones de dispersión estuvieron entre el norte y suroeste. Los estudios mineralógicos de la ceniza emitida durante esta fase indicaron la presencia de material hidrotermalizado y lapilli acrecional. El lapilli acrecional está constituido por partículas de ceniza muy finas recubiertas por líquidos (soluciones acidas estables a una humedad relativa del 100 %, Gilbert et al. 1994). Durante este periodo también se emitieron proyectiles balísticos que alcanzaron distancias de hasta 800 m desde el cráter. La Fig. 4 explica la etapa freática; este modelo reflejaría la primera interacción del ascenso de un cuerpo de magma y el sistema hidrotermal localizado debajo del volcán Ubinas, relacionado principalmente a la transferencia de calor. La ocurrencia de sismicidad VT

estuvo asociada principalmente al fracturamiento del sello de transición y los eventos LP (sismo Largo Periodo); se registraron por el movimiento de fluidos del sistema hidrotermal que eran perturbados por el calor producto de la intrusión, lo que se confirmaría con la aparición de la primera anomalía térmica de 2.8 MW registrada minutos después de la primera explosión. Asimismo, se observó actividad tipo Tremor (TRE) registrada junto a las explosiones, lo cual indicaría la apertura del sistema. Durante la fase II (media), la actividad volcánica volvió a un estado de relativa calma con algunas emisiones ceniza que no sobrepasaron los 900 m sobre el cráter.



► Fig. 3 - Explosión registrada el 07 de septiembre del 2013 en el volcán Ubinas (fotografía: Masías).



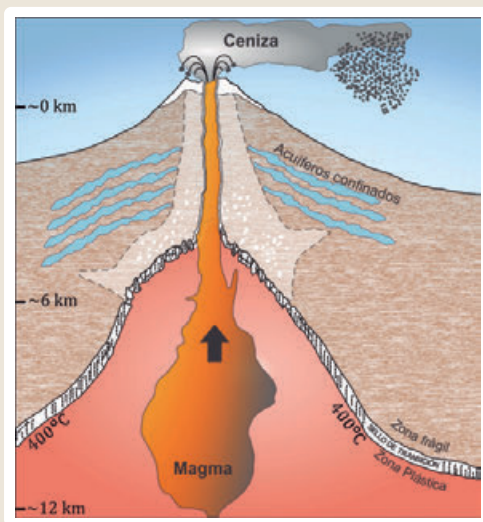
► Fig. 4 - Modelo del proceso eruptivo correspondiente a la etapa freática (modificado de White, 2011).

### 1.3. ETAPA ERUPTIVA MAGMÁTICA

Periodo 2: 01 febrero del 2014 al 19 de febrero del 2015

El periodo 2 corresponde al inicio de la etapa magmática y periodo de mayor actividad del proceso eruptivo. Comprende 4 fases de actividad entre altas, medias y bajas. La fase III (media) inicia el 01 de febrero del 2014 y se caracterizaría por una intensa desgasificación con fragmentación parcial de magma. El estudio de los componentes de la ceniza muestra la presencia cristales de plagioclasa, a piroxenos en fragmentos de magma sin alteración, lo que sugiere un cambio en la composición de la ceniza a partir de esta fecha, es decir, la transición de ceniza hidrotermal a ceniza juvenil. La Fig.5 explica la etapa magmática. Entre febrero y marzo del 2014, se dio el rompimiento del sello de transición por la intrusión y, finalmente, el

paso del magma desde la zona plástica a la zona frágil, y su continuo ascenso hacia la superficie (incremento de sismos relacionados al ascenso, movimiento de fluidos y fracturamiento; constantes anomalías MIROVA y aumento de emisiones  $SO_2$ ). La presencia de un cuerpo magmático en el fondo del cráter del volcán fue corroborada el 19 de marzo (Fig. 6). A partir del 01 abril del 2014 (fase IV - alta) se observaron inyecciones constantes de magma, en consecuencia, podemos inferir que la fase IV se caracterizó por una aceleración general de las tasas de erupción de magma, caracterizado por el magma en superficie, el cual era destruido continuamente por las explosiones que permitían la apertura temporal del sistema. Posiblemente, el sismo de Iquique (Chile) de Mw 8.2 (Fig.2) haya perturbado el sistema volcánico provocando cambios en el comportamiento de los distintos parámetros.



► Fig. 5 - Modelo del proceso eruptivo correspondiente a la etapa magmática (modificado de White, 2011).



► Fig. 6 - Cuerpo de lava localizado dentro del cráter del volcán de Ubinas entre 80 y 100 m de diámetro, observado el 19 de marzo 2014. (Fuente: José Acosta de Defensa Civil de la Municipalidad General Sánchez Cerro).

Las emisiones de ceniza ocurridas durante esta fase fueron considerables, con alturas que llegaron hasta los 5000 m sobre el cráter y fueron dispersadas a 20 km de distancia con direcciones predominantes entre noreste y noroeste. Como consecuencia de las continuas explosiones, el tapón de magma se destruyó posteriormente, ya que a finales de mayo del 2014 no había cuerpo de magma en la parte inferior del cráter (Coppola et al., 2015). La fase V (media) corresponde al periodo comprendido entre junio y

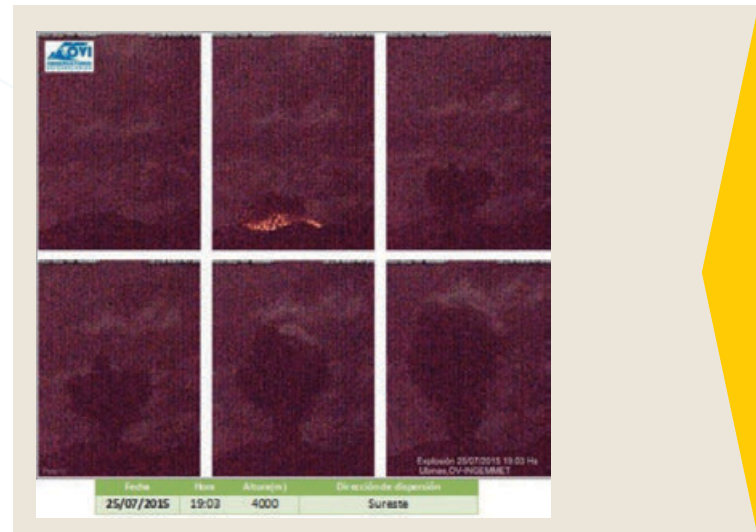
noviembre del 2014. Esta fase se caracterizó por la ocurrencia de emisiones de ceniza con un promedio de alturas de 1000 m sobre el cráter, y disminución del ascenso de magma. Por último, la fase VI (baja), comprendida entre diciembre del 2014 y febrero del 2015, es considerada como baja, podemos sugerir que las bajas tasas de inyección magmática hayan influenciado en la disminución y posteriormente ausencia parcial de la actividad explosiva.



### Periodo 3: 08 de abril del 2015 al 15 de febrero del 2016

El periodo 3 contiene 3 fases de actividad: alta, media y baja sucesivamente; corresponde a su vez a uno de los periodos de mayor actividad después del periodo 2. La fase VII (alta) comprende entre abril y agosto del 2015. Esta fase indicó una nueva inyección/recarga de magma (aumento de sismos híbridos y emisiones del SO<sub>2</sub>). Las emisiones de ceniza tuvieron alturas promedio entre 2500 y 3000 m sobre el cráter, las cuales en su mayoría se debieron al registro continuo de tremor espasmódico (TRE). También, se observó la eyección de proyectiles balísticos, de tamaños menores (Fig. 7). La fase VIII (media) corresponde al periodo comprendido entre agosto y noviembre del 2015, y se caracterizó por presentar esporádicas emisiones con alturas en promedio de 2000 m sobre el cráter. Finalmente, la fase IX (baja) entre enero y febrero del 2016 muestra una disminución notoria de la actividad volcánica. Se continuaron registrando

anomalías térmicas posiblemente relacionadas a un sistema más abierto (Fig. 2).

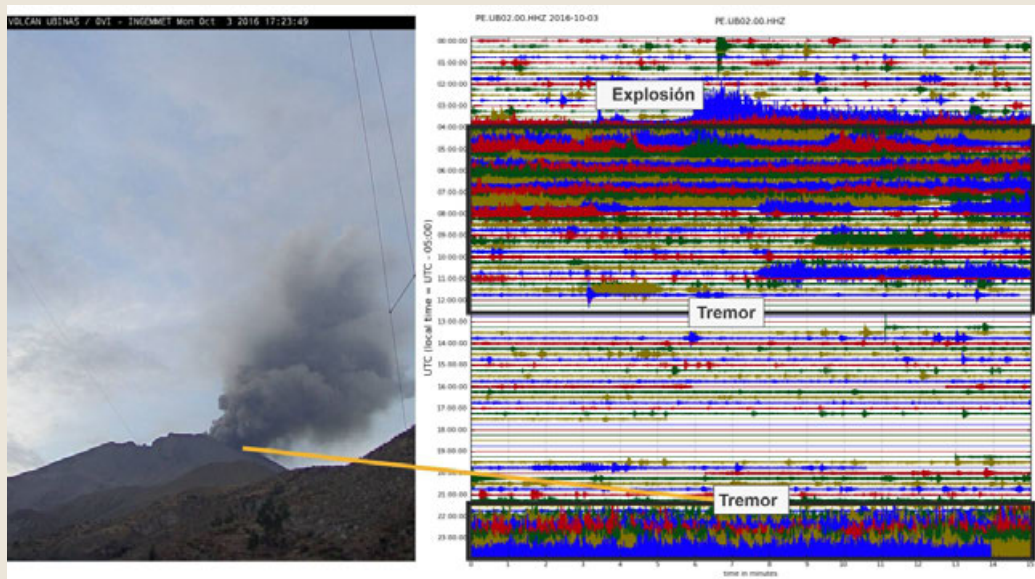


► Fig. 7 - Sucesión de imágenes de una explosión con balísticos registrada en el volcán Ubinas, correspondiente al periodo 3 fase VII.

### Periodo 4: 03 de octubre del 2016 al 06 de abril del 2017

El periodo 4 es el último periodo del proceso eruptivo, Después de una fase notable de quietud de

aproximadamente siete meses. Contiene solo una fase de actividad (fase X - baja), se observaron emisiones esporádicas con menor contenido de ceniza y cuyas alturas máximas llegaron a los 2000 m sobre el cráter (Fig. 2 y 8).



► Fig. 8 - - Actividad volcánica del periodo 4 (03 de octubre del 2016). Izquierda: emisión de ceniza, vapor de agua y gases. Derecha: sismograma de la estación UBN02, registro de la explosión y tremor asociado a la emisión.

## CONCLUSIONES

- ▶ El volcán Ubinas es considerado el más activo del Perú, presentó 26 erupciones desde el año 1550 d.C. con IEV entre 1 y 3.
- ▶ El monitoreo multiparamétrico del OVI, permitió caracterizar el proceso eruptivo del volcán Ubinas entre septiembre del 2013 y marzo del 2017, identificando etapas, periodos y fases de actividad.
- ▶ La etapa freática se caracterizó por la ocurrencia de explosiones con alturas hasta 3000 m sobre el cráter. El material expulsado consistió en fragmentos hidrotermalizados y lapilli acrecional. Esta actividad indicaría la primera interacción de un cuerpo de magma y el sistema hidrotermal, así como la apertura del sistema.
- ▶ La etapa magmática, presentó intensa desgasificación al inicio, así como el rompimiento del sello de transición por la intrusión y finalmente el paso del magma desde la zona plástica a la zona frágil, y su continuo ascenso hacia la superficie. El estudio de los minerales (plagioclasa, piroxenos) de la ceniza mostró la transición de ceniza hidrotermal a ceniza juvenil. Las emisiones de ceniza llegaron hasta los 5000 m sobre el cráter y fueron dispersadas hasta 20 km de distancia.

## REFERENCIAS

- ▶ Coppola, D., Macedo, O., Ramos, D., Finizola, A., Delle Donne, D., Del Carpio, R., White, R., McCausland, W., Centeno, R., Taipei, E. (2015). Magma extrusion during the Ubinas 2013-2014 eruptive crisis based on satellite thermal imaging (MIROVA) and ground-based monitoring. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 302: 199-210. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.07.005>.
- ▶ Gilbert, J.S., Lane, S.J. (1994). The origin of accretionary lapilli. *Bull Volcanol* 56, 398-411. <https://doi.org/10.1007/BF00326465>.
- ▶ Macedo, O., Del Carpio, J., Centeno, R., Machacca, R., Portugal, D., Huancco, O., Chijcheapaza, R. (2014). Características sísmicas de la actividad explosiva del volcán Ubinas ocurrida en septiembre 2013. En: Congreso Peruano de Geología, 17, Lima, 2014. Resúmenes. Lima: Sociedad Geológica del Perú, 5 p.
- ▶ Rivera, M., Mariño, J., Thouret, J.-C. (2011). Geología y evaluación de peligros del volcán Ubinas. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 46, 88 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/302>.

# Señales de infrasonido asociadas a la actividad superficial en el volcán Sabancaya

Rosa Ancasi, Mayra Ortega, Vídel Chávez, Rafael Miranda, Albert Ramos

<sup>1</sup> Observatorio Vulcanológico de INGEMMET, Barrio magisterial 2B-16 Yanahuara, Arequipa, Perú (autonomodgar06@ingemmet.gob.pe)

Palabras clave: Infrasonido, señales sísmicas, volcán Sabancaya, emisiones, domo de lava.

## INTRODUCCIÓN

Los volcanes producen sonidos en un amplio espectro, incluidas fuertes explosiones al final del rango de infrasonidos (0,1 Hz a 20-30 Hz) y pequeñas fumarolas en el rango audible. Los sonidos audibles en el volcán son apenas una pequeña parte de la verdadera energía que puede emitir a frecuencias infrasónicas, las cuales pueden ser propagadas varios kilómetros desde su fuente de origen sin disipación o difusión importantes (Paz, C., 2015). El infrasonido está íntimamente ligado al proceso de fragmentación del magma (rápida expansión de la mezcla gas-partícula dentro del conducto) y, en consecuencia, es relacionado con el dinamismo e intensidad eruptiva (Ripepe, M. et al., 2013, Johnson and Ripepe., 2011).

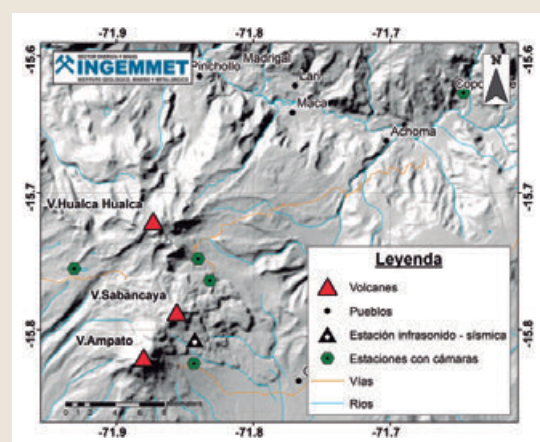
El volcán Sabancaya, se encuentra localizado en el sur del Perú, región de Arequipa y provincia de Caylloma

(Fig. 1). Ha tenido por lo menos 3 erupciones durante la época histórica, en los años 1750, 1784 d.C. y la última entre 1987 y 1998, clasificándose a esta erupción como tipo Vulcaniana (Thouret et al., 1994). Actualmente se encuentra en proceso eruptivo desde noviembre del 2016, caracterizándose por la ocurrencia de explosiones acompañadas de emisiones de ceniza y proyectiles balísticos.

En el presente trabajo se muestra la caracterización de las señales de infrasonido registradas en el volcán Sabancaya entre febrero y julio del 2022. Así mismo, se describe su correlación con la energía volcánica irradiada proporcionada por el sistema MIROVA, datos sismo-volcánicos y parámetros de las emisiones de ceniza medidas por las cámaras de video-vigilancia instaladas por el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET-OVI.



► Fig. 1 - Mapa de ubicación del volcán Sabancaya.



► Fig. 2 - Ubicación de la estación de infrasonido - sísmica (ISB01) y estaciones con cámaras de video-vigilancia óptica (SMUC, SHUA, SIRH, SCOP y SAMP) instaladas en el volcán Sabancaya.



## 1. Instrumentación

El volcán Sabancaya está compuesta por una estación de infrasonido denominada ISB01 ubicada a 2.6 km al sureste del cráter, la cual cuenta con transmisión en tiempo real (Fig. 2). Esta estación contiene un digitalizador, un sensor de infrasonido y un sismómetro vertical (ambos con una tasa de muestro de 100 Hz) marca Raspberry Shake & Boom, GPS (que provee la corrección de la hora) y accesorios.

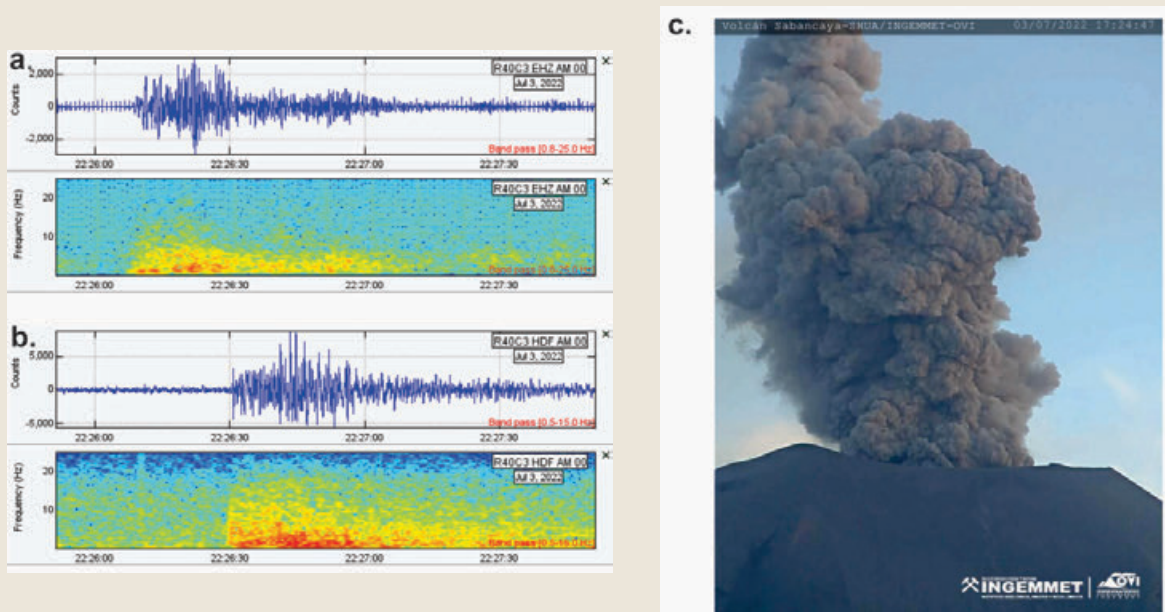
Además, la red de monitoreo volcánico está constituida por 05 estaciones con cámaras de video-vigilancia óptica (SMUC, SHUA, SIRH, SCOP y SAMP) de marca AXIS, ubicadas entre 4 y 29 km al noroeste, noreste y sureste respecto al cráter del volcán.

## 2. Señales de infrasonido en el volcán Sabancaya

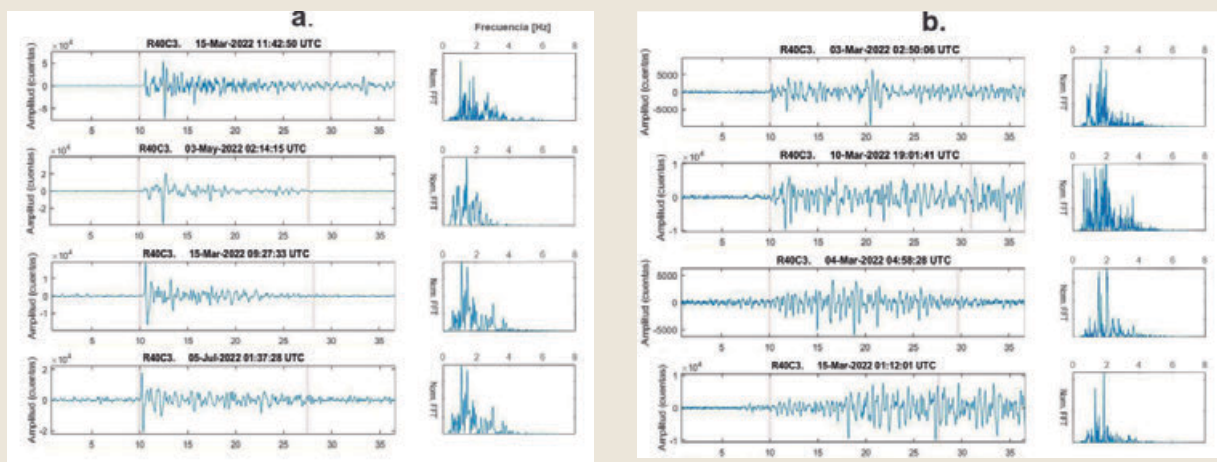
Cabe recordar que la propagación del infrasonido a distancias locales de los volcanes (<10 km) está influenciada principalmente por el viento, el cual contiene una banda de frecuencias de 0,01 a 5 Hz

(Walker y Hedlin, 2010); y las interacciones con la topografía volcánica. (e.g., Fee and Garcés., 2007; Marcillo and Johnson, 2010; Matoza et al., 2009; Johnson et al., 2012; Lacanna et al., 2014; Kim et al., 2018), los cuales pueden difractar, reflejar e incluso bloquear la señal.

En el caso del volcán Sabancaya, aproximadamente el 50% de las explosiones fueron registradas claramente a pesar de los fuertes vientos en los alrededores del volcán. La identificación de las señales de infrasonido se logró con ayuda de las señales sísmicas y registros de las cámaras de video-vigilancia volcánica (Fig. 2), los cuales fueron asociadas a explosiones acompañadas de emisiones de ceniza y gases volcánicos (Fig. 3). Entre febrero y julio del 2022 se lograron identificar más de 1600 señales de infrasonido asociadas a la actividad explosiva del volcán. En la Fig. 4, se muestran dos subtipos de señales registradas, el primero con inicios impulsivos asociado a explosiones discretas (Fig. 4a) y el segundo con inicios emergentes y duración sostenida, asociada a explosiones seguidas de tremor (Fig. 4b).

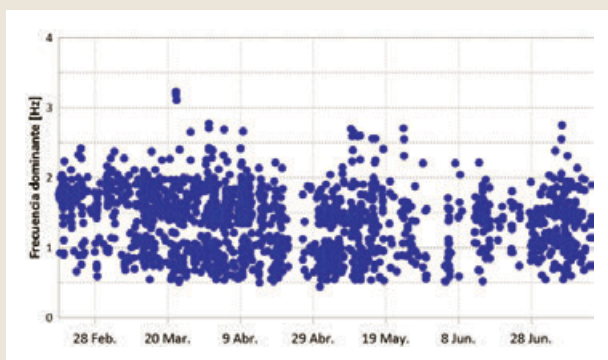


► Fig. 3 – Explosión registrada el 03 de julio del 2022 en la estación ISB01 del volcán Sabancaya; a. Señal sísmica (forma de onda y espectrograma); b. Señal de infrasonido (forma de onda y espectrograma); y c. Registro de imagen cámara SHUA (ubicada a 4.6 km del volcán).



► Fig. 4 – Señales de infrasonidos registradas en el volcán Sabancaya. a. Explosiones discretas; b. Explosiones con tremor.

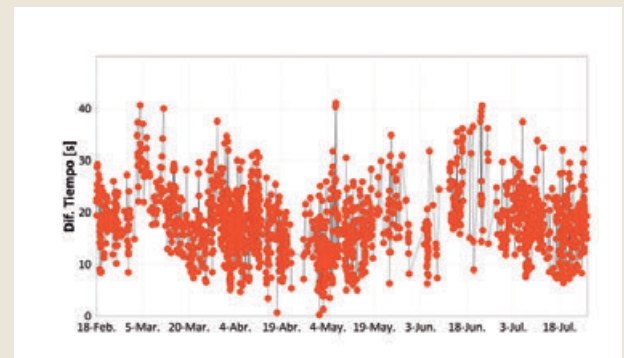
El rango de frecuencias de las señales de infrasonido estuvo entre 0.4 y 3.2 Hz (Fig. 5), los cuales concuerdan con Johnson y Ronan (2015), que indican que las explosiones volcánicas poseen frecuencias < 7 Hz.



► Fig. 5 – Frecuencias dominantes de señales de infrasonido registradas en el volcán Sabancaya.

Adicionalmente, la diferencia de las primeras llegadas entre las señales sísmicas y de infrasonido variaron principalmente entre 5 y 30 segundos. Estos valores son muy altos considerando una velocidad de propagación del sonido de 340 m/s a temperatura ambiente de 25 °C, sin embargo, las condiciones atmosféricas en los alrededores del volcán Sabancaya son bastantes agrestes debido a las altas velocidades de viento que pueden llegar hasta los 15 m/s con un promedio de 8 m/s, así como, las temperaturas que pueden registrarse < 0 °C. Las condiciones atmosféricas pueden explicar parte de la variación en el tiempo, sin embargo, también

pueden ser producto de cambios en la ruta de propagación de las señales entre explosiones (Iezzi et al., 2020). Se puede apreciar una disminución en la diferencia de tiempo entre finales de abril y mayo, lo que posiblemente indica que la fuente de generación de las explosiones fue más superficial (Fig. 6).



► Fig. 6 – Diferencia de tiempos de llegada de señales sísmicas y de infrasonido (ISB01).

### 3. Dinámica explosiva mediante señales de infrasonido

En el volcán Sabancaya se ha podido identificar el emplazamiento y destrucción de 5 domos de lava desde inicios del 2017, los cuales han sido denominados huk, iskay, kimsa, tawa y pichqa que significa uno, dos, tres, cuatro y cinco en idioma quechua (Informe técnico anual del volcán Sabancaya, 2021; Reporte Vulcanológico RMV-SAB-088-2022/DGAR-INGEMMET). Cabe indicar que el emplazamiento de

domos de lava en sistemas vulcanianos afecta la presurización en el sistema de conductos poco profundos (Clarke et al., 2015) y, por lo tanto, influye en el proceso de explosión.

Entre febrero y julio del 2022 se registró en el volcán Sabancaya entre 30 y 50 explosiones por día, las cuales fueron acompañadas de ceniza, gases volcánicos y algunos proyectiles balísticos.

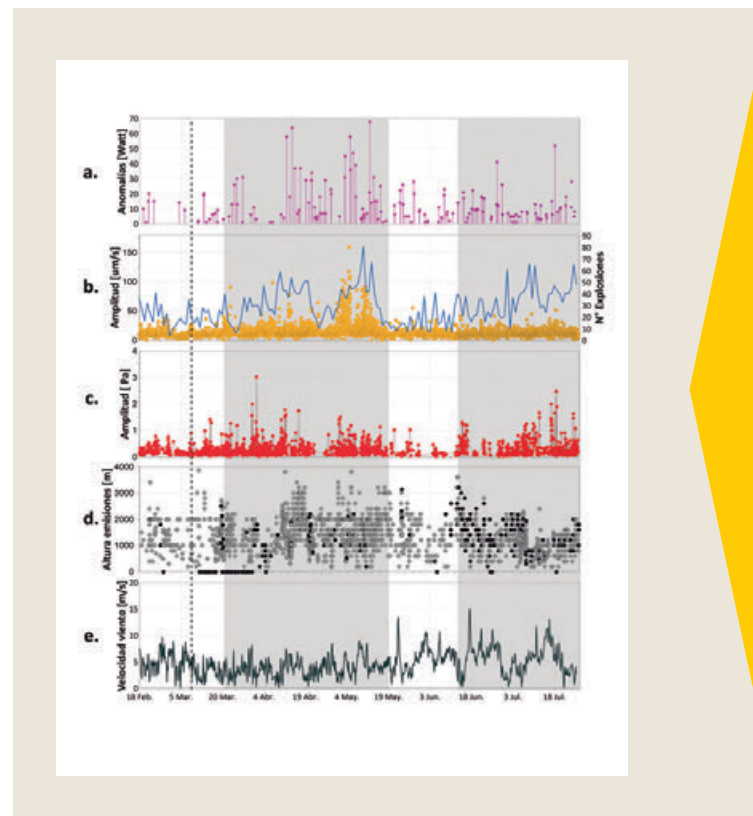
En la Fig. 7 se muestra la correlación de datos de infrasonido y parámetros de monitoreo volcánico registrados en el volcán Sabancaya entre febrero y julio del 2022. Se observaron 2 periodos de incremento en la amplitud de las señales de infrasonido:

Antes de describir los periodos, indicaremos que entre el 22 de mayo y 27 de julio se registraron valores altos en las velocidades del viento (máx. 13.4 m/s), lo cual dificultó la identificación adecuada de las señales de infrasonido (Fig. 7).

**Período 22 de marzo y 17 de mayo:** En este periodo se registró un incremento en la amplitud de las señales sísmicas (asociadas a las explosiones), así como su número con un máximo de 81 explosiones el 10 de mayo. Se identificó valores altos en la energía volcánica irradiada (anomalías en MIROVA), registrándose hasta 70 Mw. Lo antes descrito indicaría la presencia de volúmenes importantes de magma cercanos a la superficie, producto de los pulsos de intrusión magmática (provenientes del reservorio magmático ubicado por debajo del volcán Hualca Hualca, Boixart et al., 2020) registrados el 15 de marzo (línea negra entrecortada en Fig. 7). Durante este periodo también se confirmó el emplazamiento del quinto domo de lava denominado pichqa (que significa cinco en idioma quechua). Las emisiones de ceniza (producto de las explosiones) y sus alturas fueron notables, llegando a observar hasta los 4000 m sobre el cráter. Finalmente, las amplitudes altas en las señales de infrasonido estarían también relacionadas al magma cerca de la superficie, y la salida de material volcánico (ceniza y gases volcánicos) indicando así, que el domo de lava emplazado sería permeable.

#### Período 12 de junio - 15 de julio

Después del 17 de mayo, muchos de los valores de los distintos parámetros decayeron y no mostraron



► Fig. 7 - a. Energía volcánica irradiada (MIROVA); b. Amplitud sísmica en  $\mu\text{m/s}$  (ISB01) y N° de explosiones; c. Amplitud de señales de infrasonido en Pa (ISB01); d. Altura de emisiones de ceniza medida mediante las cámaras (SMUC, SHUA, SIRH, SCOP y SAMP); y e. Velocidad del viento a 4900 m.s.n.m según el modelo del NOAA (Laboratorio Oceanográfico y Meteorológico del Atlántico).

cambios, lo cual se asoció a una estabilidad en el crecimiento del domo de lava.

En el presente período, observamos que las amplitudes de las señales de infrasonido se incrementaron nuevamente, por el contrario, no se observó tal incremento en la amplitud de las señales sísmicas, pero sí en la cantidad de las explosiones y mayor contenido de ceniza en las emisiones (información obtenida mediante la red de monitoreo volcánico del OVI). Por las características de los parámetros de monitoreo, se indicó que el 19 de junio se inició un proceso de destrucción parcial del domo de lava, lo cual es concordante con los cambios descritos anteriormente, ya que al producirse la destrucción del domo de lava se crearon nuevos agrietamientos que permitieron la salida de las emisiones, aunque hayan sido de poca energía debido a la pérdida de magma cercano a la superficie.



## CONCLUSIONES

El Observatorio Vulcanológico del INGEMMET implementó una estación de infrasonido – sísmica denominada ISB01 localizada a 2.6 km al sureste del volcán Sabancaya, la cual sirvió para la identificación y caracterización de señales de infrasonido asociadas a la actividad explosiva del volcán. Se observó periodos de incremento relacionados al emplazamiento y destrucción del quinto domo de lava denominado pichqa. Así mismo, la variación de la diferencia de los primeros arribos de las señales sísmicas e infrasonido, indicarían cambios en la ruta de propagación o conducto, sumado a la influencia de las condiciones atmosféricas de la zona.

Dentro de la perspectiva de trabajos a futuro, está la implementación del programa VolcanStudio (desarrollado por el Servicio Geológico Colombiano) para el procesamiento en tiempo real de señales de infrasonido mediante correlogramas, así mismo, el cálculo de VARS (Volcano Acoustic Seismic Ratio) y la estimación de la profundidad de la fuente de generación de explosiones.

## REFERENCIAS

- ▶ Boixart, G., Cruz, L., Miranda, R., Euillades, P., Euillades, L., Battaglia, M. (2020). Source model for Sabancaya volcano constrained by dInSAR and GNSS surface Deformation Observation. *Remote Sensing* 12:1852. <https://doi.org/10.3390/rs12111852>.
- ▶ Clarke, A. B., Esposti Ongaro, T., Belousov, A. (2015). Vulcanian eruptions. *Encycl. Volcanoes*. 10, 505-518. doi:10.1016/b978-0-12-385938-9.00028-6.
- ▶ Fee, D., Garcés, M. (2007). Infrasonic tremor in the diffraction zone. *Geophys. Res. Lett.* 34, L16826. doi:10.1029/2007GL030616
- ▶ Iezzi, A., Fee, D., Haney, M., Lyons, J. (2020). Seismo-Acoustic Characterization of Mount Cleveland Volcano Explosions. *Front. Earth Sci.* 8:573368. doi: 10.3389/feart.2020.573368.
- ▶ Johnson, J.B., Ripepe, M. (2011). Volcano infrasound: a review. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 206(3-4), 61-69.
- ▶ Johnson, J.B., Anderson, J., Marcillo, O., Arrowsmith, S. (2012). Probing local wind and temperature structure using infrasound from Volcan Villarrica (Chile). *J. Geophys. Res. Atmospheres* 117, D17107. doi:10.1029/2012JD017694.
- ▶ Johnson, J.B., Ronan, T.J. (2015). Infrasound from volcanic rockfalls. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 120, 2015JB012436. doi:10.1002/2015JB012436.
- ▶ Kim, K., Rodgers, A., Seastrand, D. 2018. Local infrasound variability related to in situ atmospheric observation. *Geophys. Res. Lett.*, 45, doi: 10.1002/2018GL077124.
- ▶ Lacanna, G., Ichihara, M., Iwakuni, M., Takeo, M., Iguchi, M., Ripepe, M. (2014). Influence of atmospheric structure and topography on infrasonic wave propagation. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 119, 2988-3005. doi:10.1002/2013JB010827.

- ▶ Ripepe, M., Bonadonna, C., Folch, A., Delle Donne, D., Lacanna, G., Marchetti, E., Hoskuldsson, A. (2013). Ash-plume dynamics and eruption source parameters by infrasound and thermal imagery: The 2010 Eyjafjallajökull eruption. *Earth and Planetary Science Letters* 112 – 121.
- ▶ Marcillo, O., Johnson, J.B. (2010). Tracking near-surface atmospheric conditions using an infrasound network. *J. Acoust. Soc. Am.* 128, EL14–EL19. doi:10.1121/1.3442725.
- ▶ Matoza, R., Fee, D., Garcés, M., Seiner, J.M., Ramón, P., Hedlin, M. (2009). Infrasonic jet noise from volcanic eruptions. *Geophysical Research Letters*, 36(8). doi: 10.1029/2008gl036486.
- ▶ Paz, C. (2015). Modelo experimental de la dinámica de estallido y emisión acústica en volcanes. Tesis para optar al título de doctor en ciencias mención física. Universidad de Santiago de Chile.
- ▶ Thouret, J.-C., Guillaude, R., Huamán, D., Gourgaud, A., Salas, G., Chorowicz, J. (1994). The current activity of Nevado Sabancaya (South Peru): geological and satellite reconnaissance, assessment and mapping of volcanic.
- ▶ Walker, K.T., Hedlin, M.A. (2010). A review of wind-noise reduction methodologies, in: *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*. Springer, pp. 141–182.

# Infraestructura de protección implementada por el observatorio vulcanológico del INGEMMET para equipos de monitoreo en volcanes activos en el sur del Perú

Alfonso Añamuro, José Calderón, Edu Taipe

Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, Arequipa, Perú

Palabras Clave: estaciones, instrumentación, monitoreo volcánico.

## INTRODUCCIÓN

El Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), a través de su Observatorio Vulcanológico (OVI) con sede en la ciudad de Arequipa, tiene desplegada redes de estaciones de monitoreo multiparamétricas (Fig. 1) para el monitoreo en los volcanes activos del Perú.

El monitoreo volcánico es una actividad que requiere implementar infraestructura permanente para la instalación de equipos especializados encargados de medir y registrar información sobre diferentes parámetros de actividad volcánica (Ortega et al., 2020). Esta infraestructura se denomina estaciones multiparamétricas y forman parte de las redes de monitoreo volcánico.

Las estaciones multiparamétricas deben contar con accesorios y las condiciones técnicas adecuadas para la instalación de los diferentes tipos de sensores, garantizar funcionamiento permanente o por periodos específicos dependiendo de la naturaleza del

estudio o monitoreo; así mismo y no menos importante, la infraestructura debe brindar la protección y seguridad ante vandalismo y las condiciones de intemperie característicos de zonas volcánicas. Para cumplir con estas condiciones se emplean estructuras de metal y concreto; siendo dos los tipos de infraestructura: la primera corresponde a estaciones permanentes y la segunda a estaciones temporales.

### 1. Estructuras para estaciones permanentes

Las estructuras metálicas se diseñan de acuerdo a las necesidades propias de cada estación, teniendo en cuenta la cantidad de instrumentos a instalar y el tipo



► Fig. 1 - Estación repetidora de transmisión que conforma la red de monitoreo del volcán Sabancaya.



► Fig. 2 - Parte de la estructura metálica de una estación que alberga varios instrumentos con sensores expuestos.



de instrumentación ya que esto determina la posición del equipo, ubicación dentro o fuera de la caseta (Fig. 2). Siendo el monitoreo volcánico una actividad que requiere un funcionamiento continuo y de alta sensibilidad, los equipos deben ser correctamente instalados.

Así mismo, otro factor muy importante es la ubicación de las estaciones, estas deben ubicarse evitando el ruido natural o antrópico que podría afectar a los instrumentos a instalar (Moran et al. 2008). Como ejemplo tenemos algunas fuentes de ruido a considerar:

- ▶ Para los sismómetros; fuentes de vibración de suelo (tránsito de vehículos, personas, estructuras que vibren con el viento, ríos, canales etc.).
- ▶ Para receptores GNSS; obstáculos que impidan la correcta recepción de señales satelitales. Fuentes de ondas electromagnéticas.
- ▶ Para cámaras de video; fuentes de luz, fuentes de calor, viento, estabilidad.
- ▶ Para sensores de gases, fuentes de gases industriales, polvo, radiación.
- ▶ Para las antenas de telecomunicaciones, fuentes de ondas de radio.



▶ Fig. 3 - Estructura robusta de metal y concreto instalada en la estación Huayraray que conforma la red de monitoreo del volcán Sabancaya.

Otro factor a considerar, es la instalación de los accesorios que no presentan fabricación con grado de protección industrial, tal es el caso de componentes como baterías, radio de transmisión, controladores de carga, caja de distribución, circuitos electrónicos y demás componentes expuestos, que siendo equipos delicados requieren ser protegidos de la intemperie y de las condiciones climáticas extremas como el frío y la humedad para que funcionen de forma continua (Calderón J., 2019). Las estructuras metálicas deben contar con las condiciones que garanticen esta protección, es decir hermeticidad y aislamiento térmico (Fig. 3).

## 2. Estructuras para estaciones temporales

Otra de las labores que realiza el OVI, son los trabajos de investigación, esto con la finalidad de caracterizar con mayor detalle los diferentes parámetros de actividad volcánica e identificar y/o caracterizar las estructuras volcánicas tanto internas como externas.

Para cumplir con este objetivo es necesario instalar temporalmente instrumentos de medición y de registro de datos, la instalación debe contar con las medidas de protección adecuadas, al igual que las estaciones permanentes deben garantizar la protección de los equipos frente a vandalismo y protección ante las condiciones de intemperie.

Para este fin, se diseñaron estructuras ligeras transportables que se pueden trasladar e instalar con relativa facilidad (Fig. 4), estas a su vez se pueden desmontar una vez culminado el periodo de registro de datos para ser reutilizado en nuevas estaciones temporales en otras ubicaciones. Estas pueden adecuarse al tipo de instrumento a instalar, es decir si requieren cobertura satelital o si requieren acoplamiento especial al suelo. Otro aspecto importante es el suministro de energía eléctrica, la estructura metálica permite la instalación de uno o más paneles solares considerando la seguridad ante vandalismo.

Así mismo, su versatilidad permite instalar antenas de transmisión de datos por telemetría para estaciones que requieran su transmisión en tiempo real. Esta característica es vital para las estaciones de intervención rápida durante periodos de crisis o reactivación volcánica.



► Fig. 4- Estructura metálica ligera transportable, instalada en la estación SHUA que conforma la red de monitoreo del volcán Sabancaya.

## CONCLUSIONES

La implementación de las estaciones de monitoreo volcánico mediante estructuras de metal y cimentadas en concreto para la protección de equipos de monitoreo son muy importantes en el estudio y monitoreo de los volcanes en el Perú, esto garantiza la seguridad física y registro adecuado de datos. La experiencia en los trabajos de campo a permitido estandarizar dos tipos de estaciones: permanentes y temporales, las cuales se pueden adecuar en las diferentes actividades de monitoreo y estudio de volcanes que realiza el OVI.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a todo el personal que labora en el área de monitoreo del OVI, que durante las brigadas de campo que hicieron posible el mejoramiento continuo y la instalación de las estructuras de protección para las estaciones de monitoreo volcánico.

## REFERENCIAS

- Calderon, J. (2019). Instalación y mantenimiento de la red telemétrica de los volcanes Sabancaya, Ubina, Misti y Ticsani. Informe Técnico Nro. A7001. INGEMMET. 29 p.
- Moran, S., Freymueller, J., LaHusen R., McGee, K., Poland, M., Power, J., Schmidt D., Schneider D., Stephens, G., Werner, C., White, R. (2008). Instrumentation Recommendations for Volcano Monitoring at U.S. Volcanoes Under the National Volcano Early Warning System: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2008-5114, 47 p.
- Ortega, M., Apaza, F., Masías, P., Miranda, R., Cruz L., Antayhua, Y., Ancasi, R., Ccallata, B., Paxi, R., Valdivia, D., Japura, S., Taipe, E. (2020), Vigilancia del volcán Sabancaya, Periodo 2020. Informe Técnico Nro. A7136. INGEMMET. 125 p.

# Emisiones de SO<sub>2</sub> en la erupción del volcán Ubinas en julio 2019

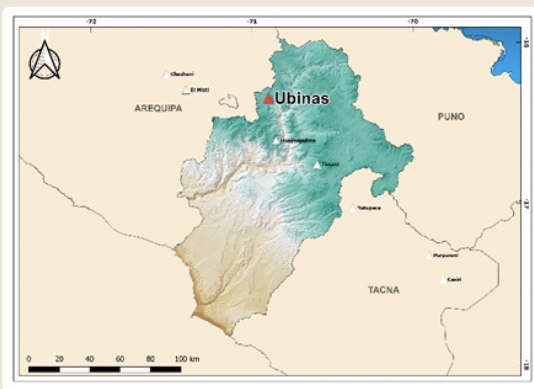
Fredy Apaza, Jorge Alcántara, Daniel Ramirez.

Observatorio Vulcanológico de INGEMMET, Barrio magisterial 2 B-16 Yanahuara, Arequipa, Perú (fapaza@ingemmet.gob.pe)

Palabras clave: Dióxido de azufre, DOAS, TROPOMI.

## INTRODUCCIÓN

El volcán Ubinas (16°22' S, 70°54' O, 5672 m.s.n.m.), está ubicado en La Zona Volcánica Central (CVZ) de los Andes, a 75 km de la ciudad de Arequipa en la zona sur del Perú. La actividad eruptiva reciente consta de más de 26 episodios eruptivos en los últimos 500 años (Rivera et al., 2011).



► Fig. 1 – Ubicación del Volcán Ubinas.

En el Perú, el observatorio Vulcanológico del INGEMMET inició el uso de los instrumentos DOAS instalando una estación NOVAC en el volcán Ubinas en el año 2014, el volcán Ubinas cuenta con dos estaciones NOVAC equipadas con un escáner DOAS. Estas redes cuentan con transmisión de datos en tiempo real para el monitoreo permanente del proceso de desgasificación volcánica.

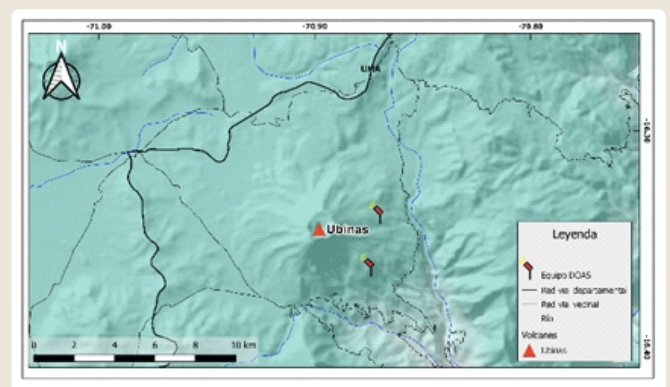
El presente resumen presenta los resultados de las mediciones de flujos de SO<sub>2</sub> en el volcán Ubinas durante el último proceso eruptivo de 2019.

## METODOLOGÍA

El uso de instrumentos de espectroscopia de absorción óptica diferencial ultravioleta (DOAS) para la medición

de emisiones de gases volcánicos ha sido implementado en 42 volcanes alrededor del mundo, como indica Galle et al. (2010) este instrumento utiliza la luz solar dispersa en la región UV para derivar la abundancia de SO<sub>2</sub> y posteriormente calcular el flujo de gas utilizando la información de velocidad y dirección del viento, así como altura de la pluma.

La red de monitoreo de SO<sub>2</sub> del volcán Ubinas cuenta con instrumentos DOAS que se componen de un espectrómetro en miniatura (Ocean Optics Inc.), una PC integrada, una fibra óptica, un telescopio y un receptor GPS. El telescopio recoge la luz ultravioleta dispersada desde aerosoles y moléculas de gas en la atmósfera haciendo escaneos de horizonte a horizonte, la fibra óptica transfiere la luz desde el telescopio al espectrómetro, el espectrómetro detecta la luz ultravioleta y la convierte en números digitales, estos números son los espectros para la evaluación posterior del gas; el GPS registra la posición del sistema y da la hora estándar universal y finalmente la PC integrada recoge los espectros y gestiona la comunicación de datos (Kern et al., 2016).



► Fig. 2 – Red de monitoreo DOAS de SO<sub>2</sub> del Volcán Ubinas.



Se necesita dos paquetes de software para ejecutar los procesos del instrumento DOAS, descargar los datos y realizar el postproceso de los datos. El software Kongo se ejecuta en la PC integrada en el campo, este ejecuta las mediciones y guarda los datos en la tarjeta de memoria, por otro lado, el software NOVAC se ejecuta en la computadora del observatorio, este se conecta con el instrumento en campo a intervalos de tiempo y comprueba si hay nuevos para descargar. Los resultados de la tasa de emisión de  $\text{SO}_2$  se obtiene en el postprocesamiento de los datos, esto también se realiza en el software NOVAC (Kern et al., 2016).

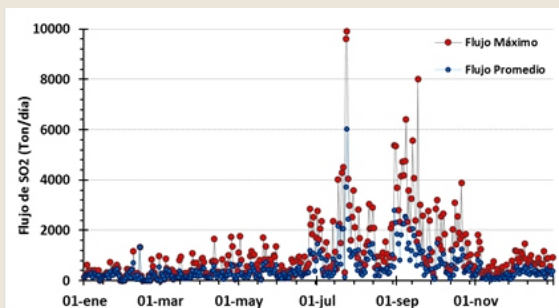
El Instrumento de monitoreo troposférico (TROPOMI) ha revolucionado las técnicas satelitales para el monitoreo de gases trazas en la atmósfera. Este instrumento identifica el  $\text{SO}_2$  volcánico emitido a la atmósfera mediante espectroscopía de absorción óptica diferencial a una resolución espacial de  $7 \times 3.5 \text{ km}^2$  y una resolución temporal de 1 día (Theys et al., 2021). Las imágenes provistas por el satélite Sentinel-

5p proporcionan información parcial de la cantidad de  $\text{SO}_2$  emitido a la atmósfera.

### Resultados y discusión

Durante el proceso eruptivo con la red de monitoreo de  $\text{SO}_2$  se ha logrado registrar alrededor de 20 escaneos por día en promedio, que lograron captar las emisiones de  $\text{SO}_2$  durante las horas de luz solar (~10h).

En la Figura 3 se muestran los flujos máximos y promedio por día de las emisiones de  $\text{SO}_2$  durante el año 2019, aquí podemos identificar que desde junio del 2019 se observa un incremento en los flujos de  $\text{SO}_2$  que superan las 2000 t/día (Fig. 3), posterior a esto, los flujos se incrementan llegando a superar las 4000 t/día días antes de la principal explosión. Posterior a las primeras explosiones los flujos llegaron a alcanzar hasta 9600 t/día cuando el sistema se encontraba abierto.



► Fig. 3 - Flujos de  $\text{SO}_2$  medidos por los instrumentos DOAS de la red de monitoreo del volcán Ubina.



► Fig. 4 - Dióxido de azufre en la atmósfera identificado por las imágenes TROPOMI usando el satélite Sentinel-5P.

## CONCLUSIONES

La red de medición de gases volcánicos instalada en el volcán Ubina está registrando información muy valiosa para la comprensión del funcionamiento del sistema volcánico Ubina, siendo una técnica complementaria a las demás técnicas del monitoreo multidisciplinario de volcanes.

El monitoreo de las emisiones de  $\text{SO}_2$  del volcán Ubina en este periodo de estabilidad en el conducto volcánico, con un sistema permeable que permite la desgasificación continua de gases, nos permitirá identificar cualquier cambio que ocurra en el sistema magmático o el conducto.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece de manera especial al área de monitoreo volcánico del Observatorio Volcanológico del INGEMMET y al proyecto NOVAC.

## REFERENCIAS

- ▶ Rivera, M.; Mariño, J. & Thouret, J.-C. (2011)– Geología y evaluación de peligros del volcán Ubinas. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 46, 88 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/302>.
- ▶ Galle, B., Johansson, M., Rivera, C., Zhang, Y., Kihlman, M., Kern, C., Lehmann, T., Platt, U., Arellano, S., Hidalgo, S. (2010). Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change (NOVAC)—A global network for volcanic gas monitoring: Network layout and instrument description, J. Geophys. Res., 115, D05304, doi:10.1029/2009JD011823.
- ▶ Kern, C., Arellano, S. (2016). NOVAC Instrument User Manual. Optical Remote Sensing Group, Department of Radio and Space Sciences, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- ▶ Theys, N., Lerot, C., Van Roozendael, I. De Smedt, M., Yu, H. (2021). S5P/TROPOMI SO2 Algorithm Theoretical Document, <https://sentinel.esa.int/documents/247904/2476257/Sentinel-5PATBD-SO2-TROPOMI>.

# Construcción de mapas calibrados de probabilidad de inundación de corrientes de densidad piroclástica para el **Complejo Volcánico San Salvador, El Salvador**

Alvaro Aravena<sup>1</sup>, Raffaello Cioni<sup>2</sup>, Andrea Bevilacqua<sup>3</sup>, Augusto Neri<sup>3</sup>, Dolores Ferrés<sup>4</sup>, Demetrio Escobar<sup>5</sup> y Alessandro Aiuppa<sup>6</sup>

1 Facultad de Ciencias Básicas, Universidad Católica del Maule, Talca, Chile.

2 Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli studi di Firenze, Florencia, Italia.

3 Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Pisa, Pisa, Italia.

4 Centro de Geociencias, UNAM, Ciudad de México, México.

5 Dirección del Observatorio Ambiental, MARN, San Salvador, El Salvador.

6 Dipartimento di Scienze della Terra e del Mare, Università degli studi di Palermo, Palermo, Italia.

Palabras clave: flujos piroclásticos, modelación numérica, mapas de peligros volcánicos

Presentamos una evaluación probabilística de los peligros volcánicos asociados a corrientes de densidad piroclástica (CDP) en el Complejo Volcánico San Salvador (CVSS). Este campo volcánico se compone por el estratovolcán El Boquerón (VB) y al menos 25 volcanes monogenéticos ubicados en los alrededores de San Salvador, capital de El Salvador. En particular, definimos un conjunto de escenarios eruptivos, incluyendo desde eventos de pequeña escala con una incerteza significativa en la posición del centro de emisión hasta eventos de alta intensidad alimentados desde el cono central (i.e. VB). En el primer caso, adoptamos mapas ya publicados de probabilidad de apertura de nuevos centros eruptivos para la construcción de los mapas de peligro. La metodología adoptada se basa fundamentalmente en la modelación numérica. Específicamente, los modelos utilizados son las versiones con ramificación del cono de energía (ECMapProb) y del box model (BoxMapProb). Estos modelos permiten describir el área de inundación de CDPs friccionales e inerciales, respectivamente, considerando la ocurrencia de procesos de canalización de material piroclástico. Las condiciones de entrada adoptadas en nuestras simulaciones derivan de la aplicación de estrategias de calibración reproducibles que consideran información volcanológica (e.g. distancia de runout o área de inundación) de eventos de referencia para cada escenario eruptivo.

Los resultados muestran que CDPs de gran escala, como aquellas asociadas al evento formador de caldera G-1, presentan altas probabilidades condicionales de invadir parcialmente la ciudad de

San Salvador (10 a 70% de probabilidad de invasión al interior de la ciudad, en función de la posición). Es importante destacar, sin embargo, que la probabilidad de ocurrencia de este escenario eruptivo es extremadamente baja. Respecto a CDPs generados por el colapso parcial de columnas eruptivas durante eventos sub-Plinianos (e.g. Talpetate-I), las máximas probabilidades de inundación se obtienen en los flancos norte, oeste y sur del volcán. El Cerro El Picacho, que corresponde a un alto topográfico ubicado en el flanco este del VB, muestra un importante efecto de escudo en la propagación de este tipo de CDPs, produciendo bajas probabilidades de inundación en San Salvador. Finalmente, respecto a erupciones de flanco capaces de producir CDPs de pequeña escala, el acoplamiento de mapas de probabilidad de apertura de nuevos centros eruptivos con el modelamiento numérico de CDPs da lugar a probabilidades de inundación máximas en el flanco noroeste del volcán, alcanzando valores de hasta 10%.

## INTRODUCCIÓN

La evaluación de peligros volcánicos permite generar información fundamental para el diseño de medidas efectivas de reducción del riesgo asociado. El desarrollo de este tipo de estudios requiere del análisis de la historia eruptiva del sistema volcánico de interés, lo que permite definir los escenarios que las comunidades probablemente enfrentarán en el futuro y los peligros que se derivan (e.g. Cioni et al., 2008). Este tipo de información ha sido integrada frecuentemente con simulaciones numéricas para definir el impacto esperado de futuras erupciones. En



efecto, se han presentado evaluaciones de peligro volcánico basadas en modelación numérica para un gran número de volcanes en el mundo, incluyendo Vesubio (Italia; Macedonio et al., 2008), Campos Flegreos (Italia; Orsi et al., 2004; Bevilacqua et al., 2017), El Misti (Perú; Sandri et al., 2014), y Cotopaxi (Ecuador; Pistolesi et al., 2014). En el caso específico del Complejo Volcánico San Salvador (CVSS), que representa el foco de este estudio, actualmente no se dispone en la literatura de una evaluación probabilística del peligro volcánico, aun cuando se han desarrollado numerosos estudios abordando su evolución e historia eruptiva.

Fairbrother et al. (1978) estudió la evolución del CVSS a través del análisis de la geoquímica y petrología de flujos de lava. Sofield (1998) estudió la estratigrafía e historia eruptiva del CVSS con énfasis en las erupciones de flanco, y cuantificó la recurrencia asociada a estos eventos. Major et al. (2001) describieron los principales peligros que podrían afectar a las comunidades que circundan el CVSS y presentó mapas de peligro determinísticos para eventos alimentados desde el cono central (i.e. VB). En la misma línea, Sofield (2004) definió cinco escenarios eruptivos para el CVSS incluyendo eventos alimentados tanto desde el VB como desde los flancos. Ferrés et al. (2011) estudiaron la estratigrafía de los últimos 3,000 años sobre la base de excavaciones arqueológicas del sitio El Cambio. Ferrés et al. (2013) revisaron la estratigrafía e historia eruptiva del CVSS, definiendo tres escenarios eruptivos para el cono central y presentando mapas determinísticos de peligros, incluyendo aquellos asociados a corrientes de densidad piroclástica (CDP). Finalmente, Bevilacqua et al. (2021) presentaron mapas temáticos de apertura de nuevos centros eruptivos para distintos fenómenos volcánicos en el CVSS, enfocándose en aquellos procesos cuya probabilidad de ocurrencia se distribuye sobre una porción significativa del campo volcánico (e.g. flujos de lava, CDPs de pequeña escala, y depósitos de caída de pequeña escala). Los eventos de mayor intensidad, capaces de producir CDPs y depósitos de caída de gran volumen y que también se encuentran presentes en el registro geológico del CVSS, han sido alimentados exclusivamente desde el cráter central en el pasado, por lo que la construcción de mapas de apertura de nuevos centros eruptivos no

se consideró relevante para tales escenarios (Bevilacqua et al., 2021). Diferentes autores han mencionado la importancia crítica de las erupciones de flanco en el CVSS. Esto se debe a la alta y creciente densidad poblacional que presentan los flancos del VB y a la recurrencia de este tipo de eventos (Sofield, 2004; Ferrés et al., 2011). Apesar de esto, casi todos los estudios de evaluación del peligro volcánico se han enfocado en eventos alimentados desde el cono central (Sofield, 2004; Ferrés et al., 2013), con la única excepción de Bevilacqua et al. (2021). Sin embargo, dado que el propósito de Bevilacqua et al. (2021) fue mostrar el efecto crítico que tiene el uso de mapas temáticos de probabilidad de apertura de nuevos centros eruptivos, los autores impusieron de forma determinística las condiciones de formación de las CDPs modeladas.

En este contexto, en este estudio presentamos una evaluación probabilística de los peligros volcánicos asociados a CDPs en el CVSS, considerando erupciones alimentadas desde el cráter central y eventos generados en los flancos del volcán. En contraste con evaluaciones previas del peligro volcánico en el CVSS, en este estudio adoptamos un enfoque probabilístico que nos permite considerar la incerteza en las condiciones eruptivas y de generación de CDPs y una serie de estrategias de calibración para las entradas de los modelos empleados, que se basan en el registro volcanológico de algunos eventos de referencia.

## REGISTRO VOLCANOLÓGICO Y ESCENARIOS ERUPTIVOS

El CVSS (Pleistoceno-Holoceno, Figura 1) se ubica en la zona central de El Salvador y es considerado uno de los complejos volcánicos que conllevan mayor riesgo para la población en El Salvador y en América Central. Este campo volcánico, que es parte del Arco Volcánico de América Central (CAVA por su sigla en inglés), se compone de un estratovolcán central y al menos 25 edificios monogenéticos. Estos edificios monogenéticos incluyen cráteres de explosión, flujos de lava y conos de escoria, que se disponen preferencialmente a lo largo de dos sistemas de falla normales de rumbo NW (Figura 1).

Durante los últimos 3,000 años, el volcanismo en el CVSS se concentró en los flancos del volcán y en la

llanura adyacente, involucrando frecuentemente interacción con aguas freáticas. La mitad de los centros volcánicos monogenéticos formados durante este período son cráteres de explosión, conos de toba, anillos de toba o maars, mientras que el resto corresponde a conos de escoria, eventualmente con presencia de flujos de lava (Ferrés et al., 2011). Sofield (2004) estimó un período de recurrencia de alrededor de 133 años para las erupciones de flanco recientes. Respecto al volcanismo desde el cono central durante los últimos 3,000 años, se han reconocido tres eventos explosivos: Talpetate-I, Talpetate-II y la última erupción en AD 1917.

Sobre la base del registro eruptivo del CVSS, Sofield (2004) propuso cinco escenarios eruptivos: (1) erupciones magmáticas monogenéticas en los flancos del volcán (VEI 1-3), (2) erupciones hidromagmáticas en los flancos del volcán (VEI 1-3), (3) erupciones de pequeña escala en el cono central (VEI 1-3), (4) erupciones sub-Plinianias en el cono central (VEI 4-5) y (5) erupciones Plinianias en el cono central (VEI 6). Ferrés et al. (2013) usaron este esquema para crear

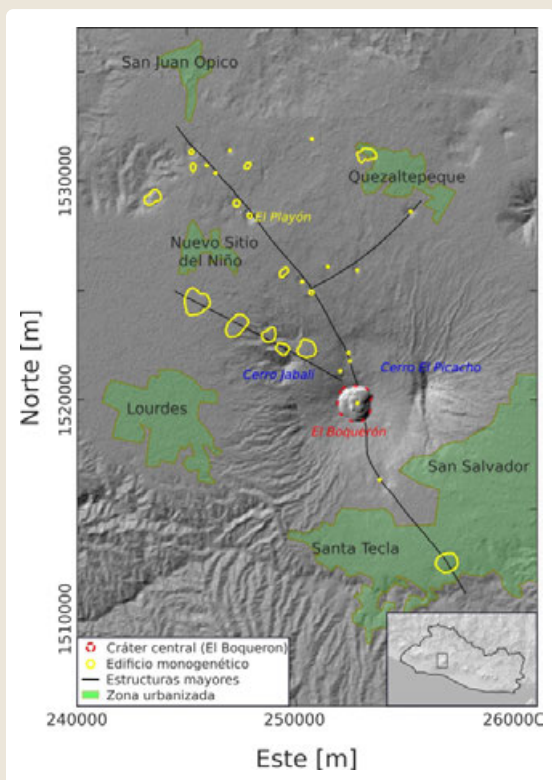
mapas determinísticos de peligro volcánico asociados a eventos alimentados desde el cráter central. En el presente trabajo, que complementa los resultados presentados por Ferrés et al. (2013) al considerar un enfoque probabilístico, se consideran tres escenarios para la generación de CDPs: (EE1) CDPs de pequeña escala derivados de erupciones monogenéticas, (EE2) CDPs de escala intermedia generados por el colapso parcial de columnas eruptivas durante eventos sub-Plinianias (referencia: Talpetate-I) y (EE3) CDPs de gran escala generados por el colapso de columnas eruptivas Plinianias (referencia: G-1).

## MÉTODOS

### 1. Escenario eruptivo Ee1

Para abordar CDPs de pequeña escala (i.e. EE1), adoptamos el modelo ramificado del cono de energía (Aravena et al., 2020). Esto se debe a que se espera que tales CDPs sean fundamentalmente friccionales. Con el objetivo de extender el análisis presentado por Bevilacqua et al. (2021), en lugar de definir las entradas del modelo de manera determinística, seguimos una de las estrategias de calibración propuestas por Aravena et al. (2022) e implementadas en el programa EMapProb. Estas estrategias se basan en el registro geológico del sistema volcánico en estudio y permiten reducir los sesgos derivados de la definición arbitraria de las entradas de modelos numéricos. En particular, desarrollamos un conjunto de simulaciones de calibración con entradas variables dentro de rangos específicos, usando una posición de colapso fija situada en el sector de El Playón. Para cada una de estas simulaciones, EMapProb calcula la distancia de runout. Por otro lado, debido a la carencia de datos detallados sobre los depósitos de este tipo de eventos en el CVSS y considerando los valores típicos descritos en la literatura, asumimos que una distribución uniforme entre 1 y 3 km es capaz de describir el rango de distancias de runout asociado a este escenario eruptivo.

A partir de la información de las simulaciones de calibración, se extrajo una muestra de 10,000 conjuntos de parámetros de entrada de modo de reproducir la distribución preestablecida de distancias de runout. Por otro lado, para muestrear las posiciones de generación de las CDPs, utilizamos los mapas



► Fig. 1 – Mapa topográfico del Complejo Volcánico San Salvador (CVSS).

temáticos de apertura de nuevos centros eruptivos presentados por Bevilacqua et al. (2021). Acoplado ambos elementos, desarrollamos 10,000 simulaciones numéricas considerando la incerteza en la posición y las condiciones de formación de CDPs de pequeña escala en el CVSS. Los resultados son descritos en términos de probabilidad de inundación. Estos valores están naturalmente condicionados a la ocurrencia de este escenario eruptivo, sin asunciones relacionadas a la posición del centro eruptivo.

## 2. Escenarios eruptivos EE2 y EE3

Para abordar CDPs de mediana escala (i.e. EE2), utilizamos tanto la formulación ramificada del cono de energía como la formulación ramificada del box model. Esto se debe al eventual carácter transicional de este tipo de fenómenos. Por otro lado, utilizamos exclusivamente la formulación ramificada del box model para estudiar el escenario eruptivo EE3. En ambos casos, para calibrar los parámetros de entrada de los modelos, seguimos los procedimientos presentados por Aravena et al. (2022). En particular, en este estudio consideramos los depósitos de CDP de las erupciones Talpetate-I y G-1 para calibrar los escenarios eruptivos EE2 y EE3, respectivamente (Sofield, 2004).

En cada caso, desarrollamos un conjunto de simulaciones de calibración usando valores variables para todos (ECMapProb) o algunos (BoxMapProb) de los parámetros de entrada (Tabla 1), y una posición de colapso fija en la zona cratéica. En el caso de la formulación con ramificación del box model, se asumieron valores fijos para las entradas del modelo cuya variabilidad esperada es menos relevante en los resultados numéricos (Tabla 1). Las áreas de inundación de las simulaciones de calibración fueron comparadas con polígonos de inundación de referencia (i.e. Talpetate-I y G-1; Sofield, 2004). Esta comparación se realizó utilizando tres métricas: raíz cuadrada de la distancia cuadrada media entre los contornos de ambos polígonos (RMSD), distancia de Hausdorff (HD) e índice de Jaccard (JI). Estas métricas permiten cuantificar el grado de coincidencia entre las simulaciones de calibración y los eventos de referencia, siendo posible definir funciones de probabilidad para muestrear las entradas de los modelos (Aravena et al., 2022). Usando este procedimiento, para cada modelo y escenario, extrajimos tres conjuntos de 1,000

parámetros de entrada que fueron usados en un segundo conjunto de simulaciones con el objetivo de construir mapas de probabilidad de inundación calibrados. En cada mapa de inundación, los resultados se describen en términos de la probabilidad de invasión, calculada como la fracción de simulaciones que alcanzan cada píxel del mapa.

**Tabla 1** – Rangos de variación de los parámetros de entrada usados en las simulaciones de calibración. Más detalles se presentan en Aravena et al. (2022).

Cono de energía con ramificación		
Parámetro	EE1	EE2
Altura de colapso ( $H_{o,o}$ [m])	100 - 1000	100 - 2000
Pendiente de los conos de energía ( $\tan(\Phi)$ )	0.2 - 1.0	0.2 - 1.0

Box model con ramificación		
Parámetro	EE1	EE2
Volumen inicial ( $V_{o,o}$ [ $m^3$ ])	$10^5 - 10^{10}$	$10^6 - 10^{11}$
Concentración inicial ( $\Phi_{o,o}$ )	0.005 - 0.04	0.005 - 0.04
Número de Froude (Fr)	1.1	1.1
Velocidad de sedimentación ( $w_s$ [m/s])	0.3	0.3
Densidad de piroclastos ( $\rho_p$ [ $kg/m^3$ ])	1500	1500
Densidad del aire ( $\rho_a$ [ $kg/m^3$ ])	1.0	1.0

## Resultados

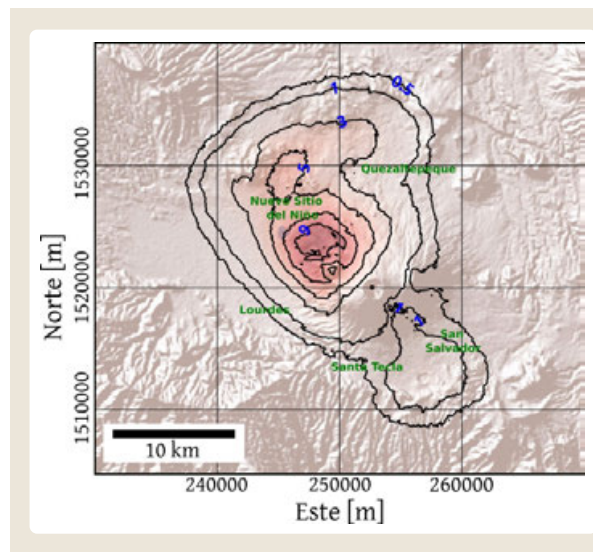
La Figura 2 muestra el mapa de inundación asociado a CDPs de pequeña escala producidos durante erupciones de flanco. La máxima probabilidad condicional de invasión se observa en el flanco noroeste del volcán, alcanzando valores máximos del orden de 10%, con valores no despreciables en la localidad de Nuevo Sitio del Niño (~5%). La



probabilidad de inundación en el área metropolitana de San Salvador es muy baja ( $<1\%$ ). Estas probabilidades de invasión son menores a las presentadas por Bevilacqua et al. (2021), lo que deriva del uso de estrategias distintas para fijar las entradas del modelo. Por un lado, Bevilacqua et al. (2021) impusieron las entradas del modelo de modo determinístico y, como mencionan los autores, sus resultados son válidos para un conjunto específico de condiciones de formación de CDPs. Por otro lado, en este trabajo hemos fijado las entradas del modelo de modo de reproducir una distribución específica de distancias de runout, permitiendo considerar condiciones variables de formación de las CDPs modeladas.

Respecto a CDPs similares a las producidas durante la erupción Talpetate-I (Figura 3), nuestros resultados muestran una dinámica de propagación de material piroclástico fuertemente controlada por la topografía proximal del volcán. La mayoría de las simulaciones solo alcanzan los flancos del volcán, mientras que una porción menor es capaz de invadir zonas periféricas de San Salvador y Santa Tecla, con probabilidades condiciones menores al 5%. En este caso, el efecto de escudo del Cerro El Picacho reduce significativamente la probabilidad de inundación en la capital de El Salvador.

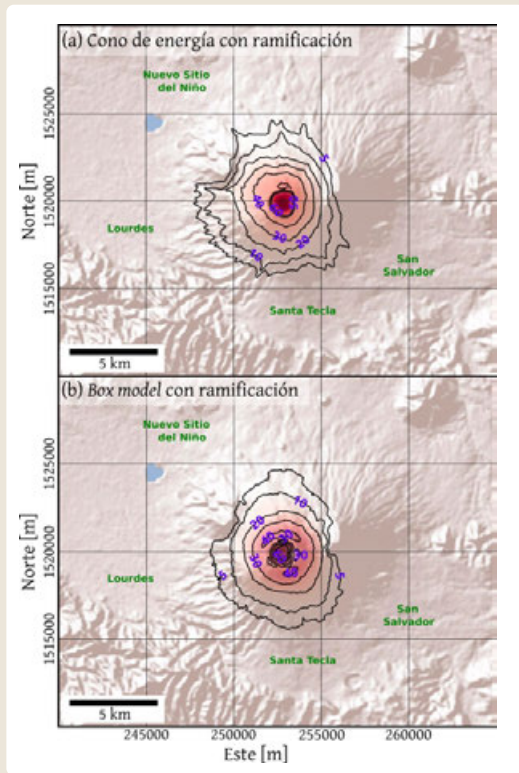
Finalmente, CDPs similares a aquellas generadas durante la erupción G-1 son capaces de invadir una porción significativa de los flancos del volcán y las llanuras cercanas, involucrando ciudades como San Salvador (10-70% de probabilidad condicional, en función de la calibración adoptada y la posición), Santa Tecla (20-70%), Quezaltenango (10-30%), Nuevo Sitio del Niño (10-30%), Lourdes (15-40%) y Apopa ( $<5-15\%$ ).



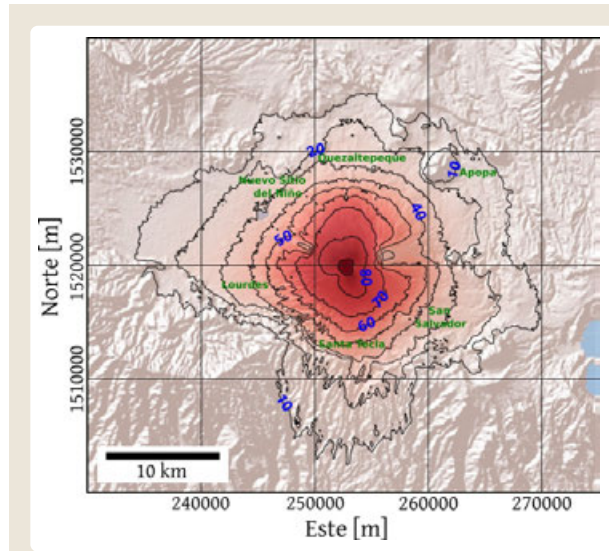
► Fig. 2 – Mapa probabilístico de inundación por CDPs, condicionado a la ocurrencia de CDPs de pequeña escala producto de erupciones de flanco en el CVSS (EE1).

## CONCLUSIONES

En este trabajo, hemos evaluado los peligros asociados a CDPs en el CVSS, El Salvador, considerando un conjunto adaptado de los escenarios eruptivos propuestos por Sofield (2004) y discutidos por Ferrés et al. (2013). Este trabajo, que se construyó sobre la base de resultados presentados en una serie de estudios previos (Sofield, 1998, 2004; Major et al., 2011; Ferrés et al., 2011, 2013; Bevilacqua et al., 2021), representa un paso crítico para robustecer nuestro conocimiento de este complejo volcánico, debido a que se incluye el análisis del peligro derivado de volcanismo monogenético, lo que es particularmente relevante en el CVSS (Sofield, 1998; 2004), y a que hemos adoptado un enfoque probabilístico que permite considerar adecuadamente la intrínseca variabilidad en las condiciones de formación de CDPs. Se sugiere que el refinamiento en la definición de los escenarios eruptivos esperables, la determinación de sus probabilidades de ocurrencia y el desarrollo de análisis de exposición al peligro y de susceptibilidad representan pasos críticos para caracterizar de mejor manera los riesgos que implica el CVSS para la población de San Salvador y sus alrededores.



► Fig.3 – Mapa probabilístico de inundación por CDPs condicionado a la ocurrencia de CDPs de escala mediana producto del colapso parcial de una columna eruptiva durante eventos sub-Plinianos en el VB (EE2; referencia: Talpetate-I). Esta figura muestra la media aritmética de los mapas obtenidos utilizando las distintas métricas de calibración con los dos modelos empleados en este trabajo.



► Fig.4 – Mapa probabilístico de inundación por CDPs condicionado a la ocurrencia de CDPs de gran escala producto del colapso de una columna eruptiva durante eventos Plinianos en el VB (EE3; referencia: G-1). Esta figura muestra la media aritmética de los mapas obtenidos utilizando las distintas métricas de calibración.

## REFERENCIAS

- Sabancaya et al. Aravena, A., Cioni, R., Bevilacqua, A., de' Michieli Vitturi, M., Esposti Ongaro, T., Neri, A. (2020). Tree-branching-based enhancement of kinetic energy models for reproducing channelization processes of pyroclastic density currents. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(7), e2019JB019271.
- Aravena A., Bevilacqua A., de' Michieli Vitturi, M., Esposti Ongaro, T., Neri, A., Cioni R. (2022). Calibration strategies of PDC kinetic energy models and their application to the construction of hazard maps. *Bulletin of Volcanology* 84(3), 1-21.
- Bevilacqua, A., Neri, A., Bisson, M., Esposti Ongaro, T., Flandoli, F., Isaia, R., Rosi, M., Vitale, S. (2017). The effects of vent location, event scale, and time forecasts on pyroclastic density current hazard maps at Campi Flegrei caldera (Italy). *Frontiers in Earth Science*, 5, 72.
- Bevilacqua A., Aravena A., Neri A., Gutierrez, E., Escobar, D., Schliz, M., Aiuppa, A., Cioni, R. (2021). Thematic vent opening probability maps and hazard assessment of small-scale pyroclastic density currents in the San Salvador volcanic complex (El Salvador) and Nejapa-Chiltepe volcanic complex (Nicaragua). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21, 1639-1665.

- ▶ Cioni, R., Bertagnini, A., Santacroce, R., Andronico, D. (2008). Explosive activity and eruption scenarios at Somma-Vesuvius (Italy): towards a new classification scheme. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178, 331-346.
- ▶ Fairbrothers, G., Carr, M., Mayfield, D. (1978). Temporal magmatic variation at Boqueron volcano, El Salvador. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 67, 1-9.
- ▶ Ferrés, D., Granados, H., Hernández, W., Pullinger, C., Chávez, H., Castillo, C., Cañas-Diñarte, C. (2011). Three thousand years of flank and central vent eruptions of the San Salvador volcanic complex (El Salvador) and their effects on El Cambio archeological site: a review based on tephrostratigraphy. *Bulletin of Volcanology*, 73, 833-850.
- ▶ Ferrés, D., Granados, H., Gutiérrez, R., Farraz, I., Hernández, E., Pullinger, C., Escobar, C. (2013). Explosive volcanic history and hazard zonation maps of Boquerón Volcano (San Salvador volcanic complex, El Salvador). *Geological Society of America Special Papers*, 4, 201-230.
- ▶ Macedonio, G., Costa, A., Folch, A. (2008). Ash fallout scenarios at Vesuvius: numerical simulations and implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178, 366-377.
- ▶ Major, J., Schilling, S., Sofield, D., Escobar, C., Pullinger, C. (2001). Volcano hazards in the San Salvador region, El Salvador. Open-file Report. U.S. Geological Survey, 366, 28.
- ▶ Orsi, G., Di Vito, M., Isaia, R. (2004). Volcanic hazard assessment at the restless Campi Flegrei caldera. *Bulletin of Volcanology*, 66, 514-530.
- ▶ Pistolesi, M., Cioni, R., Rosi, M., Aguilera, E. (2014). Lahar hazard assessment in the southern drainage system of Cotopaxi volcano, Ecuador: Results from multiscale lahar simulations. *Geomorphology*, 207, 51-63.
- ▶ Sandri, L., Thouret, J., Constantinescu, R., Biass, S. (2014). Long-term multi-hazard assessment for El Misti volcano (Peru). *Bulletin of Volcanology*, 76, 1-26.
- ▶ Sofield, D. (1998). History and Hazards of Volcán San Salvador, El Salvador (Doctoral dissertation, Michigan Technological University).
- ▶ Sofield, D. (2004). Eruptive history and volcanic hazards of Volcan San Salvador. *Natural Hazards in El Salvador*, 147.



# Mapa de peligros del complejo volcánico Chachani, Arequipa-Perú

David Arteaga<sup>1</sup>, Nérida Manrique<sup>1,3</sup>, Rigoberto Aguilar<sup>1,2</sup>, Yhon Soncco<sup>1</sup>, Benjamin Van Wyk de Vries<sup>2,3</sup>, Carla Palacios<sup>1</sup>, Verónica Tito<sup>1</sup>, Elizabeth Pacsi<sup>4</sup>, Rosmery Delgado<sup>5</sup>, Sandra Sanz<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Observatorio Vulcanológico del INGEMMET.

<sup>2</sup> Université Clermont Auvergne (Francia).

<sup>3</sup> IGCP Project 692 Geoheritage for Geohazard Resilience.

<sup>4</sup> Universidad Nacional del Altiplano (UNAP).

<sup>5</sup> Universidad Nacional de San Agustín (UNSA).

Palabras clave: Mapa de peligros, Complejo Volcánico.

## INTRODUCCIÓN

El Complejo Volcánico Chachani (CVC) se encuentra al borde oeste de la Cordillera Occidental de los Andes del Sur del Perú. El CVC está ubicado aproximadamente a 22,5 km del centro histórico de la ciudad de Arequipa. Geográficamente el CVC se localiza en el distrito de Cayma, Cerro Colorado y Yura, de la provincia y departamento de Arequipa. Siendo vulnerables diversas infraestructuras viales, energéticas y viviendas cercanas a las quebradas que descienden del CVC, donde habitan cerca de 349,000 personas en los distritos de Cayma, Cerro Colorado, Yura y Yanahuara. El CVC ocupa un volumen entre ~248-289 km<sup>3</sup>, siendo este complejo volcánico uno de los más voluminosos de los Andes Centrales (Aguilar et al., 2022).

Los mapas de peligros del CVC se elaboraron con base en el conocimiento de la historia eruptiva, los tipos de productos emitidos y su alcance, magnitud y frecuencia de los eventos eruptivos; considerando además las características geomorfológicas de la zona. En este trabajo se presenta el mapa de peligros múltiples para la zona proximal, así como los mapas de peligros por fenómenos de caída, corrientes piroclásticas de densidad y por flujos de detritos, mostrando las 3 zonas de peligrosidad: alto, moderado y bajo peligro.

La elaboración de los mapas de peligros es de suma importancia, pues sirven como instrumento para el manejo de crisis volcánicas. Además, permiten la elaboración de planes de emergencia, y son una herramienta para la educación ciudadana.

## 1. Geología del complejo volcánico Chachani

El CVC cubre un área de ~600 km<sup>2</sup>, se encuentra formado por al menos 12 edificios volcánicos, los cuales estuvieron activos durante el Pleistoceno Medio – Superior (Aguilar et al., 2022). Los edificios antiguos se ubican en el norte y noroeste del complejo volcánico. El Chachani basal presentó un volcanismo efusivo con emplazamiento de flujos de lava de tipo andesítico, sobreponiéndose a 2 ignimbritas denominadas Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (IAA) y Tufo Yura. El estratovolcán Chingana es uno de los edificios más antiguos (1012 ± 53 ka) (Aguilar et al., 2022), con lavas de composición andesítica y andesita basáltica. El estratovolcán Nocarane, datado en 866 ± 71 ka y 754.0 ± 9.5 ka (Aguilar et al., 2022), se compone por al menos 5 unidades, destacando los depósitos de caída de pómez, caída de escoria, corrientes de densidad piroclástica (PDC, por sus siglas en inglés), de pómez y ceniza, flujos de lava andesítica, flujos de lava en bloques y el emplazamiento de domos. Estratovolcán Estribo, datado entre 808.5 ± 62.7 ka y 694.1 ± 74.9 ka (Aguilar et al., 2022), posee 3 unidades, formadas por depósitos volcanoclásticos, flujos de lava andesítica, flujos de escoria y depósitos piroclásticos. Los domos El Colorado, representan uno de los últimos eventos del grupo de los edificios antiguos que consiste en dos domos-colada superpuestos de composición andesítica, datados en 641.8 ± 88.2 ka. En la parte central-oeste, se emplazan los edificios recientes, caracterizados principalmente por una actividad efusiva. El estratovolcán El Ángel, el cual se compone de una sucesión de al menos 4 flujos de lava de composición andesítica, datado en 463 ± 34

ka (Aguilar et al., 2022), alcanzando un espesor máximo de 200 m, que a su vez fueron cubiertos por depósitos de los edificios más jóvenes. Los domos Potrero consisten de un grupo de domos, domos-colada y flujos de lava de composición andesítica-dacítica y depósitos de PDC de bloques y ceniza, datado en  $368.8 \pm 61.9$  ka (Aguilar et al., 2022). Domo La Horqueta, se compone por flujos de lava en bloque de composición andesítica y andesítica-dacítica datados en  $345 \pm 26$  ka y  $332 \pm 29$  ka (Aguilar et al., 2022). Estratovolcán El Rodado, datado en  $239 \pm 25$  ka (Aguilar, et al., 2022), formado por una secuencia de flujos de lava de composición andesítica-dacítica. Flujos de lava Uyupampa, corresponde a un campo de flujos de lava tipo bloque y AA, donde algunas aún preservan sus estructuras como levées y crestas de avance. El estratovolcán Chachani corresponde al edificio de mayor altitud de todo el complejo con 6057 m s.n.m. y está formado por 3 unidades de flujos de lava de composición andesita basáltica, andesítica y andesita dacítica, este edificio fue datado en un rango de edad de  $222 \pm 24$  ka y  $130 \pm 38$  ka (Aguilar, et al., 2022). Domos-colada Cabrería, está compuesto por domos de lava y PDC de bloques y ceniza producto del colapso del domo, datado por Aguilar et al. (2022) en  $56.5 \pm 31.6$  ka. Domo El Volcancillo, es un domo de lava de composición dacítica que alcanza una altura de 250 m y ~1 km de ancho, por el grado de preservación se presume que el emplazamiento del mismo es el más reciente de todo el CVC (Fig. 1).

## 2. Escenarios eruptivos del complejo volcánico Chachani

Se definieron 4 escenarios eruptivos futuros con base en:

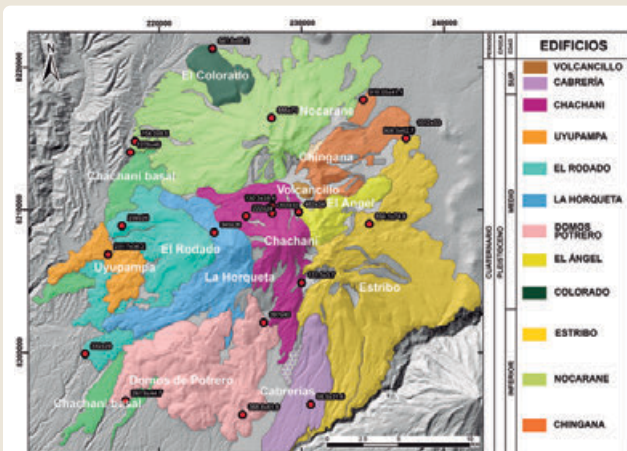
- ▶ Tipos de actividad (explosiva y efusiva) reconocidos en la tefroestratigrafía, los cuales podrían volverse a repetir.
- ▶ El índice de explosividad volcánica de las erupciones del CVC, en función del volumen y área cubierta por los productos emitidos.
- ▶ La actividad de otros volcanes peruanos u otras estructuras de la zona volcánica central de los Andes considerados como análogos al CVC.

### 2.1. Primer escenario: Erupción efusiva con emisión de lavas

El CVC ha emitido varios flujos de lava durante todo su periodo eruptivo, entre el Pleistoceno Medio – Superior (Aguilar, et al., 2022), por lo cual, este sería uno de los escenarios más probables si el volcán se reactiva. Debido a su alta viscosidad, la velocidad de desplazamiento de estas lavas sería baja y podría alcanzar hasta 13 km de distancia desde el cráter del edificio Chachani. Este escenario causaría daños por incendio e incineración y consecuentemente destruiría todo a su paso; sin embargo, con un adecuado plan de contingencia la población podría ponerse a buen recaudo.

### 2.2. Segundo escenario: Crecimiento de domos acompañado por actividad explosiva de tipo vulcaniano (IEV 1-2)

La formación de los domos en los volcanes andinos es un evento recurrente debido a la alta viscosidad que presentan las lavas emitidas y durante su crecimiento suelen generar erupciones vulcanianas con emisiones de caída piroclástica. Al respecto, el CVC, también ha presentado este comportamiento a lo largo del crecimiento de sus edificios, es así que en los sectores noreste, sur y suroeste se han formado los domos El Volcancillo, Cabrerías y Potrero; sin embargo, no se han identificado depósitos de caída piroclástica asociadas a la formación de estos domos, probablemente porque al ser erupciones bajas a moderadas, los depósitos de caída piroclástica han sido erosionados.



▶ Fig. 1 – Mapa generalizado en DEM que muestra dos grupos de edificios antiguos y jóvenes que suman doce edificios que forma el CVC. Los puntos rojos indican la ubicación de las muestras con edades 40Ar/39Ar.

En erupciones recientes, (e.g. actual erupción del volcán Sabancaya), se ha observado la formación de domos acompañados por emisión de material piroclástico que se han dispersado en todas las direcciones, incluso han alcanzado la ciudad de Arequipa a más de 70 km. La formación de nuevos domos en el Chachani, generaría inevitablemente caídas piroclásticas que podrían dispersarse a más de 20 km y afectar toda la ciudad de Arequipa.

Por otro lado, la formación de lahares durante la ocurrencia de erupciones vulcanianas es frecuente, y se ha visto que, en los periodos de lluvia entre los meses de diciembre y marzo, las quebradas que descienden del Chachani son afectadas por los lahares secundarios, por lo cual, ante cualquier proceso eruptivo del Chachani, se podría generar lahares primarios y secundarios según la época del año.

### 2.3. Tercer escenario: Crecimiento y colapso de domos con generación de corrientes de densidad piroclástica (PDCs)

El crecimiento y posterior colapso de domos en el CVC es probable, ya que los últimos procesos eruptivos en el Chachani han dejado registro estratigráfico de este proceso, tal como lo muestran los depósitos del PDCs Cabrerías y Potreros, que han alcanzado hasta 10 km de distancia desde su fuente. Ante una posible reactivación del Chachani, los PDCs podrían emplazarse preferentemente por las quebradas del sector sur y sureste del complejo, donde se encuentran zonas urbanas de los distritos de Cayma, Cerro Colorado y Yura, estos depósitos podrían superar los 10 km de distancia.

La presencia de material disponible (PDC) también sería un detonante para la generación de lahares durante los periodos de lluvia entre los meses de diciembre y marzo.

### 2.4. Cuarto escenario: Erupción subpliniana a pliniana, con generación de PDC (IEV 4-5)

Los edificios antiguos de CVC como el Chingana, Estribo y Nocarane, han tenido eventos explosivos importantes que han dejado depósitos de caída de pómez y ceniza, así como PDCs producto del colapso de columnas eruptivas, que han alcanzado 8 km de distancia desde la fuente. Sin embargo, en el caso de

los edificios recientes, no se han identificado depósitos asociados a estos tipos de erupciones.

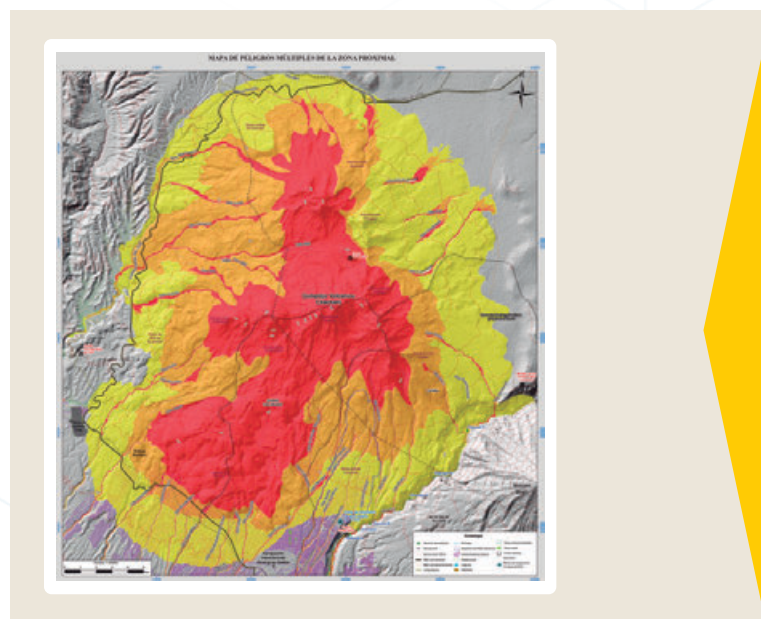
La probabilidad de ocurrencia de erupciones plinianas y subplinianas con IEV 4-5 en el edificio Chachani es baja, ya que no ha presentado erupciones en el pasado; sin embargo, no puede ser descartada. Durante una erupción con IEV 4-5, las PDCs podrían descender por el sector sur y sureste, afectando principalmente los distritos de Cayma, Yanahuara, Cerro Colorado y Yura. Así mismo, podrían generarse lahares durante los periodos de lluvia.

## 3. Mapas de peligros volcánicos

Para la elaboración de los mapas de peligros del CVC se consideraron los 4 escenarios eruptivos descritos anteriormente. Estos escenarios están basados según el tipo de actividad volcánica (explosiva y efusiva), la magnitud y frecuencia de las erupciones pasadas, así como el comportamiento de otros volcanes peruanos como el Tutupaca, Misti y Sabancaya, considerados análogos al Chachani.

### 3.1. Mapa de peligros múltiples de la zona proximal

Este mapa es el resultado de la combinación de las áreas que serían afectadas por PDCs, flujos de lava y lahares del CVC (Fig. 2).



► Fig. 2 – Mapa de peligros múltiples de la zona proximal del CVC. Las zonas de alto y moderado peligro, rojo y naranja respectivamente, estarían afectando gran parte de la zona urbana de la ciudad de Arequipa.



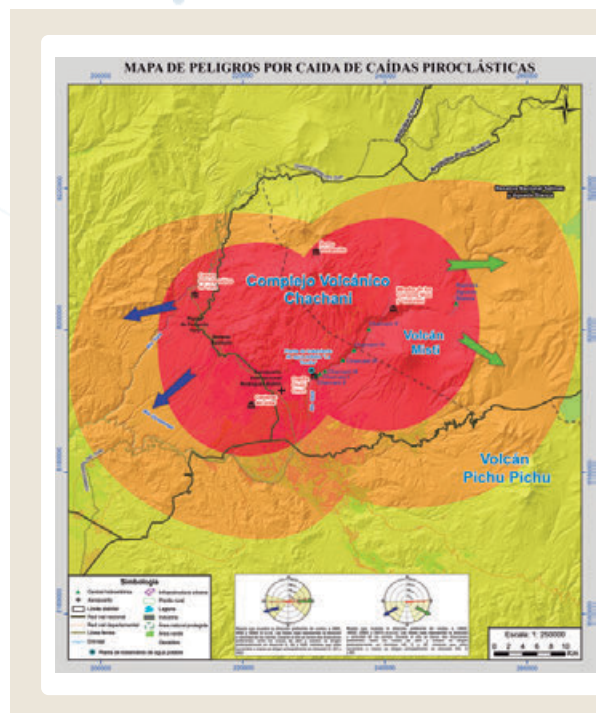
Los cálculos de alcance de los productos emitidos por el CVC se realizaron con la metodología denominada "Cono de energía" (Malin & Sheridan, 1982), utilizada para definir las zonas de peligro proximales alrededor de un volcán. Este método postula que el alcance horizontal (L) de un depósito volcánico, es función de la diferencia de alturas (H) entre el punto de generación del flujo y el punto de depósito. Para ello se utilizó el programa LAHARZ (Schilling, 1998).

Para delimitar las zonas de peligros, se consideraron 5 puntos de emisión: Horqueta 3, Rodado 2, Potrero 2, Potrero 1 y Volcancillo. Para definir la zona de peligro alto (rojo), se consideraron los valores de: 0.28, 0.25, 0.14, 0.16 y 0.18 para la proporción H/L, de los 5 edificios descritos anteriormente. El límite máximo de recorrido desde el domo El Volcancillo es 18,4 km. Para delimitar la zona de moderado peligro (naranja) en el mapa, se consideraron los valores de: 0.3, 0.34, 0.18, 0.19 y 0.23 para la proporción H/L de los 5 centros de emisión. El límite máximo de recorrido para estas proporciones, desde El Volcancillo es 19,8 km. Para delimitar la zona de bajo peligro (amarillo) en el mapa, se consideraron los valores de: 0.46, 0.39, 0.2, 0.24, 0.3 para la proporción H/L de los 5 edificios del Chachani. El límite máximo de recorrido desde El Volcancillo con estos valores es 22,8 km.

### 3.2. Mapa de peligros por caídas piroclásticas

Para la elaboración del mapa de caídas piroclásticas se consideraron 3 escenarios posibles, tomando como referencia eventos explosivos ocurridos en los volcanes Ubinas, Misti y Huaynaputina. Las direcciones y velocidades predominantes de vientos a 5865, 9690, 10960, 12445, 16645, 20662 y 26415 m s.n.m. que fueron obtenidas por el Instituto Geofísico del Perú, basado en el análisis de datos NCEP/NCAR, periodo 1979-1998 (Fig. 3).

Para el nivel de peligrosidad alto (rojo), se utilizó la forma y distribución de las isopacas correspondiente a la erupción del volcán Ubinas ocurrida en el 2019 (Aguilar et al., 2019), la máxima distancia alcanzada por la isopaca de 1 mm es de 28 km. Para el nivel de peligrosidad moderado (naranja), se utilizó como referencia el mapa de isopacas del depósito Sacarosa datada entre 38.6 ka y 33.7 ka del volcán Misti (Harpel et al, 2021). Del mapa en mención la máxima distancia

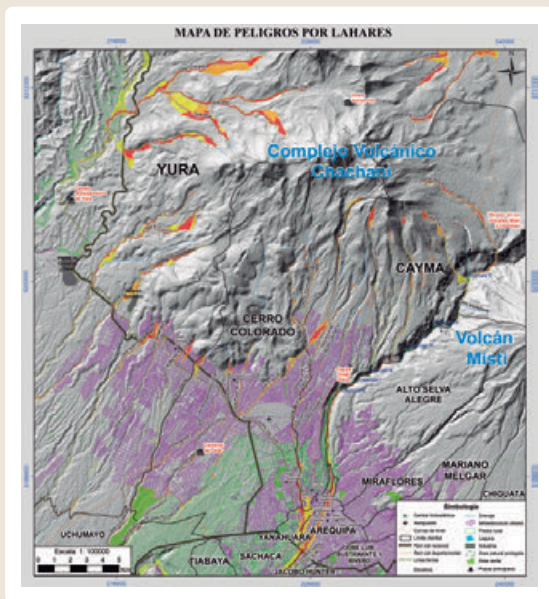


► Fig. 3 – Mapa de peligros por caídas piroclásticas. Las flechas señalan direcciones de vientos.

alcanzada por la isopaca de 240 mm es de 39 km de distancia. Para el nivel de peligrosidad bajo (amarillo) se utilizó como referencia el mapa de isopacas de la erupción del volcán Huaynaputina del año 1600 d.C. (Prival et al., 2020), En el mapa en mención, la máxima distancia alcanzada por la isopaca de 10 cm fue de 90 km, aproximadamente. Las 3 distancias máximas (peligrosidad alta, moderada y baja), se proyectaron en las distintas direcciones de vientos obtenidos, tomando como punto de emisión el edificio Chachani (uno de los edificios más recientes).

### 3.3. Mapa de peligros por flujos de detritos (lahares)

Para delimitar las zonas de peligros por flujos de detritos (lahares), se utilizó el software VolcFlow (Kelfoun & Druit, 2005). Este programa correlaciona el área para la generación de lahar en cada quebrada y la media de la precipitación pluvial (baja, moderada y alta) para obtener el cálculo de los volúmenes que serán empleados en la simulación de flujos de detritos (lahares), obteniendo los 3 niveles de peligrosidad: alto, moderado y bajo (Fig. 4), simulando un total de 45 quebradas para los distritos de Yura, Cayma, Cerro Colorado y Yanahuara.



Finalmente, para los distritos Cayma, Cerro Colorado, Yura y Yanahuara, asociados al CVC, afectados por flujos de detritos (lahares), se realizó la evaluación de puntos críticos (infraestructuras), que podrían verse afectadas encontrándose alrededor de 160 puntos críticos entre instituciones educativas (inicial, primaria y secundaria), campos deportivos, áreas recreativas, estaciones de servicio de combustible (grifos), rellenos sanitarios, cruces de carreteras y puentes, considerando los 3 niveles de peligrosidad.

► Fig. 4 - Mapa de peligros por emplazamiento de flujos de detritos (lahares) del CVC. Los lahares afectarían instituciones educativas, campos deportivos, áreas recreativas, estaciones de grifos, rellenos sanitarios, cruces de carreteras y puentes ubicados en los distritos de Cayma, Yura, Cerro Colorado y Yanahuara.

## CONCLUSIONES

- Con base en los datos geológicos, se han propuesto cuatro escenarios eruptivos en caso de una eventual reactivación del CVC: el primer escenario considera una erupción efusiva con emisión de lavas; el segundo escenario considera un crecimiento de domos acompañado de erupciones vulcanianas (IEV 1-2); un tercer escenario considera el crecimiento y colapso de domos con generación de PDC y un cuarto escenario considera una erupción subpliniana a pliniana, con generación de PDC.
- En el mapa principal de peligros múltiples (Fig. 2), la zona de alto peligro (rojo) puede ser severamente afectada por flujos de lava, corrientes de densidad piroclástica poco voluminosas y caída de tefra, alcanzando 18.4 km de longitud máxima desde el edificio Chachani. La zona de moderado peligro (naranja), puede ser afectada por flujos de lava, PDCs y caída piroclástica, afectando un área comprendida entre los 18.4 y 19.8 km de distancia radial desde el CVC. La zona de bajo peligro (amarillo) abarca una distancia entre los 19.8 a 22.8 km afectando a algunos distritos de Arequipa. En las quebradas aledañas al complejo volcánico, las zonas de color rojo, naranja y amarillo, pueden ser afectadas por lahares.
- En el mapa de peligro por fenómenos de caída piroclástica, la zona de alto peligro (rojo) abarca 28 km de distancia desde el CVC; la zona de moderado peligro (naranja) está entre 28 y 39 km de distancia, y la zona de bajo peligro (amarillo) abarca hasta 90 km de distancia.
- En caso de una erupción del CVC, varios distritos de la ciudad de Arequipa, se verían afectadas, donde habitan más de 322,524 habitantes, por eso es necesario que las autoridades, dirigentes y población en general conozca los mapas de peligros para el ordenamiento territorial, expansión urbana y planificación del desarrollo.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece de manera especial al área de monitoreo volcánico del Observatorio Volcanológico del INGEMMET y al proyecto NOVAC.

## REFERENCIAS

- ▶ Aguilar, R., Thouret, J.-C., Samaniego, P., Worner, G., Jincha, B., Paquette, J.-L. S., Anthony, F. (2022). Growth and evolution of long-lived, large volcanic clusters in the Central Andes: The Chachani Volcano Cluster, southern Peru. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 26 p.
- ▶ Kelfoun, K., Druit, t. T. (2005). Numerical modelling of the emplacement of the 7500 BP Socompa rock avalanche, Chile. *J. Geophys. Res.*, B12202, doi : 10.1029/2005JB003758, 13p.
- ▶ Larry G, M., Michael, R., Hans, S., Roger, P. (2013). The Ash3d Volcanic Ash Dispersion Model (USGS). U.S. Geological Survey(USGS).
- ▶ Malin, M., Sheridan, M. (1982). Computed-assisted mapping of pyroclastic surges. *Science*, 4 p.
- ▶ Sanz, S. (2020). Evaluación del Peligro por Flujos Piroclásticos de Bloques y Cenizas en el Flanco Sur del Complejo Volcánico Chachani. Tesis UNSA, 212 p.
- ▶ Schilling, S. (1998). AHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones. U.S. Geological Survey, Open File-Report 98-638, 79 p.



# Diseño e implementación de un prototipo multiparámetro para monitoreo de fuentes termales volcánicas

Gonzalo Borja<sup>1</sup>, Javier Calderón<sup>1</sup>, Albert Ramos<sup>1</sup>, Pablo Masías<sup>1</sup> y Roxana Flores<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, Arequipa, Perú - jborja@ingemmet.gob.pe

<sup>2</sup> Universidad Católica San Pablo

**Palabras clave:** fuentes termales, monitoreo, conductividad, pH.

## INTRODUCCIÓN

Dentro de las actividades concernientes al monitoreo volcánico se encuentra el monitoreo de aguas termales, actividad importante ya que sus parámetros físico químicos reflejan el estado de actividad de un volcán.

El monitoreo hidroquímico consiste en la medición de parámetros físico-químicos de aguas termales. El monitoreo de aguas termales implica la medición periódica de parámetros físico-químicos. El análisis de las aguas termales permite caracterizar la composición química del agua de fuentes termales (Masías et al., 2006).

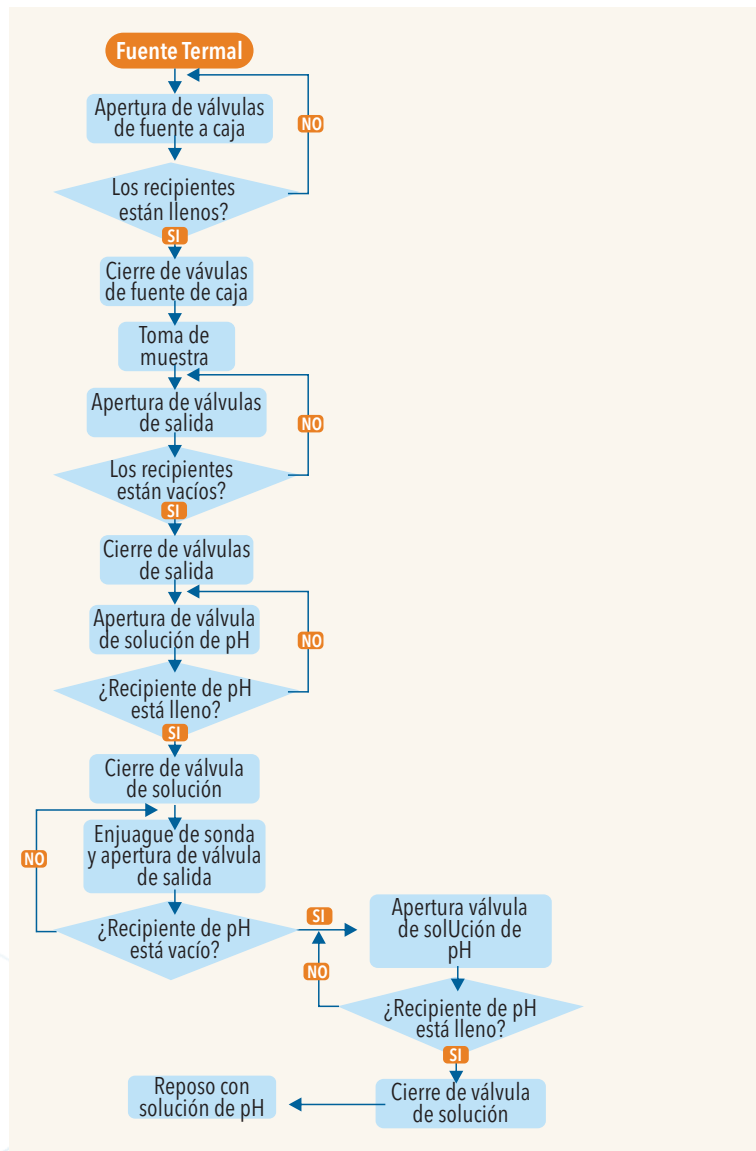
Este proyecto está enfocado en la medición de parámetros físicos como la conductividad, sólidos totales disueltos y temperatura; así como químicos como la acidez (potencial de hidrógenos - pH). Ponemos nuestra atención en la medición de estos parámetros ya que son los más sensibles ante cambios de la actividad de un volcán, y son también los que reportan resultados más rápido.

El método actual utilizado para la medición del agua de fuentes termales es mediante la inmersión simple, el cual consiste en identificar y llegar a la fuente de interés periódicamente lo que implica costos, esfuerzo físico y muchas veces riesgo para el personal. Otra desventaja es el hecho de no contar con información inmediata, ya que llegar a las fuentes conlleva una programación de salidas a campo junto con todos los trámites que implica; esto causa que la frecuencia de realización de esta tarea sea bastante amplia.

### 1. Propuesta de solución

El proceso adoptado para la medición de los parámetros físico-químicos de las aguas termales es

repetitivo por lo que es posible automatizarlo, la solución que se propone con este proyecto es automatizar dicho proceso mediante el diseño e implementación de un prototipo de medición de parámetros físico-químicos de aguas termales



► Fig. 1 – Diagrama de Flujo propuesto.

(temperatura, conductividad y pH), el cual realizará las mediciones periódicamente, guardará los datos, y enviará la información en tiempo real a través de una red de comunicaciones, para el presente proyecto se utilizará la red de telemetría implementada por el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET.

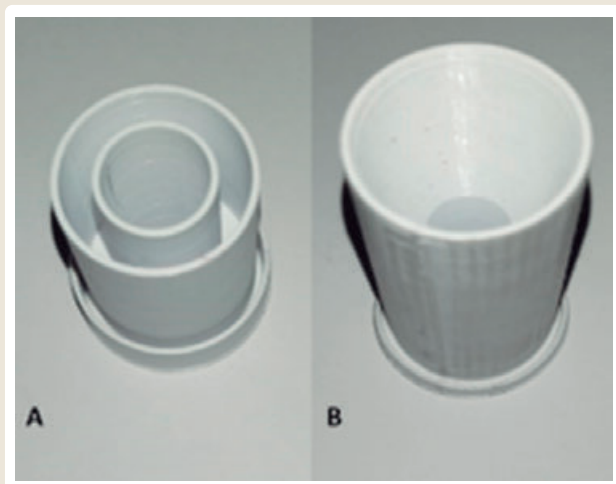
En la Fig. 1 se presenta el diagrama de bloques de la propuesta de solución con el diseño del sistema de flujo de la muestra de la fuente termal.

## 2. Diseño del sistema

### 2.1. Sistema mecánico:

El diseño está pensado para simplificar el sistema de tal manera que sea amigable para el usuario. Consiste en una bomba sumergible instalada en la fuente la cual se conecta por una manguera con una electroválvula acoplada a las dimensiones requeridas cuya salida es una "T" que alimenta a los 2 tanques donde se encuentran las sondas de pH y conductividad.

Los recipientes y soportes fueron diseñados en el software Inventor el cual permite hacer diseños de figuras en 3D, se realizó un diseño para cada sonda las cuales son instaladas en unos tanques en donde llega la muestra de agua termal, en la Fig. 2 se puede observar los diseños impresos para las sondas de pH y conductividad.



► Fig. 2 - (A) Diseño realizado para la sonda de conductividad. (B) Diseño realizado para la sonda de pH.

Los diseños encajaron a la perfección brindando hermeticidad al sistema ya que el sistema y la tarjeta electrónica serán instalados en la misma caja de seguridad, por lo que el factor de humedad debe ser considerado, en la Fig. 3 se muestra la sonda de conductividad instalada en el tanque.



► Fig. 3 - Instalación de la sonda de conductividad

El diseño para la sonda de pH fue diseñado para que permita enjuagar la sonda en la solución requerida, esto es para evitar que la sonda pierda la calibración. Se optó por diseñarlo en un cilindro para que ingrese al recipiente con una forma cónica hueca por dentro para que ingrese el agua y en la base cuenta con perforaciones que simulan una ducha que enjuaga la sonda de todos los ángulos.

El resultado fue el esperado, siendo probado con diferentes diseños y en todos dando el mismo resultado. En la Fig. 4 se muestra las pruebas realizadas con el resultado esperado.

En la base de los recipientes se tiene una manguera en cada uno las cuales se conectan mediante otra "T" a una electroválvula acoplada de un lado ya que en la salida las dimensiones son despreciables.

Para la solución se cuenta con un envase al costado de los recipientes cuya salida es una electroválvula acoplada por ambos lados y la salida va por una manguera a el recipiente con la sonda de pH.



► Fig. 4- Comprobación del correcto funcionamiento del soporte para la sonda de pH

## 2.2. Desarrollo de la tarjeta electrónica

Utilizando la tarjeta electrónica se maneja y programa el cierre y apertura de las electroválvulas para el correcto funcionamiento tal como se explica en el diagrama de bloques.

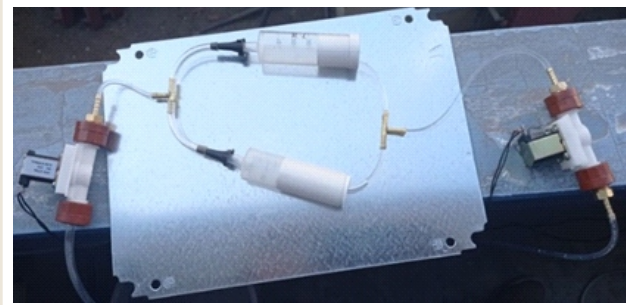
Para el desarrollo de la tarjeta electrónica se considera básicamente una placa de desarrollo Arduino Nano ya que los actuadores a controlar son pocos (2 bombas sumergibles y 3 electroválvulas) y para la realización del código el hecho que toda la plataforma de Arduino sea liberada con licencia de código abierto facilita considerablemente la programación del prototipo Ramos Figueroa (2017).

Junto con la tarjeta de desarrollo se considera utilizar un array de transistores Darlington ULN2803APG, el cual ofrece 8 salidas de alta corriente, para impulsar los actuadores de acuerdo al funcionamiento del sistema mecánico.

### Resultados preliminares y trabajos futuros

Las pruebas preliminares realizadas al mecanismo del sistema implementado, como se puede observar en la Fig. 5 demuestran el correcto funcionamiento del sistema, permitiendo empezar con la etapa del diseño de la tarjeta electrónica para el control de las electroválvulas y bomba sumergible.

El prototipo terminado y ensamblado enviará datos de la fuente termal en tiempo real utilizando una conexión a internet o la red de telemetría del Observatorio Vulcanológico de INGEMMET, dependiendo de la ubicación donde se encuentre el prototipo, hasta tres muestras por día logrando un estudio constante de la fuente termal.



► Fig. 5 - Sistema implementado

## REFERENCIAS

- Masías, P., Taípe, E., Antayhua, Y., Ramos, D. (2013) Monitoreo de los Volcanes Misti y Ubinas: Periodo 2006-2012. INGEMMET. Boletín, Serie C: Geología Ambiental y Riesgo Geológico, 54, 112 p.
- Ramos, J. A., (2017). Diseño e implementación de un prototipo de medición de potencial espontáneo para el monitoreo del volcán Ubinas [Título profesional, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Académico de la Universidad Nacional del Altiplano. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/3690>.



# Modelos de fuente de sismicidad LP para la actividad del volcán Galeras 2004-2010 (Colombia)

Oscar Cadena<sup>1</sup>, John Jairo Sánchez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Servicio Geológico Colombiano, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto, Colombia, ocadena@sgc.gov.co

<sup>2</sup> Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

**Palabras clave:** Volcán Galeras, Sismos de Largo Periodo, resonancia en conductos.

## INTRODUCCIÓN

El volcán Galeras (VG), se encuentra localizado al suroccidente de Colombia, a 9 km de la ciudad de Pasto, capital del departamento de Nariño. En su zona de influencia habitan alrededor de 500 000 personas. El VG pertenece al Complejo Volcánico Galeras (CVG) al que se le ha estimado más de 1 millón de años (Cepeda, 1985) y que comprende 6 estados a lo largo de su evolución. Según los estudios de Murcia y Cepeda (1991), los centros eruptivos del CVG están conformados principalmente por depósitos de flujos de lavas, depósitos de flujos piroclásticos, depósitos de caídas de cenizas, depósitos de avalanchas de escombros y depósitos de flujos de lodo. El CVG está formado sobre uno de los segmentos del Sistema de Fallas Romeral, cuya dirección aproximada en este punto es de 45° noreste. A lo largo de su evolución, el CVG ha presentado erupciones efusivas y explosivas que han formado un estratovolcán y dos calderas (Calvache, 1990), estas últimas con edades aproximadas de 560 000 años BP y 150 000 - 40 000 años BP, por otra parte, hace 12 000 a 5 000 años se presentó un colapso en el costado occidental del edificio favorecido por la alteración hidrotermal y la elevada pendiente.

El VG tiene edad de ~4 500 años, corresponde al centro eruptivo más reciente del CVG, y tiene composición predominantemente andesítica, identificándose seis periodos eruptivos que han generado flujos piroclásticos, caídas piroclásticas y flujos de lava (Calvache, 1990; -). Según Espinosa (2001), históricamente se tienen documentados 63 episodios eruptivos entre 1535 y 1936.

Desde el inicio del monitoreo permanente del VG en 1989 por parte del Servicio Geológico Colombiano-

Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto (SGC-OVSP), se han registrado 21 erupciones explosivas de tipo vulcaniano con columnas eruptivas de hasta 12 km de altura y que en ocasiones han producido pequeños depósitos de material piroclástico.

Dentro del contexto de la actividad volcánica de Galeras se han registrado diferentes tipos de sismos, entre los cuales están los relacionados con fractura de material rocoso del edificio volcánico, los llamados sismos Volcano-tectónicos (VT) y aquellos relacionados con movimiento de fluidos dentro o hacia afuera del volcán, sismos de Largo Periodo (LP) cuando la fuente actúa de manera transitoria en el tiempo, y Tremor volcánico (TRE) cuando la fuente se mantiene persistente en el tiempo.

La sismicidad objeto de estudio en este trabajo es del tipo LP, especialmente la registrada en el periodo comprendido entre 2004 y 2010, en el que se registraron importantes eventos como son el emplazamiento de dos domos de lava en la base del cráter principal, uno en 2006 y otro en 2008, que posteriormente se destruyeron como consecuencia de las erupciones registradas entre 2006 y 2010.

La importancia de la sismicidad LP, en un contexto de formación de domos, radica en que, a partir de sus formas de onda y contenido espectral, es posible extraer información relacionada con los procesos de ascenso y emplazamiento del magma en superficie. Autores como Ferrazzini y Aki (1987); Chouet (1986, 1988); Sturton (2003), Jousset et al. (2003), Sturton y Neuberg (2006); Neuberg (2006); Smith (2006), entre otros, han construido un estado del arte mediante el cual es posible estudiar los sismos LP como la consecuencia de procesos de movimiento de

magma y/o gases dentro de un sistema volcánico. En general, estos autores sugieren que la resonancia de las paredes de grietas llenas de gas o conductos llenos de magma corresponde a la fuente generatriz de gran parte de la sismicidad LP.

Es de interés en este trabajo abordar la sismicidad LP desde el enfoque que presentan los autores mencionados, especialmente porque se encuentra factible la aplicación de sus teorías, en la etapa de extrusión de los domos de lava de 2006 y 2008 en el volcán Galeras.

El principal objetivo del presente estudio es la configuración de modelos de fuente de sismos LP, con base en la resonancia de columnas de magma, dentro de las cuales, una perturbación inicial dentro de la columna se propaga por sus paredes en forma de ondas hasta alcanzar un receptor ubicado en superficie. Estos modelos se parametrizan utilizando información preexistente de estudios específicos de la estructura interna del volcán, tanto de su edificio como de sus componentes fluidos internos (magma y gases). Los sistemas de ecuaciones que se derivan del planteamiento del problema se resuelven mediante el método de elementos finitos y los resultados de la ejecución de los modelos propuestos se presentan como sismogramas sintéticos comparables con sismogramas reales registrados durante el periodo estudiado.

Para alcanzar el objetivo principal, es necesario realizar un reconocimiento de la sismicidad en cuanto a su distribución en el tiempo durante el periodo de estudio. Esto se trabaja desde la perspectiva de cambios en la dimensión fractal de la distribución temporal de sismos, lo que conduce a una forma de medida del orden o aleatoriedad de la ocurrencia sísmica en el tiempo. La aplicación de este método de análisis, sus resultados y discusión se detallan en la primera parte del estudio.

Luego, en una sección posterior se aplica un análisis de correlación cruzada al total de sismos LP registrados entre 2004 y 2010, con el fin de separar la sismicidad significativa y a su vez organizarla en familias, las cuales representan grupos de sismos con características espectrales similares que posteriormente son caracterizadas en el dominio de la

frecuencia y distribuidas en grupos bajo ciertos criterios de su similitud espectral.

En la sección final, se pone en evidencia la existencia de pulsos (eco sísmico) en las formas de onda de sismos de Largo Periodo del VG, a partir de los cuales se propone inferir la longitud de la columna de magma asociada con estos sismos y la ubicación vertical de la fuente dentro de la columna. Adicionalmente se logra la identificación, sobre los sismogramas, de los diferentes trenes de ondas que forman parte de un sismo del tipo Largo Periodo. Se presenta también una comparación entre sismogramas sintéticos (producto de los modelos propuestos) y sismos reales. Se propone un modelo correspondiente a los sismos asociados a la etapa predómica y otro relacionado con el emplazamiento de los domos como tal. Finalmente, se presenta una discusión de los resultados encontrados y sus posibles aplicaciones, así como también sus alcances y limitaciones.

La información para la parametrización de la corteza superficial y el magma, se obtuvo de estudios específicos preexistentes, y la solución de los sistemas de ecuaciones se realiza mediante el método de elementos finitos. Los resultados muestran un comportamiento anómalo en la dimensión fractal durante el emplazamiento de los domos de lava de 2006 y 2008. La caracterización sísmica evidencia la existencia de 9 familias de sismos LP que se distribuyeron en dos grupos G1 y G2 asociados respectivamente con el emplazamiento de los domos de lava en superficie y la sismicidad precedente a estos domos. Se parametrizaron modelos para los grupos G1 y G2 los cuales tienen por diferencias principales: la longitud de la columna de magma y el tipo de acción de la fuente sísmica. Se propone la resonancia de una columna de magma de aproximadamente 2800 m de largo, cuyo tope casi alcanza la superficie, como posible causante de la sismicidad del grupo G1 y una columna cercana a los 2000 m como responsable de los sismos del grupo G2. Adicionalmente, los resultados de este estudio ponen en duda la efectividad de la localización de sismicidad de fluidos basada en el método de atenuación de amplitudes.

La importancia de este estudio radica en que sus resultados y conclusiones, aportan al entendimiento de un fenómeno complejo como es la génesis de

sismos tipo LP, algo que ha sido ampliamente debatido desde los inicios de la observación de la sismicidad volcánica. Para el caso específico de los modelos de resonancia de conducto, estos resultados se muestran

como evidencias de la validez de la teoría y la posibilidad de su aplicación en sismicidad real, con objetivos de monitoreo de la actividad volcánica y apoyo al entendimiento de la estructura interna de los volcanes.

## REFERENCIAS

- ▶ Cepeda, H. (1985). Anotaciones a cerca de la geología del volcán Galeras, Colombia. *Encyclopedia of Volcanoes*. 421-430.
- ▶ Murcia, L., Cepeda, H. (1991). Mapa Geológico de Colombia, Plancha 410, La Unión, Memoria explicativa. INGEOMINAS.
- ▶ Calvache, M. (1990). *Geology and Vulcanology of the recent evolution of the Galeras Volcano, Colombia*. Ms. Thesis. Louisiana State University.
- ▶ Calvache, M.L., Williams, S.N. (1997). Emplacement and petrological evolution of the andesitic dome of Galeras volcano, 1990–1992. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(96\)00086-8](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(96)00086-8).
- ▶ Espinoza, A. (2001). *Erupciones históricas de los volcanes colombianos (1500-1995)*. Editorial Guadalupe Ltda. Bogotá.
- ▶ Ferrazzini, V., Aki, K. (1987). Slow waves trapped in a fluid-filled infinite crack: Implication for volcanic tremor. *Journal of Geophysical Research*, 92(B9), 9215. <https://doi.org/10.1029/jb092ib09p09215>
- ▶ Chouet, B. (1986). Dynamics of a fluid-driven crack in three dimensions by the finite difference method. *Journal of Geophysical Research*, 91(B14), 13967. <https://doi.org/10.1029/jb091ib14p13967>
- ▶ Chouet, B. (1988). Resonance of a fluid-driven crack: radiation properties and implications for the source of long-period events and harmonic tremor. *Journal of Geophysical Research*, 93(B5), 4375–4400. <https://doi.org/10.1029/JB093iB05p04375>
- ▶ Sturton, S., Neuberg, J. (2006). The effects of conduit length and acoustic velocity on conduit resonance: Implications for low-frequency events. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 151(4), 319–339. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.09.009>
- ▶ Neuberg, J. W., Tuffen, H., Collier, L., Green, D., Powell, T., Dingwell, D. (2006). The trigger mechanism of low-frequency earthquakes on Montserrat. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 153(1-2 SPEC. ISS.), 37–50. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.08.008>



# Tefrocronología y frecuencia eruptiva en el holoceno superior del volcán Irazú, Costa Rica

Daniela Campos-Durán<sup>1</sup>, Guillermo E. Alvarado<sup>2</sup>, Joan Martí<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Escuela de Ciencias Geográficas, Universidad Nacional de Costa Rica, Heredia, Costa Rica. <sup>2</sup> Área de Amenaza y Auscultación Sísmica y volcánica, Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), San José, Costa Rica. <sup>3</sup> Geociencias Barcelona, CSIC, Barcelona, España.

**Palabras clave:** Volcán Irazú, datación radiométrica, amenaza volcánica.

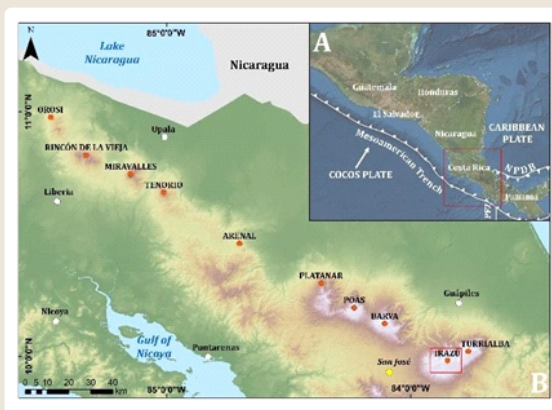
El volcán Irazú, es un escudo andesítico, localizado en Costa Rica (América Central), cubre un área de aproximadamente 700 km<sup>2</sup>, con un volumen total de 359 km<sup>3</sup>. Presenta un amplio complejo central de cumbres con varios cráteres, siendo el cráter principal el que actualmente está ocupado por un pequeño lago y tiene además varios conos satélites alrededor de sus laderas principales, y varias cicatrices de derrumbes (Alvarado, 2021). Se formó como resultado de la subducción de la placa de Cocos bajo la microplaca de Panamá (Fig. 1). La profundidad de la placa de Cocos subductada bajo la microplaca de Panamá, a la altura del Irazú, parece ser de unos 110 km por debajo del volcán (Lücke y Arroyo, 2015). El Moho ha sido delimitado sísmicamente entre una profundidad de 35 y 45 km. (Dzierma et al., 2010; Lücke, 2012; Hayes et al., 2013).

Diversas investigaciones han aportado información valiosa sobre su geología, geoquímica, petrología, estratigrafía, geocronología, tefroestratigrafía, química, aguas termales y fumarolas (Alvarado, 1993; Alvarado et al., 2006; Alvarado y Gans, 2012; Carr et al., 2007; Clark, 1993; Clark et al., 2006; Krushensky, 1972; Rouwet et al., 2021; Ruiz et al., 2010; Ulloa et al., 2018). Sin embargo, para el estudio de los depósitos de tefra, la única investigación que aportó información sobre su tefroestratigrafía a distancias intermedias, en secciones orientadas al

WSW hacia la ciudad de San José o hacia el NE, y que abarcan los últimos 2600 años, fue la tesis de maestría de Clark (1993) y su posterior publicación (Clark et al., 2006).

En tiempos históricos Irazú ha registrado al menos ocho episodios eruptivos (1723-1724, 1917-1921, 1924, 1928, 1930, 1933, 1939-1940 y 1963-1965) (Tristán, 1924; Sapper, 1902, 1913, 1925; Schaufelberger y Jiménez, 1933; Murata et al., 1966) todos ellos asociados a depósitos de caída de tefra. Sin embargo, sólo cuatro de estos eventos se conservan en el registro estratigráfico (Alvarado, 1993). Respecto a este último episodio eruptivo, se registraron daños económicos, y pérdidas (principalmente en la agricultura y ganadería) en la Gran Área Metropolitana (GAM) del país (Abarca y Alvarado, 2017). Esta región corresponde a la zona económica e industrial central de Costa Rica, que, junto con el potencial eruptivo del Irazú, conforman el escenario de riesgo.

Recientemente, Freitas Guimarães et al. (2021) propusieron un Ranking de Riesgo Volcánico (VRR) para 123 volcanes de América Latina, utilizando cuatro variables (peligro, exposición, vulnerabilidad y



► Fig. 1 - A) Marco geodinámico de Costa Rica. NPDB: Cinturón Deformado del Norte de Panamá, PFZ: Zona de Fractura de Panamá. B) Ubicación del volcán Irazú en la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica y posición de la ciudad de San José (SO).

resiliencia). El volcán Irazú (VRR en la posición 33) es considerado uno de los más peligrosos (puesto 4) debido a su actividad reciente (1963-1965); sin embargo, en términos de resiliencia, ocupa la sexta posición en la región debido a las políticas de gestión del riesgo implementadas por el país en las últimas décadas.

Con el fin de definir el marco geológico para futuros análisis de peligros y riesgos, este trabajo proporciona una reconstrucción detallada de la tefrocronología del volcán Irazú para el Holoceno superior, basada en nuevos datos volcano-estratigráficos (distribuciones de espesor y características de los depósitos) y nuevos datos radiométricos (método del C14), siendo estos la base para establecer la periodicidad eruptiva del Irazú durante el Holoceno superior, su estilo eruptivo y su potencial futuro.

De acuerdo con lo anterior, se obtuvieron, mediante el método de datación C14, un total de 11 nuevas edades para tefras más jóvenes de 2 ka. Estas, junto con las obtenidas por Clark (1993) y Clark et al. (2006) proporcionan un total de 17 edades radiométricas para las tefras del Irazú para los últimos 2600 años en su zona media (Fig. 2).

Basándose en su reconocimiento de campo y en las edades radiométricas, Clark (1993) propuso 19 unidades tefroestratigráficas para los últimos 2600 años en el volcán Irazú, denominadas de la letra Aa la S,

siendo P la más antigua y A la más reciente en el flanco SO, y Q la más reciente y S la más antigua en el flanco NE. Además, Alvarado (1993) y Alvarado et al. (2006) propusieron cuatro unidades de depósitos de caída (González, Dóndoli, Tristán y Alfaro) estudiadas en la zona de los cráteres Principal y Diego de La Haya (Fig. 2 para su localización). Las nuevas edades de C14 y las secciones estratigráficas proporcionan una estratigrafía volcánica mucho más completa para este periodo, redefiniendo algunas de las unidades de tefra anteriores e identificando un total de 31 nuevas.

Entre las Unidades redefinidas, por ejemplo, se destaca la Unidad J, donde el paleosuelo que recubre el depósito aglutinado en la cima del Irazú (sección estratigráfica 21-05) (Figs. 2 y 3) proporcionó una edad de  $1850 \pm 30$  años A.P. (120-248 D.C.). Por correlación cronoestratigráfica, el evento explosivo cercano a esta



► Fig. 2 - Ubicación de las columnas estratigráficas anteriores (Clark, 1993) y nuevas en la cumbre y los flancos SO y NE del volcán Irazú.



► Fig. 3 - (A-B). Paleosuelo datado en  $1850 \pm 30$  A.P. en el afloramiento aglutinado de la cima del Irazú (sección 21-05). La edad estimada de esta Unidad (J o Tristán) es de  $\sim 200$  A.D. En algunos sectores hay escoria de la erupción de 1723. C-D). Aglutinado (nivel de bombas soldadas), que aflora en todo el sector de Las Torres en la cima occidental del Irazú. E) En la parte superior del aglutinado suele haber estrías, posiblemente por erosión eólica.



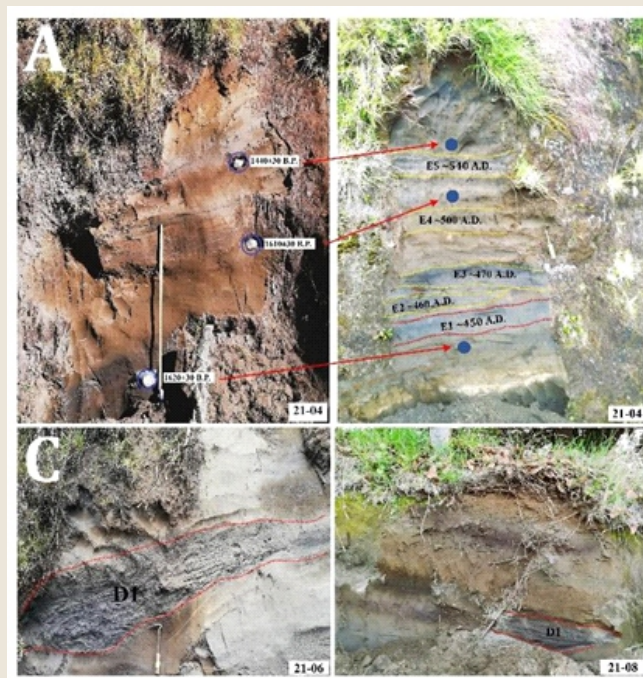
edad podría corresponder a la unidad J, definida por Clark (1993) como un depósito de cenizas finas, a veces gruesas, con estratificación discontinua y espesores entre 25 y 29 cm y a la unidad Tristán propuesta por Alvarado et al. (2006) como un aglutinado fácilmente reconocible al sur del cráter Principal (11 m de espesor). Por lo tanto, la unidad J podría ser el equivalente distal del aglutinado (unidad Tristán), al que se le asignó una edad de ~200 años A.D. El espesor del aglutinado puede indicar que la fuente estaba cerca del cráter Principal.

Otra unidad extendida a cuatro fases explosivas corresponde a la Unidad D propuesta por Clark (1993). El nivel inferior (D1) se superpone a un paleosuelo datado en  $1300 \pm 30$  años a.C. (edad calibrada 740-773 d.C.) y corresponde a un depósito estratificado rico en lapilli y fragmentos juveniles de ceniza gris gruesa; su espesor varía entre 8 y 55 cm. Presenta un adelgazamiento lateral, una superficie superior erosionada con estructuras de relleno y niveles oxidados hacia la parte superior. Su color gris brillante, estratificación y presencia de laminación interna paralela y cruzada y ausencia de cohesión, la asemejan a los depósitos de 1963-1965, aunque es notoriamente más gruesa, característica distintiva para reconocerla en el campo, como se observa en las secciones estratigráficas (21-03, 21-06, 21-07, 21-08) (Fig. 2 y 4). Subyacente a esta unidad, Clark (1993) da una edad de  $1325 \pm 35$  años B.P. (sección Clark 91-01), similar a la nuestra. Por tanto, se podría aseverar que ambas edades están asociadas a la unidad D1. Estas edades calibradas proporcionan edades máximas entre 740-773 d.C. y 657-687 d.C., respectivamente. Por lo tanto, el año 700 d.C. sería el más apropiado para este evento explosivo relevante (D1).

Además, la unidad E, definida por Clark (1993), corresponde (según los datos de campo y la correlación estratigráfica) a por lo menos cinco erupciones de diferente magnitud, separadas por paleosuelos delgados (sección estratigráfica 21-04) (Figs. 2 y 4). Por ello, la hemos subdividido en cinco unidades (E1 a E5) (Fig. 5).

Clark (1993) fechó un fragmento de madera cerca de finca Retes (sección estratigráfica 91-54) (Fig. 2) en el paleosuelo inferior en la Unidad E1 en  $1600 \pm 180$  años A.P. (edad calibrada 321- 611 A.D.). En esta

investigación se fechó un paleosuelo bajo E1 en  $1620 \pm 30$  años A.P. (edad calibrada 415-533 A.D.) cerca de la finca de Cabeza de Vaca (sección estratigráfica 21-04) (Figs. 2 y 4). Geocronológicamente, estas edades son indistinguibles y están dentro del rango de edad dado por Clark, indicando que estos eventos probablemente se originaron dentro de un siglo. Eventos eruptivos como este son muy similares a lo que ocurrió con el Irazú en el siglo XX cuando el volcán estaba muy activo. La unidad E (de E1 a E5) tiene entre sus 5 fases edades seleccionadas entre ~450 d.C. y ~540 d.C., es decir, aproximadamente 90 años de actividad relativamente sostenida en el tiempo.



► Fig. 4 – Las unidades E y D representan uno de los eventos explosivos más importantes del Irazú en los últimos miles de años debido a su espesor y distribución espacial. A-B) Desde E1 hasta E5 (sección 21-04), se reconocen al menos cinco eventos explosivos separados por paleosuelos delgados. Esta Unidad (E1 hasta E5) está restringida por dos edades relativamente cercanas,  $1620 \pm 30$  y  $1440 \pm 30$  años B.P. C-D) La Unidad D1 (informalmente llamada la capa brillante en el campo, debido a su frescura) se reconoce por parecerse en color, textura y tamaño de grano a las capas de ceniza gris de la erupción de 1963-1965 y se observa fácilmente en las secciones 21-06, 21-07 y 21-08. (Véase la Fig. 2 para su localización).



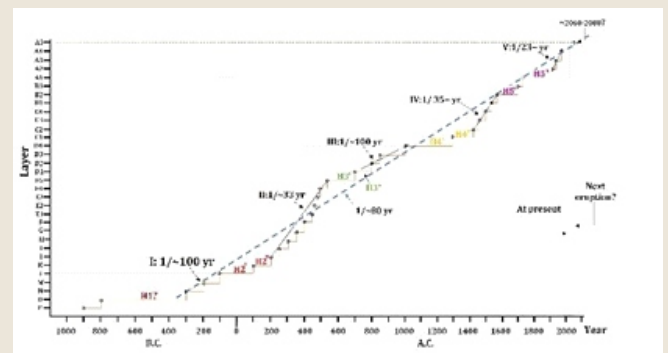
A 4 km al suroeste del cráter principal, Clark (1993) describe una capa de 15 a 25 cm de espesor de fragmentos, seguida de una capa de 6 a 8 cm de espesor formada por fragmentos vesiculares de lapilli (0,2 a 3 cm de diámetro), superpuesta por una capa de ceniza de grano medio, con espesores que van de 9 a 14 cm. A 6 km del cráter principal, la capa rica en lapilli se convierte en ceniza gruesa y luego en ceniza fina recubierta por un suelo rico en cenizas. El suelo subyacente tiene espesores variables entre 4 y 76 cm, lo que indica un período prolongado de inactividad (¿décadas a un siglo o más?), o al menos de algunas erupciones sin importancia. Este paleosuelo fue datado en  $315 \pm 20$  años antes de Cristo (Clark et al., 2006), cuya edad calibrada es de 1521-1577 d.C. El paleosuelo suprayacente tiene espesores entre 7 y 67 cm (promedio de 25 cm), lo que indica un período sin erupciones importantes durante varias décadas. También se dató un paleosuelo sobre una capa de escoria ( $\geq 1$  m de espesor) asociado al cono de La Laguna (columna estratigráfica 21-01) (Fig. 2). La edad radiocarbónica proporcionada fue de  $330 \pm 30$  años A.P. (1549-1598 A.D.), que es muy cercana a la citada por Clark (1993)  $315 \pm 20$  años A.P. (1521-1577 A.D.).

Sobre este paleosuelo hay niveles de depósito rico en fragmentos de lapilli alterados hidrotermalmente y cenizas laminadas con óxidos de hierro. A un paleosuelo (de 10 cm de espesor) le siguen  $\sim 16$  cm de cenizas que podrían corresponder a la erupción de 1723-1724. Aquí, dos niveles explosivos están muy próximos entre sí (B1 y B2), separados por paleosuelos poco desarrollados. El inferior es un depósito estromboliano (B1:  $\sim 1540$  d.C.) compuesto por escoria de lapilli y el superior tiene un carácter más freatomagmático al estar formado por fragmentos juveniles de tamaño lapilli y ceniza, con abundantes fragmentos líticos de los mismos tamaños y de diferentes litologías (B2:  $\sim 1561$  d.C.). Además, cerca de la cima del Irazú, hay capas estratificadas de ceniza y escoria de lapilli (55-100 cm de espesor) subyacentes a capas freáticas y freatomagmáticas, quizás contemporáneas al cono de La Laguna. Además, se identificó un flujo de lava (3 km de longitud) al N del cono de La Laguna, que podría ser contemporáneo con la formación de este cono y por lo tanto sería uno de los flujos de lava más recientes en Irazú.

En resumen, los nuevos datos volcano-estratigráficos y radiométricos aportados por esta investigación permiten afinar la cronoestratigrafía reciente del volcán Irazú, identificando nuevos depósitos explosivos y precisando la edad relativa de otros. Esta información es crucial para establecer la recurrencia y el estilo eruptivos de estos eventos pasados, y para inferir cómo y cuándo podría entrar en erupción el volcán en un futuro próximo.

La tefroestratigrafía del volcán Irazú presentada en este estudio revela que no ha mostrado una frecuencia eruptiva uniforme en su período más reciente. Por lo tanto, la evaluación de futuras erupciones deberá basarse en la extrapolación del comportamiento pasado, para lo cual se asignará un peso más significativo a los últimos 2,6 ka de actividad. En este contexto, el registro de datación presentado en esta investigación mejora sustancialmente esta evaluación porque constituye una base esencial para estimar el periodo de recurrencia y los ciclos de los eventos eruptivos.

Nuestra investigación ha determinado que en los últimos 2,6 ka Irazú registró con certeza 31 eventos eruptivos que se conservan en la estratigrafía o en los datos históricos, sin embargo, no descartamos eventos eruptivos pequeños como los de 1924, 1928, 1930 y 1939, que no se conservaron en la estratigrafía. Por lo



► Fig. 5 – Frecuencia eruptiva de las principales unidades dadas en la literatura y los nuevos datos aportados en el presente estudio. La frecuencia eruptiva ha sido mayor en los últimos 2 ka debido a un mejor muestreo cronoestratigráfico. También se distinguen algunos hiatos.

tanto, podemos afirmar que se ha registrado al menos una media de una erupción aproximadamente cada 80 años. Sin embargo, los nuevos datos nos permiten identificar algunas fases y hiatos importantes en los que no se ha registrado actividad (Fig. 5).

Otro aspecto que puede estimarse, al menos de forma semicuantitativa, a partir de los datos aquí presentados es el tamaño de las erupciones. Utilizando el VEI (Newhall & Self, 1982) para comparar el tamaño de las erupciones en Irazú, Clark et al. (2006) sugirieron que

entre 4 y 5 erupciones de magnitud moderada a baja ( $VEI \leq 2$ ) ocurren cada siglo, y al menos una erupción mayor ( $VEI = 3$ ) ocurre cada 200 a 400 años en promedio. Sin embargo, Alvarado et al. (2006) señalaron que al menos una erupción  $VEI=3$  ocurre cada 185 años. Nuestros resultados están en línea con lo propuesto por estos últimos autores ya que, para los últimos 3 ka, identificamos 15 eventos con  $VEI \leq 3$ , es decir, un evento cada 200 años en promedio. Además, determinamos 16 erupciones con  $VEI \leq 2$  (en promedio un evento cada 170 años).

## REFERENCIAS

- ▶ Alvarado, G. (2000). Los volcanes de Costa Rica: su geología, historia y riqueza natural [2.a ed.]. San José, Costa Rica: EUNED.
- ▶ Alvarado, G. E., Carr, M. J., Turrin, B. D., Swiher, C., Schmincke, H.-U., Hudnut, K. W. (2006). Recent volcanic history of Irazú volcano, Costa Rica: alternation and mixing of two magma batches, implying at least two intracrustal chambers. En Rose, W. I., Bluth, G. J. S., Carr, M. J., Ewert, J. W., Patino, L. C., Vallance, J. W. (Eds.), Volcanic Hazards in Central America (Geol. Soc. Amer., Sp. Paper, 412, 259-276). Boulder: Geol. Soc. Amer. Inc. [https://doi.org/10.1130/2006.2412\(14\)](https://doi.org/10.1130/2006.2412(14))
- ▶ Alvarado, G. E. (2021). Costa Rica y sus volcanes. San José, Costa Rica: EUCR, EUNA, ETCR.
- ▶ Clark, S. K. (1993). The recent eruptive history of Irazú volcano, Costa Rica: A study of the tephra deposits of the last 2500 years with geochemical and isotopic analysis of the 1963-1965 eruption. (Ms. C. Thesis). Univ. Iowa.
- ▶ Clark, S. K., Reagan, M. K., Trimble, D. A. (2006). Tephra deposits for the past 2600 years from Irazú Volcano, Costa Rica. En Rose, W. I., Bluth, G. J. S., Carr, M. J., Ewert, L. C., Patino, L. C. y Vallance, J. W. (Eds.), Volcanic Hazards in Central America (Geol. Soc. Amer., Sp. Paper: 412, 225-234). Boulder: Geol. Soc. Amer. Inc. [https://doi.org/10.1130/2006.2412\(12\)](https://doi.org/10.1130/2006.2412(12))
- ▶ Guimarães, LF, Nieto-Torres, A., Bonadonna, C., Frischknecht, C. (2021). A New Inclusive Volcanic Risk Ranking, Part 2: Application to Latin America. *Frontiers in Earth Science*, 9, 1-24. doi: 10.3389/feart.2021.757742
- ▶ Lücke, O. H., Arroyo, I. G. (2015). Density structure and geometry of the Costa Rican subduction zoned from 3-D gravity modeling and local earthquake data. *Solid Earth*, 6, 1169-1183.
- ▶ Murata, K. J., Dóndoli, C., Sáenz, R. (1966). The 1963-65 eruption of Irazú Volcano, Costa Rica. *Bull Volcanol.*, 29, 765-793.
- ▶ Newhall, C.G., Self, S. (1982). The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research.*, 87, 1231-1238.  
<https://doi.org/10.1029/JC087iC02p01231>.
- ▶ Rouwet, D., Mora-Amador, R., Ramírez, C., González, G., Baldoni, E., Pecoraino, G., Inguaggiato, S., Capaccioni, B., Lucchi, F., Tranne, C. A. (2021). Response of a hydrothermal system to escalating phreatic unrest: the case of Turrialba and Irazú in Costa Rica (2007-2012). *Earth, Planets and Space*, 73:142, <https://doi.org/10.1186/s40623-021-0147-8>
- ▶ Tristán, J. F. (1924). Dos Documentos Históricos. I. Reproducción del Documento original de don Diego de la Haya Fernández, sobre la erupción del Irazú den el año 1723. *Liceo de Costa Rica*, (11), 1-31, San José.

# Gestión técnica en tres volcanes con estilos eruptivos diferentes, casos: Villarrica, Calbuco y Nevados del Chillán (Chile)

Carlos Cardona<sup>1</sup>, Alvaro Amigo<sup>1</sup>, Rodrigo Ordenes<sup>1</sup>, Cintia Bengoa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Red Nacional de Vigilancia Volcánica, OVDAS, Sernageomin, Chile – carlos.cardona@sernageomin.cl

**Palabras clave:** monitoreo volcánico, erupciones, gestión técnica, precusores, diversos estilos eruptivos.

Chile posee un extenso arco volcánico que se extiende por más de 3000 km de norte a sur del país, con cerca de 90 volcanes considerados como geológicamente activos o con potencialidad de presentar algún periodo eruptivo en el futuro.

En el año 2009 debido a las crisis volcánicas acontecidas en los volcanes Llaima y Chaitén, que afectaron infraestructura vital para el desarrollo del país y provocaron la evacuación de un importante número de personas asentadas en su zona de influencia, el gobierno nacional vio la necesidad de actualizar y reforzar el monitoreo volcánico, creando el proyecto "Red Nacional de Vigilancia Volcánica – RNVV" del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), con el objetivo de llevar a cabo el monitoreo volcánico en el país. Actualmente, la RNVV se compone de dos unidades, el Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS) encargado del monitoreo permanente y la Unidad de Geología y Peligros de Sistemas Volcánicos (UGPSV), quien tiene a cargo la realización de mapas de peligro volcánico de los 45 volcanes monitoreados a lo largo del país (Fig. 1). Para la escogencia de los 45 volcanes más activos, se implementó un sistema de clasificación adaptando la metodología NVEWS (Ewert et al. 2005) a la realidad chilena, con el fin de determinar su riesgo específico basado en 13 factores asociados a peligro volcánico y 12 factores asociados a la exposición de la población, para finalmente establecer un ranking volcánico (Sernageomin, 2019). Los primeros 45 volcanes de este ranking fueron seleccionados con el fin de implementar redes de vigilancia y monitoreo permanente. Desde la implementación del proyecto Nacional de la RNVV en el año 2009, en Chile se han presentado erupciones en 8 sistemas volcánicos y se han debido atender más de 15 crisis volcánicas (Fig. 2),



► Fig. 1 – Ranking Volcánico Chile, versión 2019 (tomado de Sernageomin, 2019).



con procesos volcánicos que han presentado diversos estilos eruptivos, composición de magmas, volúmenes emitidos, duración de ciclos eruptivos, niveles de explosividad y precursores de actividad volcánica, lo cual da valiosa información con el fin de contextualizar cada ciclo eruptivo, construir modelos conceptuales de actividad volcánica, realizar un análisis comparativo de los diversos ciclos eruptivos y analizar la respuesta técnica y gestión de las crisis volcánicas afrontadas.

A partir del monitoreo volcánico 24/7 multiparamétrico (sismicidad, deformación, geoquímica de fluidos, análisis de la actividad superficial, mediciones de sensores remotos e imágenes satelitales, entre otras) que se realiza en el OVDAS, se establecen alertas técnicas (Verde, Amarillo, Naranja y Roja) definiendo estados de actividad base de sistemas volcánicos hasta su progresión hacia fases eruptivas, con el fin de proporcionar información oportuna al organismo nacional de emergencia y a la comunidad asentada en zonas de influencia volcánica. En este trabajo se han escogido tres ciclos eruptivos recientes ocurridos en territorio chileno y que corresponden a las erupciones de los sistemas volcánicos Villarrica, Calbuco y Nevados de Chillán, debido a las diferencias en la duración de sus ciclos eruptivos, VEI, composición, volúmenes de magmas emitidos, precursores registrados, productos emitidos y zonas de impacto.

El volcán Villarrica es catalogado como el volcán más activo de Chile, que ocupa el 1º lugar en el Ranking de Riesgo específico de los volcanes activos del país. Durante sus últimas erupciones históricas ha emitido productos principalmente de composición basáltica a andesita basáltica, es considerado un sistema de conducto abierto que tiene alojado en su interior un lago de lava. En el mes de marzo del 2015 presentó una erupción tipo estromboliana, en términos de señales premonitorias los primeros síntomas de anomalías sísmicas se registraron a comienzos de febrero del mismo año (~ 1 mes antes de la erupción), específicamente la energía de la señal sísmica continua, que en el caso del volcán Villarrica está íntimamente ligada con la dinámica y evolución de su lago de lava, presentó un ligero incremento de su valor de RSAM (medida continua de la amplitud sísmica)

pasando de valores promedio de 2 a 11  $\mu\text{m}/\text{seg}$ , debido a lo anterior su alerta técnica fue cambiada de verde a amarilla. Observaciones visuales posteriores revelaron que el nivel de lago de lava estaba cerca de superficie (menos de 50 m del borde del cráter) y con una incipiente actividad estromboliana con explosiones asociadas al colapso de burbujas en la parte superior de la columna magmática. Durante los días siguientes los valores promedio de RSAM fueron aumentando paulatinamente, junto con el incremento de la energía y periodicidad de las explosiones registradas, hasta el día 2 de marzo donde un incremento significativo fue registrado tanto en la señal continua, como en el número de explosiones registradas, alcanzando valores de RSAM de 20  $\mu\text{m}/\text{seg}$  y un valor de DR (valoración del tamaño de las señales sísmicas continuas con base en su amplitud) de las señales discretas cercano a los 50  $\text{cm}^2$ , por este motivo fue cambiado su alerta técnica a naranja. Finalmente, el día 3 de marzo de 2015, 10 horas después de ser decretado su cambio de alerta técnica, se presentó una erupción volcánica que impulsó una columna eruptiva de ~12 km de altura y generó diversos flujos de escorias y lahares que descendieron por las laderas del volcán hasta una distancia de ~25 km.

El segundo caso corresponde al volcán Calbuco (3º puesto en el ranking) el cual es considerado un proceso eruptivo con escasas señales premonitorias de actividad volcánica y/o con pocas horas de antelación. Desde el punto de monitoreo instrumental el día 22 de abril a las 15:11 HL (~3 horas antes de la erupción), se registró un 'enjambre sísmico' de eventos VT, localizados sobre la cima del volcán (< 2 km de profundidad), el cual progresó aumentando su energía y recurrencia. Posteriormente, a las 16:34 HL, se observan los primeros eventos de largo periodo e híbridos de muy baja frecuencia (0.7 Hz), que aumentaron paulatina y rápidamente su ocurrencia y tamaño, alcanzando desplazamientos reducidos de hasta 1700  $\text{cm}^2$  (10 minutos antes del inicio del primer pulso eruptivo). A las 18:04 HL se observa a través de las cámaras web el inicio de la erupción, que formó una columna eruptiva de ~15 km de altura, con una duración total del pulso eruptivo de aproximadamente 1,5 Horas. Posteriormente, y durante 5 horas el sistema presenta una relajación parcial, destacando el registro de un tremor armónico,

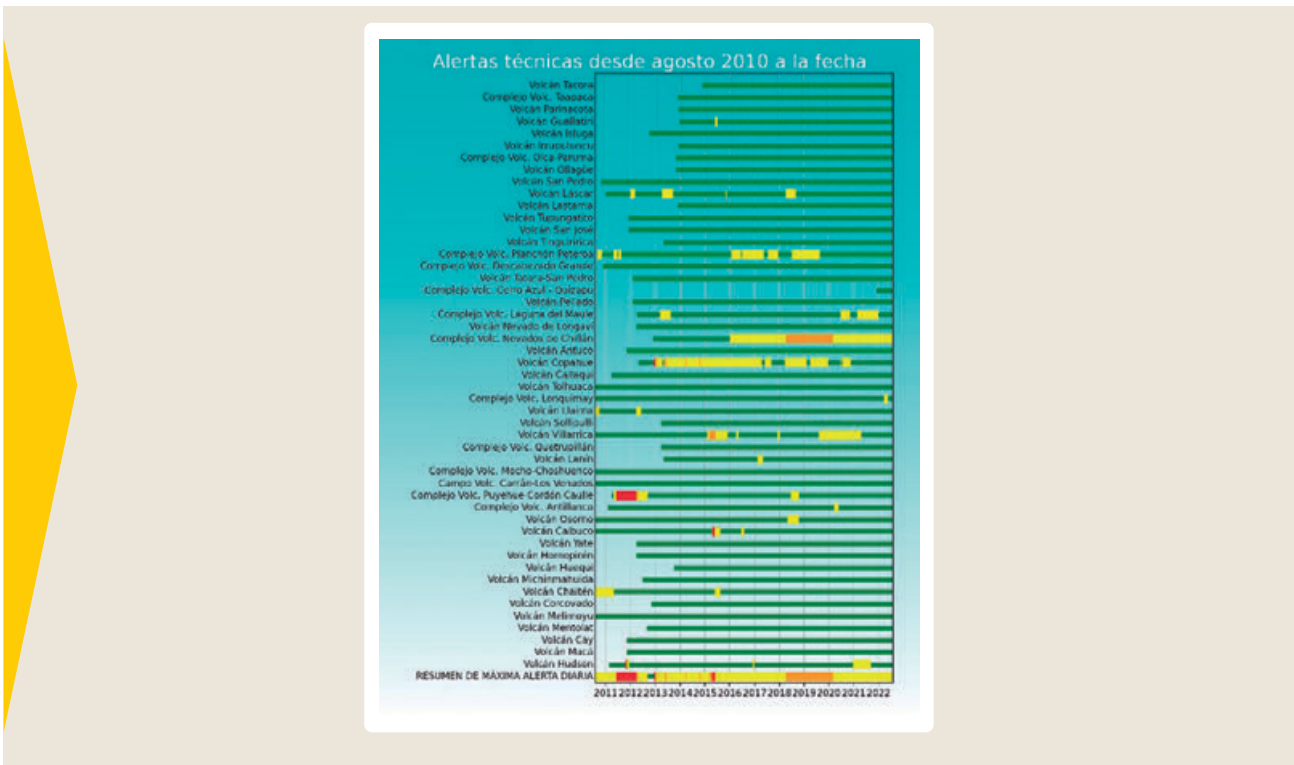
posiblemente relacionado con la movilización de material magmático al interior del sistema volcánico. A las 00:20 HL del día 23 de abril, se registra nuevamente eventos sísmicos híbridos, similares a los registrados previos al primer pulso, con valores de desplazamiento reducido cercanos a 75 cm<sup>2</sup> y la posterior aparición de una señal de tremor espasmódico que alcanzó valores de desplazamiento reducido de 500 cm<sup>2</sup>, señal antecesora del comienzo del segundo pulso eruptivo, el cual fue energéticamente mayor comparativamente con el pulso anterior y de mayor duración (~5 horas), impulsando una columna eruptiva cercana a los ~17 Km de altura (Valderrama et al. 2016). Levantamiento de los depósitos asociados a la erupción, realizados por el personal de grupo de la Unidad de Peligros Geológicos Volcánicos (UPGSV) del Sernageomin e incluidos en el trabajo de Bertín et al. (2015), describen un depósito de caída piroclástica de más de medio metro, con partículas de hasta 8 cm de diámetro. Asimismo, flujos piroclásticos fueron generados radialmente, alcanzando distancias de hasta 7,5 Km, además, se formaron lahares en su mayoría producidos por interacción de los flujos piroclásticos con el sistema fluvial. El trabajo de Bertín et al. (2015), sugiere un volumen de tefra emitido cercano a los 155 millones de m<sup>3</sup>, además, análisis petrográficos y geoquímicos de los fragmentos emitidos estiman 58,2% de SiO<sub>2</sub> y un 0,7 % de K<sub>2</sub>O, correspondiendo a una andesita.

El tercer caso corresponde al ciclo eruptivo del Complejo volcánico Nevados del Chillán (4° puesto en el ranking), el cual es considerada una erupción prolongada en el tiempo (hasta el momento 6,5 años de actividad eruptiva), pulsátil, de moderada

explosividad e impacto, con ciclos de ascenso y descenso de su actividad. Los primeros síntomas de anomalías internas fueron registrados en diciembre de 2014, ~13 meses antes de la primera explosión registrada, con el aumento de señales relacionadas con actividad de fluidos (LP's) y de ruptura de material frágil (VT), los cuales fueron progresivamente aumentado su ocurrencia y tamaño durante los meses subsiguientes, por lo que el 31 de diciembre del año 2015 fue decretado su cambio de alerta técnica a amarilla. El día 8 de enero, se registra la primera explosión, al cual formó un nuevo cráter en el sector E del edificio volcánico y produjo una columna de 2 Km de altura, dicha explosión fue considerada de tipo freática, sin embargo, algunas muestras de cenizas y gases colectados sugieren una participación de gases magmáticos durante esta fase (Moussallam et al. 2018). Posterior a su ocurrencia el sistema volcánico entró en una fase eruptiva discontinua con diversos periodos de actividad interna y superficial, que confluyó a una fase netamente magmática, con ascensos y descensos transitorios de su actividad, (Cardona et al. 2021), impulsando diversos cambios morfológicos en superficie como la creación de múltiples cráteres, que formaron un único centro de emisión denominado cráter 'Nicanor', a través del cual se formaron diversos cuerpos de domos y flujos de lavas. De acuerdo con un análisis petrológico del material emitido corresponden a magmas de composición dacitas (Benet et al. 2021), con un volumen estimado emitido hasta el momento cercano a los 2 millones de m<sup>3</sup>, el ciclo volcánico continua activo, con depósitos y zona de afectación restringidas a la parte alta del edificio volcánico, no superando los productos proximales una distancia de 2 Km desde el centro de emisión recientemente formado.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a todo el personal técnico y científico del proyecto Red Nacional del Vigilancia Volcánica (RNVV) del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin) que se desempeña en el Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS) y en la Unidad de Geología y Peligros de Sistemas Volcánicos (UGPSV) por su trabajo y profesionalismo durante la atención de las crisis volcánicas mencionadas en este trabajo.



► Fig. 2 – Erupciones y ciclos eruptivos del arco activo volcánico Chileno y cambios de alerta técnica en los diferentes sistemas volcánicos vigilados por el OVDAS durante los últimos 12 años.

## REFERENCIAS

- Bertín, D; Amigo, A; Astudillo, V; Bertín, L; Bucci, F. (2015). Erupción del Volcán Calbuco 2015: Estratigrafía y volumen involucrado. In XIV Congreso Geológico Chileno. La Serena, Chile.
- Benet, B; Costa, F., Pedreros, G., Cardona, C., (2021). The volcanic ash record of shallow magma intrusion and dome emplacement at Nevados de Chillán Volcanic complex, Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 417(2). 10.1016/j.jvolgeores.2021.107308
- Cardona, C; Gil-Cruz, F., Franco-Marín, L; San Martín, J; Valderrama, O; Lazo, J; Cartes, C., Morales, S; Hernández, E; Quijada, J., Pinto, C., Vidal, M., Bravo, C., Pedreros, G., Contreras, M., Figueroa, M., Córdova, L., Mardones, C., Alarcón, A., Velásquez, G., Bucarey, C. (2021). Volcanic activity accompanying the emplacement of dacitic lava domes and effusion of lava flows at Nevados de Chillán Volcanic Complex – Chilean Andes (2012 to 2020). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107409>.
- Ewert, J., Guffanti, M., Murray, T. (2005). An Assessment of Volcanic Threat and Monitoring Capabilities in the United States: Framework for a National Volcanic Early Warning System (NVEWS). United States Geological Survey, OpenFile Report 1164: 1-62.
- Moussallam, Y., Bani, P., Schipper, C.I., Cardona, C., Franco, L., Barnie, T.; Álvaro, A; Curtis, A., Peters, N., Aiuppa, A., Giudice, G., Oppenheimer, C. (2018). Unrest at the Nevados de Chillán volcanic complex: a failed or yet to unfold magmatic eruption? *Volcanica* 1 (1), 19–32. <https://doi.org/10.30909/vol.01.01.1932>.
- Sernageomin (2019). Ranking volcánico de Riesgo específico, versión 2020, <https://rnvv.sernageomin.cl/>.
- Valderrama, A., Cardona, C., Gil-Cruz, F. (2016). Subplinian eruption of Calbuco volcano (Chile), April 22nd, an example of VEI-4 explosive eruption with few precursor signals. Cities on volcanoes Congress, Puerto Varas – Chile, November 2016



# Campo Magnético preliminar del Volcán Misti

Beto Ccallata, Reynaldo Ccacyancco, Domingo Ramos, Rafael Miranda y Jorge Alcántara

Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, Arequipa, Perú - beto.ccallata@gmail.com

**Palabras clave:** Anomalía magnética, campo magnético, volcán Misti.

## INTRODUCCIÓN

El volcán Misti ( $16^{\circ}17' S, 71^{\circ}24' O, 5822$  msnm) es uno de los diez volcanes activos, situado en la cadena volcánica Plio-Cuaternaria del sur peruano (Bromley et al., 2019). Este volcán se encuentra localizado en la Cordillera Occidental de los Andes, a 17 km de la Plaza de Armas de la ciudad de Arequipa (Fig. 1). Esta ciudad, es considerada como la segunda ciudad económicamente más importante del Perú, con más de 1 millón de habitantes e importante infraestructura comprometida.

Por otro lado, estudios geológicos señalan que el Misti, en su historia eruptiva, ha sido protagonista de diversos tipos de erupciones: erupciones de magnitud baja ( $IEV = 2$ ), cada 500 a 1500 años, la última se produjo en el siglo XV; de magnitud alta ( $IEV = 3-4$ ), cada 2000 a 4000 años, la última se produjo hace 2050 y 11000 años; y erupciones muy altas ( $IEV$  igual o mayor a 5), que ocurren cada 7000 a 15000 años, la última se produjo hace 33000 años. Actualmente, nos encontramos dentro del límite del periodo de recurrencia para erupciones de magnitudes baja y alta.

Por lo expuesto anteriormente, es clara la importancia del estudio del volcán Misti. Es por ello que, en los últimos años, el INGEMMET ha puesto especial énfasis en conocer la estructura interna de este volcán, entre ellas, las zonas de debilidad estructural que podrían ser mayormente afectadas durante una erupción volcánica.

En esta ocasión, hablaremos de las mediciones magnéticas realizadas en el volcán Misti y sus resultados preliminares. Es preciso señalar que este es un trabajo exploratorio y que su ampliación estará ligada a los resultados que se obtengan durante su desarrollo.

## INSTRUMENTACIÓN

Para este trabajo, se emplearon tres magnetómetros portátiles de precisión de protones Overhauser GSM19, Gemsystems: 01 Base y 02 móviles, en modo caminata, con un intervalo de muestreo de 2 s. La posición del GPS se registró simultáneamente durante el levantamiento, que está integrado en el magnetómetro.



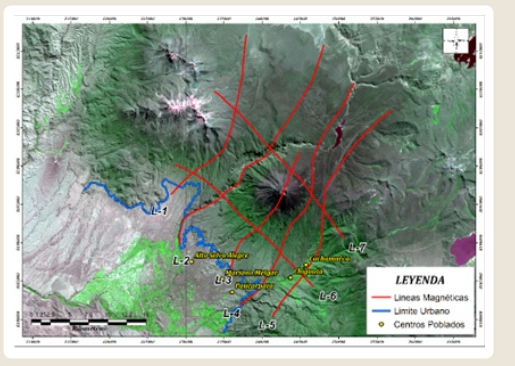
► Fig. 1 - Ubicación del volcán Misti.

El Misti es un volcán activo, su dinamismo interno se manifiesta por una baja actividad microsísmica, detectada únicamente por sismómetros de alta sensibilidad, su sistema hidrotermal, limitado por mediciones de Potencial Espontáneo (Ramos, 2000, Finizola, 2004), así como mediante la presencia de fumarolas que pueden ser apreciadas en el cráter interno y en el sector Este, en la cima del volcán, y la presencia de manantiales en diversas partes de la ciudad. Además, el análisis químico de los gases indica una fuerte componente magnética.

## ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS

La información empleada para este resumen, fue adquirida en dos campañas de campo, donde, a lo largo de 188 km lineales, se realizaron mediciones del campo magnético total. Estas mediciones se distribuyeron en forma de malla, en siete líneas magnéticas, sobre el edificio volcánico y alrededores del Misti (Fig. 2). La distribución de las líneas de medición estuvo supeditada a las condiciones de acceso terrestre.

Se establecieron 2 bases magnéticas, una 1100 m, hacia el norte, mientras se realizaban los trabajos del sector Norte; y otra, 1400 m, hacia el Sur, mientras se realizaban las mediciones en ese sector. Estas bases estuvieron ubicadas fuera de la zona de estudio. La data de estas bases, posteriormente, permitieron realizar la corrección diurna de la información adquirida con los magnetómetros móviles. La Figura 3 muestra el comportamiento de la variación diurna del 15 de octubre del 2021.

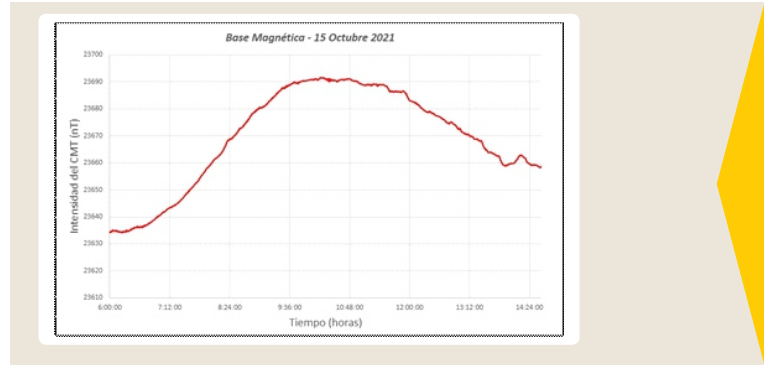


► Fig. 2 – Distribución de las líneas de medición magnéticas realizadas en el volcán Misti.

El control de calidad consistió en la eliminación de valores inconsistentes mediante la aplicación de filtros. Se eliminó el 6.4 % de los valores de campo medidos sobre los perfiles diseñados en gabinete.

### MAPA DE LA INTENSIDAD DEL CAMPO MAGNÉTICO TOTAL (ICMT)

El mapa de Intensidades del Campo Magnético Total (ICMT), permite ver la distribución de la intensidad magnética en cada parte de la zona de estudio. Para obtener el ICMT del volcán Misti (Fig. 4), se aplicó la interpolación por el método de mínima curvatura, utilizando el programa Oasis Montaj v.8.4. Se



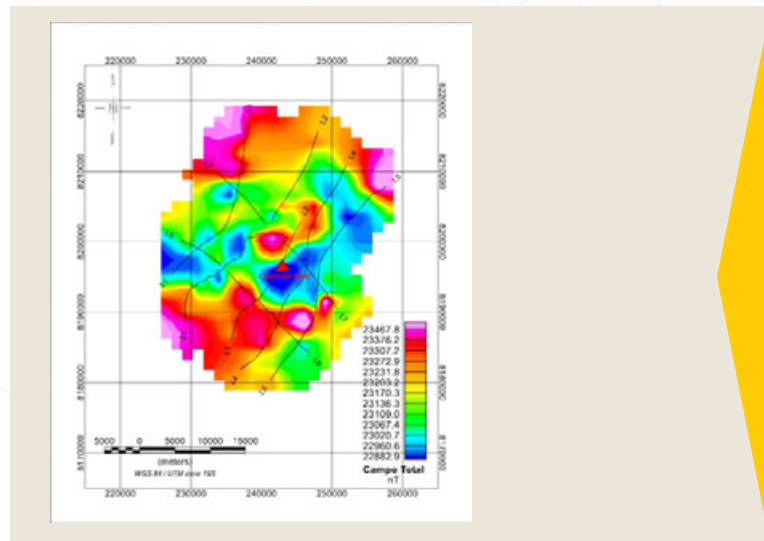
► Fig. 3 – Variación diurna de la base magnética correspondiente al 15 de octubre del 2021.

realizaron iteraciones basadas en el promedio de la distancia inversa existente entre los datos reales que se encuentran en un radio específico, el cual genera una superficie de interpolación, que pasa muy cerca de los perfiles reales de medición de manera aleatoria y con curva mínima.

El mapa de ICMT del volcán Misti, presenta un valor mínimo de 22882 nT y un valor máximo de 23467 nT.

Los valores mínimos (tonalidades azul y verde, Fig. 4), se encuentran ubicados sobre el cráter, al Sur, Sureste, Oeste y Este del cráter del volcán Misti, mientras que los valores máximos se encuentran al norte y noroeste del volcán Misti (tonalidades roja y naranja).

Las líneas 2, 3, 4 y 7, muestran valores magnéticos altos al norte y noroeste del cráter. El mapa geológico del Misti, señala que, en esta zona, afloran secuencias volcanoclásticas y depósitos de caídas de tefras. Las



► Fig. 4 – Mapa del campo magnético total del volcán Misti. El triángulo de color rojo indica la posición del cráter del Misti.

líneas 1, 2, 3, 4, 6 y 7, presentan valores magnéticos bajos, al este, sureste, sur, sureste y este del cráter del volcán. Estos valores menores, según el mapa

geológico del Misti, estarían asociados a coladas de lava andesítica del cono superior y a secuencias volcanoclásticas y depósitos de caída de tefras.

### DISCUSIONES

- ▶ Las mediciones magnéticas realizadas en el volcán Misti, se obtuvieron con un paso de muestreo de 2 s. Esta nitidez podría potenciarse exponencialmente, disminuyendo la distancia entre líneas magnéticas. Para evitar que el trabajo de interpolación oculte o cree nuevas zonas anómalas.
- ▶ La anomalía positiva de la zona norte del cráter del volcán, podría estar influenciada por las maquinarias de la hidroeléctrica de Charcani.
- ▶ Los valores positivos en las zonas extremas hacia el sur, podrían estar influenciados por la proximidad a la ciudad de Arequipa.
- ▶ Los valores positivos del extremo norte del mapa, podrían estar asociados a zonas con material alterado hidrotermalmente.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ▶ En el volcán Misti se han realizado 188 km lineales de mediciones del campo magnético total. Estas mediciones se distribuyeron en forma de malla sobre la base de 7 líneas magnéticas.
- ▶ Con la data obtenida y corregida, se ha confeccionado un mapa preliminar de intensidades del campo magnético total (ICMT), el mismo que muestra la distribución de los valores magnéticos locales en la zona del volcán Misti y sus alrededores.
- ▶ El ICMT del volcán Misti, presenta una anomalía positiva al norte y noroeste del cráter, en superficie, dicha anomalía estaría relacionada a secuencias volcanoclásticas y depósitos de caídas de tefras; una anomalía negativa, al este, sur, sureste y este del cráter, asociada a coladas de lava andesítica del cono superior y a secuencias volcanoclásticas y depósitos de caída de tefras.
- ▶ Por lo tanto, se sugiere establecer una red de estaciones magnéticas estables como una red básica de monitoreo magnético del volcán Misti, a fin de establecer patrones premonitorios de actividad eruptiva, así como establecer correlaciones con otros métodos geofísicos en el área de estudio para identificar anomalías asociadas a estructuras geológicas internas, para su respectiva interpretación.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI) – Geología de Volcanes, por la oportunidad de realizar este trabajo y apoyo del técnico Alfonso Jensen Añamuro Justo en la adquisición de datos geofísicos para el desarrollo de este estudio.

### REFERENCIAS

- ▶ Bromley, G. R. M., J.-C. Thouret, I. Schimmelpfennig, J. Mariño, D. Valdivia, K. Rademaker, S. del Pilar Vivanco Lopez, ASTER Team, G. Aumaître, D. Bourlès y K. Keddadouche (2019). "In situ cosmogenic  $^3\text{He}$  and  $^{36}\text{Cl}$  and radiocarbon dating of volcanic deposits refine the Pleistocene and Holocene eruption chronology of SW Peru". *Bulletin of Volcanology* 81 (11). doi: 10.1007/s00445-019-1325-6.
- ▶ Finizola, A., Le´nat, J.-F., Macedo, O., Ramos, D., Thouret, J.C., Sortino, F., (2004). Fluid circulation and structural discontinuities inside Misti volcano (Peru) inferred from selfpotential measurements. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 135, 343–360.
- ▶ Ramos D. (2000). Aplicación del método geofísico del potencial espontáneo para el estudio estructural del volcán Misti, Tesis para optar el título de ingeniero Geofísico, Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, 173 pág.



# Mecanismos de emplazamiento y destrucción de los domos de lava kimsa y tawa en el volcán Sabancaya, mediante el monitoreo volcánico multidisciplinario

Jorge Chalco<sup>1</sup>, Mayra Ortega<sup>1</sup>, Rosa Ancasi<sup>1</sup>, Videll Chavez<sup>1</sup>, Fredy Apaza<sup>1</sup>

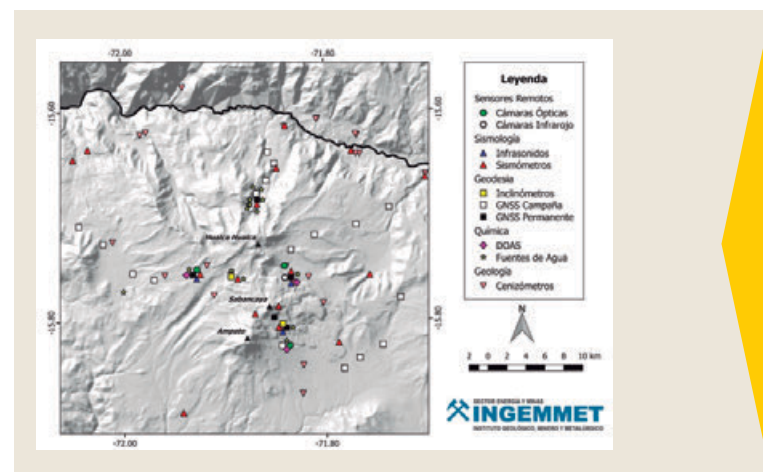
<sup>1</sup> Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, Barrio magisterial 2 B-16 Yanahuara, Arequipa - Perú - jchalco@ingemmet.gob.pe

**Palabras clave:** Monitoreo multidisciplinario, Domos de lava, Sismicidad distal.

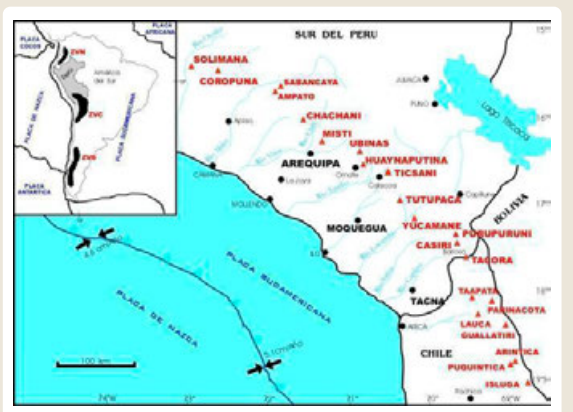
El volcán Sabancaya está localizado a 76 km al NO de la ciudad de Arequipa, en la provincia de Caylloma (15° 46' - 15° 52' S; 71° 49' - 71° 54' O). El volcán Sabancaya es el más joven de los 10 volcanes activos del sur del Perú, se ha formado en los últimos 10 mil años (Bromley et al., 2019). Está conformado principalmente por secuencias de flujos de lava de composición andesítica y dacítica, con limitados depósitos piroclásticos (Mariño, 2012; Rivera et al., 2015; Samaniego et al., 2016).

La cumbre del volcán Sabancaya está a 5,980 msnm y el edificio volcánico cubre un área de 65 a 70 km<sup>2</sup>. Está conformado por 2 estratos-conos, alineados en dirección SO-NE. El más antiguo se halla en el extremo suroeste, en cuya cima se emplaza un domo-colada; mientras que el cono más reciente se halla al extremo noreste. El cráter con actividad histórica y reciente se encuentra en la cima del estrato-cono NE. (INGEMMET, 2016).

En los últimos años el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, mediante el monitoreo multidisciplinario, ha identificado la formación de 5 domos de lava, los cuales han repercutido en la actividad de dicho volcán.



► Fig. 2 - Red de monitoreo multidisciplinario del volcán Sabancaya.



► Fig. 1 - Mapa de ubicación del volcán Sabancaya dentro de la Zona Volcánica Central (CVZ) de los Andes.

En tal sentido, para entender y comprender el mecanismo de formación y destrucción del tercer ("KIMSA") y cuarto ("TAWA") domo de lava, en el presente trabajo de investigación, se pretende realizar un análisis detallado de la sismicidad volcánica en correlación con algunos de los parámetros de monitoreo a fin de establecer patrones claros en la evolución de dichos procesos.

## Sismicidad Volcánica

### I Periodo: enero 2021 - agosto 2021

En este periodo se registró una importante sismicidad de tipo Volcano Tectónica distal (VTD), este tipo de sismicidad se ha registrado en varias ocasiones a modo

de enjambres sísmicos (Figura 2), se ha contabilizado alrededor de 16 enjambres, durante este periodo de tiempo, el primero se registró el 12 de enero y el último el 23 de julio.

La ocurrencia de estos enjambres, están asociados a la sobrepresurización de acuíferos que cruzan las fallas de la zona generada por la presión causada a raíz de la intrusión de magma (White & McCausland, 2016). Los pulsos de magma intruidos provendrían de la cámara profunda localizada al norte del volcán Sabancaya por debajo del volcán Hualca Hualca (Cruz, 2019).

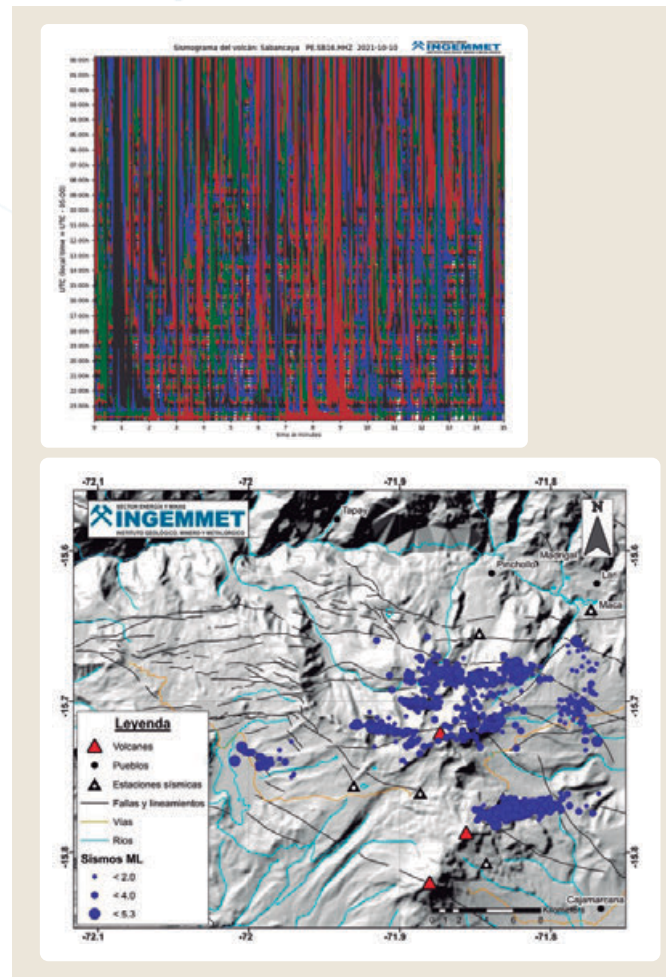
Entre los meses de enero y febrero del 2021 se produjo un incremento del volumen del magma intruido hacia la superficie, siendo el 07 de febrero el máximo con un volumen superior a los 7 millones de metros cúbicos.

El día 18 de abril del 2021 se registró el mayor aporte de magma de este periodo, siendo 132 millones de metros cúbicos el volumen de magma intruido hacia la superficie.

## II Periodo: septiembre 2021 - enero 2022

En este periodo, de igual manera, se registró una importante sismicidad de tipo Volcano Tectónica distal (VTD), contabilizando alrededor de 15 enjambres, registrándose el primero el 03 de septiembre y el último el 02 de diciembre del 2022.

Entre septiembre y octubre del 2021, a raíz de estos continuos enjambres, se produjo un incremento del volumen del magma intruido hacia la superficie, estimándose un total de 515 millones de metros cúbicos, indicándose un aporte de magma desde la cámara principal hacia la superficie.



► Fig. 3a Registro de la actividad sísmica a manera de enjambres de eventos VTs registrados en el volcán Sabancaya, en el 2021; 18 de abril (izquierda) y 10 de octubre (derecha).

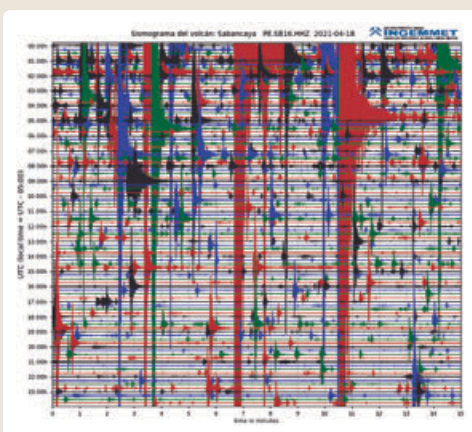
Fig. 3b Mapa de localización de enjambres de sismos VTs registrados en el volcán Sabancaya durante el 2021.

## Explosiones

Para el cálculo de la energía sísmica de las explosiones se utilizó la ecuación propuesta por Johnson & Aster (2005):

$$E_{\text{sísmica}} = 2\pi r^2 c \frac{1}{A} \int_{\sigma} S^2 U(t)^2 dt$$

Donde  $r$  es la distancia fuente-estación,  $c$  es la velocidad de la onda P (3000 m/S),  $A$  es la corrección de atenuación,  $S$  es la respuesta del sitio sísmico corrección y  $U(t)$  es la velocidad de la partícula.



### I Periodo: enero 2021 - agosto 2021

Se registró un aumento significativo tanto en número como en energía de las explosiones (EXP) que comenzó en el mes de febrero y continuó hasta la primera semana de mayo.

Durante este periodo se contabilizó un promedio de 50 EXP/día que liberaron una energía diaria de 11.65 MJ. Durante este periodo se alcanzó un pico en la energía liberada de 19.98 MJ el día 25 de febrero y en tasa de ocurrencia el día 26 de abril con un total de 80 explosiones.

A partir de la segunda semana de mayo la energía de las explosiones comenzó a descender, registrándose valores menores a los 10 MJ.

Desde la última semana del mes de junio las explosiones volvieron a aumentar en número y energía, alcanzando picos de 108 en número el 15 de julio y 24.74 MJ de energía el 13 de julio, ambos fueron los valores más altos que se registraron a lo largo del 2021.

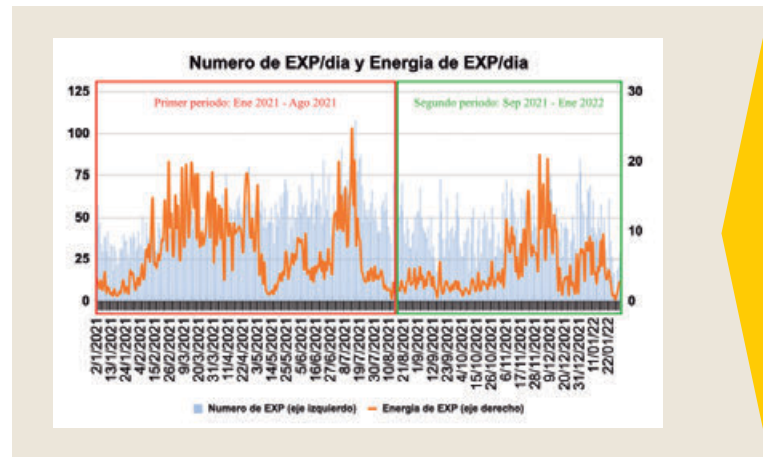
Luego de la tercera semana del mes de julio la actividad explosiva disminuyó nuevamente en número y energía.

### II Periodo: septiembre 2021 - enero 2022

Durante el mes de septiembre del 2021 los valores de las explosiones tanto en número como en energía mantuvieron niveles moderados de actividad y no fue hasta noviembre del 2021 que los valores aumentaron significativamente tanto en número como en energía de las explosiones (EXP), comportamiento que continuó hasta parte del mes de diciembre de dicho año.

Durante este periodo se obtuvo un promedio de 52 EXP/día y 8.69 MJ de energía por día, alcanzando picos de 83 en número (07 de diciembre del 2021) y de 20,85 MJ (01 de diciembre del 2021).

Luego del aumento que hubo hasta la primera mitad del mes de diciembre del 2021, los valores descendieron durante la segunda mitad de dicho mes, hasta el mes de enero donde los valores volvieron a ascender durante su primera semana, y posteriormente disminuir drásticamente hasta el fin de este periodo de tiempo.



► Fig. 4 – Gráfica del número y energía de las EXP diarias registradas en el Volcán Sabancaya del primer periodo (enero 2021 a agosto 2021 - marco rojo izquierdo) y del segundo periodo (septiembre 2021 a enero 2022 - marco verde derecho).

### Monitoreo Multiparamétrico

#### ENERGÍA VOLCÁNICA IRRADIADA (VRP, POR SUS SIGLAS EN INGLÉS)

### I Periodo: enero 2021 - agosto 2021

Desde el año 2019 se registraron cambios en las anomalías térmicas durante los periodos de crecimiento y destrucción de domos de lava en el cráter del volcán Sabancaya (Ramos et al. 2019).

La energía volcánica irradiada (VRP) a lo largo de los meses de febrero hasta la primera semana de mayo, (Fig. 5) mostró una mayor tasa de registro de anomalías térmicas, teniendo el valor de energía (VRP) más alto de 87 MW (02 de abril).

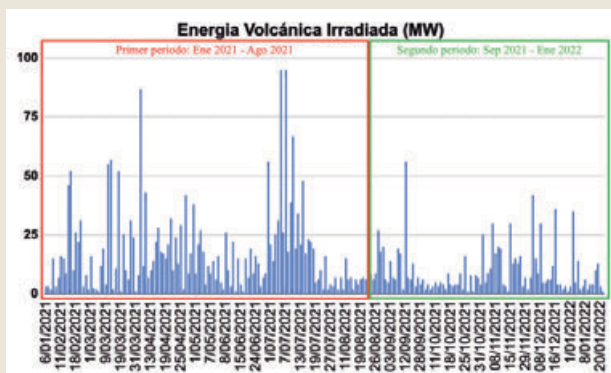
Los días siguientes la energía volcánica irradiada descendió, pero seguían manteniéndose valores relativamente altos. En la primera semana de julio del 2021 volvieron a ascender los valores, incluso superando los vistos anteriormente, llegando a su pico el 5 y 7 de julio con un valor de 96 MW en ambos días. Luego de ese incremento en la energía irradiada por el volcán los datos registrados descendieron drásticamente.

Estos datos son registrados por MIROVA que es un sistema automático de detección de puntos calientes desarrollado para detectar, localizar y medir la radiación de calor procedente de la actividad volcánica (Coppola et al., 2016).



## II Periodo: septiembre 2021 - enero 2022

En el mes de septiembre los valores de la energía volcánica irradiada se mantuvieron en niveles bajos a excepción del día 12 de septiembre que se registró un valor de 56 MW. No fue hasta finales de octubre del 2021 que se registró un cambio en la actividad, donde los valores registrados comenzaron a aumentar alcanzando un máximo de 42 MW el 02 de diciembre del 2021. Los valores siguieron siendo altos hasta el mes de enero del 2022 para posteriormente descender.



► Fig. 5 – Gráfica de la Energía Volcánica Irradiada diaria registrada en el Volcán Sabancaya del primer periodo (enero 2021 a agosto 2021 - marco rojo izquierdo) y del segundo periodo (septiembre 2021 a enero 2022 - marco verde derecho), (Fuente: MIROVA).

## QUÍMICA DE GASES - EMISIONES DE SO<sub>2</sub>

La Red Escaner DOAS está compuesta por 4 escáneres instalados alrededor del cráter del Sabancaya. Estos equipos escanean el cielo buscando las plumas volcánicas que pasan encima de ellas, midiendo el SO<sub>2</sub> (Ramos et al., 2019).

### I Periodo: enero 2021 - agosto 2021

En el mes de febrero hubo un cambio en los flujos de dióxido de azufre SO<sub>2</sub>, incrementándose los valores registrados normalmente. El 15 de febrero se registró un flujo máximo de 11,786 toneladas, luego en los días siguientes los valores descendieron hasta que el 23 de febrero se volvió a registrar un aumento con un valor de 11,005 toneladas. Este cambio se debió a que el conducto fue menos permeable y acumuló una

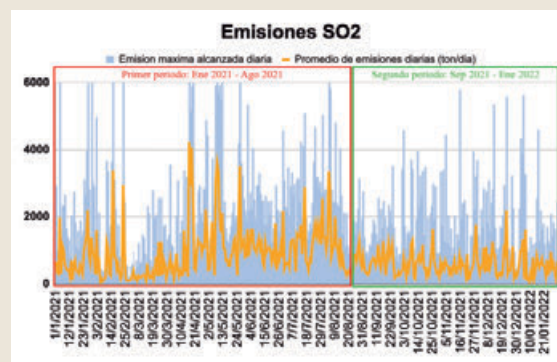
masa de gases en él, hasta que debido a la presión el gas salió de manera abrupta produciendo así los valores altos antes mencionados.

Posterior a este comportamiento, los flujos se mantuvieron bajos sugiriendo un conducto poco permeable. Posteriormente, a mediados del mes de abril se volvieron a elevar los valores, registrándose un flujo importante de 10,328 toneladas el 16 de abril. Luego como se había visto anteriormente los flujos de SO<sub>2</sub> se mantuvieron bajos por unos días para luego incrementar significativamente, este comportamiento se observó hasta el mes de agosto donde el conducto nuevamente se vuelve más permeable permitiendo así el tráfico de gases con mayor facilidad.

### II Periodo: septiembre 2021 - enero 2022

Las emisiones de dióxido de azufre se mantuvieron estables durante el mes de septiembre del 2021. En octubre del 2021 se vuelve a producir un cambio en los flujos registrados. Muy similar a las del anterior periodo donde el conducto se hizo menos permeable y los gases se acumulaban habiendo una emisión máxima muy alta debido a la fuga abrupta del gas producto de la presión por la acumulación de estos.

El mayor valor registrado en este periodo de tiempo fue de 5,782 toneladas correspondiente al día 15 de noviembre del 2021. Este comportamiento se mantuvo hasta fines del mes de enero del 2022, donde las emisiones de dióxido de azufre se normalizaron.



► Fig. 6 – Gráfico de emisiones máximas y promedio de emisiones diarias de SO<sub>2</sub> registradas en el volcán Sabancaya del primer periodo (enero 2021 a agosto 2021 - marco rojo izquierdo) y del segundo periodo (septiembre 2021 a enero 2022 - marco verde derecho).

## Discusiones

### I Periodo: enero 2021 - agosto 2021

Debido a la alta tasa de intrusión de magma que se tuvo en el volcán Sabancaya entre el mes de enero y febrero del 2021, ocurrió un ascenso de este hacia la superficie, el cual al ser de un material muy viscoso (Rivera et al., 2015), se solidifica formando así el tercer domo de lava llamado Kimsa. Posteriormente, desde el mes de febrero hasta mayo del 2021, se registró un cambio con tendencia a incrementar en la actividad explosiva (número y energía), valores moderados de la energía volcánica irradiada (valor máximo registrado: 87 MW), flujos de dióxido de azufre (valor máximo registrado: 11,786 t). Estos datos indicaron un periodo de crecimiento acelerado del domo de lava kimsa.

Desde el mes de mayo hasta junio los valores descendieron y se mantuvieron en un rango moderado, sugerimos que el domo dejó de crecer aceleradamente y permaneció en el cráter todo ese tiempo.

Durante todo el mes de julio los valores volvieron a incrementar en los 3 parámetros estudiados, indicando que el domo pasaba nuevamente por una tasa de crecimiento importante en su cuerpo superando la anterior.

En el mes de agosto los valores descendieron drásticamente sugiriendo un conducto menos obstruido, esto debido a la destrucción del domo de lava Kimsa.

### II Periodo: septiembre 2021 - enero 2022

Debido a la alta tasa de intrusión de magma (incluso superando a la que hubo en el anterior periodo) que se

tuvo en el volcán Sabancaya entre el mes de septiembre y octubre, ocurrió un ascenso de este hacia la superficie, el cual al ser de un material muy viscoso se solidifica formando así el cuarto domo de lava llamado Tawa. Posteriormente, desde el mes de noviembre hasta la primera semana de diciembre del 2021, se registró un cambio con tendencia a incrementar en la actividad explosiva (número y energía), valores moderados de la energía volcánica irradiada (valor máximo registrado: 42 MW), flujos de dióxido de azufre (valor máximo registrado: 5,872 t). Estos datos indicaron un periodo de crecimiento importante del domo de lava Tawa.

En la segunda mitad del mes de diciembre del 2021 hasta el mes de enero del 2022 los valores de las explosiones descendieron y se mantuvieron en un rango moderado, infiriendo que el domo dejó de crecer. La energía volcánica irradiada permaneció registrando valores moderados y las emisiones de dióxido de azufre, infiriendo que el domo de lava permaneció todo ese tiempo obstruyendo el conducto por lo que los gases no pudieron circular libremente.

Durante el mes de enero los valores de las explosiones volvieron a incrementar indicando que el domo pasaba nuevamente por una tasa de crecimiento, sin embargo, por sus características probablemente este volumen de magma involucrado no superó el periodo previo.

A fines del mes de enero los valores descendieron drásticamente en los 3 parámetros estudiados, sugiriendo así finalmente la destrucción de este cuarto domo de lava (Tawa).

## DISCUSIONES

Se pueden establecer 5 etapas para el ciclo de vida de estos dos domos de lava los cuales tienen grandes similitudes.

- ▶ **Primera etapa:** Presencia de sismicidad distal en forma de enjambre, en ambos casos se presentó semanas previas a la aparición del domo de lava.
- ▶ **Segunda etapa:** Ascenso del material magmático hacia la superficie, debido a la sismicidad distal en forma de enjambre, para posteriormente solidificarse y dar origen al domo de lava.
- ▶ **Tercera etapa:** Presencia del domo de lava obstruyendo el conducto, haciéndolo menos permeable, impidiendo así el libre tráfico de los gases.

- ▶ **Cuarta etapa:** Crecimiento del domo de lava donde las explosiones aumentan en número y energía, así como un aumento en la energía volcánica irradiada.
- ▶ **Quinta etapa:** Destrucción del domo de lava, las explosiones tanto en número y en energía disminuyen, al igual que los registros de energía volcánica irradiada. Debido a su destrucción, el conducto queda libre, haciéndolo así más permeable permitiendo el libre tráfico de los gases.

### Agradecimientos

Se agradece a INGEMMET, por darme la oportunidad de llevar a cabo este trabajo y a mis compañeros del observatorio vulcanológico (OVI) por su constante apoyo.

### REFERENCIAS

- ▶ Bromley G., Thouret J.C., Schimmelpfennig I., Mariño J., Valdivia D., Rademaker, K., Vivanco S., ASTER Team, Aumaitre G., Bourles D., Keddadouche. K. (2019). In situ cosmogenic <sup>3</sup>He and <sup>36</sup>Cl and radiocarbon dating of volcanic deposits refine the Pleistocene and Holocene eruption chronology of SW Peru. *Bulletin of Volcanology*, 81(11), 64. <https://doi.org/10.1007/s00445-019-1325-6>
- ▶ Coppola, D., Laiolo, M., Cigolini, C., Donne, D. D., & Ripepe, M. (2016). Enhanced volcanic hot-spot detection using MODIS IR data: results from the MIROVA system. *Geological Society, London, Special Publications*, 426(1), 181–205. <https://doi.org/10.1144/SP426.5>
- ▶ Cruz, L. (2019). Análisis de deformación del volcán Sabancaya como herramienta útil en el pronóstico de erupciones periodo 2012-2017. Tesis Título Profesional. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- ▶ Johnson J.B., Aster R.C. (2005). Relative partitioning of acoustic and seismic energy during Strombolian eruptions. *J Volcanol Geoth Res* 148:334–354. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.05.002>
- ▶ Ramos, D., Masías, P., Apaza, F., Miranda, R., Antayhua, Y., Ortega, M., Ancasi, R., Ccallata, B., Luza, C., Valdivia, D., Cruz, L., Taipe, E. 2019. Informe Técnico Anual: Vigilancia del Volcán Sabancaya, Periodo 2019.
- ▶ INGEMMET. (2016). Informe Técnico No A 6728 - Inspección Geológica del volcán Sabancaya (Distritos Maca y Lluta, Provincia de Caylloma, Región Arequipa).
- ▶ Mariño, J. (2012). Escenarios eruptivos y mapa de peligros del complejo volcánico Ampato - Sabancaya. Tesis Maestría, Universidad de Nice, Francia, 87 p.



# Monitoreo visual del volcán Sabancaya con imágenes térmicas en tiempo real

Videl Chavez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Observatorio Vulcanológico del INGEMMET - vchavez@ingemmet.gob.pe

**Palabras clave:** cámara térmica, monitoreo visual

## RESUMEN

Las continuas fases eruptivas del volcán Sabancaya desde sus inicios en el año 2016, han representado un reto en el monitoreo y vigilancia, por lo que el INGEMMET a través de su Observatorio Vulcanológico, ha implementado desde el 2013 una red multidisciplinaria de monitoreo de deformación, sismología volcánica, química de gases, hidroquímica volcánica y monitoreo visual, esta última está conformada por 4 cámaras ópticas (SCOP, SAMP, SHUA, SMUC) y una cámara térmica (SIRH), para el monitoreo de proyectiles balísticos y cambios en la temperatura, esto ha complementado en la identificación de los diferentes procesos involucrados en la dinámica del volcán Sabancaya, como formaciones de domo, así como marcar las etapas de inicio de la actividad eruptiva. Por lo cual el presente artículo pretende mostrar las diversas fases del proceso eruptivo formadores de domo, con imágenes térmicas, donde se podrá visualizar los distintos materiales emitidos en fases explosivas. Para la realización de este trabajo nos basamos en el artículo científico de Coppola et al. (2022) titulada "Shallow magma convection evidenced by excess degassing and thermal radiation during the dome-forming Sabancaya eruption (2012–2020)".

## INTRODUCCIÓN

El volcán Sabancaya se encuentra en el altiplano de la Puna y forma parte de la Cordillera Occidental. Se encuentra a 76 km al NO de la ciudad de Arequipa, en la provincia de Caylloma, y forma parte de un complejo volcánico que consiste en el Nevado Ampato al sur y Hualca Hualca al norte (Bulmer et al., 1999).

Este volcán ha presentado por lo menos 3 erupciones desde el año 1750, los cuales se registraron en 1750,

1784 y el último en 1981-1998 (Thouret et al., 1994).

Tras 15 años de inactividad, la actividad fumarólica se reanudó el 5 de diciembre del 2012 (Moussallam et al., 2017). Sin embargo, las señales más notorias se registraron el 22-23 de febrero del 2013, cuando se produjo un terremoto de 4.6 y 5.2 ML, el enjambre fue seguido por un aumento gradual de la actividad fumarólica y la desgasificación de SO<sub>2</sub>, siendo el 9 y 25 de agosto del 2014, las primeras explosiones freáticas del volcán Sabancaya (Coppola et al., 2022).

Mediante el monitoreo visual desde el 2013, se ha podido tener registro de todos estos procesos, caracterizando las fumarolas y los productos emitidos mediante la cámara térmica. Aunque los instrumentos espaciales brindan una clara ventaja para recopilar datos de forma remota, aún no se pueden igualar al detalle espacial y la resolución de tiempo que se puede obtener al utilizar generadores de imágenes portátiles en tierra (Spampinato et al., 2011).

El mejoramiento de la vigilancia térmica permitirá mejorar la evaluación de peligros y contribuir sustancialmente a comprender una variedad de procesos volcánicos.

## METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este artículo nos basamos en las fases de actividad explosiva del volcán Sabancaya descritas por Coppola et al. (2022), las cuales serán ilustradas con las imágenes térmicas de la cámara SIRH del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET.

### Ubicación de las cámaras ópticas y térmicas:

El monitoreo visual del volcán Sabancaya está conformado por 4 cámaras ópticas en tiempo real (SCOP, SAMP, SHUA, SMUC) y una térmica (SIRH).

La figura 1 nos muestra la ubicación de las cámaras ópticas y térmica, con respecto al volcán Sabancaya, la Tabla 1 nos da más información sobre las características técnicas de las cámaras y el lugar donde están implementadas.



► Fig. 1 - Ubicación de las cámaras ópticas y térmicas del volcán Sabancaya.

#### Tabla 1:

Estaciones de monitoreo y características técnicas de las cámaras de monitoreo del volcán Sabancaya.

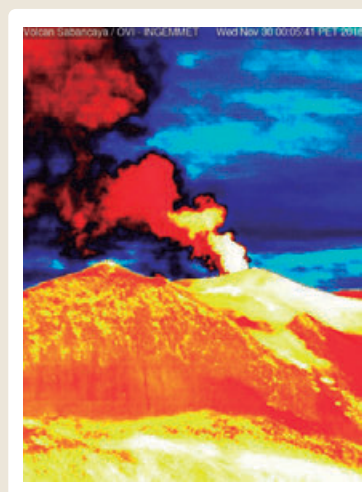
Estación	Cámara	Modelo	Tipo	Ubicación	Transmisión
SIRH	Axis	Q1931-E	Térmica	Hornillos	Tiempo Real
SMUC	Axis	Q1765-LE	Óptica	Muccurca	Tiempo Real
SHUA	Axis	Q1765-LE	Óptica	Domo	Tiempo Real
SAMP	Axis	Q1765-LE	Óptica	Ampato	Tiempo Real
SCOP	Axis	Q1765-LE	Óptica	Coporaque	Tiempo Real

#### Fases eruptivas del volcán Sabancaya:

##### Fase I:

Inicio de la actividad explosiva (noviembre -mediados de diciembre del 2016)

Esta fase se caracterizó por frecuentes explosiones vulcanianas, que alcanzaron una altura de hasta 4.5 km, las emisiones de SO<sub>2</sub> fueron mayores a 2000 ton día (-1). No hubo presencia de domo. A continuación, se muestran las imágenes referentes a este periodo.

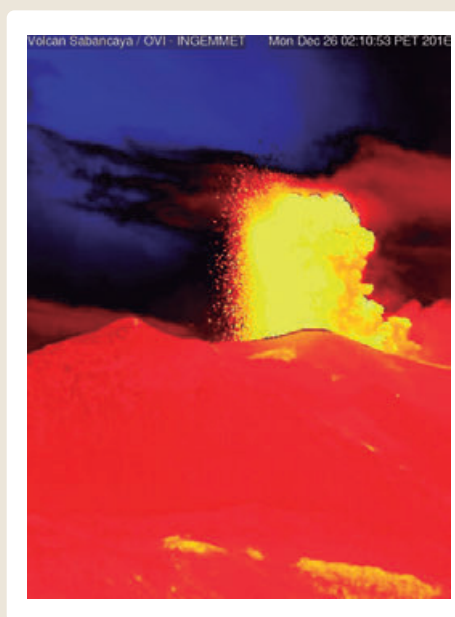


► Fig. 2 - Fase I presencia de explosiones recurrentes detectadas por la cámara SIRH del OVI-INGEMMET.

##### Fase II:

#### Comienzo del crecimiento del domo (diciembre del 2016 a enero del 2018)

Esta fase se caracterizó por un aumento en las anomalías térmicas, y por el crecimiento del domo "Huk" (uno en lenguaje quechua), el cual se pudo evidenciar por la actividad fumarólica con alta cantidad de ceniza y explosiones con proyectiles balísticos.



► Fig. 3 - Fase II explosiones con proyectiles balísticos señalados con la flecha roja.



► Fig. 4 - Explosiones con proyectiles balísticos.

#### Fase III:

#### Actividad explosiva estable, volumen de domo estable (enero de 2018 a marzo del 2019)

Esta fase se caracterizó por una reducción en el número de las explosiones, siendo el único evento notable el aumento de los niveles de SO<sub>2</sub> en julio del 2018. Sin embargo, las anomalías térmicas aún eran altas y persistentes.

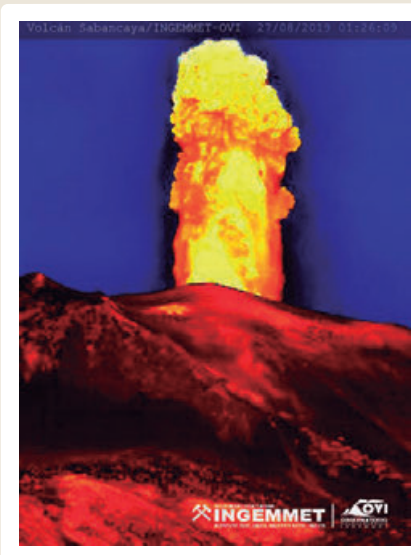


► Fig. 5 - Explosiones con proyectiles balísticos registrado el 24 de agosto del 2018.

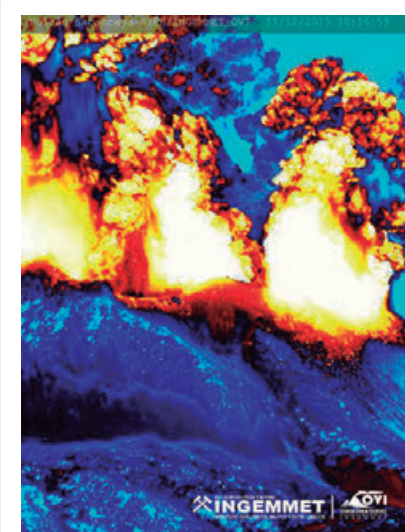
#### Fase IV:

#### Crecimiento del domo (marzo a octubre del 2019)

Esta fase inició en marzo del 2019 y se caracterizó por contener 4 subfases con notorias diferencias. En la primera subfase se dio un crecimiento del domo, con aumento en la energía de las explosiones y flujo de SO<sub>2</sub>. La segunda subfase se caracterizó por un domo estable con baja actividad explosiva, pero con aumento irregular de la desgasificación. La tercera subfase fue similar a la primera fase con actividad explosiva frecuente. En la cuarta subfase el crecimiento del domo fue muy acelerado, con 200 explosiones por día.



► Fig. 6 - Explosión correspondiente a la tercera subfase (IVc).



► Fig. 7 - Flujo piroclástico registrado tipo boiling-over.



**Fase V:****Colapso lento del domo (noviembre del 2019 a septiembre de 2020)**

Se produjo un decrecimiento de la energía de las explosiones, así como de las anomalías térmicas. La superficie del domo entró en una fase de hundimiento. Mediante el monitoreo visual se pudo observar por primera vez la presencia de flujos piroclásticos tipo boiling-over, estos eventos fueron registrados hasta en

6 oportunidades el 11 de diciembre del 2019, este tipo de eventos se asocia con erupciones vulcanianas con magma máfico a intermedio (Lazarte et al., 2019).

**Fase VI:****Nueva fase de crecimiento de domo (septiembre de 2020 a diciembre de 2020)**

Esta fase dio origen al nuevo domo llamado "Iskay". Se registró actividad explosiva y una disminución en el flujo de SO<sub>2</sub>.

**CONCLUSIONES**

El uso de imágenes térmicas complementa el monitoreo multidisciplinario del volcán Sabancaya, permitiendo distinguir las diversas fases eruptivas, así como los procesos de formación de domos de lava.

**AGRADECIMIENTOS**

El uso de imágenes térmicas complementa el monitoreo multidisciplinario del volcán Sabancaya, permitiendo distinguir las diversas fases eruptivas, así como los procesos de formación de domos de lava.

**REFERENCIAS**

- ▶ Bulmer, M., Johnston, A., & Engle, F. (1999). Analysis of Sabancaya volcano, southern Peru using Radarsat and Landsat TM data. Application Development and Research Opportunity (ADRO).
- ▶ Coppola, D., Valade, S., Masias, P., Laiolo, M., Massimetti, F., Campus, A., ... & Valdivia, D. (2022). Shallow magma convection evidenced by excess degassing and thermal radiation during the dome-forming Sabancaya eruption (2012–2020). *Bulletin of Volcanology*, 84(2), 1-19.
- ▶ Lazarte Zerpa, I. A., Sandoval, C., Arnold, K., Manrique Llerena, N., Masías Alvarez, P. J., Choquehuayta, A., ... & Machacca Puma, R. (2019). Informe técnico anual del volcán Sabancaya, periodo 2018. Región Arequipa, provincia Caylloma, distrito Achoma.
- ▶ Moussallam, Y., Tamburello, G., Peters, N., Apaza, F., Schipper, C. I., Curtis, A., ... & Moussallam, M. (2017). Volcanic gas emissions and degassing dynamics at Ubinas and Sabancaya volcanoes; implications for the volatile budget of the central volcanic zone. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 343, 181-191.
- ▶ Spampinato, L., Calvari, S., Oppenheimer, C., & Boschi, E. (2011). Volcano surveillance using infrared cameras. *Earth-Science Reviews*, 106(1-2), 63-91.
- ▶ Thouret, J. C., Guillaude, R. I. C. H. A. R. D., Huaman, D. A. V. I. D., Gourgaud, A. L. A. N., Salas, G., & Chorowicz, J. (1994). L'Activite actuelle du Nevado Sabancaya (sud Perou); reconnaissance geologique et satellitaire, evaluation et cartographie des menaces volcaniques. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 165(1), 49-63.

# Actualización de mapas de Amenaza por flujos de lava del volcán de Pacaya, San Vicente Pacaya, utilizando modelos de procesos físicos y validación de campo

Carla Chun<sup>1</sup>, Rüdiger Escobar-Wolf<sup>2</sup>, Gustavo Chigna<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Servicio Vulcanológico de Guatemala, Universidad Mariano Gálvez - carla.chun@umg.edu.gt

<sup>2</sup>Ingeniería y Ciencias Geológicas y de Minas, Universidad Tecnológica de Michigan

<sup>3</sup>Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología-INSIVUMEH

**Palabras clave:** flujos de lava, focos eruptivos, amenaza volcánica

Guatemala es un país con una gran diversidad geológica, al sur del país se encuentra la zona de subducción lo que origina una cadena volcánica. En la actualidad se reconocen 25 volcanes activos de los cuales 3 poseen actividad constante y largos periodos eruptivos. Los volcanes Santiaguito, Fuego y Pacaya debido a la actividad que poseen han sido monitorizados y estudiados por varios años, esto nos permite entender tanto los procesos eruptivos, como amenazas potenciales de cada uno de estos.

El volcán de Pacaya ha presentado largos periodos eruptivos que corresponden a una actividad efusiva y explosiones estrombolianas desde 1961. Los flujos de lava alcanzan diferentes longitudes y salen a la superficie en diferentes puntos, algunos cercanos al cono Mackenney.

La introducción de nuevas técnicas de mapeo geológico y la implementación de simulaciones para determinar zonas que pueden estar expuestas a amenazas volcánicas, son de gran aporte para el desarrollo de las comunidades que se encuentran ubicadas en los alrededores de los volcanes, los mapas de amenazas volcánicas, son de gran utilidad para el ordenamiento territorial. El objetivo principal de esta investigación es actualizar los mapas de amenaza volcánica por flujos de lava del volcán de Pacaya.

La metodología desarrollada para esta investigación se llevó a través de 4 etapas, estas enfocadas en el objetivo principal, la elaboración de escenarios de amenaza por flujos de lava, estas son: recopilación de información histórica de la actividad volcánica, reconocimiento de campo de los flujos de lava, análisis de imágenes satelitales y elaboración de

simulaciones, análisis de escenarios y elaboración del mapa final.

El volcán de Pacaya ha mantenido periodos eruptivos en gran parte del complejo, desde el año 1961 la zona más activa es el cráter Mackenney y sus alrededores. En esta zona se han originado flujos de lava que se han extendido hasta 5.5 km, la mayoría de focos eruptivos por donde fluye lava se han localizado al noroeste, sin embargo, existen focos eruptivos que se localizan hasta 2 km del cráter en dirección sur-suroeste.

Los flujos de lava principalmente son de tipo 'a', lavas viscosas que poseen una composición basáltica, baja vesicularidad, textura rugosa y son de aspecto áspero, como se observa en la figura 1. Poseen una matriz vítrea con porcentajes de plagioclasas del 3-40% y olivinos menores al 10%. Debido a que los flujos de



► Fig. 1 - Identificación de depósitos de flujos de lava de tipo 'A' 'A', ubicados en la parte sur-suroeste del volcán de Pacaya. Fuente: Investigación de campo. Año 2019.

lava se encuentran depositados sobre lavas más antiguas, es difícil caracterizar cada flujo de lava, también algunos fueron muy cortos en longitud, por lo que en campo ya no se distinguen de otras unidades.

Desde el año 1961 se comienza un registro de flujos de lava basálticos que alcanzaron aproximadamente 5.5 km, y estos se originaron en focos (vents) que se localizaban en la parte Sur del volcán. Durante los siguientes años, se identificaron 510 flujos de lava, los cuales alcanzaron diversas longitudes y poseen características diversas, la orientación preferencial de estos es norte, noroeste, oeste y suroeste.

Los flujos de lava del volcán de Pacaya tienen longitudes diversas, el análisis de 1961 al año 2019 muestra que: el 68% de los flujos de lava posee longitudes que van de 1 a 500 metros de longitud, el 31% longitudes que van desde 501 m hasta 3 km y el 1% van de 3,01 km hasta 5,5 km. Datos históricos de flujos de lava ocurridos antes de 1961 alcanzaron distancias de 7 y 10 km.

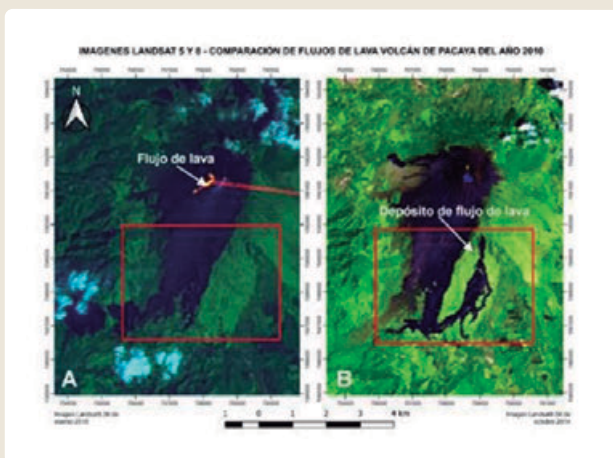
Las erupciones que recientemente han sido significativas de acuerdo a la amenaza que representan son: el flujo de lava del año 2010 que se originó en focos localizados a 1,5 km del cráter Mackeney en dirección Sur y se extendió 5,5 km al Suroeste. El flujo de lava de 2014 que se originó en las

cercanías del cráter Mackeney y se extendió en el flanco noroeste alcanzando una longitud de 3 km.

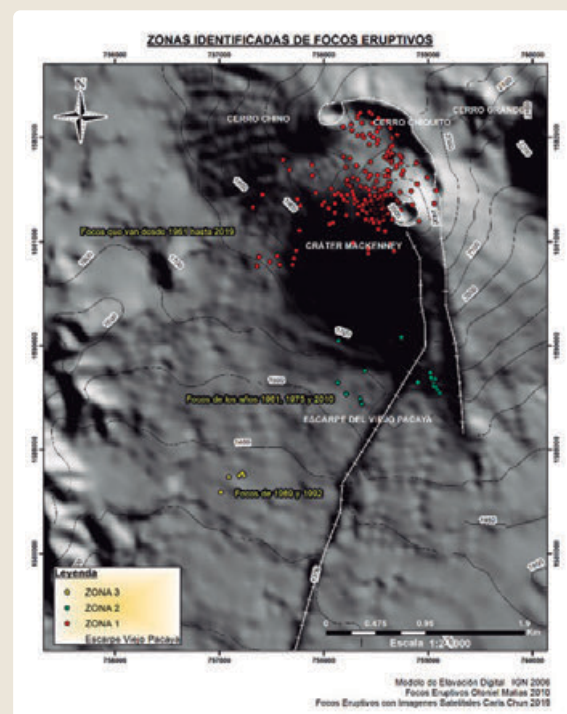
Con el análisis de imágenes satelitales (fig.2) se identificaron 284 focos eruptivos y 262 flujos de lava, registros que permitieron simular junto con el conteo y el recuento de flujos de lava de Otoniel Matias (2010), de 364 focos eruptivos y 248 flujos de lava, la totalidad de 648 focos eruptivos y 510 flujos de lava.

Se identificaron 3 zonas de ocurrencia de focos eruptivos, la zona de mayor frecuencia con 623 focos identificados se encuentra en el flanco Oeste-Noroeste entre el Cerro Chino y Cono Mackeney, debido al agrietamiento y debilidad que persisten en esta área.

La zona con una mediana probabilidad de ocurrencia con 20 focos al sur del Cono Mackeney, donde los focos eruptivos han surgido debido a la zona de debilidad por el escarpe del antiguo Pacaya. Con 5 focos eruptivos identificados en la zona con menor probabilidad de ocurrencia es el flanco suroeste como se observa en la figura 3.



► Fig. 2 – Comparación de imágenes satelitales para observar los cambios geomorfológicos de la zona por flujos de lava. Fuente: Investigación de campo. Año 2019.



► Fig. 3 – Zonas de identificación de focos eruptivos por de acuerdo a la ubicación y años Fuente: Investigación de campo. Año 2019.



El análisis de las simulaciones muestra la posible trayectoria de flujos de lava, estos pueden ser comparados con los flujos de lava que se observaron en las imágenes satelitales y depósitos de flujos de lava históricos.

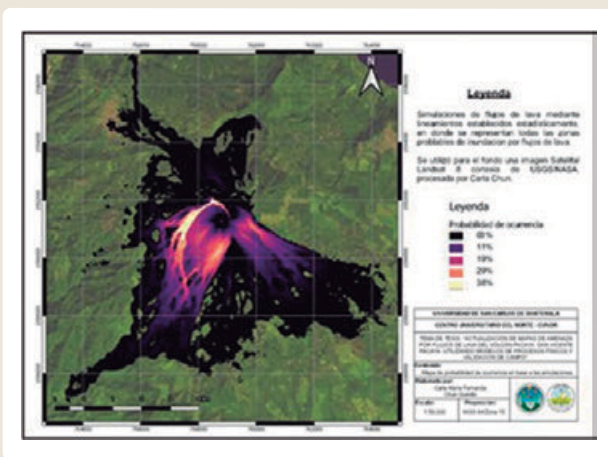
Q-LAVHA y DOWNFLOW son herramientas que ayudan a identificar las posibles zonas que pueden ser afectadas por flujos de lava, Q-LAVHA muestra zonas de inundación y trayectoria de flujos de lava, y DOWNFLOW la trayectoria de flujos de lava.

Para la elaboración de las simulaciones se definieron 29 lineamientos, establecidos de acuerdo a la localización de los focos eruptivos y la zona del escarpe, zona en donde se localiza agrietamiento y la mayoría de focos eruptivos. En cada corrida se simularon 1,500 flujos de lava para cada longitud. El resultado de esto fueron 435,000 flujos de lava, distribuidos en 290 archivos ascii. La agrupación de estos datos se realizó en base a la longitud, es decir se agruparon los resultados de las simulaciones de 100, 300, 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5500, 7000 y 10000 metros, como se observa el ejemplo en la figura 4.

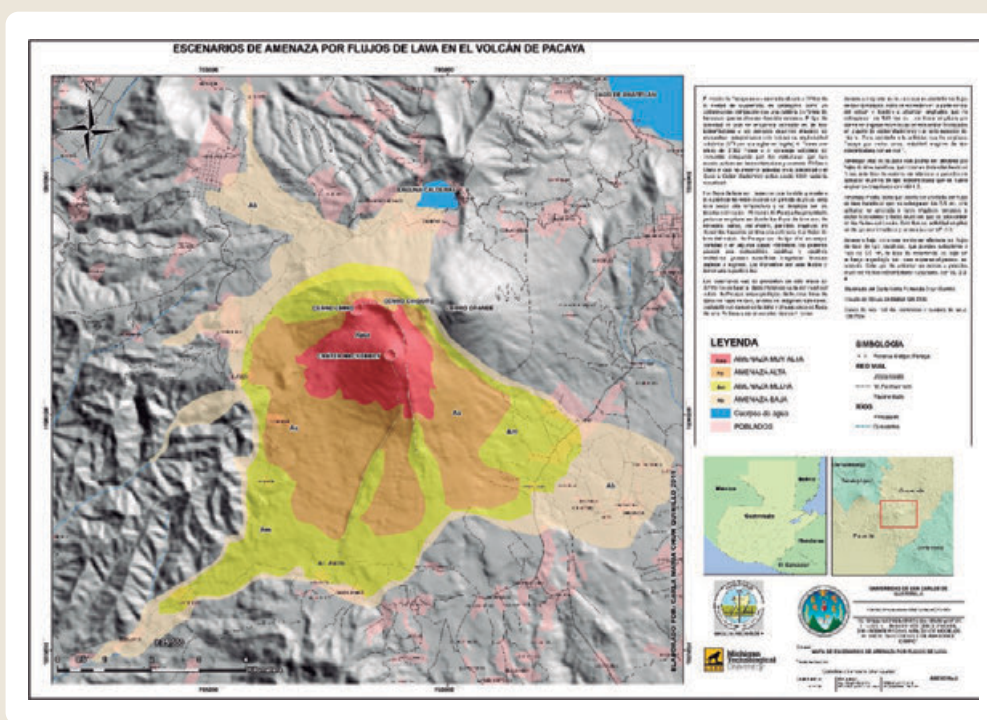
La probabilidad de ocurrencia y de afectación en los alrededores volcán varía de acuerdo al sector y distancia, por lo que se describieron en 5 posibles zonas a través de simulaciones: el 38% de probabilidad de ocurrencia se da en zonas entre el Cono Mackenney y el flanco sur, esto se debe a la pendiente que posee y a las zonas de fracturamiento que se originan entre el Cerro Chino y el Cono Mackenney; El 29% de probabilidad se encuentra en las faldas del volcán, principalmente en los flancos suroeste y sureste; el 19 % se localiza en la parte del Cerro Chino y el Cono Mackenney hasta la parte suroeste-sureste del volcán, alcanzando una mayor trayectoria; el 11% se encuentra localizado en sectores al sur del volcán principalmente causando afectación en las comunidades de este flanco; y el 3% se encuentra localizada en zonas lejanas mayores a los 7 km del cono en donde la probabilidad es baja pero la afectación podría ser alta.

Dando como resultado 4 escenarios, los cuales son: Amenaza muy alta, amenaza alta, amenaza media y amenaza baja. Estos escenarios de amenaza volcánica por flujos de lava en el volcán de Pacaya fueron definidos por factores como la longitud mínima (m) y máxima (km), por la cantidad de flujos de lava por año y por la probabilidad de ocurrencia.

Los 4 escenarios de amenaza volcánica por flujos de lava se definieron con base en la probabilidad de flujos de lava, el índice de explosividad volcánica y el impacto a las comunidades, como se observa en la figura 5. La amenaza muy alta afecta zonas cercanas al Cono Mackenney, el grado de exposición es para los turistas y guías del parque nacional. La zona de alta amenaza afecta a comunidades como El Caracol y El Rodeo. Las comunidades afectadas por la amenaza media son El Rabón, Las Chilcas, El Chupadero, San Antonio, El Rodeo y El Caracol. La zona de baja amenaza (menor probabilidad de ocurrencia) afectaría San Vicente Pacaya, El Cedro, San Francisco de Sales, Calderas, Colombia, Monte Redondo, San Antonio, Las Lajitas, Buenos Aires, El Balsamo, El Rodeo, El Patrocino entre otras.



► Fig. 4 – Zonas de probabilidad de ocurrencia de flujos de lava establecidas a través de simulaciones. Fuente: Investigación de campo. Año 2019.



► Fig. 5 – Mapa de escenarios por flujos de lava del volcán de Pacaya, muestra las 4 zonas identificadas como: Muy alta amenaza, alta amenaza, moderada amenaza y baja amenaza. Fuente: Investigación de campo. Año 2019.

**AGRADECIMIENTOS**

Al señor Gustavo Chigna por todo el conocimiento brindado, por las largas caminatas de campo y sobre todo por su amistad, que cada paso que dé sea guiando a más aprendices como yo.

Al personal de INSIVUMEH por brindarme palabras de aliento, pero sobre todo por las grandes enseñanzas, motivación y apoyo.

Al Doctor Rüdiger Escobar, por su amistad, aprendizaje y paciencia brindada. Especialmente por ser un gran ejemplo para Guatemala por todo el aporte científico.

Al Doctor Otoniel Matías (†) por ser un gran ejemplo de humildad y sabiduría, reconociendo el aporte científico y geológico que hizo por el país.

**REFERENCIAS**

- Agencia Internacional de Cooperación Japonesa -JICA-. (2003). Estudio del establecimiento de los mapas básicos de amenaza para el sistema de información geográfica de la República de Guatemala. Guatemala, Guatemala: INSIVUMEH., 2003.
- Banks, N.G.(1986). Preliminary evaluation of volcanic hazards of Pacaya Volcano. Guatemala: Unpubl Report.
- Bartolini, S., Capello, A., Martí, J. & Del Negro, C. (2013). QVAST: a new Quantum GIS plugin for estimating volcanic susceptibility. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 13, 3031-3042. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-303-2013>.

- ▶ Bollasina, A. J. (2014). The may 2010 eruption of Pacaya volcano, Guatemala: An experimental study of subliquidus magma rheology.[Tesis de maestría]University of Missouri-Columbia, United States of America.
- ▶ Bonne, K., Kervyn, M., Cascone, L., Njome, S., Van Ranst, S., Suh, E. Ayonghe, J. & Ernst, G. (2008). A new approach to assess longterm lava flow hazard and risk using GIS and low-cost remote sensing: the case of Mount Cameroon, West Africa. *Int. J. Remote Sens.* 29, 6537-6562. <https://doi.org/10.1080/01431160802167873>
- ▶ Damiani, M.L., Groppelli, G., Norini, G., Bertino, E., Gigliuto, A. & Nucita, A. (2006). A lava flow simulation model for the development of volcanic hazard maps for Mount Etna Italy. *Comput. Geosci.* 32. 512-526.
- ▶ Favalli, M., Pareschi, M., Neri, A. Forecasting lava flow paths by a stochastic approach. Pisa, Italy: Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, 2005.
- ▶ Et. Al. "Topographic control on lava flow paths at Mount Etna, Italy: Implications for hazard assessment". *J. Geophys. Res.* 114, 3. (marzo, 2009). 27-39.
- ▶ Geneviève, Robert Et. Al. "The effect of water on the viscosity of a synthetic calc-alkaline basaltic andesite". *Chemical Geology.* 346, 11. (mayo, 2013): 135-148.
- ▶ Harris, Andrew J., and S. Rowland. "FLOWGO: a kinematic thermo-rheological model for lava flowing in a channel". *Bulletin of Vulcanology.* 63, 1. (mayo 2001): 20-44.
- ▶ Et. Al. "Simulating the thermorheological evolution of channel-contained lava: FLOWGO and its implementation in EXCEL". *Geological Society*, 426. 1. (junio, 2016): 36-69.
- ▶ Kitamura, Shigeru, and Otoniel Matías. Tephra stratigraphic approach to the eruptive history of Pacaya volcano, Guatemala. Sendai, Japan: The Science Reports of the Tohoku University, 1995.
- ▶ Matías, O. Et. Al. Notes on a map of the 1961-2010 eruptions of volcano de Pacaya, Guatemala. Houghton, Michigan, Estados Unidos de America: Michigan Technological University, 2010.
- ▶ Morgan, A, Et. Al. "Lava discharge rate estimates from thermal infrared satellite data for Pacaya Volcano during 2004-2010". *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* 264. (agosto, 2013): 1-11.
- ▶ Soldati, A., Et. Al. "Field and experimental constraints on the rheology of arc basaltic lavas: The January 2014 Eruption of Pacaya Guatemala" *Bulletin of Volcanology.* 78, 43. (junio, 2016): 1-19.
- ▶ Tarquini, Simone, and Massimiliano Favalli. Mapping and downflow simulation of recent lava flow fields at Mount Etna. Italy: Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, 2011.
- ▶ Wardman, Johnny, Et. Al. Impact assessment of the May 2010 eruption of Pacaya volcano, Guatemala. Nueva Zelanda: University of Canterbury, 2012.



# Influencia de la geología de la corteza en el emplazamiento y propagación de intrusiones magmáticas y en las señales de deformación en superficie

Matías Clunes<sup>1</sup>, John Browning<sup>1,2,3</sup>, Carlos Marquardt<sup>3</sup>, Kyriaky Drymoni<sup>4</sup>, Agust Gudmundsson<sup>5</sup>, Janine Kavanagh<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile - mclunes@uc.cl

<sup>2</sup> Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA), Universidad de Chile, Santiago, Chile

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería en Minería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

<sup>4</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra y Medioambiente, Università degli Studi di Milano-Bicocca, Milán, Italia

<sup>5</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra, Royal Holloway University of London, Londres, Reino Unido

<sup>6</sup> Escuela de Ciencias Medioambientales, University of Liverpool, Liverpool, Reino Unido

**Palabras clave:** deformación, volcanes, magmatismo

## INTRODUCCIÓN

Para que se formen cámaras magmáticas o para que ocurran erupciones volcánicas, el magma debe propagarse a través de la corteza en forma de diques, intrusiones inclinadas o sills. La mayoría de los modelos que investigan las trayectorias del magma asumen que la corteza es homogénea (Kiyoo, 1958); Okada y Yamamoto, 1991) o estratificada horizontalmente, a menudo compuesta por rocas con contrastes en sus propiedades mecánicas (e.g., Masterlark, 2007). En regiones que han experimentado orogénesis, como en Los Andes, la corteza que constituye el basamento de los volcanes ha sido deformada durante millones de años, resultando en capas de roca plegadas y con fuerte inclinación. Incluso en ambientes extensionales, las capas de roca que componen la corteza presentan cierta inclinación, aunque a un menor ángulo. Esta característica también se puede observar en edificios volcánicos, como los estratovolcanes, formados por capas de depósitos con pendientes de hasta 40°, o en calderas por la acción de fallas. La suposición de propiedades homogéneas o estratificación horizontal, entonces, no comprende todas las potenciales interacciones entre el magma y la corteza. De manera adicional, estos procesos pueden generar cambios en la cantidad y el estilo de deformación en superficie registradas durante episodios de actividad volcánica, con relevantes implicancias para el monitoreo volcánico y las interpretaciones realizadas sobre las características de la fuente de la deformación.

## METODOLOGÍA

En nuestra investigación (Clunes et al., 2021; Clunes et al., 2022) combinamos observaciones de terreno de intrusiones emplazadas en secuencias de roca inclinadas a distintos ángulos con modelos numéricos a través de la metodología de los Elementos Finitos (FEM) en el software COMSOL Multiphysics 5.4 para explorar las interacciones entre capas de roca inclinadas, trayectorias del magma y la deformación en superficie asociada a dichas intrusiones. Las intrusiones son modeladas como cavidades elípticas con dimensiones obtenidas a partir de observaciones de terreno y una presión  $P_0$  (overpressure) asignada de 5 MPa. Dichas cavidades están emplazadas en un dominio computacional con comportamiento elástico, en el que se simulan las geometrías corticales y sus propiedades mecánicas (Módulo de Young y coeficiente de Poisson). El tamaño del dominio modelado debe ser lo suficientemente grande para evitar efectos de borde. El borde superior del dominio, equivalente a la superficie terrestre, es modelado como una superficie libre, mientras que los otros bordes se consideran fijos, para evitar traslaciones y rotaciones durante el modelamiento.

## Sill El Juncal

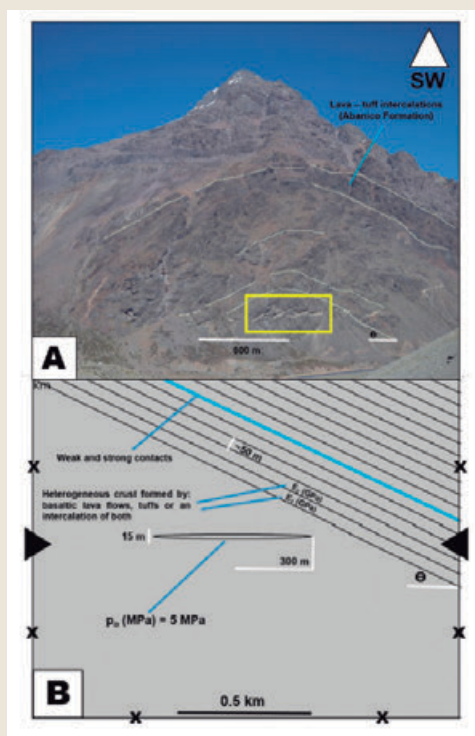
En primer lugar, realizamos modelos FEM con datos de terreno de un sill riódacítico emplazado en el núcleo de un pliegue anticlinal en Los Andes de Chile Central (Fig. 1), en rocas volcánicas y volcanoclásticas de la Formación banico del Eoceno-Mioceno (Piquer et

al., 2015) (Cooke et al., 2019). La geometría de la intrusión en forma de segmentos en "echelon" ha sido interpretada previamente como una serie de estructuras dilatacionales generadas por procesos tectónicos durante la intrusión, asociadas a la actividad de la falla Alto del Juncal (Piquer et al., 2015). Montecinos et al. (2008) obtuvo una edad U-Pb en circón de  $11.53 \pm 0.19$  Ma en intrusiones similares ubicadas al noreste. El acortamiento observado en la Cordillera Principal de Los Andes de Chile Central entre el Oligoceno-Mioceno Temprano, hace 25-22 Ma y continúa hasta el presente (Charrier et al., 2002; Carrizo & Herrera, 2019; Piquer et al., 2019; Cooke et al., 2021).

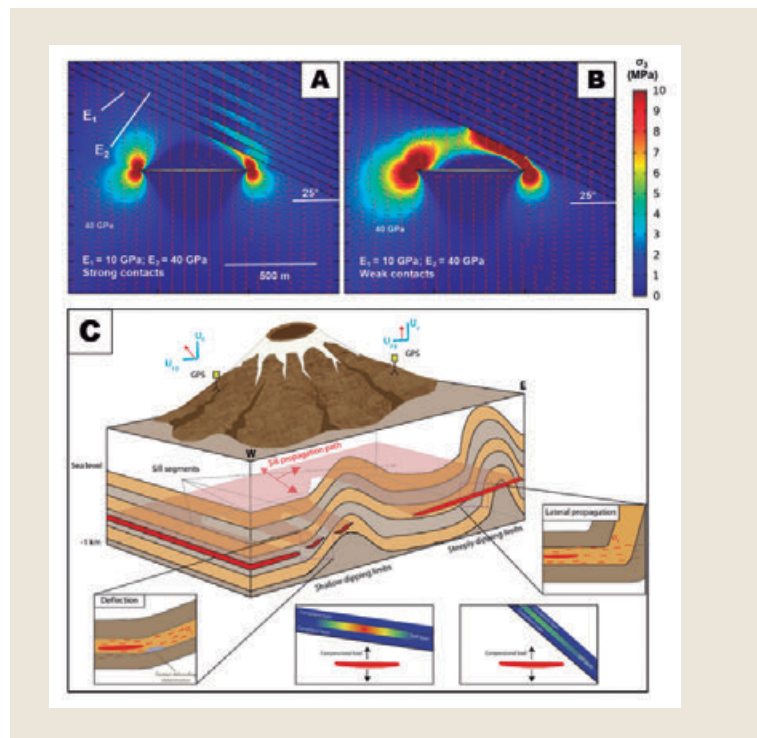
Los resultados de los modelos muestran que, tanto las propiedades mecánicas de las capas que conforman la roca caja, como las de los contactos entre ellas y su geometría, juegan un rol importante en la propagación y emplazamiento de magma a niveles

superficiales (Fig. 2). La propagación y emplazamiento de sills en segmentos corticales heterogéneos y anisotrópicos modifican el campo de esfuerzos, promoviendo la propagación lateral, el cese de la propagación o generando cambios en la dirección de propagación de la intrusión.

Específicamente, observamos que los sills presentan mayor tendencia a cambiar su dirección de propagación al encontrarse en su trayectoria con capas de roca inclinadas a bajos ángulos, respecto de lo que ocurre con rocas inclinadas a altos ángulos. Los contactos entre las capas de roca mecánicamente débiles, por su parte, favorecen el cambio de la dirección de propagación debido a la rotación de esfuerzos, efecto que es atenuado cuando las capas de roca están inclinadas a mayores ángulos.



► Fig. 1 - A) Sill riódacítico emplazado en el núcleo de un pliegue anticlinal formado por una intercalación de lavas basálticas a andesíticas y tobas en la localidad de El Juncal. B) Configuración del modelo FEM 2D generado en COMSOL Multiphysics, donde  $\theta$  representa la inclinación del limbo del pliegue.



► Fig. 2 - Figura A) y B) Modelos FEM de esfuerzos alrededor del sill cerca de una secuencia de rocas heterogénea ( $E_1 < E_2$ ) e inclinadas a  $25^\circ$  alejándose de la intrusión. Las flechas rojas indican las trayectorias del esfuerzo principal mayor ( $\sigma_1$ ) y los contornos de colores, el esfuerzo principal menor ( $\sigma_3$ ) o tensión máxima. En A) los contactos entre las capas son modelados como resistentes mecánicamente, mientras que en B) como débiles. C) Esquema de las posibles trayectorias de propagación de un sill y los mecanismos asociados, emplazado en una corteza plegada que subyace a un volcán activo.

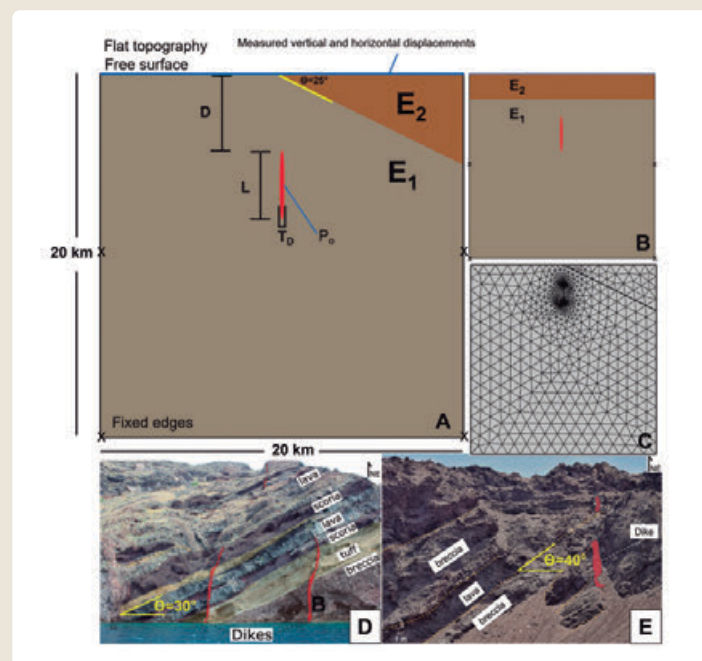
Estas observaciones demuestran que, para generar las geometrías observadas en el sill de El Juncal, no se requieren complejas estructuras de cizalle generadas por procesos tectónicos, sino que se pueden explicar a través de las interacciones de la intrusión con la roca caja. Lo anterior también resuelve un problema de escala temporal que conlleva la interpretación "sintectónica" del origen de las geometrías observadas en sill de El Juncal, puesto que la deformación relacionada al plegamiento ocurre durante miles o millones de años, mientras que el enfriamiento de diques o sills toman del orden de meses a años (Carslaw y Jaeger, 1959; Gudmundsson, 2020).

### Deformación en superficie

Una vez establecida la influencia de las capas inclinadas y sus propiedades mecánicas en la propagación y emplazamiento del magma, evaluamos las implicancias de estas interacciones en la deformación superficial generada durante periodos de actividad volcánica. Para este efecto, basándonos en observaciones de terreno, simulamos distintos

escenarios de diques emplazados en secuencias de rocas heterogéneas inclinadas a diferentes ángulos en modelos FEM (Fig. 3), con el objetivo de comparar las deformaciones generadas en superficie, tanto verticales (Fig. 4), como horizontales (Fig. 5) con aquellas observadas bajo el supuesto de una corteza homogénea o estratificada horizontalmente.

Nuestros resultados muestran que la inclinación de las capas de roca de la corteza puede producir localmente deformaciones en superficie que pueden ser hasta 30 veces mayores que las observadas en modelos que consideran una corteza homogénea, dependiendo del ángulo de inclinación de las capas y del contraste de rigidez (stiffness) entre las rocas que hospedan a la intrusión y las que son adyacentes a ella (Fig. 6). Observamos, además, que las señales de deformación resultantes exhiben máximos ubicados hasta 1.4 km de distancia de los esperados en modelos homogéneos y con patrones asimétricos, similares a aquellos observados en modelos numéricos y análogos durante intrusiones inclinadas (Kavanagh et al., 2018; Bazargan y Gudmundsson, 2020).

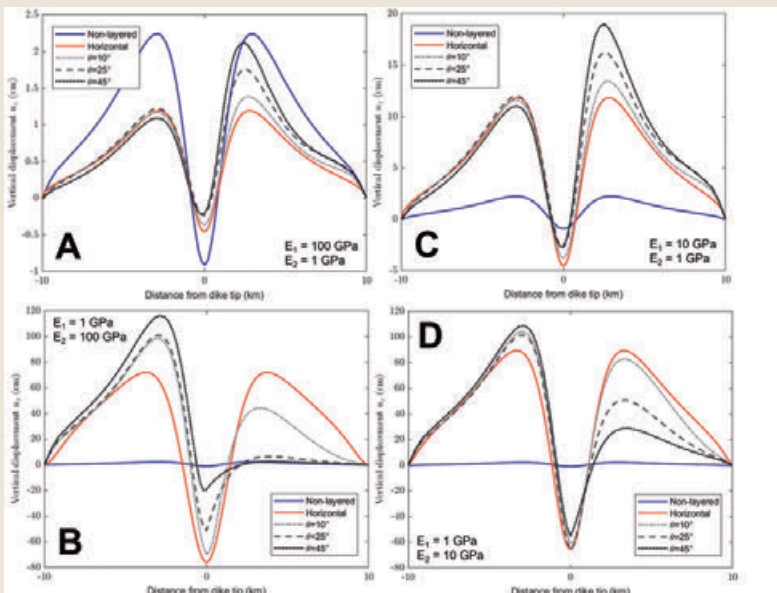


► Fig. 3 – A) Configuración de los modelos FEM para las distintas inclinaciones testeadas (L: longitud del dique, TD: espesor del dique, D: profundidad del extremo superior del dique, Po: sobrepresurización magmática u overpressure,  $\theta$ : inclinación de la capa superior, E1-E2: variación del Módulo de Young de las capas. B) Configuración del modelo FEM estratificado horizontalmente. C) Ejemplo del mallado del modelamiento para la capa superior inclinada 25°. D) y E) Fotografías de terreno de diques emplazados en unidades de roca inclinadas a distintos ángulos, de la caldera en Santorini (D) y la Formación Farellones en Los Andes de Chile Central (E).

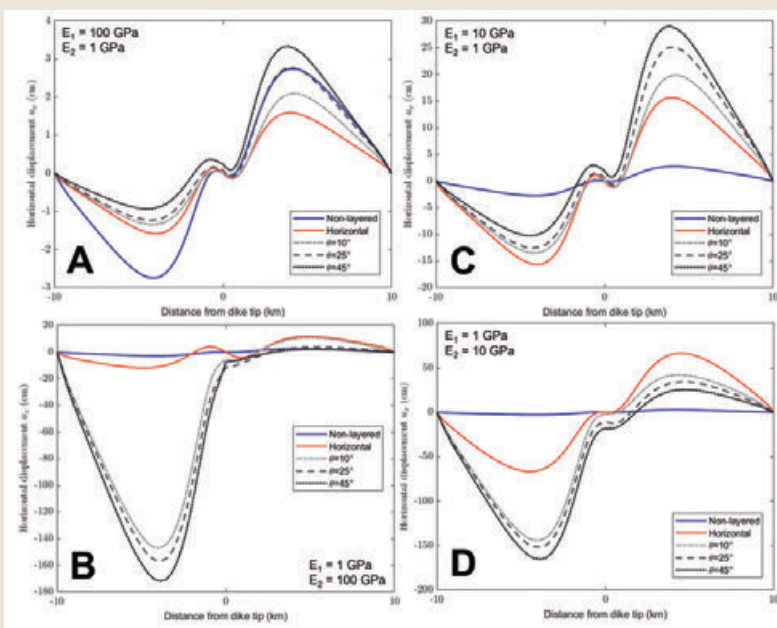


**CONCLUSIONES**

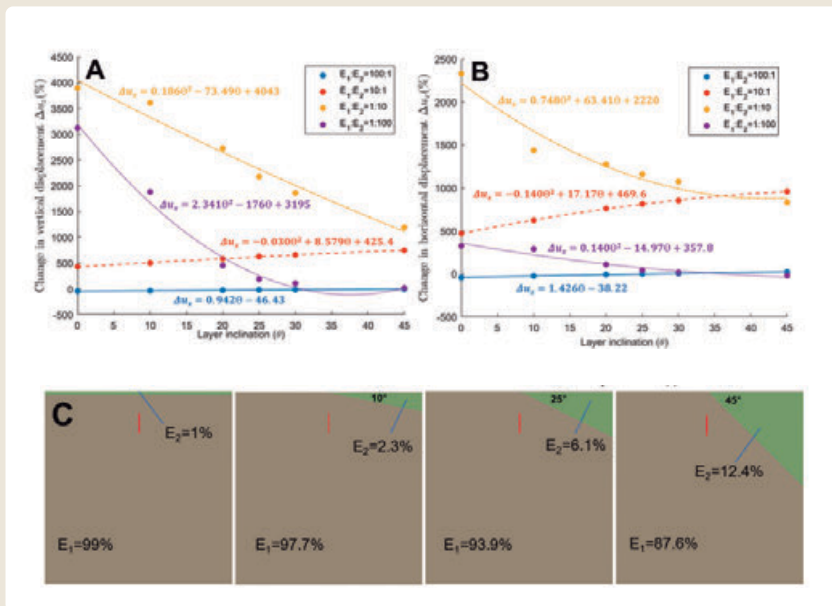
Nuestras observaciones destacan la importancia de considerar la geometría y las propiedades mecánicas de las rocas en las cuales el magma intruye durante el modelamiento de procesos magmáticos, puesto que influyen considerablemente en los procesos de propagación y emplazamiento del magma, controlando las trayectorias y la geometría resultante. Así como también en las señales de deformación observadas en superficie, las que pueden ser similares para intrusiones verticales o inclinadas, dependiendo de la presencia de rocas inclinadas con contrastes de rigidez en la corteza a través de la cual el magma se propaga. Los resultados aquí expuestos demuestran que para cualquier estudio que busque invertir las deformaciones observadas en superficie para determinar la geometría y profundidad de la fuente de la deformación, es necesario establecer, de la mejor manera posible, las propiedades mecánicas y la actitud de las unidades de roca que constituyen la geología bajo volcanes activos, especialmente el ángulo de inclinación.



► Fig. 4 – Variaciones en la deformación vertical en superficie ( $u_y$ ) relativas a la distancia lateral desde la intrusión (dique de 2 km de longitud emplazado a 2 km de profundidad) para cada inclinación y contraste de rigidez testados en los modelos FEM.



► Fig. 5 – Variaciones en la deformación horizontal en superficie ( $u_x$ ) relativas a la distancia lateral desde la intrusión (dique de 2 km de longitud emplazado a 2 km de profundidad) para cada inclinación y contraste de rigidez testados en los modelos FEM.



► Fig. 6 – Cambios en los desplazamientos verticales (A) y horizontales (B) en porcentaje respecto de los modelos que asumen una corteza homogénea, para cada inclinación ( $\theta$ ) y contraste de rigidez testeados ( $E_1:E_2$ )

## REFERENCIAS

- Bazargan, M., & Gudmundsson, A. (2020). Stresses and displacements in layered rocks induced by inclined (cone) sheets. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 401, 106965.
- Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of heat in solids*, Clarendon.
- Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J. J., Gans, P., Kay, S. M., ... & Zurita, E. (2002). Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33–36°S). *Journal of South American Earth Sciences*, 15(1), 117-139.
- Clunes, M., Browning, J., Cembrano, J., Marquardt, C., & Gudmundsson, A. (2021). Crustal folds alter local stress fields as demonstrated by magma sheet–Fold interactions in the Central Andes. *Earth and Planetary Science Letters*, 570, 117080.
- Clunes, M., Browning, J., Marquardt, C., Cortez, J., Drymoni, K., & Kavanagh, J. L. (2022). Inclination and heterogeneity of layered geological sequences influence dike-induced ground deformation.
- Gudmundsson, A. (2020). *Volcanotectonics: Understanding the structure, deformation and dynamics of volcanoes*. Cambridge University Press.
- Kavanagh, J. L., Burns, A. J., Hazim, S. H., Wood, E. P., Martin, S. A., Hignett, S., & Dennis, D. J. (2018). Modelos desafiantes de ascenso de diques utilizando experimentos de laboratorio novedosos: Implicaciones para reinterpretar evidencia de ascenso de magma y vulcanismo. *Revista de Vulcanología e Investigación Geotérmica*, 354, 87-101.
- Masterlark, T. (2007). Magma intrusion and deformation predictions: Sensitivities to the Mogi assumptions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B6).

- ▶ Kiyoo, M. O. G. I. (1958). Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. *Earthq Res Inst*, 36, 99-134.
- ▶ Montecinos, P., Schärer, U., Vergara, M., & Aguirre, L. (2008). Lithospheric origin of Oligocene-Miocene magmatism in Central Chile: U-Pb ages and Sr-Pb-Hf isotope composition of minerals. *Journal of Petrology*, 49(3), 555-580.
- ▶ Okada, Y., & Yamamoto, E. (1991). Dyke intrusion model for the 1989 seismovolcanic activity off Ito, central Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B6), 10361-10376.
- ▶ Piquer, J., Skarmeta, J., & Cooke, D. R. (2015). Structural evolution of the Rio Blanco-Los Bronces District, Andes of Central Chile: controls on stratigraphy, magmatism, and mineralization. *Economic Geology*, 110(8), 1995-2023.
- ▶ Cooke, D. R., Rivera, O., Piquer, J., & Yáñez, G. (2019). Long-lived crustal damage zones associated with fault intersections in the high Andes of Central Chile. *Andean Geology*, 46(2), 223-239.
- ▶ Piquer, J., Sanchez-Alfaro, P., & Pérez-Flores, P. (2021). A new model for the optimal structural context for giant porphyry copper deposit formation. *Geology*, 49(5), 597-601.
- ▶ Carrizo, G. Y., & Herrera, O. R. (2019). Crustal dense blocks in the fore-arc and arc region of Chilean ranges and their role in the magma ascent and composition: Breaking paradigms in the Andean metallogeny. *Journal of South American Earth Sciences*, 93, 51-66.



# Integrando los métodos geocronológicos y modelamiento probabilístico para el análisis de las amenazas volcánicas: el caso del volcán Galeras

Ruby Alicia Criollo<sup>1</sup>, Gustavo Córdoba Guerrero<sup>2</sup>, Diana Rodríguez<sup>1</sup>, Alejandra Guerrero<sup>1</sup>, Antonio Costa<sup>2</sup> y Jean-Claude Thoure<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Nariño, Colombia- gcordovaguerrero@gmail.com

<sup>2</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Sezione di Bologna, Italy.

<sup>3</sup> Université Clermont- Auvergne, Laboratoire Magmas et Volcans, CNRS, OPGC, IRD, 6 avenue Blaise Pascal, Campus les Cézeaux, 63178 Aubière, France

**Palabras clave:** volcán Galeras, Severidad Ponderada, modelamiento.

## INTRODUCCIÓN

La generación de mapas de amenaza volcánica involucra varios peligros específicos en un solo mapa que los compila en un intento de proporcionar la probabilidad de futuros eventos volcánicos que afecten a lugares, propiedades y personas. Por lo general, los mapas de peligro volcánico se basan en registros geológicos o una combinación de estos últimos con modelos computacionales, pero ambos tienen incertidumbres que deben considerarse. La evaluación probabilística de peligros es considerada como el enfoque más confiable para hacer frente a las incertidumbres inherentes involucradas que permite tener en cuenta el carácter aleatorio de este fenómeno (Sparks et al, 2013). La cantidad de información resultante de un análisis probabilístico de la amenaza se puede compilar de varias maneras; entre ellas, la que involucra la vulnerabilidad de los elementos expuestos, la cual, combinándola con la amenaza probabilista, resulta en mapas de riesgo. Sin embargo, los mapas de amenaza que compilan todas las amenazas volcánicas han venido siendo la herramienta más usada para la toma de decisiones. A menudo, los registros geológicos no pueden proporcionar un número estadísticamente significativo de datos para permitir un análisis probabilístico completo, por lo que se utilizan herramientas estadísticas y de modelado computacional para complementar los registros geológicos, teniendo en cuenta las incertidumbres involucradas.

## METODOLOGÍA

En este trabajo aplicamos para el volcán Galeras un método práctico para abordar el problema de la

evaluación probabilística de peligros volcánicos (PVHA) mediante la compilación de todos los peligros probabilísticos en un solo mapa. Primero, para cada uno de los peligros volcánicos (onda de choque, caídas piroclásticas, proyectiles balísticos, lahares y corrientes de densidad piroclástica o PDCs), realizamos un análisis probabilístico centrado en la probabilidad condicionada a la ocurrencia de cada fenómeno específico, describiendo distribuciones probabilísticas para cada uno dentro de rangos de la magnitud máxima y mínima de cada amenaza. El análisis se realizó por medio de modelamiento, cuyos rangos y condiciones iniciales son dados por la geología y la historia del volcán. Dentro de cada rango, se establece un muestreo estadísticamente significativo de combinaciones de condiciones iniciales, usando la técnica del Muestreo Hipercúbico Latino Ortogonal (OLHS) que hace computacionalmente factible el modelamiento por el reducido número de muestras (del orden de cientos de muestras en lugar de miles como con Monte Carlo). Los resultados del modelamiento se traducen en información raster a ser tratada por un sistema de información geográfica. En este caso usamos el programa de código abierto Grass-Gis.

Todos los eventos fueron modelados sobre un DEM de 3 metros, resultando en una escala menor a 1:5.000. Cada evento amenazante se modeló con un programa en particular. Las corrientes piroclásticas de densidad se modelaron en dos partes y adaptando las ideas de Ogburn y Calder (2017); para lo cual modelamos la parte basal del flujo con Titan2D y la nube acompañante con las líneas de energía; tomando como condiciones iniciales los trabajos previos de Calvache (1990), Hurtado y Cortés (1997). Para

modelar proyectiles balísticos desarrollamos nuestro propio código, teniendo así en cuenta el cambio de densidad de la atmósfera con la altura; las condiciones iniciales necesarias se tomaron de los datos proporcionados por Hurtado y Cortés (1997), Servicio geológico Colombiano (2015). Los piroclastos de caída se modelaron con el programa HAZMAP (Macedonio et al, 2005), tomando como condiciones iniciales la información de Hurtado y Cortés (1997), sgc(2015) e información directamente proporcionada por el Servicio Geológico Colombiano relacionada con registros geológicos del ciclo eruptivo 2008-2018. La onda de choque se modeló tridimensionalmente para tener en cuenta la refracción y reflexión de la onda con la orografía usando el programa OpenFoam; las condiciones iniciales se tomaron a partir de la energía necesaria para tener afectaciones similares a las del ciclo eruptivo de 1925-1927. Los lahares se modelaron usando el programa Titan2F (Córdoba et al, 2018) tomando como condiciones iniciales datos de precipitación y volúmenes de caídas piroclásticas. Seguidamente se desarrollaron scripts para Octave/Matlab que permitieron estimar la probabilidad bayesiana de que se excedan límites de interés para el análisis del riesgo, como por ejemplo presiones dinámicas capaces de afectar personas, estructuras en muros confinados o no, estructuras sismoresistentes, etc.

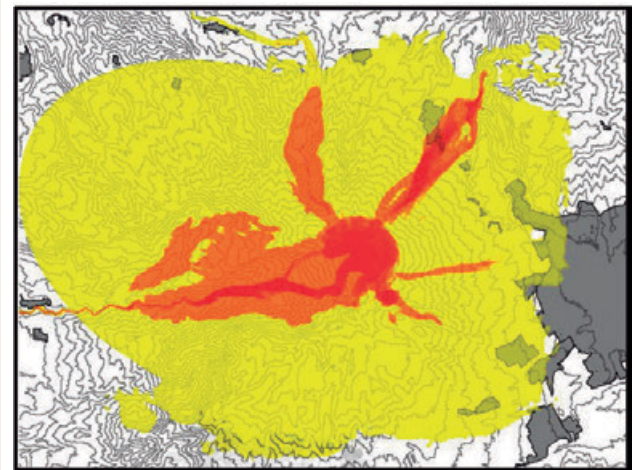
A continuación, se adapta el Método de Severidades Ponderadas (WSM) utilizado en Hurtado y Cortés (1997). Esto se hizo eliminando el supuesto de eventos mutuamente excluyentes para así tener en cuenta los peligros para los cuales faltan registros geológicos, como las ondas de choque. Además, reclasificamos los niveles de severidad para poder tener en cuenta el daño esperado a diferentes niveles de intensidad para cada uno de los peligros. Luego, en cada píxel del modelo de elevación digital, aplicamos el WSM para obtener el nivel de severidad ponderado (WSL) de cada peligro. Siguiendo a Hurtado y Cortés (1997), si  $WSL < 10$ , el nivel de peligro es bajo; si  $10 < WSL < 20$  el peligro medio y si  $WSL > 20$ , el peligro es alto. Como resultado, se presenta un mapa de peligros probabiñíficos para el volcán Galeras que incluye todas sus amenazas volcánicas individuales, incluyendo ondas de choque, proyectiles balísticos, corrientes de densidad piroclástica, caídas

piroclásticas y lahares. Las anteriores operaciones sobre la información en formato raster se realiza usando las capacidades de operar matemáticamente entre mapas que tiene Grass-Gis.

## RESULTADOS

A excepción de los PDCs, para todas las amenazas volcánicas se generaron 128 combinaciones OLHS que resulta en un error de muestreo  $\leq \lceil 10 \rceil^{-4}$ . Con dichas combinaciones como condiciones iniciales, se procedió a modelar, para luego proceder a estimar la probabilidad de excedencia de que el punto de la grilla computacional resulte afectado para magnitudes predefinidas de cada amenaza.

En el caso de PDCs, hay tres incertidumbres principales en su modelado: las coordenadas X e Y, representadas por la distancia radial al cráter, el volumen y la altura de colapso. La combinación de estas tres condiciones se obtiene a través del muestreo OLHS. Los lugares aleatorios de arranque se muestran en la Figura 1 en la cual se miran un anillo y un círculo central. En total se tienen para flujos piroclásticos 640 combinaciones.



► Fig. 1 - Lugares aleatorios de inicio de PDCs. El anillo contiene información de 512 combinaciones OLHS de localización, volumen y altura de colapso. El círculo interior contiene 128 combinaciones

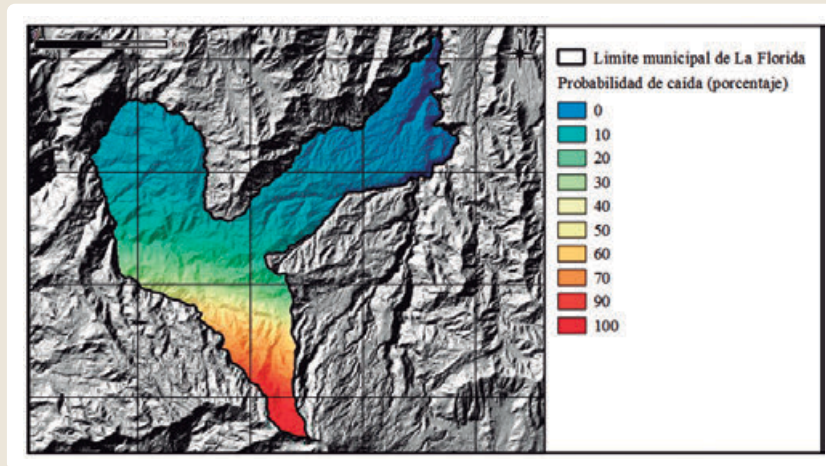
Para la nube acompañante se comparó el coeficiente H/L que resulta de dividir la altura de colapso que corresponde a cada punto de arranque con la distancia

de los puntos de la grilla del DEM. Este valor se compara con los valores dados por Ogburn y Calder (2017), permitiendo conocer si la nube alcanza o no el punto de la grilla.

Para la parte basal, en cada lugar, con sus respectivos valores de volumen y altura de colapso, se realiza el modelamiento con Titan2D, cuyos resultados

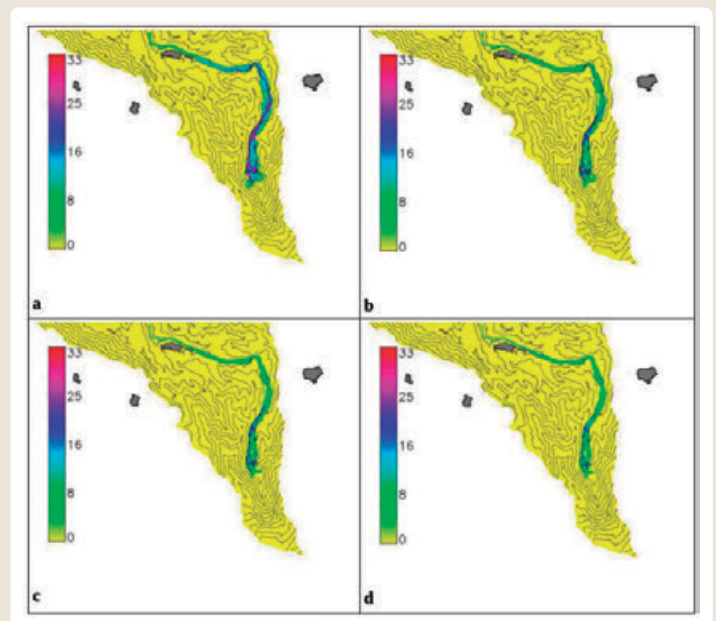
permiten un análisis bayesiano de la probabilidad de que el flujo alcance cualquier punto de la grilla computacional.

La **Figura 2** muestra el resultado de la envolvente de probabilidades de que un lugar cualquiera dentro de la grilla analizada sea alcanzado por PDCs.



► **Fig. 2** – Probabilidad mayor que el 0.01% de que Corrientes de Densidad Piroclástica (PDCs) alcancen el área de influencia del volcán Galeras. La línea roja corresponde a la zona de amenaza alta determinada por el Mapa de Amenazas del Servicio Geológico Colombiano (2015)

En el caso de que la fuente sea única, como el caso de onda de choque, la probabilidad es de tipo frecuencial. La figura 3 muestra la probabilidad de excedencia de 1 kPa, suficiente para romper vidrios y ventanales relativamente pequeños. Se observa como el efecto de reflexiones y refracciones incrementan la presión dinámica, pasando de una dispersión radial a una dispersión mucho más compleja, modulada por la orografía del volcán. Se puede entender con estos resultados el mecanismo mediante el cual la onda de choque ha afectado en repetidas ocasiones a la ciudad de Pasto, rompiendo sus vidrios y derribando personas hacia el lado sur-occidental, hacia donde se dirige el anfiteatro del volcán.

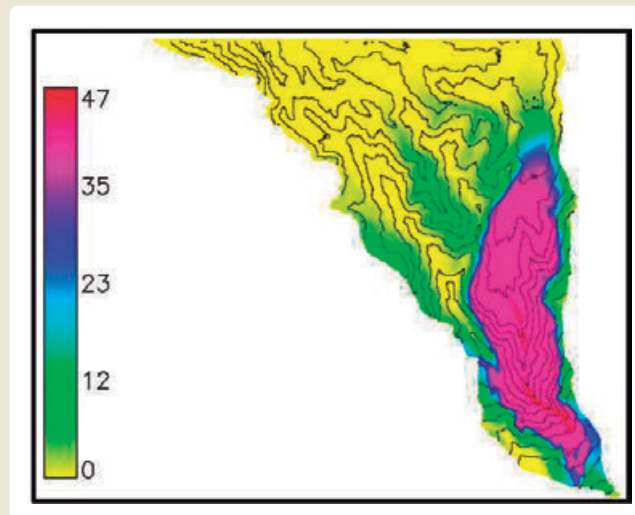


► **Fig. 3** – Probabilidad de excedencia del impacto de una presión dinámica 1 kPa. Nótese la influencia de la orografía del sector, donde reflexiones y refracciones de la onda afectan su propagación.



Finalmente, una vez obtenidos los resultados del análisis probabilista de cada una de las amenazas, y aplicando la técnica de las Severidades Ponderadas (Hurtado y Cortés, 1997) se compilaron en un solo

mapa que muestra tres niveles de Severidad Ponderada (ver Figura 4). En rojo, severidad Alta: en Anaranjado, la severidad media: y en amarillo la severidad Baja.



► Fig. 4 - Mapa de severidades ponderadas a una escala 1:5.000 teniendo en cuenta todas las amenazas del volcán Galeras. En Rojo nivel de severidad ponderada Alto, en Anaranjado nivel medio y en Amarillo nivel Bajo.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se consideraron todos los eventos amenazantes del volcán Galeras, tanto los que han dejado registros geológicos, como flujos piroclásticos, caídas piroclásticas, lahares, y aquellos que, o no dejan registros geológicos, o cuyo encuentro es muy difícil, como la onda de choque y la nube acompañante, oleadas piroclásticas. Por medio del modelamiento numérico fue posible lograr un muestreo estadísticamente significativo que complementó la información geocronológica, haciendo posible obtener un mapa de severidades ponderadas probabilística.

La base topográfica sobre la cual se trabajó, permitió una escala 1:5.000, que en conjunto con las probabilidades obtenidas para cada evento amenazante muestra un avance en el conocimiento de las amenazas del volcán Galeras.

Si bien un mapa de severidades ponderadas no permite una evaluación probabilista del riesgo en términos de costo, si lo permitiría en términos cualitativos; así en caso que se prefiera usar los mapas de amenaza como herramienta en la toma de decisiones, es posible tener en cuenta todas las amenazas con un bajo error en el muestreo.

## AGRADECIMIENTOS

Parte de este trabajo se realizó gracias al Convenio 2017000277 Universidad de Nariño-Municipio de la Florida, y a la Vicerrectoría de Investigaciones e Iteración Social de la Universidad de Nariño, Colombia, investigación 1889 de 2019.

## REFERENCIAS

- ▶ Córdoba, G. A., Sheridan, M. F., & Pitman, B. (2018). Titan2F code for lahar hazard assessment: derivation, validation and verification. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 70(3), 611-631.
- ▶ Hurtado, A. D. and Cortés, G. P. J. (1997). Third version of the hazard map of Galeras Volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 77, 89-100.
- ▶ Ogburn, S. and Calder, E. (2017). The relative effectiveness of empirical and physical models for simulating the dense undercurrent of pyroclastic flows under different emplacement conditions. *Frontiers in Earth Science* 5, 1-23. doi:10.3389/feart.2017.00083
- ▶ sgc (2015). Actualización Del Mapa De Amenaza Volcánica Del Volcán Galeras – Colombia. Tech. rep., Servicio Geológico Colombiano, Pasto, Colombia.
- ▶ Sparks, R., Aspinall, W., Crosweller, H., and Hincks, T. (2013). Risk and uncertainty assessment of volcanic hazards. In *Risk and Uncertainty Assessment for Natural Hazards*, eds. J. Rougier, R. Sparks, and L. J. Hill (Bristol: University of Bristol). 364-397. doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139047562.01>

# Simulación de lahares en las microcuencas del volcán Misti, Arequipa - Perú

Juan Cuno<sup>1</sup>, Kevin Cueva<sup>1</sup>, Jersey Mariño<sup>1</sup>, Carla Arias<sup>1</sup>, Andy Ancalle<sup>1,2</sup>, Yhon Soncco<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geológico Minero y Metalúrgico-INGEMMET, juanjose.cunobayta@gmail.com

<sup>2</sup> Universidad Nacional de San Agustín

**Palabras clave:** volcán Misti, VolcFlow, lahares, mapa de peligros

En la ciudad de Arequipa, las microcuencas alrededor del volcán Misti son las principales fuentes de agua, para la generación de flujos de detritos o lahares, compuestos por agua y sólidos de origen volcánico. Los lahares se producen en épocas de intensas lluvias, donde las aguas colectadas por las microcuencas descienden y se mezclan con depósitos piroclásticos del volcán Misti, que incrementan su volumen, ocasionando inundaciones en la zona urbana de la ciudad de Arequipa.

Debido a la frecuente ocurrencia de estos fenómenos, es necesario conocer las posibles zonas de inundación. Para lograr este objetivo se han recolectado datos de registros geológicos de lahares, eventos de inundación históricos (Fernandez et al., 2001, Vargas et al., 2010), como los ocurridos el 8 de febrero del 2013 (Ettinger et al., 2016, Cacya et al., 2013) y el 8 de febrero de 1989 (Montesinos et al., 2019); así como también características físicas de los depósitos (Lowe et al., 1986; Pierson et al., 1990; Pallares et al., 2015; Vásconez et al., 2017; Thouret et al., 2020), y se ha hecho una delimitación de microcuencas, con el propósito de calcular el contenido de agua necesaria para la generación de lahares.

Los datos recolectados se han utilizado para realizar simulaciones de lahares con VolcFlow (Fig. 1), para identificar las zonas posibles a inundarse en diferentes escenarios de precipitaciones pluviales, en las quebradas El Pato, Pastores y San Lázaro, ubicadas al suroeste del Misti.

Los resultados (Fig. 1), obtenidos de las simulaciones, permitirán la mejora en la delimitación de las zonas de peligro por lahares, como parte de la actualización del mapa de peligros del volcán Misti, en beneficio de la gestión del riesgo volcánico en la ciudad de Arequipa.

## METODOLOGÍA

Las simulaciones se han realizado con el código VolcFlow (Kelfoun et al., 2009), utilizando como datos de entrada: un modelo de elevación digital (DEM) de 4m/píxel, un punto de inicio y un volumen a simular.

El DEM base se ha corregido con puntos de GPS diferencial dentro y fuera de la ciudad de Arequipa. Debido al tiempo que toma realizar cada simulación (3-7 días), se ha transformado el DEM de 4m/píxel, a un DEM de 6m/píxel para el escenario de alto peligro 8 m/píxel, para el escenario moderado peligro y para el escenario de bajo peligro a 10m/píxel.

Los puntos de inicio fueron obtenidos con base en el registro geológico de lahares, que se encuentran en las quebradas del volcán (Mariño et al., 2016; Harpel et al., 2013; Delaite et al., 2005; Thouret et al., 2001), también fueron escogidos los puntos de salida de las microcuencas y quebradas de interés. El volumen total del lahar se ha obtenido, calculando las áreas de las microcuencas que se encuentran en los flancos del volcán Misti, siendo la principal fuente de agua las precipitaciones pluviales que ocurren entre enero y marzo. Los datos hidrológicos se han obtenido de las diferentes estaciones del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

Se ha calculado la precipitación efectiva que generaría la escorrentía (agua que discurriría por el drenaje principal) aplicando el método de las abstracciones (agua infiltrada, retenida por la vegetación o por procesos de evapotranspiración) desarrollado por el Servicio de conservación de suelos de los Estados Unidos (NSCS), dicha precipitación efectiva se ha multiplicado por el área de la cuenca y se ha obtenido el volumen de agua que estaría compuesto.



En cuanto al tipo de lahar, en la ciudad de Arequipa se ha encontrado depósitos en su mayoría flujos hiperconcentrados y en menor cantidad flujos de escombros (Cereceda, 2008; Pallares et al., 2015; Thouret et al., 2020). En tal sentido se han simulado lahares hiperconcentrados asumiendo que el volumen de agua que genera el lahar representa el 60% y los sólidos el 40%.

Para definir los escenarios de alto, moderado y bajo peligro, se consideró la recurrencia de las precipitaciones que han generado lahares en tiempos históricos y modernos, es decir para un escenario de alto peligro son las precipitaciones de 30 mm (más frecuentes), el escenario moderado entre 50 mm y el de bajo peligro con 124.5 mm (menos frecuentes) de precipitación diaria acumulada.

Los volúmenes utilizados para la simulación de lahares, varían en el escenario de alto peligro entre 10000-120000 m<sup>3</sup>; en el de moderado peligro entre 50000-400000 m<sup>3</sup>; y en el de bajo peligro los volúmenes varían entre 80000-1.6 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>.

## RESULTADOS

La aplicación del método de las abstracciones ha permitido calcular el volumen de agua involucrado para la generación de flujo de detritos o lahares, cabe

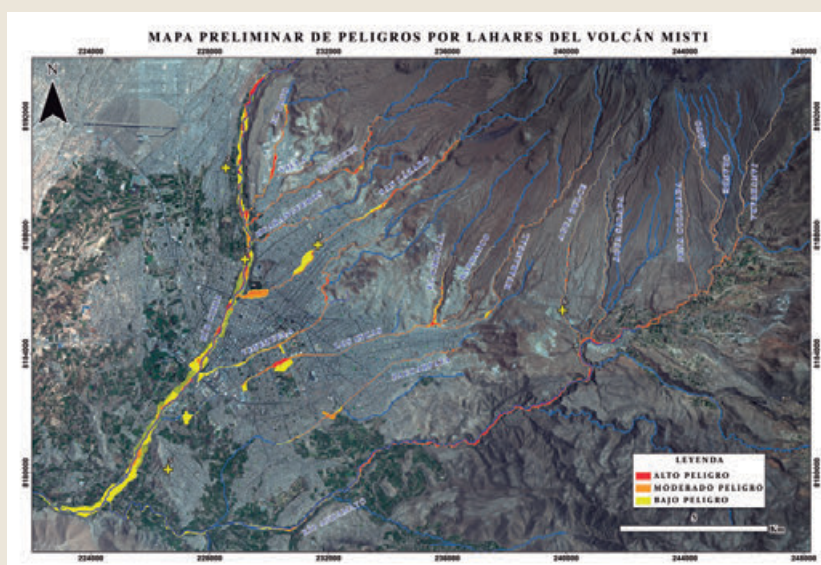
mencionar que dichos resultados de precipitaciones efectivas son aproximaciones y que se restringen a las limitaciones de dicho método.

Las simulaciones indican que las quebradas San Lázaro, Venezuela, Huarangal, Pastores y Paucarpata representan un peligro latente durante las épocas de lluvia (enero-marzo) dentro de la zona urbana de la ciudad.

Las simulaciones en la quebrada El Pato, indican posible desborde e inundación por lahares en el tramo que atraviesa el Asentamiento Villa confraternidad.

Los cauces de las quebradas Agua dulce, Agua Salada, Peña Colorada, Moto, Grande, Honda y Januhua, tienen profundidades entre 20-60 metros de profundidad, y entre 10-30 m de ancho los cuales desembocan en el Río Andamayo. Todos los cauces no atraviesan infraestructura urbana, pero si atraviesan la carretera que comunica el distrito de Chiguata con la ciudad de Arequipa, por lo que en caso de que resultaran afectados por lahares, dejarían incomunicados al distrito de Chiguata.

Las simulaciones con el código VolcFlow han permitido mejorar la delimitación de los alcances longitudinales y transversales (Fig. 1).



► Fig. 1 – Resultados de simulaciones de lahares en las principales quebradas en los flancos sureste-suroeste del volcán Misti, con el código VolcFlow

## REFERENCIAS

- ▶ Cacya, L., Meza, P., Carlotto, V., & Mamani, L. (2013). Aluvión del 8 de Febrero del 2013 en la ciudad de Arequipa. Resumen extendido Foro Internacional de Riesgos Geológicos. INGEMMET, 195-200.
- ▶ Delaite, G., Thouret, J. C., Sheridan, M., Labazuy, P., Stinton, A., Souriot, T., & Van Westen, C. (2005). Assessment of volcanic hazards of El Misti and in the city of Arequipa, Peru, based on GIS and simulations, with emphasis on lahars. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 140, 209-231.
- ▶ Ettinger, S., Mounaud, L., Magill, C., Yao-Lafourcade, A. F., Thouret, J. C., Manville, V., ... & Llerena, N. M. (2016). Building vulnerability to hydro-geomorphic hazards: Estimating damage probability from qualitative vulnerability assessment using logistic regression. *Journal of Hydrology*, 541, 563-581.
- ▶ Fernández, J. & A. Benites. 2001. Estudio: Inundaciones en la localidad de Arequipa ocasionadas por el ingreso de las torrenteras. INDECI. 53 p.
- ▶ Harpel, C. J., De Silva, S., & Salas, G. (2011). The 2 ka Eruption of Misti Volcano, Southern Peru—The Most Recent Plinian Eruption of Arequipa's Iconic Volcano. *The Geological Society of America, Special Paper 484*.
- ▶ Gueugneau, V. (2014). Evaluation du logiciel VolcFlow pour la simulation numérique de lahars et application aux risques associés. Rapport de Travail d'Etude et de Recherche (TRE). Université Blaise Pascal Clermont II. France.
- ▶ Kelfoun, K. (2009). VolcFlow simulation of Volcanic Flows. Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Fd (OPGC), Université Blaise Pascal. Francia.
- ▶ Lowe, D. R., Williams, S. N., Leigh, H., Connort, C. B., Gemmell, J. B., & Stoiber, R. E. (1986). Lahars initiated by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia. *Nature*, 324(6092), 51-53.
- ▶ Mariño J., Rivera M., Thouret J., Macedo L., (2016). Geología y Mapa de Peligros del volcán Misti. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico. INGEMMET.
- ▶ Montesinos-Tubée Daniel B., Núñez del Prado Hernando, Toni Bustaman Brian J., Álvarez Tejada Erik M., Borgoño Lozada Alejandra, Zegarra Flores Jorge, Gutiérrez Paco, Maldonado Mónica, Rodríguez Moscoso Mari del Pilar, Riveros Arteaga Gilbert C., Guillén Tamayo Dora, 2019. Floristic diversity, plant communities and conservation proposals of the riparian forest in the Chili River (Arequipa, Peru). doi.org/10.22497/arnaldoa.261.26106.
- ▶ Pallares, C., Fabre, D., Thouret, J.C. 2015.. Geological and geotechnical characteristics of recent lahar deposits from El Misti volcano in the city area of Arequipa, South Peru. *Geotech Geol Eng* 33, 641-660. <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9848-x>
- ▶ Pierson, T., Richard J., Thouret, J-C., Borrero, C., 1990. "Perturbation and Melting of Snow and Ice by the 13 November 1985 Eruption of Nevado Del Ruiz, Colombia, and Consequent Mobilization, Flow and Deposition of Lahars." *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 41, no. 1: 17-6.
- ▶ Thouret J-C, Antoineb S., Magillc C. Ollierd C., 2020. Lahars and debris flows: Characteristics and impacts. *Earth-Science Reviews*. doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103003.

- ▶ Thouret, J.-C., Finizola, A., Fornari, M., Legeley-Padovani, A., Suni, J., and Frechen, M., 2001. Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru: *Geological Society of America Bulletin*, 113, 1593–1610.
- ▶ Vásconez F., Vásconez R., Mothes P., 2017, Reconstrucción de los flujos de lodo del volcán Carihuairazo originados por el terremoto de 1698 utilizando el código Volcflow.
- ▶ Vargas Franco, R.D., Thouret, J.-C., Delaite, G., van Westen, C., Sheridan, M.F., Siebe, C., Mariño, J., Souriot, T., and Stinton, A., 2010, Mapping and assessing volcanic and flood hazards and risks, with emphasis on lahars, in Arequipa, Peru, in Grippelli, G., and Viereck-Goette, L., eds., *Stratigraphy and Geology of Volcanic Areas: Geological Society of America Special Paper 464*, p.265–280, doi: 10.1130/2010.2464(13).
- ▶ Kelfoun, K. (2017). A two-layer depth-averaged model for both the dilute and the concentrated parts of pyroclastic currents. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 122, 4293–4311. doi: 10.1002/2017JB014013



# Un sistema automatizado de pronóstico de dispersión de cenizas y su monitoreo en tiempo real para el volcán Popocatepetl

Hugo Delgado Granados<sup>1</sup>, Agustín García Reinoso<sup>2</sup>, Eric Téllez Ugalde<sup>1</sup>, Jorge Zavala Hidalgo<sup>2</sup> y Adolfo Magaldi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Vulcanología, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México – hdelgado@unam.mx

<sup>1</sup> Departamento de Vulcanología, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México – etellezu@igeofisica.unam.mx

<sup>2</sup> Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México – agustin@atmosfera.unam.mx

<sup>2</sup> Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México – jzavala@atmosfera.inam.mx

<sup>3</sup> Escuela Nacional de Estudios Superiores, Juriquilla, Universidad Nacional Autónoma de México – adolfo.magaldi@gmail.com

**Palabras clave:** Mapas, peligro volcánico, metodologías.

El volcán Popocatepetl ha estado muy activo desde el 21 de diciembre de 1994. Su actividad, a lo largo de los casi 30 años de actividad eruptiva ha sido de carácter explosivo (principalmente de tipo vulcaniano), alternado con actividad efusiva (construcción de domos de lava).

La actividad explosiva ha producido columnas de cenizas con diferentes tamaños, de hasta ~20 km de altitud y con una dispersión que ha llegado hasta los EUA. Sin embargo, la lluvia de cenizas importante se ha restringido a los ~65 km alrededor del cráter con evidencias de caída de cenizas en las ciudades de México y Puebla principalmente.

El monitoreo de la actividad eruptiva ha sido llevada a cabo por el Centro Nacional de Prevención de Desastres, conjuntamente con investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México, principalmente del Instituto de Geofísica, durante los años que lleva en actividad el volcán.

Este monitoreo ha consistido principalmente en la vigilancia sísmica, la deformación, las emisiones de gases volcánicos y el monitoreo de aguas de manantiales cercanos, entre otras líneas de trabajo.

Sin embargo, a pesar de los estudios de emisiones de cenizas volcánicas, su estudio y elaboración de mapas de peligro volcánico, el monitoreo de las cenizas que emite el volcán ha sido un tema complejo. Las condiciones de monitoreo de cenizas son especialmente complejas durante la noche y en época de lluvias, cuando no existe visibilidad y se dificulta saber si existe una nube de cenizas o no, o si la nube de

cenizas es densa o no, moviéndose hacia la Ciudad de México.

La Ciudad de México se encuentra a ~60 km de distancia del volcán y elementos de infraestructura importantes tales como el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM, a ~65 km del cráter), o el nuevo Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles (AIFA, ~70 km del cráter).

El volcán Popocatepetl se encuentra entre los volcanes de emisión de gases más grandes del mundo, y la Ciudad de México (CDMX) se encuentra entre las áreas pobladas más grandes del planeta. Las emisiones de gases y cenizas representan una fuente de "contaminación" para los habitantes de la CDMX y una amenaza para la salud de las personas y los animales, para la infraestructura y la navegación aérea. Por ello, es muy importante contar con un sistema de previsión y seguimiento de emisiones para prevenir exposiciones y riesgos.

Si bien no se ha evaluado la magnitud de la contaminación del volcán a la CDMX, existen estudios que documentan la presencia de productos volcánicos en la ciudad. Las emisiones de ceniza volcánica han provocado el cierre del aeropuerto de la CDMX, el más grande del país, con un importante impacto económico. Debido a la corta distancia entre la ciudad y su aeropuerto al volcán (36 y 70 km respectivamente desde el cráter), hay muy poco tiempo para reaccionar a la actividad eruptiva, particularmente durante la noche bajo condiciones tormentosas.

Se ha desarrollado un sistema para anticipar los

patrones de dispersión de los productos de emisión y su seguimiento. Por un lado, se ha establecido un sistema de predicción mediante datos meteorológicos de alta resolución y una rutina mediante código Fall3D. Este sistema de pronóstico se opera tanto en el Centro Nacional para la Prevención de Desastres (CENAPRED) como en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el cual se visualiza en línea. Por otro lado, se ha instalado un radar Doppler banda X a 11 km al norte del volcán a 4000 msnm para

identificar y dar seguimiento a la dispersión de ceniza.

Además, se está llevando a cabo la rehabilitación del sistema de monitoreo de SO<sub>2</sub> utilizando una red DOAS permanente, así como el despliegue del espectrómetro FTIR para el monitoreo de una gran variedad de especies volcánicas que podrían dar una pista sobre la actividad eruptiva.

Aquí reportamos los resultados del pronóstico contra el monitoreo de la dispersión de cenizas.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece cumplidamente al Gobierno de la Ciudad de México, a través de la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación por el apoyo al proyecto de investigación "*Sistema de Pronóstico de Dispersión y transporte de productos del volcán Popocatepetl hacia la Ciudad de México*"

### REFERENCIAS

- ▶ Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2021). Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/44.pdf>
- ▶ Delgado, H. (2022). Elaboración de mapas de peligro geológico: Pasado, presente y futuro [Diapositiva PowerPoint]. [https://www.ugm.org.mx/docs/webinar/2012/31\\_Agosto\\_2012\\_webinario.pdf](https://www.ugm.org.mx/docs/webinar/2012/31_Agosto_2012_webinario.pdf).
- ▶ Ley Federal de Protección Civil. (6 de junio de 2012). última reforma DOF 20-05-2021. Diario oficial de la Federación, México. [https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPC\\_200521.pdf](https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPC_200521.pdf).

# Análisis de las Caídas Piroclásticas "Sandwich" Originadas por Erupciones Plinianas del Volcán Misti en el Pleistoceno Superior, para evaluar el Peligro Volcánico en la Ciudad de Arequipa

Gian Escobar<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Escuela Profesional de Ingeniería Geológica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú - gm.escobar7@gmail.com

**Palabras clave:** Misti, caída piroclástica, mapa de peligros.

El volcán Misti, clasificado como volcán activo y considerado el más peligroso del sur peruano, está ubicado a 17 km al noreste de la ciudad de Arequipa. En los últimos 33.7 mil años este volcán ha tenido por lo menos 11 erupciones sub-plinianas a plinianas, de las cuales la octava y novena erupción están ligados a los depósitos de caída piroclástica denominados "Sandwich Inferior" (SI) y "Sandwich Superior" (SS) de una edad aproximada de ~ 9 y ~8.5 ka respectivamente.

Los depósitos SI y SS tienen un alcance de 15.1 y 15.3 km distribuidos en un área semielíptica de 197.7 km<sup>2</sup> y 202.07 km<sup>2</sup> en el flanco suroeste del Misti.

Debido a la peligrosidad que este volcán representa para la ciudad de Arequipa (con más de un millón de habitantes), se hicieron cálculos de los parámetros eruptivos de las erupciones ligados a los depósitos mencionados, con el objetivo de caracterizarlos, modelarlos y finalmente determinar el posible alcance areal.

## TRABAJOS DE CAMPO

Los trabajos de campo en depósitos de caída piroclástica involucran la exploración de capas en cortes de quebrada, carretera, calicatas, bofedales.

Las zonas exploradas por depósitos de SI y SS están basadas en la información de estudios previos de depósitos guía como "Sacarosa", "2 ka", "Autopista". Estos depósitos de caída del Misti se encuentran en su mayor parte en un área semielíptica (eje mayor -15 km) al suroeste del cráter, sin embargo, no se descartó la exploración en zonas complementarias.

Los datos obtenidos fueron: descripción estratigráfica, sedimentológica, petrográfica, máximo pómez (MP), máximos líticos (ML), espesor de capa, coordenadas UTM, registro fotográfico. Las muestras procesadas fueron: muestra completa (bulk), muestra de MP y ML, muestras de geoquímica (de tefra fresca, no alterada).

Caracterización sedimentológica, petrográfica, granulométrica y geoquímica

Los depósitos de caída SI y SS han sido descritos anteriormente como un solo depósito de caída al cual denominaron "Sandwich" (Mariño et al., 2016), estos se encuentran divididos por una capa de material retrabajado de pómez subredondeadas dentro de una matriz limosa o paleosuelo. Generalmente en los afloramientos se encuentran ambos.

En ambos depósitos se tienen tefras con "mingling" las cuales muestran bandas blancas finas intercaladas con marrones (indicador de la mezcla de dos magmas).

El depósito de caída de lapilli SI, está constituido por pómez (20%), escorias (67%), "mingling" (1%), líticos cogenéticos (11%) y líticos xenolíticos (1%) como se observa en la Fig. 1. Los espesores de capa encontrados varían de 64 cm (6.2 km del cráter) a 8 cm (14.3 km del cráter) generalmente muy bien preservados y con buena clasificación.

Las pómez (59.05 % de SiO<sub>2</sub>) y escorias (58.97 % de SiO<sub>2</sub>) son de una composición andesítica calcoalcalina (2.1% de K<sub>2</sub>O para pómez y 1.86% de K<sub>2</sub>O para escorias) de mediana a fuertemente potásico.

Las escorias son de color marrón, presentan vesículas subredondeadas (37.2%) y cristales de: plagioclasas (19%), anfíboles (1%), clinopiroxenos (16%), óxidos de Fe-Ti (16%) y ortopiroxenos (1%).

Las pómez son de color blanco, presentan textura microvesicular (35.6%) y cristales de: plagioclasas (20%), anfíboles (2%), clinopiroxenos (15%) y óxidos de Fe-Ti (3%). Estas pómez están distribuidas en toda la capa, pero tienen cierta concentración en la parte inferior de ella (característica más visible en aquellos afloramientos más cercanos al cráter del Misti).

El tamaño máximo del eje mayor de escoria y/o pómez encontrada es de 8.2 cm.

Las escorias con "mingling" se localizan en toda la capa, pero tienen cierta abundancia en la parte intermedia y superior de ella.

Los líticos presentes son grises oscuros (11%) angulares a subangulares y pardos grisáceos (1%) subangulares.

Las pómez (60.19 % de SiO<sub>2</sub>) y escorias (58.74 % de SiO<sub>2</sub>) son de una composición andesítica calcoalcalina (2.28% de K<sub>2</sub>O para pómez y 2.08% de K<sub>2</sub>O para escorias) de mediana a fuertemente potásico.

Las escorias son de color marrón a marrón oscuro, presentan vesículas subredondeadas a irregulares (32.2%) y cristales de: plagioclasas (18%), anfíboles (3%), clinopiroxenos (17%), óxidos de Fe-Ti (4%) de y ortopiroxenos (1%).

Las pómez son de color blanco grisáceo, presentan una textura microvesicular (27.5%) y cristales de: plagioclasas (23%), anfíboles (1%), clinopiroxenos (19%) y óxidos de Fe-Ti (4%). Estas pómez están distribuidas en toda la capa, pero tienen cierta concentración en la parte inferior (a comparación del SI es más escasa), en afloramientos proximales esta característica es más evidente y en los distales raramente lo es.

El tamaño máximo del eje mayor de escoria y/o pómez encontrada es de 9.8 cm.

Los líticos presentes son grises oscuros (11%), grises claros (2%) y rojizos (1%) sub angulares. Los líticos rojizos podrían indicar del contacto del magma en su ascenso con una zona hidrotermalizada.

El depósito de caída SS casi siempre sobreyace inmediatamente la capa intermedia que lo separa del "Sandwich Inferior", en el resto de ocasiones sobreyace depósitos como el "Rosado" y "Autopista" con capas intermedias de paleosuelo o material retrabajado.



► Fig. 1 - Componentes litológicos de la caída del "Sandwich Inferior" (malla 4 mm). a). Escoria. b). Pómez. c). Líticos cogenéticos. d). Líticos no juveniles pardos grisáceos.

En caso del depósito de caída de lapilli SS, está constituido por pómez (13%), escorias (72%), "mingling" (1%), líticos cogenéticos (11%), líticos xenolíticos o accesorios (2%) y líticos oxidados (1%) como se observa en la Fig. 2. Los espesores de capa encontrados varían desde 31 cm (zona proximal) a 8 cm (zona distal). Regularmente la parte superior de la capa tiene una preservación incompleta y/o retrabajada y/o alterada (patina rojizas y blancas); sin embargo, toda la capa tiene una buena clasificación.



► Fig. 2 - Componentes litológicos de la caída del "Sandwich Superior" (mallas 8 y 4 mm). a). Escoria. b). Pómez (vesículas menos densas que el "Sandwich Inferior". c). Líticos cogenéticos. d). Líticos no juveniles grisáceos claros. e). Líticos no juveniles rojizos.



### CORRELACIÓN TEFRO-ESTRATIGRÁFICA

Los depósitos del "Sandwich Inferior" y "Sandwich Superior" estratigráficamente corresponden a dos de los doce depósitos de caída con mayor presencia en los afloramientos en el flanco suroeste del Misti, cada uno de ellos está ligado a una erupción subpliniana o pliniana de este volcán en por lo menos los últimos 33.7 ka ("Sacarosa").

Caracterizados y nombrados del más antiguo al más reciente en la siguiente secuencia tenemos las caídas piroclásticas de: "Fibroso I", "Sacarosa" (Cuno, 2019), "Fibroso II", "Blanco", "La Zebra", "Autopista" (Cacya, 2006), "Espuma gris", "Espuma iridiscente" (Harpel et al, 2018), "Sandwich Inferior", "Sandwich Superior", "Rosado" y "2 ka" (Harpel et al., 2011).

Cada uno de los depósitos mencionados tuvo el potencial de emitir caídas piroclásticas, corrientes de densidad piroclástica (CDP) y lahares. De los estudios realizados aún no se tiene un registro completo de todos los eventos eruptivos del Misti, es por ello que, relacionar caídas, CDP y lahares a un solo evento eruptivo (mediante geoquímica, petrografía, datación, etc.) ayudara a comprender mejor el peligro que representa la erupción de este volcán para la ciudad de Arequipa y sus alrededores.

### PARÁMETROS Y MODELAMIENTO ERUPTIVO

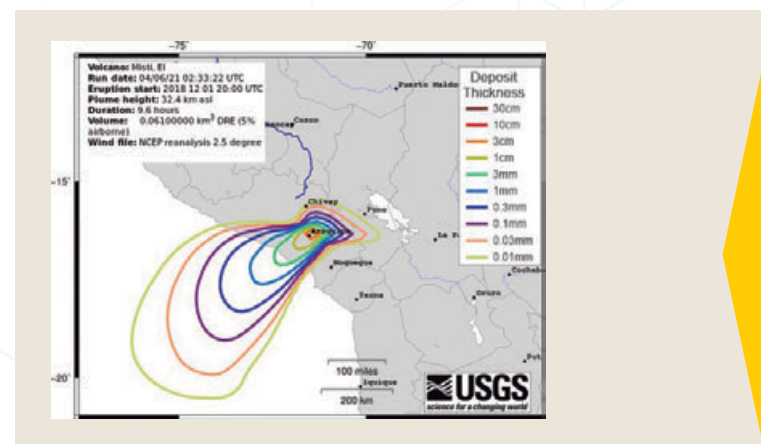
Los principales parámetros de una erupción (PE) son: volumen depositado (VD), volumen del magma (volumen de densidad de roca equivalente, VM), altura de la columna eruptiva (HT), velocidad del viento (VW), tasa de descarga de masa (tasa de masa eruptiva, TDM), tasa de descarga de volumen (TDV), duración de la erupción (DE), estilo eruptivo (EE), índice de explosividad volcánico (IEV), intensidad (I) y magnitud (M).

El cálculo de estos parámetros dependió principalmente de los mapas de isópacas e isopletas elaborados a partir de datos de espesor de la capa, diámetro mayor de los máximos pómez (MP) y máximos líticos (ML) con su respectivas coordenadas UTM de campo. Además del análisis de estos mapas se obtuvieron los ejes de dispersión de los depósitos del SI y SS.

**Tabla 1.** Parámetros eruptivos (PE) de las erupciones ligadas a los depósitos del SI y SS.

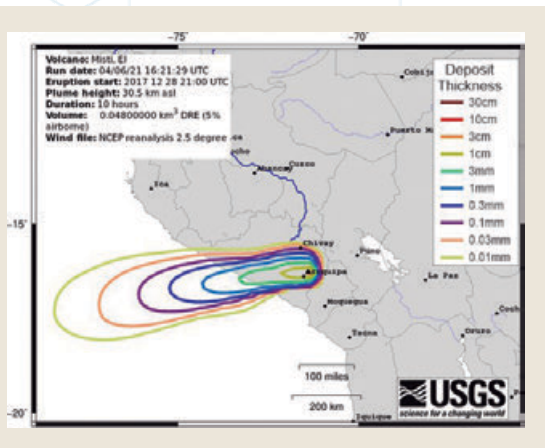
PE	Método	SI	SS
VD (m <sup>3</sup> )	Bonadona & Costa (2012)	6.1x10 <sup>7</sup>	4.8x10 <sup>7</sup>
VM (m <sup>3</sup> )	Segura (2016)	2.4x10 <sup>7</sup>	1.9x10 <sup>7</sup>
HT (km)	Carey & Sparks (1986)	26.6	24.7
VW (m/s)	Carey & Sparks (1986)	13.3	25.3
TDM (kg/s)	Mastin et al. (2010)	~1.2x10 <sup>8</sup>	~0.9x10 <sup>8</sup>
TDV (m <sup>3</sup> /s)	Sparks et al. (1997)	4.4x10 <sup>4</sup>	3.3x10 <sup>4</sup>
DE (horas)	(1980)	9.6	10.0
EE	Bonadona & Costa (2013)	Pliniano	Pliniano
IEV	Newhall and Self (1982)	2-5	2-4
I	Pyle (2000)	11.1	11
M	Pyle (2000)	3.8	3.7
<b>Eje de dispersión</b>		SW y SSW	WSW y SW

Los métodos mencionados en la Tabla 1 fueron elegidos después de una comparación con otros antiguos y recientes, por ser aquellos que mejor representan el análisis de campo.



► **Fig. 3** – Simulación de dispersión de ceniza en caso se diera una erupción similar a la que origino los depósitos del SI en condiciones climáticas del día 01-12-2018, comenzando a las 20:00 horas con una duración de 9.6 horas.

El modelamiento eruptivo se realizó en base a la altura de la columna eruptiva, duración de la erupción y al volumen depositado, parámetros requeridos en el uso del programa ASH3D del USGS. Se escogió un día con condiciones climáticas promedio en la ciudad de Arequipa, obteniendo así la Fig. 3 y Fig. 4.



► Fig. 4 – Simulación de dispersión de ceniza en caso se diera una erupción similar a la que originó los depósitos del SS en condiciones climáticas del día 28-12-2017, comenzando a las 21:00 horas con una duración de 10 horas.

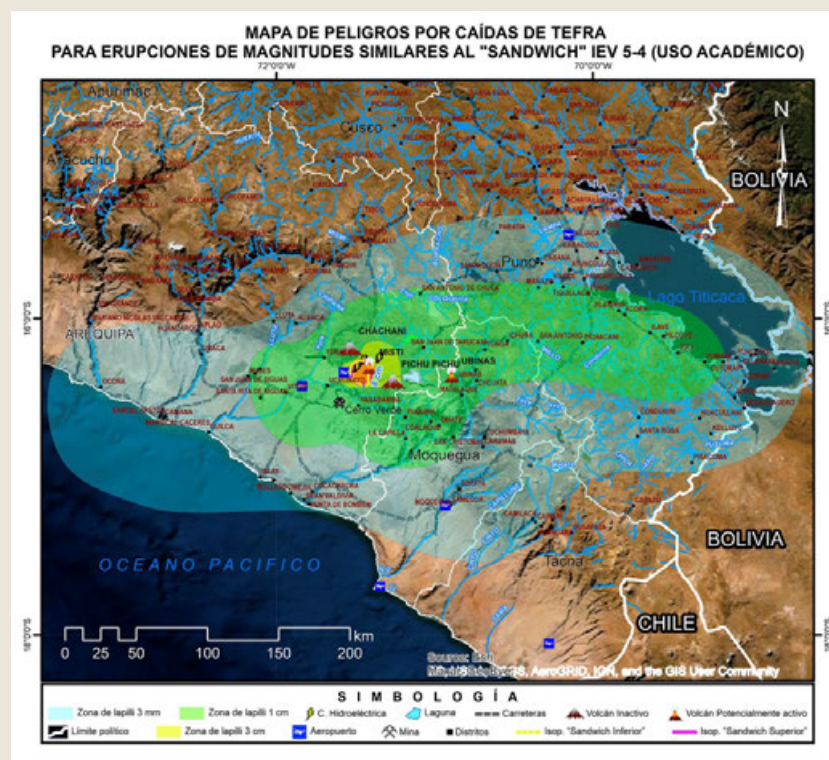
## MAPA DE PELIGROS POR CAÍDA PIROCLÁSTICA

La elaboración de un mapa de peligros requiere una basta cantidad de modelamientos en distintos softwares similares al ASH3D además de un registro de datos climatológicos de por lo menos diez años.

Para la tesis de este trabajo se realizó un mapa en base al modelamiento de 24 erupciones similares a las que depositaron el SI y SS.

Ya que el software ASH3D necesita especificar el día del evento, estos días fueron escogidos según el análisis de la base de datos del registro de 8 años de la estación meteorológica de Chiguata (SENAMHI), teniendo en cuenta aquellos más representativos y probables.

El resultado fue un Mapa de Peligros por Caída de Tefra de Uso Académico, por el cual podemos entender básicamente el peligro que representa el volcán Misti para la ciudad de Arequipa y sus alrededores, como se observa en la Fig. 5.



► Fig. 5 – Mapa que muestra tres zonas de caída de lapilli: celeste (zona que puede acumular capas de entre 3 mm y 1 cm de espesor), verde (zona que puede acumular capas entre 1cm y 3 cm de espesor) y amarilla (zona que puede acumular capas mayores a 3 cm de espesor). La acumulación es mayor según su proximidad al cráter del Misti.

El mapa de la Fig. 5, revela espesores de hasta 3 mm de lapilli de tefra en un área semielíptica de 83,754 km<sup>2</sup> y tres ejes menores. Sus dos puntos más distales son a ~294 km al este-noreste y 220 km al oeste-suroeste

(desde el cráter), abarcando casi el área total del lago Titicaca y Moquegua, el ~50% del sur de Arequipa y Puno, llegando hasta la localidad de Achacachi en Bolivia, Mirave en Tacna, 208 km de playas y ~31 millas del Océano Pacífico.

## CONCLUSIONES

El análisis de depósitos del "Sandwich Inferior" (SI) y "Sandwich Superior" (SS) reveló las características de dos erupciones plinianas del volcán Misti ocurridas entre 33.7 ka y 2 ka,

Las erupciones involucraron la fragmentación magmática de dos magmas andesíticos calcoalcalinos de mediana a fuertemente potásico que le dieron la peculiaridad de expulsar principalmente pómez, escorias y "mingling". El inicio de la actividad eruptiva fue brusco, no tuvo evento previo y la culminación fue gradual. El inicio de la actividad involucro magma más ácido (debido a ello se tiene la presencia de una ligera concentración de pómez en la parte inferior de la capa depositada), pero el magma predominante fue más básico (escorias predominantes en toda la capa). Las columnas eruptivas alcanzaron una altura máxima de 26.6 y 24.7 km, fueron influenciadas por vientos con una dirección inicial hacia el suroeste y oestesuroeste, las erupciones duraron 9.6 y 10 horas, depositando  $6.1 \times 10^7$  y  $4.8 \times 10^7$  m<sup>3</sup> de tefra en un área semielíptica hacia el suroeste del volcán Misti, los estilos eruptivos fueron plinianos y sus IEVs máximos fueron de 5 y 4; respectivamente para el SI y SS.

Si las erupciones mencionadas se dieran en la actualidad podrían alcanzar hasta el océano pacífico y el lago Titicaca, afectando las poblaciones, economía, infraestructuras, fauna, medio ambiente a lo largo de su recorrido. Por tal el análisis de depósitos volcánicos ayudará a entender el peligro que representa una erupción y nos dará las bases para poder planificar la mitigación de su impacto.

## AGRADECIMIENTOS

Al FONDO NACIONAL DE DESARROLLO CIENTÍFICO, TECNOLÓGICO Y DE INNOVACIÓN TECNOLÓGICA (FONDECYT) y al INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO Y METALÚRGICO (INGEMMET) quienes han financiado (Convenio N° 158-2017) el proyecto de investigación científica básica titulado: "Determinación de los periodos de recurrencia y procesos desencadenantes de erupciones explosivas recientes de los volcanes Misti y Chachani: implicaciones en la prevención del riesgo volcánico en Arequipa" a cargo de la investigadora principal M.Sc. Nérida Manrique Llerena.

Así mismo al Dr. Christopher Harpel (asociado investigador del VDAP, del Servicio Geológico de Estados Unidos), M. Sc. Rigoberto Contreras Aguilar, M. Sc. Edu Taípe Maquerhua (Coordinador del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET) y Dr. Marco Rivera Porrás (Investigador Científico Principal en el Instituto Geofísico del Perú) por su asesoría, apoyo, conocimientos y paciencia en la elaboración de la tesis de la cual se ha realizado este resumen.

## REFERENCIAS

- ▶ Biass S., Bagheri G., Bonadonna C. (2015). A Matlab implementation of the Carey and Sparks (1986) model. <https://vhub.org/resources/3922>.

- ▶ Bonadonna C. & Costa A. (2012). Estimating the volume of tephra deposits: a new simple strategy. *Geology* 40(5):415-418
- ▶ Bonadonna C. and Costa A. (2013). Plume height, volume, and classification of explosive volcanic eruptions based on the Weibull function. *Bulletin of Volcanology*, 75, 742.
- ▶ Bonadonna C., Connor C.B., Houghton B.F., Connor L., Byrne M., Laing A., Hincks T.K. (2005). Probabilistic modeling of tephra dispersal: hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand. *J Geophys Res* 110(B03203):1-21.
- ▶ Cacya L. (2006). Volcán Misti: Sedimentología, geoquímica y correlación tefro-estratigráfica del depósito de caída de pómez "Autopista" ~ 14000 años. Tesis Ingeniero, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, 85 p.
- ▶ Harpel C.J., Cuno J.J., Cueva K., Japura S., Cabrera M., Soncco Y. & Rivera M. (2018). "Tefroestratigrafía preliminar de erupciones explosivas del volcán Misti (Arequipa, Perú) desde la "Autopista" y sus implicaciones para los peligros volcánicos, Foro Internacional: Los Volcanes y su Impacto. Arequipa. Perú, 2018, p2.
- ▶ Harpel C.J., De Silva S.L. & Salas, G. (2011) - The 2 ka eruption of Misti volcano, southern Peru – the most recent plinian eruption of Arequipa's iconic volcano. Boulder, CO: Geological Society of America, 72 p. Special Paper, 484.
- ▶ Mariño, J.; Rivera, M.; Thouret, J.-C. & Macedo, L. (2016) - Geología y evaluación de peligros volcánicos del volcán Misti, INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 60, 170 p.
- ▶ Mastin L.G., Guffanti M., Servranckx R., Webley P., Barsotti S., Dean K., Durant A., Ewert J.W., Neri A., Rose W.I., Schneider D., Siebert L., Stunder B., Swanson G., Tupper A., Volentik A. & Waythomas. C.F. (2010). A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 186. 10-21. 10.1016/j.jvolgeores.2009.01.008.
- ▶ Pyle D.M. 2000. Sizes of Volcanic Eruptions. *Encyclopedia of Volcanoes*. Editor. Sigurdsson, H. foreword by Ballard, R. D. pp 1359.
- ▶ Rivera M. 2009. Estudio de productos emitidos por el volcán Misti durante los últimos 10,000 años. Informe técnico, Geología Ambiental, INGEMMET, 39 p.
- ▶ Segura A. (2016). Erupción subpliniana de abril de 2015 del volcán Calbuco, Andes del Sur: génesis, dinámica y parámetros físicos de la columna eruptiva y depósitos piroclásticos de caída asociados. Tesis de pregrado. Universidad de Chile, Chile. p. 111.
- ▶ Sparks R.S.J. (1986). The dimensions and dynamics of volcanic eruption columns. *Bulletin of Volcanology* 48 (1), 3-15.
- ▶ Thouret J.C., Finizola A., Fornari M., Legeley-Padovani A., Suni J. & Frechen M. (2001). Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. *Geological Society of America Bulletin*, 113(12): 1593-1610.



## Avances en el Monitoreo Volcánico Instrumental en la República Argentina

Sebastian Garcia<sup>1</sup>, Gabriela Badi<sup>1,2</sup>, Victor Preatoni<sup>1</sup>, Victoria Hipatia Olivera Craig<sup>1</sup>, Fabricio Carbajal<sup>1</sup>, Gemma Acosta<sup>1</sup>, Augusto Casas<sup>3</sup>, Nicolas Vigide<sup>3</sup>, Pablo Forte<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (OAVV), SEGEMAR, Argentina – sebastian.garcia@segemar.gov.ar

<sup>2</sup> Departamento de Sismología, Facultad de Cs. Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, Argentina

<sup>3</sup> Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (OAVV), SEGEMAR, CONICET, Argentina

**Palabras clave:** observatorio volcanológico, gestión del riesgo, alerta temprana.

Las erupciones volcánicas generalmente suelen estar precedidas por señales de “intranquilidad” (unrest) que pueden ser detectadas por redes de monitoreo instrumental. Algunas de esas señales, tales como sismos, aumento de la desgasificación o cambios en los sistemas hidrotermales, pueden ser detectadas por las comunidades locales u observadores casuales. Sin embargo, no todos los episodios de intranquilidad conducen a una erupción, razón por la cual las instituciones científico-técnicas calificadas deben analizar esta incertidumbre y asesorar a las autoridades civiles. Esto puede resultar particularmente desafiante si la instrumentación es limitada, así como quedó demostrado durante la erupción del volcán Copahue del año 2012 (Caselli et al., 2016).



► Fig. 1 - Erupción del volcán Copahue, provincia de Neuquén, Argentina, ocurrida el 22 de diciembre de 2012. A los pies del volcán, a aproximadamente 8 km, se encuentra ubicada la localidad turística de Caviahue (Fotografía de Nicolás Elguero).

Argentina presenta una situación particular con respecto al riesgo volcánico. Si bien la densidad poblacional e infraestructura en general es baja en

torno a los volcanes activos, existe distinto grado de exposición a los peligros volcánicos. En ciertas áreas, como el sur de la provincia de Mendoza o la Patagonia norte, se encuentran expuestas numerosas personas, áreas protegidas y actividades económicas, incluyendo el turismo. Probablemente, el desarrollo de estas actividades, así como el tamaño de las poblaciones, se incrementen en el futuro, aumentando de este modo la exposición a las amenazas de origen volcánico. Además, la situación particular del territorio argentino en relación con los patrones de circulación de los vientos genera que el país esté expuesto no sólo a la actividad de volcanes argentinos sino también a la dispersión y caída de cenizas de volcanes ubicados en Chile (Elissondo et al., 2016).

Los observatorios volcanológicos son instituciones o áreas específicas dentro de organismos (Servicios Geológicos, Universidades, Institutos de Investigación, Oficinas meteorológicas) cuya función es el monitoreo de los volcanes considerados activos y la generación de alertas técnicas tempranas. El fin de esto es lograr dar aviso anticipado a las autoridades y a la población, posibilitando salvaguardar la vida de las personas, y mitigar los impactos sobre las infraestructuras y economías regionales (Pallister et al., 2019).

Existen más de 100 observatorios volcanológicos en todo el mundo, muchos de ellos con responsabilidades sobre múltiples volcanes. Para cada país, la constitución exacta y las responsabilidades de un observatorio volcanológico pueden diferir, pero por lo general es la fuente de pronósticos autorizados sobre la actividad volcánica a corto plazo, así como del asesoramiento

científico sobre peligros volcánicos a autoridades y tomadores de decisiones. Por lo tanto, tienen un papel clave en el desarrollo de la resiliencia y, por ende, en la reducción del riesgo.

Los observatorios volcanológicos previenen sobre el nivel de actividad de un volcán a través de los sistemas de alerta temprana. Estos abarcan una serie de técnicas de comunicación desarrolladas por volcanólogos y responsables políticos para proporcionar información de los peligros volcánicos a las poblaciones en riesgo. La información sobre cuándo y dónde el volcán puede entrar en erupción; la magnitud, estilo y duración de la erupción; peligros probables e impactos esperables a escala local, regional y global, es crucial para los tomadores de decisiones. Uno de los elementos clave de un sistema de alerta temprana, y el más ampliamente difundido a través de los medios de comunicación, es el semáforo de niveles de alerta técnica volcánica.

En América Latina, durante la última década, Argentina junto con Bolivia, eran los únicos dos países con volcanes activos en su territorio que no contaban con observatorios volcanológicos permanentes (Forte et al., 2021). Esto adquiere particular relevancia si se considera que Argentina se encuentra entre los 10 primeros países con más volcanes activos en el mundo (Global Volcanism Program, 2013), así como las reiteradas erupciones que han afectado su territorio (Quizapu 1932; Isla Decepción 1967, 1969, 1970; Láscar 1986–1993; Hudson 1991; Chaitén 2008; Planchón-Peteroa 1991, 2011, 2018; Cordón Caulle 2011, Copahue 2012; Calbuco 2015), generando serios impactos sobre miles de personas y produciendo pérdidas económicas y materiales por millones de dólares (Elissondo et al., 2016; Caselli et al., 2016). A su vez, los registros estratigráficos evidencian la ocurrencia en el pasado de erupciones mayores, con capacidad de afectar a escala local, regional y hemisférica, como es el caso de la erupción riolítica de ~4410 BP del Complejo Volcánico Cerro Blanco (Báez et al., 2020).

No fue hasta el año 2017 que iniciaron oficialmente las actividades del Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (OAVV). El observatorio se constituye como un área especializada del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) dedicada al estudio y monitoreo

de los volcanes cuya actividad pueda afectar al territorio argentino, y encargada de la generación y emisión de alertas técnicas sobre actividad volcánica de forma oficial dentro de la República Argentina. El OAVV es, al momento, el observatorio volcanológico más joven de América Latina (Forte et al. 2021, Garcia y Badi, 2021).

Desde su puesta en funcionamiento hasta la actualidad, el OAVV del SEGEMAR ha logrado instalar redes de monitoreo instrumental permanentes sobre 4 de los 38 volcanes considerados activos para la República Argentina: volcán Copahue y Lanín en la provincia de Neuquén, el Complejo Volcánico Laguna del Maule en el límite entre las provincias de Neuquén y Mendoza, y el Complejo Volcánico Planchón Peteroa en la provincia de Mendoza.

### Volcán Copahue

El volcán Copahue es monitoreado desde el año 2012 por el Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS) del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN). Posterior a la erupción del año 2012 (Caselli et al., 2016), que derivó en la firma de un convenio binacional para el control, monitoreo y gestión de las erupciones volcánicas en la región fronteriza entre Chile y Argentina, la red de monitoreo se amplió al territorio argentino, añadiéndose seis nuevas estaciones multiparamétricas. Esto mejoró notablemente la cantidad y distribución de estaciones de monitoreo y permitió realizar un seguimiento mucho más detallado de la actividad de este volcán.

El acuerdo firmado representó un hito en materia de monitoreo y gestión del riesgo volcánico entre ambos países, y ha sentado bases sólidas para la cooperación entre SEGEMAR y SERNAGEOMIN (García y Badi, 2021). A su vez, este acuerdo posibilitó el intercambio en tiempo real de la información proveniente de las estaciones de monitoreo a ambos lados de la frontera.

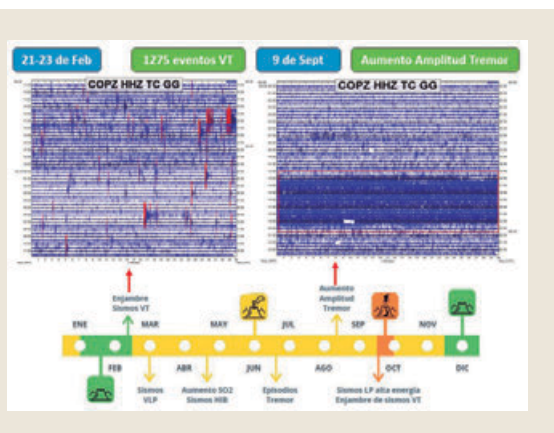
Durante el año 2020, en plena pandemia mundial de COVID-19, y ya con el OAVV consolidado en su funcionamiento, se amplió la red a partir de la firma de un convenio entre el SEGEMAR y la Provincia de Neuquén. Se incorporaron tres nuevas estaciones, conformando la configuración actual de la red de

monitoreo, con un total de 14 estaciones. Esto convirtió a Copahue en uno de los volcanes mejores monitoreados en el segmento de los Andes compartido entre Argentina y Chile (Fig.2).



► Fig. 2 – Mapa de la red binacional de monitoreo volcánico del volcán Copahue perteneciente al OAVV del SEGEMAR de Argentina y al OVDAS del SERNAGEOMIN de Chile.

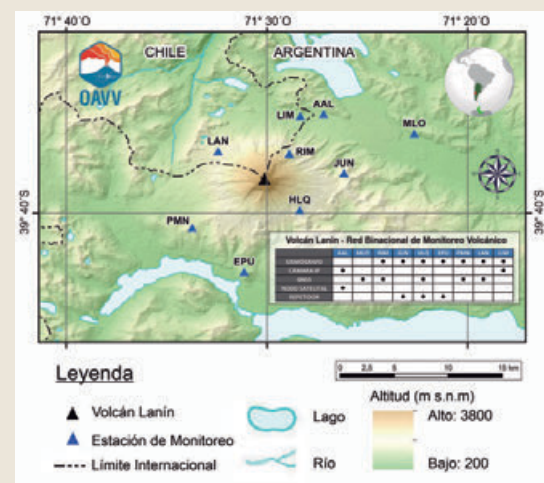
A la actualidad la red de monitoreo del volcán Copahue se encuentra conformada por doce estaciones sismológicas de banda ancha, cinco estaciones GNSS, cuatro cámaras IP, una cámara térmica, dos estaciones DOAS de medición de gases y una estación de infrasonido. Esta red permite la realización de un monitoreo de muy alto nivel, posibilitando la detección de patrones precursoros de actividad eruptiva y la consecuente generación de alertas técnicas volcánicas asociadas (Fig. 3).



► Fig. 3 – Variación de los niveles de alerta técnica para el volcán Copahue durante el año 2019, en base a la detección de parámetros precursoros a través del monitoreo volcánico instrumental.

### Volcán Lanín

El volcán Lanín se encuentra monitoreado desde el año 2013 por el OVDAS. No obstante, debido a que el edificio volcánico se emplaza mayormente sobre territorio argentino, la red de monitoreo solamente contaba con dos estaciones, reduciendo la cobertura azimutal de la misma y por lo tanto la eficiencia del monitoreo. Esto quedó evidenciado durante el cambio en el nivel de alerta técnica ocurrido en febrero de 2017. Por primera vez en la historia desde que el volcán se encuentra monitoreado, la alerta técnica se elevó de verde a amarilla, producto de la ocurrencia de un enjambre sísmico. Debido al tamaño y configuración de la red, no fue posible realizar un análisis preciso de lo ocurrido.



► Fig. 4 – Mapa de la red binacional de monitoreo volcánico del volcán Lanín perteneciente al OAVV del SEGEMAR de Argentina y al OVDAS del SERNAGEOMIN de Chile.

Es por ello que desde el año 2021, y en continuidad de los trabajos realizados por el OAVV en conjunto con la Provincia de Neuquén y la Administración de Parques Nacionales (APN), se instaló por primera vez una red de monitoreo instrumental multiparamétrica sobre el sector argentino del volcán Lanín, conformando una nueva red binacional de monitoreo volcánico (Fig. 4).

Al día de la fecha, la red de monitoreo del volcán Lanín se encuentra conformada por siete estaciones sismológicas de banda ancha, cinco estaciones GNSS y tres cámaras IP (Fig. 5).





► Fig. 5 - Estación Epulafquen (EPU) perteneciente a la red binacional de monitoreo volcánico del volcán Lanín.

La ampliación de esta red ha permitido una mejor identificación y localización de las fuentes sísmogénicas asociadas a este volcán y por consecuencia una mejora significativa en el monitoreo volcánico llevado adelante.

### Complejo Volcánico Laguna Del Maule

El Complejo Volcánico Laguna del Maule (CVLdM) se encuentra monitoreado desde el año 2011 por el OVDAS. Este complejo presenta un proceso de deformación sostenida desde el año 2007 mayor a 20 cm/año (Le Mével et al., 2021).

Complementariamente, se ha reconocido actividad sísmica principalmente relacionada a enjambres sísmicos tipo VT (volcano-tectónicos) de corta duración (0,5 a 3 h) y baja magnitud (< 3 ML), producto del fracturamiento de material rígido, con profundidades menores a 10 km (Cardona et al., 2018). Estos eventos se presentan agrupados en dos áreas principales. Una al suroeste de la laguna del Maule, en coincidencia con la zona de alzamiento y vinculada directamente a la intersección de la Falla Troncoso, de orientación NE-SO con el lineamiento laguna Fea, de orientación ONO-ESE y otra al sureste de la laguna del Maule, bajo el Subcomplejo Volcánico Cerro Barrancas (Cardona et al., 2018).

La existencia de una extensa red de monitoreo sobre territorio chileno desde el año 2011 posibilitó realizar un seguimiento pormenorizado de la evolución de la actividad interna de este volcán y la consecuente generación de alertas técnicas. Sin embargo, debido a la extensión del Complejo Volcánico y la cantidad y distribución de centros eruptivos asociados (Gho et al.,

2019), la red de monitoreo no permitía la cobertura de la totalidad de los centros, excluyendo, por ejemplo, el Subcomplejo Volcánico Cerro Barrancas.

Es por ese motivo que durante el año 2021 el OAVV del SEGEMAR, en conjunto con la Provincia de Neuquén, instaló por primera vez una red de monitoreo instrumental multiparamétrica sobre el sector argentino del Complejo Volcánico Laguna del Maule, conformando una nueva red binacional de monitoreo volcánico (Fig. 6).



► Fig. 6 - Estación Epulafquen (EPU) perteneciente a la red binacional de monitoreo volcánico del volcán Lanín.

A la actualidad la red de monitoreo del CVLdM se encuentra conformada por doce estaciones sísmológicas de banda ancha, nueve estaciones GNSS, cuatro inclinómetros electrónicos y dos cámaras IP (Fig. 7).



► Fig. 7 - Estación Laguna Fea (FEA) perteneciente a la red binacional de monitoreo volcánico del CVLdM.



Con la ampliación de la red a territorio argentino, el Complejo Volcánico Laguna del Maule se ha convertido en otro de los volcanes mejores monitoreados en la cordillera de los Andes, en el límite internacional entre Argentina y Chile.

### Complejo Volcánico Planchón Peteroa

El Complejo Volcánico Planchón Peteroa se encuentra monitoreado desde el año 2010 por el OVDAS y desde el año 2016 por el OAVV. Esta red ha permitido realizar el seguimiento de los últimos periodos eruptivos de 2010-2011 (Haller y Risso 2011) y de 2018-2019 (Forte et al., 2022) de dicho complejo volcánico.

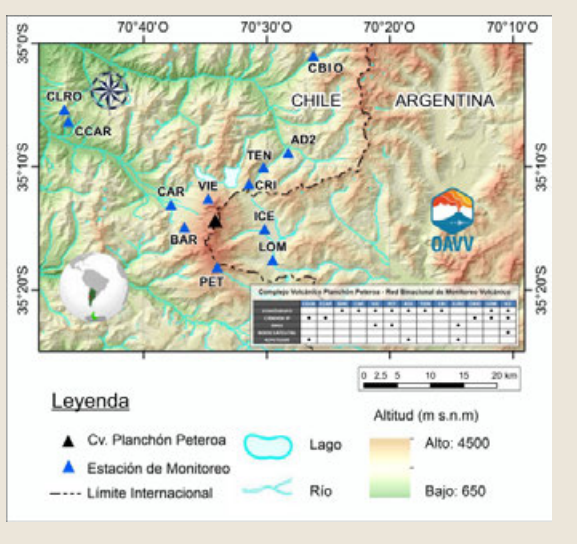
A la actualidad, la red de monitoreo del Complejo Volcánico Planchón Peteroa presenta un amplio desarrollo sobre el territorio chileno y unas pocas estaciones sobre territorio argentino. La red se encuentra conformada por nueve estaciones sismológicas de banda ancha (solamente dos de OAVV), tres estaciones GNSS, un inclinómetro electrónico y cuatro cámaras IP (Fig. 8).

Para el año 2023, se encuentra planificada la ampliación de la red de monitoreo sobre el territorio argentino. La misma contempla la instalación de un total de cinco nuevas estaciones multiparamétricas, incluyendo: cinco sismógrafos de banda ancha, tres estaciones GNSS, una cámara IP y dos estaciones DOAS de medición de gases.

### Generación De Alertas Técnicas

A partir de la información recibida de las distintas redes instrumentales instaladas, los profesionales del OAVV realizan el monitoreo 24/7, utilizando las principales metodologías aplicadas al monitoreo volcánico a nivel mundial, incluyendo: Sismología, Geodesia y Geoquímica.

A partir de la información procesada se emiten las alertas técnicas a través del Sistema Nacional de Alerta y Monitoreo de Emergencias (SINAME) del Sistema Nacional para la Gestión Integral del Riesgo (SINAGIR) (Fig. 9) y se generan los Reportes de Actividad Volcánica (RAV) y Reportes Especiales de Actividad Volcánica (REAV), que son publicados en el sitio web del OAVV (<https://oavv.segemar.gov.ar/>).



► Fig. 8 - Mapa de la red binacional de monitoreo volcánico del Cv. Planchón Peteroa, perteneciente al OAVV del SEGEMAR de Argentina y al OVDAS del SERNAGEOMIN de Chile.

COLOR DE ALERTA	ESTADO DE ACTIVIDAD	SITUACIÓN DEL VOLCÁN	ESCENARIO POSIBLE	RECOMENDACIONES A LA POBLACIÓN
<b>ALERTA ROJA</b>	Explosión mayor o refugio en el cono. Reporte de Actividad Volcánica alerta por fase.	• Actividad volcánica crítica con presencia de vibración y explosiones sostenidas. • Programación de evacuación por emergencia. • Aumento de frecuencia y volumen de la salida de cenizas. • Posible aumento de cenizas y proyección lateral. • Posibilidad de explosiones de tipo explosivo. • Posibilidad de explosiones de tipo explosivo. • Posibilidad de explosiones de tipo explosivo.	Posible explosión en desarrollo o inminente con bastante mayor campo de acción. La fase crítica puede agravarse o agravarse por un aumento de la actividad volcánica. Posible explosión sostenida o explosiones de tipo explosivo de gran potencia y con proyección lateral. Posible explosión de tipo explosivo de gran potencia y con proyección lateral. Posible explosión de tipo explosivo de gran potencia y con proyección lateral.	• Mantenerse continuamente informado sobre la actividad del volcán. • Evacuarse inmediatamente si se ordena hacerlo por las autoridades de Protección Civil. • Evacuarse por las vías de escape designadas. • Dirigirse a los puntos seguros de acuerdo a los planes de emergencia.
<b>ALERTA NARANJA</b>	Posible explosión mayor o refugio en el cono. Reporte de Actividad Volcánica alerta.	• Actividad volcánica crítica con presencia de vibración y explosiones sostenidas. • Aumento de frecuencia y volumen de la salida de cenizas. • Posible aumento de cenizas y proyección lateral. • Posibilidad de explosiones de tipo explosivo. • Posibilidad de explosiones de tipo explosivo.	Variaciones significativas en el desarrollo del proceso volcánico durante el análisis de los indicadores de los parámetros de vigilancia, los cuales pueden indicar un desarrollo de actividad volcánica crítica o explosiones de tipo explosivo de gran potencia y con proyección lateral. Posible explosión sostenida o explosiones de tipo explosivo de gran potencia y con proyección lateral. Posible explosión de tipo explosivo de gran potencia y con proyección lateral.	• Mantenerse alerta y seguir las indicaciones que emitan las autoridades de Protección Civil. • Evacuarse por las vías de escape designadas. • Evacuarse por las vías de escape designadas. • Evacuarse por las vías de escape designadas.
<b>ALERTA AMARILLA</b>	Continúa en el nivel de alerta naranja. Reporte de Actividad Volcánica alerta.	• Actividad volcánica crítica con presencia de vibración y explosiones sostenidas. • Aumento de frecuencia y volumen de la salida de cenizas. • Posible aumento de cenizas y proyección lateral. • Posibilidad de explosiones de tipo explosivo. • Posibilidad de explosiones de tipo explosivo.	Variaciones en los niveles de los parámetros de vigilancia indican que el volcán está por encima de su nivel de alerta y que el sistema de vigilancia puede estar sufriendo un desarrollo de actividad volcánica crítica o explosiones de tipo explosivo de gran potencia y con proyección lateral. Posible explosión sostenida o explosiones de tipo explosivo de gran potencia y con proyección lateral. Posible explosión de tipo explosivo de gran potencia y con proyección lateral.	• Mantenerse alerta y seguir las indicaciones que emitan las autoridades de Protección Civil. • Evacuarse por las vías de escape designadas. • Evacuarse por las vías de escape designadas. • Evacuarse por las vías de escape designadas.
<b>ALERTA VERDE</b>	Trabaja Activo, con un comportamiento normal. Reporte de Actividad Volcánica normal.	• El sistema de monitoreo continúa en funcionamiento. • Posible aumento de cenizas y proyección lateral. • Posibilidad de explosiones de tipo explosivo. • Posibilidad de explosiones de tipo explosivo.	El volcán puede presentar un estado de alerta que caracterice el período de reposo o actividad normal. Posible explosión sostenida o explosiones de tipo explosivo de gran potencia y con proyección lateral. Posible explosión sostenida o explosiones de tipo explosivo de gran potencia y con proyección lateral.	• Mantenerse alerta y seguir las indicaciones que emitan las autoridades de Protección Civil. • Evacuarse por las vías de escape designadas. • Evacuarse por las vías de escape designadas. • Evacuarse por las vías de escape designadas.

► Fig. 9 - Niveles de alerta técnica volcánica para la República Argentina emitidos por el OAVV

### Futuros Trabajos

Para los próximos tres años, se pretende avanzar con el proyecto de implementación del OAVV (ver García y Badi, 2021). Para fines de 2022, se planea la instalación de las primeras redes existentes en los volcanes Tromen y Domuyo, en la provincia de Neuquén. Posteriormente, durante 2023, se planea avanzar con la ampliación de la red del Complejo Volcánico Planchón-Peteroa y la instalación de una red permanente en la Isla Decepción en Antártida. Por último, para los años 2024/2025 se llevará adelante la

instalación de redes instrumentales en los volcanes Maipo, San José y Tupungatito en la Provincia de Mendoza.

Lo expuesto en este trabajo evidencia el avance realizado en materia de monitoreo volcánico y gestión de los riesgos volcánicos en la República Argentina. Desde la puesta en funcionamiento del OAVV hasta la actualidad se ha trabajado de manera sostenida y progresiva, sentando bases sólidas sobre las cuales construir a futuro y avanzar en el establecimiento de un sistema de alerta temprana volcánica moderna para el país.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece a las autoridades del SEGEMAR por el apoyo constante y a todos los organismos, instituciones y grupos científicos a nivel nacional e internacional que apoyan el desarrollo de esta importante tarea.

### REFERENCIAS

- ▶ Báez, W., Bustos, E., Chiodi, A., Reckziegel, F., Arnosio, M., De Silva, S., Giordano, G., Viramonte, J., Sampietro-Vattuone, M., Peña-Monné, J., 2020. "Eruptive style and flow dynamics of the pyroclastic density currents related to the Holocene Cerro Blanco eruption (Southern Puna plateau, Argentina)". *Journal of South American Earth Sciences* 98, pág. 102482. issn: 0895-9811. doi: 10.1016/j.jsames.2019.102482.
- ▶ Caselli, A.T., Agosto, M., Velez, M.L., Forte, P., Bengoa, C., Daga, R., Albite, J.M., Capaccioni, B., 2016. The 2012 eruption. In: Tassi, F., Vaselli, O., Caselli, A.T. (Eds.), *Copahue Volcano, Active Volcanoes of the World*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 61-77. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-48005-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-48005-2_3).
- ▶ Cardona, C., Tassara, A., Gil-Cruz, F., Lara, L., Morales, S., Kohler, P., Franco, L., 2018. Crustal seismicity associated to rapid surface uplift at Laguna del Maule Volcanic Complex, Southern Volcanic Zone of the Andes. *J Volcanol Geotherm Res* 353:83-94
- ▶ Elissondo, M., Baumann, V., Bonadonna, C., Pistolesi, M., Cioni, R., Bertagnini, A., Biass, S., Herrero, J. C., Gonzalez, R., 2016. "Chronology and impact of the 2011 Cordón Caulle eruption, Chile". *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16(3), págs. 675-704. doi: 10.5194/nhess-16-675-2016.
- ▶ Elissondo, M., Farías C., 2016. "Volcanic risk assessment in Argentina". *Cities on Volcanoes 9: Understanding Volcanoes and Society - The Key for Risk Mitigation*. Puerto Varas.
- ▶ Haller, M., Risso, C., 2011. La erupción del volcán Peteroa (35°15'S, 70°18'O) del 4 de septiembre de 2010. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 68: 295-305.

- ▶ Forte, P., Rodríguez, L., Paz, M. P. J., García, L. C., Segura, Y. A., Bustos, E., Moya, C. P., Espinoza, E., Vallejo, S., Agosto, M., 2021. Volcano monitoring in Latin America: taking a step forward. *Volcanica* (S1), págs. vii-xxxiii. doi: 10.30909/vol.04.S1.viixxxiii.
  - ▶ Forte, P., Ramires, A., De Abrantes, L., Llano, J., Dominguez, L., Carbajal, F., García, S., Sruoga, P., Bonadonna, C., 2022. La erupción no será transmitida: características, impactos y asistencia durante el ciclo eruptivo 2018-2019 del volcán Peteroa, Argentina. *Revista De La Asociación Geológica Argentina*, 79(1), 47-71.
  - ▶ García, S., Badi, G., 2021. "Towards the development of the first permanent volcano observatory in Argentina". *Volcanica* 4(S1), págs. 21-48. doi: 10.30909/vol.04.S1.2148.
- Global Volcanism Program, 2013. *Volcanoes of the World*, v. 4.11.0 (08 Jun 2022). Venzke, E (ed.). Smithsonian Institution. Downloaded 22 Jul 2022. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4-2013>.
- ▶ Gho, R., Sruoga, P., Amigo, A., Fierstein, J., Elissondo, M., Kaufman, J., Toloza, V., Calderón, R., 2019. Peligros del Complejo Volcánico Laguna del Maule, Argentina y Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería – Servicio Geológico Minero Argentino. *Publicación Geológica Multinacional*, 8. En prensa.
  - ▶ Le Mével, H., Córdova, L., Cardona, C., 2021. Unrest at the Laguna del Maule volcanic field 2005–2020: renewed acceleration of deformation. *Bull Volcanol* 83, 39. <https://doi.org/10.1007/s00445-021-01457-0>
  - ▶ Pallister, J., Papale, P., Eichelberger, J., Newhall, C., Mandeville, C., Nakada, S., Marzocchi, W., Loughlin, S., Jolly, G., Ewert, J., Selva, J., 2019. "Volcano observatory best practices (VOBP) workshops - a summary of findings and best-practice recommendations". *Journal of Applied Volcanology* 8(1). doi: 10.1186/s13617-019-0082-8.

# Mapas de amenaza por caída de ceniza y proyectiles balísticos, **volcán de Pacaya, Guatemala**

Dulce González<sup>1</sup>, Rüdiger Escobar-Wolf<sup>2</sup> y Gustavo Chigna<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Mariano Gálvez, Guatemala - dulce.gonzalez@umg.edu.gt

<sup>2</sup> Ingeniería y Ciencias Geológicas y de Minas, Universidad Tecnológica de Michigan, Estados Unidos

<sup>3</sup> Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, Guatemala

**Palabras clave:** Mapas de amenaza, caída de ceniza, balísticos.

La actividad volcánica alrededor del mundo es muy variada y compleja. En Guatemala existen alrededor de 43 estructuras que son consideradas como volcanes y que se alinean de oeste a este del país debido a la zona de subducción. A la actualidad la clasificación de volcanes publicada por INSIVUMEH en el ranking de Peligrosidad Volcánica define tres volcanes con actividad diaria significativa: Pacaya, Fuego y Santiaguito, las cuales generan productos volcánicos

que afectan poblaciones, infraestructuras, medios de vida y vías aéreas en todo el país (Roca et al., 2021).

Debido a su cercanía con la ciudad de Guatemala y los productos volcánicos que genera, el volcán de Pacaya es uno de los volcanes más peligrosos, catalogado como un volcán con un VEI 3, su actividad varía entre efusiva de tipo estromboliana y explosiva con probabilidades de desarrollar actividad subpliniana como lo menciona Kitamura y Matías (1995).

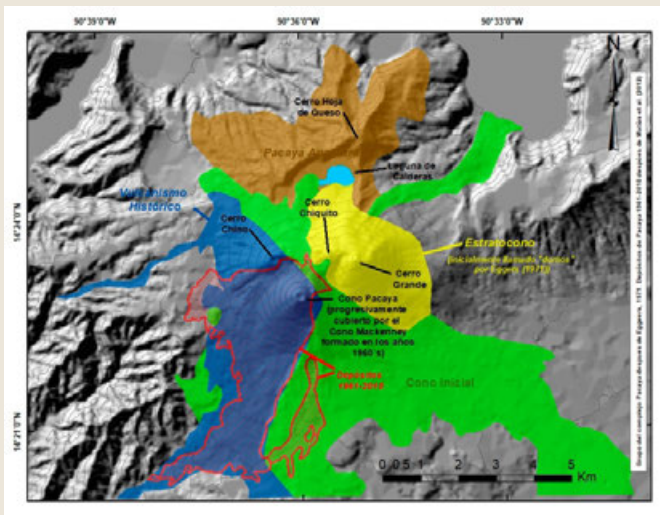


Fig. 1



Fig. 2

- ▶ Fig. 1 – Basado en “A 50 yr eruption of a basaltic composite cone: Pacaya, Guatemala”, muestra la actividad histórica del volcán de Pacaya en orden cronológico (Rose et al., 2013).
- ▶ Fig. 2 – Impactos generados durante el evento eruptivo del 27 de mayo del año 2010 por Gustavo Chigna A) Afección por caída de ceniza en el Aeropuerto La Aurora ubicado en la ciudad de Guatemala. B y C) Daños a la infraestructura por impacto de balísticos en las cercanías del complejo volcánico. (Wardman & GNS Science (N.Z), 2012).



Las principales amenazas para las comunidades cercanas son: flujos de lava, proyectiles balísticos y caída de ceniza; de estas, la caída de ceniza repercute directamente sobre la ciudad de Guatemala (Fig. 2A) y llega a generar depósitos de hasta 1 m en las áreas más cercanas, mientras que, el impacto de balísticos afecta principalmente las poblaciones cercanas (Fig. 2B y 2C), como se evidenció durante el evento eruptivo del año 2010 (INSIVUMEH, 2010), en donde las comunidades fueron afectadas directamente por los balísticos los cuales generaron incendios tanto de viviendas como de medios de sustento (Wardman & GNS Science (N.Z), 2012).

A pesar de la existencia de los mapas de amenaza generados por Norman Banks (1985) y JICA (2003), estos lamentablemente no han contado con los criterios necesarios para mostrar la verdadera amenaza que estos fenómenos representan ya que se basan únicamente en mapeo geológico, por lo que se ha hecho necesario generar mapas de amenaza actualizados que proyecten la probabilidad de ocurrencia de las amenazas, identificando las zonas de mayor y menor impacto, insumos que pueden ser útiles para la población y las autoridades.

Para la definición de las áreas de impacto asociadas a caída de ceniza y proyectiles balísticos se utilizó una metodología mixta que incluye tres componentes: la recopilación inicial de información (recopilación bibliográfica y de campo), el análisis estadístico de datos para seleccionar las variables de entrada para los modelos de procesos volcánicos (análisis de sensores remotos y análisis estadístico de las posibles variables de entrada), y finalmente la modelación de procesos volcánicos usando modelos numéricos que proyectan la probabilidad de ocurrencia de las amenazas.

Durante la primera fase se procedió a la recolección de datos por medio de observaciones in situ. Para el caso de los proyectiles balísticos se realizó un recorrido en la zona proximal de la fuente eruptiva actual (cono Mackenney), los balísticos se caracterizaron por ser de tipo basáltico, con una densidad promedio de 2 940 kg/m<sup>3</sup>, variando de tamaño entre 1,5 metros a bloques menores de 25 centímetros, con formas fusiformes (Fig. 3A y 3B) y por lo general están ubicados en un perímetro no mayor a 2 kilómetros en

los alrededores del volcán de Pacaya y 5 kilómetros según la recopilación bibliográfica.

Para el muestreo de ceniza se ubicaron las columnas descritas por Kitamura y Matías (1995) en donde previamente fueron realizadas una serie de columnas tefroestratigráficas (Kitamura & Matías, 1995), recolectando muestras de los distintos eventos en los puntos 4 y 5 señalados con color rojo en la Fig. 3C; posteriormente se realizó un ensayo granulométrico



► Fig. 3 - A) y B) Muestras de proyectiles balísticos recolectados en las cercanías del área que se utilizaron para la descripción reológica y las características observadas en campo. C) Correspondencia y ubicación de las columnas tefroestratigráficas definidas por Kitamura y Matías (1995), en rojo se observan las columnas utilizadas para los ensayos granulométricos.

que consistió en diferenciar el tamaño de partículas distinguiendo entre lapilli, ceniza gruesa y ceniza fina (Fisher, 1961).

Durante la fase estadística se tabuló la información bibliográfica recabada, enfocada en priorizar los valores máximos y mínimos de la actividad explosiva del volcán de Pacaya, tales como alturas de columnas, desplazamiento de las columnas de ceniza, espesores registrados y dispersión de proyectiles balísticos, todos estos datos estandarizados según las variables de entrada que se utilizaron posteriormente para los modelos computacionales.

El análisis estadístico de las direcciones y velocidades preferenciales de viento se realizó en base a los modelos globales extraídos de la NOAA (NOAA Satellite and Information Service, 2018), utilizando tres parámetros principales: dirección ( $\Phi$ ), velocidad (m/s) y altura (km). Con estos datos se realizó una media de 10 años (2009-2019) y los resultados de la variabilidad son descritos según los meses (enero a diciembre) y la altura de los perfiles de viento que además fueron variados de 4,500 msnm a 15,000 msnm, correspondiente a datos históricos de generación de altura de columna eruptivas observada, reportada y medida y un valor de actividad superior al registrado según el Índice de Explosividad Volcánica.

En el caso de la determinación de la altura de la columna de ceniza se tomaron en cuenta aquellas columnas del registro histórico, tomando la base de datos de instituciones como el Smithsonian e INSIVUMEH y registros medidos con análisis satelital producidos por la NOAA.

Para el análisis del volumen de caída de ceniza, se utilizó como base el trabajo de Matías (2009), donde se menciona los volúmenes correspondientes a distintas caídas de ceniza histórica reconocidas como parte del trabajo iniciado por Kitamura y Matías (1995).

La modelación se dividió en tres fases, la primera en la utilización de modelos numéricos basados en los modelos de Mastin (2001) y Bonadonna et al. (2005), la segunda contrarrestando los datos obtenidos con las simulaciones y la validación a través de eventos registrados por Rose et al. (2013) e INSIVUMEH y finalmente la generación de escenarios de amenaza

volcánica tanto para caída de ceniza como para caída de balísticos.

Para la caída de ceniza se utilizó la base del modelo TEPHRA, este es un algoritmo de computación propuesto por Bonadonna et al., (2005), caracterizado por ser un modelo que implementa la difusión-advención que determina el comportamiento de la caída de ceniza, integrando parámetros físicos de las partículas y distribución del viento que es fundamental para la distribución y sedimentación (deposito) de la ceniza a través de la ecuación de Armienti et al. (1988) y Suzuki (1983).

¡En el caso de la caída de balísticos se implementó el programa de cómputo EJECT!, este es un código desarrollado por Mastin (2001) con el propósito de calcular las posibles trayectorias de los proyectiles balísticos y su probabilidad del alcance. Toma en consideración parámetros como la fuerza con que es expulsado el proyectil, la velocidad inicial y la velocidad de impacto, la fuerza de arrastre del viento, una trayectoria parabólica, el número de Reynolds y la topografía del área de estudio (Mastin, 2001).

Ambos modelos (¡TEPHRA y EJECT!), fueron trasladados a un código para ser utilizados en la plataforma abierta Octave por Rüdiger Escobar-Wolf de la Universidad Tecnológica de Michigan, que además facilita la generación de archivos de salida de fácil lectura en plataformas de Sistema de Información Geográfica (SIG).

En total se realizó alrededor de 480 simulaciones para caída de ceniza, combinando los parámetros desde el mínimo reportado hasta los valores teóricos establecidos para un VEI de 3, los parámetros utilizados son: altura, volumen de la ceniza, distribución del tamaño del grano y los perfiles de viento obtenidos para cada uno de los 12 meses del año (Fig. 4A).

Mientras que, para los balísticos se contabilizó un total de 160 simulaciones definidas por variables como la altura inicial, la densidad del proyectil, el tamaño del balístico y la velocidad máxima teórica (250 m/s) de lanzamiento del balístico (Fig. 4B), estas variables fueron aplicadas en cuatro puntos de emisión histórica: el cráter del cono Mackenney, la zona de colapso de la erupción del año 2010, el Cerro Chino y

el punto de migración de los flujos de lava de Los Pocitos generado en el año 2010.

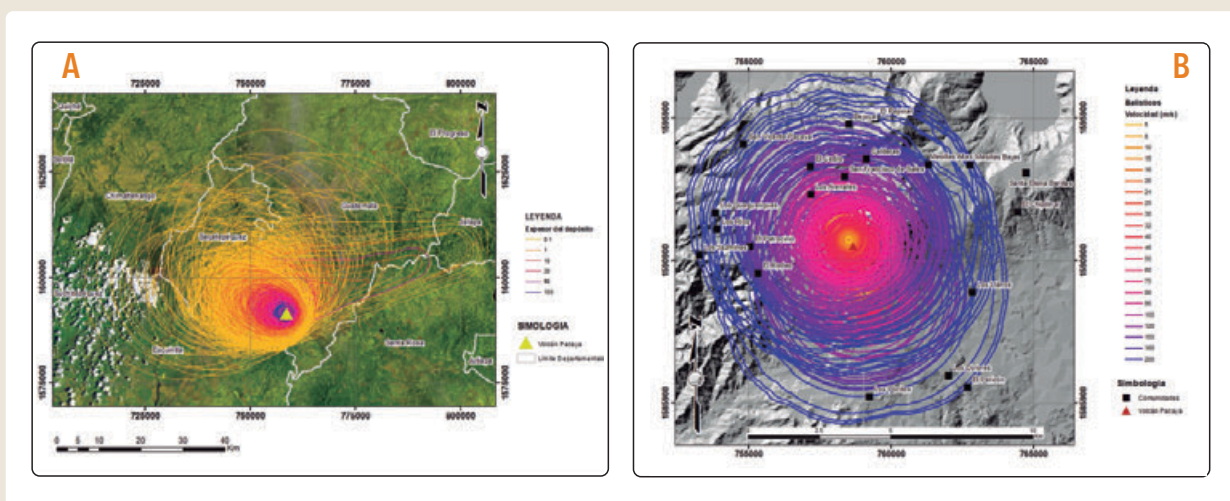
La validación de los datos obtenidos de las simulaciones se realizó contrarrestando la información recabada por Matías et al. (2012) donde se define el espesor de las caídas de ceniza y con imágenes satelitales donde se puede observar el depósito generado por la caída de ceniza, los balísticos se contrarrestaron con la base de datos de INSIVUMEH, donde se establece un mapeo de balísticos de diferentes erupciones.

La generación de los mapas se basó en la Metodologías para el análisis y manejo de los riesgos naturales (MET-ALARN) publicada en Nicaragua en el año 2005, la cual se basa en la utilización de matrices de escenario de amenaza volcánica, estas matrices incluyen la tasa de retorno de los eventos según el Índice de Explosividad Volcánica y la probabilidad de ocurrencia de la amenaza, en este caso se utilizaron las probabilidades obtenida de la proyección de las simulaciones (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales & Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación, 2005).

Los escenarios para caída de ceniza incluyen el espesor, la distancia, la probabilidad de ocurrencia de un depósito y el período de recurrencia entre

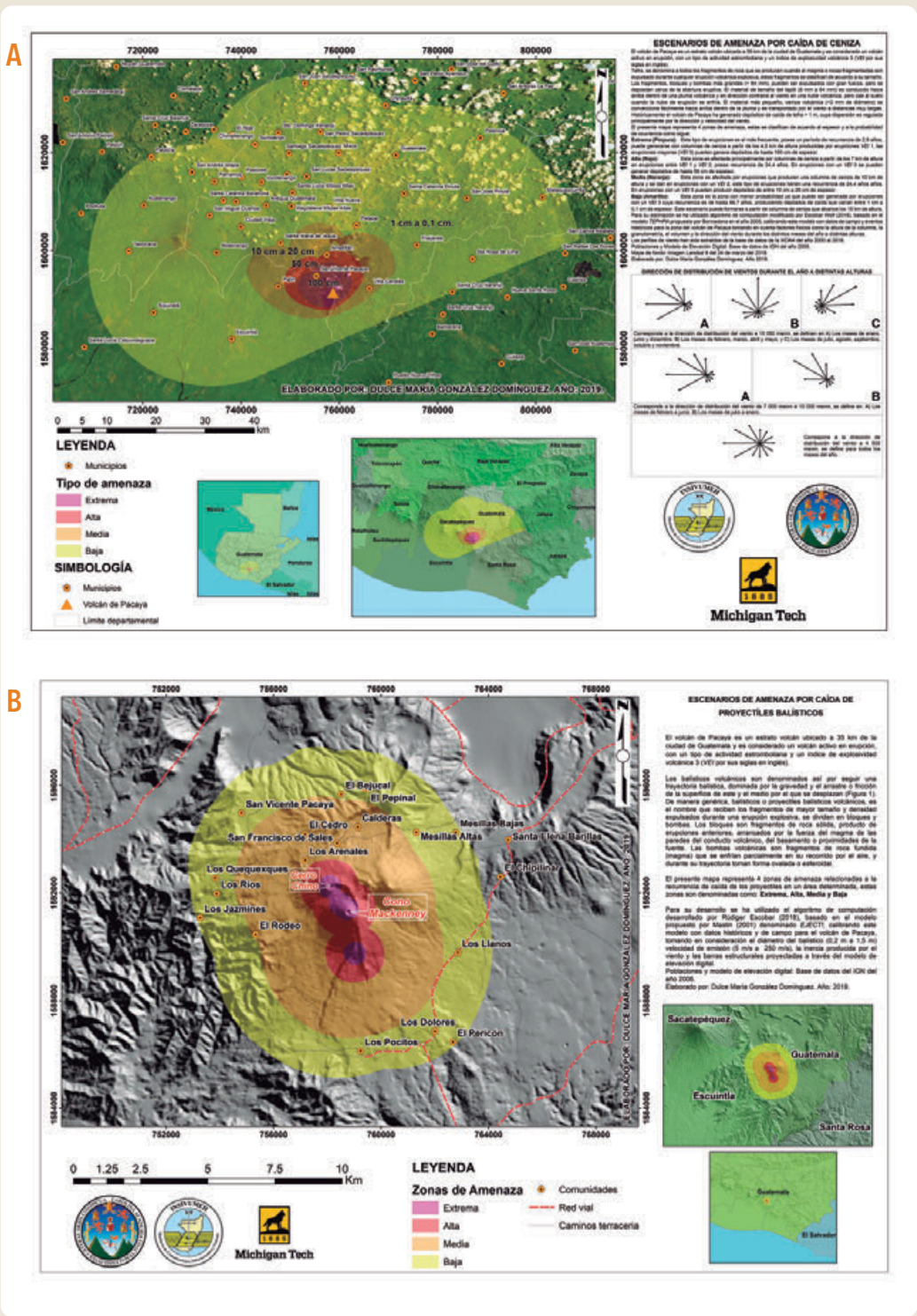
erupciones, estos escenarios son: Amenaza extrema, con depósitos de hasta 100 cm con un área de hasta 7 kilómetros y un período de recurrencia de 2,8 años; amenaza alta, con depósito de hasta 50 cm, dispersas en un área de entre 7 y 10 kilómetros y un periodo de recurrencia de 24,4 años; amenaza media, con depósitos de entre 10 y 20 centímetros de espesor, en un área de entre 10 y 20 kilómetros y un período de recurrencia de 24,4 años y finalmente la amenaza baja, con espesores de 1 a 0,1 cm en un área de hasta 60 kilómetros y período de recurrencia de hasta 66,7 años (Fig. 5A).

Los escenarios para la caída de balísticos se han diferenciado por tres factores, la distancia máxima, la recurrencia de caída de un proyectil y el período de recurrencia entre las erupciones, estos escenarios son: Amenaza extrema, ubicada en un área no mayor a 500 metros de los centros eruptivos con un período de recurrencia de hasta 2.8 años; amenaza alta, ubicada en un área de entre 0.5 a 1.2 kilómetros de los centros eruptivos con un período de recurrencia de hasta 24.4 años; amenaza media, ubicada en un área de entre 1.2 y 3.5 kilómetros con un período de recurrencia de hasta 24.4 años y finalmente la amenaza baja que se proyecta en un área de impacto de entre 3.5 a 5.4 kilómetros con un período de recurrencia de hasta 66.7 años (Fig. 5B).



► Fig. 4 – Resultado del total de las simulaciones obtenida combinando los datos de campo y datos teóricos para expresar la probabilidad mínima y máxima de impacto por: A) Caída de ceniza según el espesor de la caída que va de 0.1 mm (color amarillo) a 100 cm (color azul) y B) Caída de balísticos según la velocidad de emisión del balístico que va de 5 m/s (color amarillo) a 200 m/s (color azul).





► Fig. 5 – A) Se observa la zona de probabilidad de amenaza por caída de ceniza dividida según la probabilidad de la amenaza en extrema (morada), alta (roja), media (naranja) y baja (amarilla). B) en la parte inferior se observa la zona de probabilidad de amenaza por caída de balísticos dividida según el tipo de amenaza en extrema (morada), alta (roja), media (naranja) y baja (amarilla).



## AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), por abrir las puertas de la institución y brindar acceso a muchos de los datos bases para la construcción de esta investigación.

A Rüdiger Escobar, por ser facilitador en el proceso de desarrollo de la investigación, por contribuir con sus conocimientos en cada uno de los pasos para la formulación y el logro de los resultados.

A Gustavo Chigna, quien ha sido un maestro, un guía y un amigo, quien a través de su enseñanza a formado a muchos de los que hoy en día tratamos de contribuir en la Vulcanología del país.

## REFERENCIAS

- ▶ Bardintzeff, J.-M., & Deniel, C. (1992). Magmatic evolution of Pacaya and Cerro Chiquito volcanological complex, Guatemala. *Bulletin of Volcanology*, 54(4), 267–283. <https://doi.org/10.1007/BF00301482>
- ▶ Bonadonna, C. (2005). Probabilistic modeling of tephra dispersal: Hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand. *Journal of Geophysical Research*, 110(B3), B03203. <https://doi.org/10.1029/2003JB002896>
- ▶ Eggeres, A. (1969). Hoja geológica Amatitlán (2059 II G) [Geológico]. Dartmouth College de New Hampshire e Instituto Geográfico Nacional. Guatemala: Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas.
- ▶ Fisher, R. V. (1961). PROPOSED CLASSIFICATION OF VOLCANIC CLASTIC SEDIMENTS AND ROCKS. *Geological Society of America Bulletin*, 72(9), 1409. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1961\)72\[1409:PCOVSA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1961)72[1409:PCOVSA]2.0.CO;2)
- ▶ INSIVUMEH. (2010). Reporte de Erupción Volcán de Pacaya (1402-11). Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. (Recuperado en 2019).
- ▶ INSIVUMEH. (2019). Volcán Pacaya. Volcanes de Guatemala. [www.historico.insivumeh.gob.gt](http://www.historico.insivumeh.gob.gt) (Recuperado en 2019).
- ▶ Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, & Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación. (2005). Erupciones volcánicas: Mapas de amenazas, recomendaciones técnicas para su elaboración (p. 48) [Desastres naturales. prevención, volcanes, Nicaragua]. [http://www.asocam.org/sites/default/files/publicaciones/files/e65efa26c05e16ebfb6017bd587d1046\\_0.pdf](http://www.asocam.org/sites/default/files/publicaciones/files/e65efa26c05e16ebfb6017bd587d1046_0.pdf).
- ▶ Kitamura, S., & Matías, O. (1995). Tephra stratigraphic approach to the eruptive history of Pacaya volcano, Guatemala. (Science Reports Seventh Series; Geography, pp. 1–41). Tohoku University.
- ▶ Mastin, L. G. (2001). Simple calculator of ballistic trajectories for blocks ejected during volcanic eruptions (Núm. 01–45; 1.2, p. 18). U.S. Geological Survey, Cascades Volcano Observatory. [https://pubs.usgs.gov/of/2001/0045/pdf/of2001-0045\\_v1-2.pdf](https://pubs.usgs.gov/of/2001/0045/pdf/of2001-0045_v1-2.pdf).
- ▶ Matías Gómez, R. O., Rose, W. I., Palma, J. L., & Escobar-Wolf, R. (2012). Notes on a map of the 1961–2010 eruptions of Volcán de Pacaya, Guatemala [Map].

- ▶ NOAA Satellite and Information Service. (2018). Current Volcanic Ash Advisories, Washington VAAC. National environmental Satellite, Data and Information Service (NEDIS). <https://www.ssd.noaa.gov/VAAC/messages.html>
- ▶ Roca, A., Mérida Boogher, E. R., Chun Quinillo, C. M. F., González Domínguez, D. M. E., Chigna Marroquin, G. A., Juárez Cacao, F. J., & Argueta Ordoñez, P. D. (2021). Volcano observatories and monitoring activities in Guatemala. *Volcanica*, 4(S1), 203–222. <https://doi.org/10.30909/vol.04.S1.203222>.
- ▶ Rose, W. I., Palma, J. L., Escobar Wolf, R., & Matías Gomez, R. O. (2013). A 50 yr eruption of a basaltic composite cone: Pacaya, Guatemala. En W. I. Rose, J. L. Palma, H. D. Granados, & N. Varley, *Understanding Open-Vent Volcanism and Related Hazards*. Geological Society of America. [https://doi.org/10.1130/2013.2498\(01\)](https://doi.org/10.1130/2013.2498(01)).
- ▶ Smithsonian Institution. (2013). Pacaya [Science]. Global Volcanism Program. <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=342110> (Recuperado en 2019).
- ▶ Wardman, J. & GNS Science (N.Z.). (2012). Impact assessment of the May 2010 eruption of Pacaya volcano, Guatemala. GNS Science.

# La Inteligencia Artificial como herramienta de identificación de penitentes en el volcán nevado Coropuna: Primeros ensayos

Joshua Iparraguirre<sup>1</sup>, Pablo Masías<sup>2</sup>, Jose Úbeda<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, Lima, Perú – iparraguirrea.joshua@gmail.com

<sup>2</sup>Observatorio Vulcanológico del Perú, Yanahuara, Arequipa

<sup>3</sup>Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España

**Palabras clave:** Penitentes, Inteligencia Artificial, Coropuna

## INTRODUCCIÓN

El volcán nevado Coropuna (15°32'S, 72°39'O, 6377 m) se ubica al oeste de los Andes peruanos, al norte de la Zona Volcánica Central (ZVC). Debido a su topografía, permite la acumulación de precipitación sólida, que en determinados años por los fenómenos ENSO se intensifican, formando estructuras conocidas como penitentes. Los penitentes se forman por ablación diferencial, con el punto de rocío siempre debajo de 0°C, lo que significa que la nieve se sublima en lugar de fundirse. Además, múltiples penitentes altos pueden crear un microclima que desarrolle una circulación convectiva del calor, empujando el aire más cálido hacia arriba durante el día y provocando el atrapamiento del aire más frío por la noche (Yoshikawa et al., 2020).

La Inteligencia Artificial (IA), en los últimos años, es la disciplina, que no sólo viene siendo aplicada en ramas de ciencias de la computación o ingeniería de sistemas. Sino que, con el desarrollo de nuevos algoritmos englobados en módulos, también se está aplicando en diferentes ramas de la ingeniería (ambiental, geología, salud, etc.) por su facilidad de uso, fácil aprendizaje y su menor consumo de memoria para el procesamiento de datos masivos. La IA tiene como finalidad que un algoritmo programado haga el trabajo que haría cualquier persona, previamente habiéndole enseñado a razonar e identificar el objeto de estudio. Bajo este criterio, la IA puede identificar personas, animales, cosas; siempre y cuando nuestro algoritmo aprenda las diferentes formas que puede adquirir el objeto de estudio. Así mismo, si lo complementamos con el uso de sistemas de detección remoto complejo, se puede monitorear

diferentes elementos que se encuentren en zonas muy alejadas y/o que conlleve demasiado recurso humano para su análisis.

Los algoritmos se caracterizan por seguir un procedimiento, paso a paso, para realizar una determinada tarea. Primero se definen los valores iniciales como son el tipo de captura de datos (fotografía, imagen o vídeo), si la identificación será de izquierda a derecha o viceversa, mediciones de distancia entre objetos, centroides, etc. Posteriormente, se adentra en el aprendizaje autónomo. Actualmente, existen módulos en python para la identificación de diferentes objetos comúnmente encontrados en nuestro día a día. A su vez, los mismos módulos instruyen, a través de su documentación, cómo se pueden crear algoritmos para objetos particulares. Ya que, exclusivamente la identificación de Penitentes nunca antes se ha realizado, el objetivo ha sido elaborar los algoritmos personalizados para la identificación y reconocimiento de Penitentes.

## METODOLOGÍA

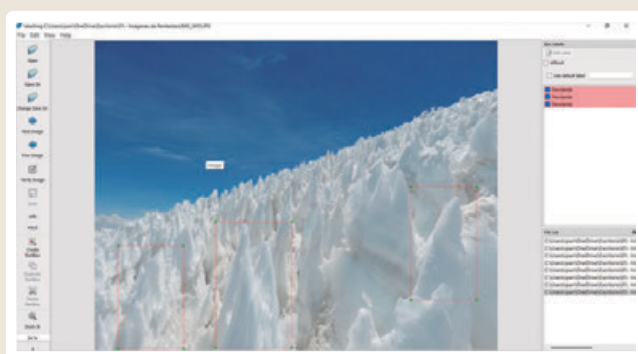
Para una correcta identificación del objeto a analizar, es necesario contar con una amplia colección de fotografías. Un número promedio apropiado sería entre 500 a 800 fotografías. Debido a que aún no hay un sistema remoto instalado, se realizó este primer ensayo con 100 fotografías tomadas con una GoPro durante salidas a campo en años anteriores hacia el volcán nevado Coropuna. Se realizaron 03 pasos, detallados a continuación:

**Paso 1:** Preparación de imágenes con el módulo YOLO

Primero, se recolectaron todas las fotografías disponibles que contengan penitentes. Incluyendo aquellas tomadas en diferentes ángulos y direcciones. Esto permitió mejorar la calidad del algoritmo; ya que, amplió la data de reconocimiento de las diferentes geometrías.

La preparación consistió en clasificar aquellas fotografías con alto brillo, otras que se encuentren movidas, aquellas que presenten doble visión, etc. La finalidad de esta clasificación fue importante, porque adaptó el algoritmo, lo cual es útil cuando las capturas no tienen buena resolución. Luego, se descargó el software LABELIMG (Versión 1.8.0), que requirió de entrada la carpeta que contienen las fotografías clasificadas. El software contiene dos módulos con los cuales etiquetar el objeto a identificar: Yolo y Pascal. Ambas metodologías son eficientes, pero en este caso, se decidió escoger Yolo, porque genera matrices numéricas en archivos textos que son de fácil exportación.

Seleccionada la metodología, el software separó un 80% de las fotografías (80 del total) para el entrenamiento y el 20% restante para testeo (20 del total). De las 80 fotografías destinadas al entrenamiento, se agruparon las diferentes geometrías de los penitentes y etiquetaron con el nombre de "Penitente" (Fig. 1).



► Fig. 1 - Ejemplo de etiquetado de penitentes. Al centro la fotografía seleccionada para entrenamiento. Lado derecho, las etiquetas sombreadas en rojo.

Toda fotografía está compuesta de píxeles; por ende, el software brindó un archivo texto con las coordenadas superior e inferior de los penitentes que han sido señalados en el entrenamiento de cada una de las fotografías usadas.

Finalmente, todas las fotografías con etiquetado, junto a sus archivos textos de coordenadas se comprimieron en una sola carpeta (.zip), terminando así la preparación de los datos con Yolo.

## Paso 2: Creación del algoritmo de entrenamiento para identificación de penitentes

Se procedió a utilizar el conjunto de datos comprimidos (.zip) para el entrenamiento de identificación de penitentes, utilizando Google Colab, debido a que este servidor cuenta con una Unidad de Procesamiento Gráfica (GPU, por sus siglas en inglés) necesaria para procesamientos de datos masivos como el que se requirió para el presente trabajo.

Se cargaron todas las fotografías comprimidas en el servidor Google Drive; y se conectó virtualmente con el servidor Google Colab. Conectados ambos servidores, se procedió al entrenamiento:

Primero, se descargó la red neuronal de pre-entrenamiento conocido como Darknet. Esta red neuronal permitió escalar las fotografías y procesarlas de manera automatizada. Luego, se compilaban los archivos de la Darknet necesarios para el funcionamiento según la GPU de Google Colab. Esto permitió, la habilitación del módulo especializado OpenCV, así como de la GPU - NVIDIA.

Luego, se configuró la Darknet para su funcionamiento; ya que, al descargar y compilar los archivos, estos reconocen una serie de elementos por defecto (personas, animales, cosas, etc.). Por lo tanto, la configuración consistió en que sólo se reconociera una clase: Penitentes.

Luego, se utilizó una línea de código que permitió descomprimir el archivo zip y almacenarlos en la memoria interna de la Darknet para que puedan procesarse. Una vez realizado el desempaqueado, se utilizaron todos los archivos textos, generándose una matriz de todas las coordenadas superior e inferior de las selecciones realizadas de los penitentes. Es en esta sección donde el algoritmo empezó a asignar según los espectros que píxeles son considerados como penitentes y cuales no. Esto lo hace posible a través de una serie de iteraciones para asignar valores según la coloración del píxel. Es el paso que requirió el mayor tiempo de procesamiento, ya que se tuvo que



desglosar uno a uno todos los píxeles que conforman la fotografía, asignarles un valor y correlacionarlos con la etiqueta a cada una de las 80 fotografías asignadas al entrenamiento.

Finalmente, después del procesamiento se generaron 02 archivos, que fueron denominados de acuerdo a la etiqueta trabajada: Yolo\_training\_Penitente\_1000 y Yolo\_training; ambos con extensión "weight". Ambos archivos son originados dependiendo de la cantidad de archivos, el primero porque superó las 1000 iteraciones y por lo tanto es más completo; pero a la vez, necesita de mayor memoria de procesamiento. Mientras que, el segundo es todo lo contrario. Dependiendo de la cantidad de fotografías y el hardware que se posea, se escoge uno. En este primer ensayo se utilizó el segundo archivo.

**Paso 3:** Creación del algoritmo de testeo para identificación de penitentes

Se creó un algoritmo propio para el testeo. La finalidad de este algoritmo fue comprobar si el archivo de entrenamiento de extensión "weight" (apartado 2.2) reconoce, señala y cuantifica qué son penitentes y cuantificarlos.

Lo primero, consistió en cargar el archivo de extensión "weight". Luego, se englobó en una variable la clase de análisis denominada "Penitente", con la finalidad de que pueda ser llamado en cualquier línea de código y en cualquier computadora que haga uso del script. Luego, se brindó acceso a la carpeta que tiene las imágenes no usadas (el 20% reservado para el testeo).

Finalmente, se configuró los parámetros de visualización. Por ejemplo, qué figura geométrica servirá de delimitador (rectángulo en este caso), la

coloración, identificación de derecha a izquierda de los penitentes y si se reconocen muchas geometrías, no se superpongan, evitando así cargar la fotografía con demasiados rectángulos (Fig. 2).

Por último, se realizaron unas configuraciones finales: Todas las coordenadas de los penitentes identificados se almacenaron en un archivo CSV y se pueda trabajar con fotografías y vídeos.

**RESULTADOS**

El algoritmo se configuró para la identificación de penitentes. De las 20 fotografías de testeo, fueron 2 en las que no se pudo determinar geometría alguna. El problema pudo deberse a que los penitentes eran muy pequeños. Por lo tanto, se identificó la primera limitante: no se dispone de la cantidad suficiente de fotografías con diversas geometrías.

Por otro lado, el algoritmo YOLO, por defecto contiene pre establecido la identificación de personas, animales y cosas que comúnmente se ve en el día a día. Pero, el algoritmo modificado para la exclusiva identificación de penitentes, fue capaz de discretizar a personas que aparecían en las fotos (Figura 3). Esto otorga una mejor calidad de datos, y la confianza de que, si en la captura de fotografías provenientes del sistema remoto aparecieran otros elementos, el algoritmo es capaz de sólo capturar penitentes.

```

class_ids, scores, bbboxes) = model.detect(frame)
for class_id, score, bbox in zip(class_ids, scores, bbboxes):
    (x, y, w, h) = bbox
    class_name = classes[class_id]

    if class_name == "Penitente" and button_penitente is True:
        cv2.putText(frame, class_name, (x, y-10), cv2.FONT_HERSHEY_PLAIN, 2, (255, 0, 0), 2)
        cv2.rectangle(frame, (x, y), (x+w, y+h), (255, 0, 0), 2)

#creación de un rectángulo
cv2.rectangle(frame, (20, 20), (200, 20), (0, 0, 255), -1)
polygon = np.array([(20, 20), (200, 20), (200, 20), (20, 20)])
cv2.fillPoly(frame, [polygon], (0, 0, 255))
cv2.putText(frame, "Rectángulo", (20, 20), cv2.FONT_HERSHEY_PLAIN, 1, (255, 255, 255), 1)
    
```

► Fig. 2 – Líneas de código para la configuración de visualización.



► Fig. 3 – Identificación de penitente, incluyendo una discretización de la persona en la fotografía.

En las 18 fotografías restantes, el algoritmo no fue capaz de identificar todos los penitentes. Esto permitió determinar la segunda limitante: la falta de datos de entrenamiento; esto quiere decir que contar con 100 fotografías no es suficiente; por lo que, aún no se cuenta una larga data que capturen a penitentes en diferentes direcciones y en diferentes ángulos.

La cantidad necesaria aproximada debería ser entre 500 a 800 fotografías, lo cual conllevaría a una tercera

limitante: la necesidad de contar con una potente Unidad de Procesamiento Gráfica (GPU). El procesamiento de testeo con 100 imágenes conllevó cerca a las 12 horas; por lo que, si se requiere conseguir la mejora en los resultados, la máquina tendría que ser capaz de procesar por encima de las 24 horas. Lamentablemente, la GPU proporcionada por el servidor Google Colab sólo funciona por 12 horas continuas, posterior a ese tiempo se reinicia y pierde el procesamiento.

### AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al Observatorio Vulcanológico del INGEMMET por brindar los accesos a los datos utilizados y al proyecto PERMAFROST-ENSO N° 081-2021 FONDECYT por financiar este trabajo, necesario para monitorear la evolución de los penitentes con una visión a futuro de su rol que cumplirán con el cambio climático.

### REFERENCIAS

- ▶ Bradski, G. (2000). The OpenCV Library. *Dr. Dobbs & s Journal of Software Tools*.
- Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., ... Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585, 357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- ▶ Pauli Virtanen, Ralf Gommers, Travis E. Oliphant, Matt Haberland, Tyler Reddy, David Cournapeau, Evgeni Burovski, Pearu Peterson, Warren Weckesser, Jonathan Bright, Stéfan J. van der Walt, Matthew Brett, Joshua Wilson, K. Jarrod Millman, Nikolay Mayorov, Andrew R. J. Nelson, Eric Jones, Robert Kern, Eric Larson, CJ Carey, İlhan Polat, Yu Feng, Eric W. Moore, Jake VanderPlas, Denis Laxalde, Josef Perktold, Robert Cimrman, Ian Henriksen, E.A. Quintero, Charles R Harris, Anne M. Archibald, Antônio H. Ribeiro, Fabian Pedregosa, Paul van Mulbregt, and SciPy 1.0 Contributors. (2020) SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, 17(3), 261-272.
- ▶ Van Rossum, G., & Drake Jr, F. L. (1995). Python reference manual. Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam.
- ▶ Yoshikawa, K., Úbeda, J., Masías, P., Pari, W., Apaza, F., Vasquez, P., Ccallata, B., Concha, R., Luna, G., Iparraguirre, J., Ramos, I., De la Cruz, G., Cruz, R., Pellitero, R., & Bonshoms, M. (2020). Current thermal state of permafrost in the southern Peruvian Andes and potential impact from El Niño–Southern Oscillation (ENSO). *Permafrost and Periglacial Processes*, 31(4), 598–609. <https://doi.org/10.1002/ppp.2064>.

# Inteligencia Artificial aplicada a la predicción de los niveles de alerta de actividad volcánica del volcán Sabancaya, Arequipa, Perú

Guilherme Tomazi Klein<sup>1</sup>, Viviane Todt<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Sao Leopoldo, Brazil - guitklein@gmail.com

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica del Uruguay, Rivera, Uruguay - viviane.todt@utec.edu.uy

**Palabras clave:** Monitoreo volcánico, Minería de datos, Análisis predictivo.

La predicción de las erupciones volcánicas es un desafío, pero a partir de los datos históricos y los patrones precursoros, es posible observar, interpretar y modelar las consecuencias del movimiento magmático (Boué, 2015). De esta manera, el desarrollo de estrategias que permitan predecir mejor las actividades volcánicas ha sido uno de los principales puntos de debate en la vulcanología. Para este fin, algunos investigadores han utilizado enfoques probabilísticos sobre datos históricos para tratar de predecir las erupciones volcánicas tanto a largo como a corto plazo (Boué, 2015). Sin embargo, a pesar de presentar buenos resultados en varias áreas de la ciencia y la ingeniería, los métodos probabilísticos no cumplen con las exigencias de la vulcanología en su totalidad, ya que la precisión y la fiabilidad de las predicciones aún están lejos de las condiciones ideales (Parra et al., 2017).

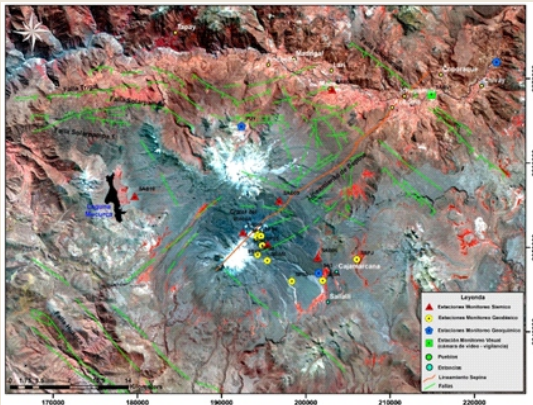
Una posible forma de mejorar estas predicciones es utilizar modelos de predicción no paramétricos (Parra et al., 2017), siendo una de las posibilidades el uso de modelos obtenidos por técnicas de aprendizaje automático y minería de datos. Así la pregunta guía de este trabajo es: "debido a la dificultad que aún existe en la predicción de las actividades eruptivas, con altos niveles de precisión, ¿podrían las técnicas de minería de datos, basadas en la Inteligencia Artificial, contribuir significativamente a la eficiencia y eficacia de la determinación del nivel de alerta de las actividades volcánicas y así contribuir a la mitigación de los desastres naturales?"

Así, este trabajo tiene como objetivo principal aplicar técnicas de minería de datos en las bases de datos del

Instituto Geofísico del Perú que contienen información de monitoreo del volcán Sabancaya, Arequipa, Perú, para contribuir a la predicción del nivel de alerta de sus actividades volcánicas y evaluar esta técnica de inteligencia artificial en este contexto y aplicación.

El conocido proceso de Descubrimiento de Conocimiento en Bases de Datos o KDD, Knowledge Discovery in Databases, tuvo su primera conferencia internacional en 1995 y en ella se propuso denominar KDD a todo el proceso de extracción de conocimiento de las bases de datos. Castro y Ferrari (2016) aclaran que todo este proceso contempla las siguientes tareas: a) selección e integración de bases de datos; b) limpieza de bases de datos; c) selección y transformación de datos; d) minería de datos; e) evaluación de la minería de datos.

El volcán Sabancaya en Arequipa, Perú, fue elegido para ser analizado en este trabajo debido a su alta actividad volcánica. Para ello se han encontrado bases de datos de vigilancia de volcanes susceptibles de ser tratadas y analizadas mediante un proceso de aprendizaje supervisado, con el fin de crear un clasificador capaz de predecir adecuadamente, a partir de los datos disponibles, el nivel de alerta del volcán. La vigilancia del volcán Sabancaya consiste principalmente en una red multidisciplinaria de instrumentos. Estos instrumentos comprenden estaciones de vigilancia sísmica, estaciones de vigilancia geodésica, estaciones de vigilancia geoquímica y estaciones de vigilancia visual (IGP, 2019). En la Fig. 1 se observa un mapa con la ubicación de las distintas estaciones.



► Fig. 1 – Estaciones de vigilancia del volcán Sabancaya. Fuente: IGP (2019).

En las estaciones de monitoreo visual, las cámaras de video instaladas registran minuto a minuto cualquier variación en la actividad eruptiva (IGP, 2019). Además de estas estaciones de monitorización acompañadas por investigadores del IGP y del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 2019), existen otras fuentes de monitorización remota capaces de adquirir datos relacionados con el volcán Sabancaya; entre ellas, los instrumentos de medición a bordo de los satélites meteorológicos espaciales Aura, Metop y Suomi NPP, capaces de medir la concentración de diversos gases en la atmósfera terrestre. También es posible obtener datos relacionados con los instrumentos MODIS a bordo de los satélites EOSAM y EOS PM. Los datos de MODIS sirven de base para el procesamiento del sistema MIROVA, que es capaz de detectar en tiempo casi real las anomalías térmicas de varios volcanes de la Tierra (Università Degli Studi di Torino, 2019).

Para la realización de este trabajo se han utilizado los datos obtenidos mediante la monitorización del volcán Sabancaya por los instrumentos OMI, GOME-2A, GOME-2B y OMPS, que se encuentran a bordo de los satélites Aura, Metop A, Metop B y Suomi NPP, respectivamente. También se emplearon los datos sobre el nivel de alerta facilitados por los informes semanales de actividad volcánica de Sabancaya de 2016 y 2017.

Los datos relativos a los instrumentos de medición de los satélites están disponibles para el acceso público en el sitio web del Centro de Datos de Validación del

Aura (AVDC, 2019), que es una base de datos alojada en el laboratorio de la Rama de Química y Dinámica Atmosférica del Centro de Vuelo Espacial Goddard (GSFC) de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) en la ciudad de Greenbelt, en el estado de Maryland, en Estados Unidos.

Mientras tanto, los datos relativos a los informes semanales de actividad del volcán Sabancaya están disponibles para el acceso público en el sitio web del Observatorio Vulcanológico del Ingemmet (OVI), albergado por el INGEMMET (2019) del Ministerio de Energía y Minas de Perú.

Los datos obtenidos de los archivos AVDC se preprocesaron en Visual Studio Code. Para cada expediente se seleccionaron los datos de interés, siendo estos los comprendidos entre el 1 de febrero de 2016 y el 31 de octubre de 2016, más los datos entre el 1 de abril de 2017 y el 31 de diciembre de 2017. Se eligieron estos intervalos de tiempo pues los mismos presentaron consistencia de valores y de formatación. Estos datos seleccionados se procesaron sustituyendo los espacios en blanco entre los datos por comas para obtener un archivo en formato .csv.

Tras este tratamiento de datos, se constituyeron cuatro archivos en formato .csv, uno para cada conjunto de datos de un equipo específico en el periodo establecido. Estos archivos fueron tratados posteriormente en Microsoft Excel, donde se asoció el conjunto de datos de nivel de alerta obtenido tras la lectura de todos los informes semanales de actividad del volcán Sabancaya entre los años 2016 y 2017 con los datos ya presentes en cada archivo .csv. De este modo, para cada línea de datos, es decir, para cada instancia se asoció el nivel de alerta correspondiente. Esta asociación se produjo al correlacionar el valor de la fecha de cada instancia con el informe de actividad correspondiente a esta fecha. Por último, se obtuvieron cuatro nuevos conjuntos de datos, en los que se muestra la clasificación específica de cada instancia de datos según la escala de nivel de alerta para cada instancia de datos. Esta nueva columna recibió el nombre de alert\_color.

Continuando con el proceso de preprocesamiento de datos, los archivos .csv se importaron al software Weka



para excluir los datos de los parámetros relacionados con la fecha, ya que los datos del año 2016 representan todo un nivel de alerta amarillo y los datos de 2017 representan todos unos niveles de alerta naranja. Esta exclusión es importante para que el modelo de clasificación no tenga en cuenta el periodo de tiempo para definir la clase de un conjunto de datos, lo que llevaría a una falsa precisión de clasificaciones correctas del cien por cien.

Tras la exclusión de los parámetros relacionados con la fecha, cada archivo se convirtió al formato .arff, constituyendo así el conjunto de datos final para iniciar el proceso de extracción de datos.

Por su vez, el proceso de minería de datos en este trabajo consistió en aplicar algoritmos de clasificación a un conjunto de datos de entrenamiento para generar un modelo de clasificación mediante un proceso de aprendizaje supervisado. La aplicación de este modelo, también llamado clasificador, a un conjunto de datos de prueba, permite evaluar el rendimiento de este clasificador.

Para realizar una comparación entre los distintos algoritmos existentes para la clasificación, se ha seguido la idea presente en Castro y Ferrari (2016), en la que se realiza una comparación entre un algoritmo probabilístico, en este caso Naïve Bayes; entre un algoritmo de evaluación de distancias, en este caso k-NN; y un algoritmo de árbol de decisión, en este caso el elegido ha sido el algoritmo C4.5, considerando que es uno de los algoritmos de árbol de decisión más populares (Salzberg, 1994).

Para separar la base de datos en conjuntos de entrenamiento y prueba, se realizó una validación cruzada estratificada en 10 carpetas, donde el algoritmo se evalúa diez veces y en cada evaluación 9 carpetas conforman la base de entrenamiento y una carpeta la base de prueba del clasificador (Castro y Ferrari, 2016).

Como complemento a la comparación, se decidió incluir un algoritmo capaz de evaluar qué conjuntos de parámetros de un determinado conjunto de datos tendrían mayor precisión en el proceso de clasificación. Para ello, se decidió utilizar el especificado en (KOHAVI; JOHN, 1997), en el que esta

evaluación se realiza mediante un Wrapper que contiene un algoritmo de clasificación y un algoritmo de búsqueda de parámetros para formar y evaluar los distintos conjuntos de parámetros posibles.

Para realizar la minería de datos se utilizaron las bases de datos en formato .arff que fueron importadas al software Weka y procesadas por las implementaciones en él de los algoritmos mencionados. Estas implementaciones son NaiveBayes, para el algoritmo probabilístico; IBk, para el algoritmo de evaluación de la distancia; J48, para el algoritmo de árbol de decisión; y WrapperSubsetEval, para el algoritmo de evaluación del conjunto de parámetros (Universidad de Waikato, 2019).

**La Tab. 1** presenta los resultados de precisión obtenidos con los clasificadores NaiveBayes, IBk y J48.

**Tab. 1**  
Porcentaje de precisión de los clasificadores

Dataset	NaiveBayes	IBk	J48
OMI	74,83	66,04	82,57
GOME-2A	99,18	51,53	99,98
GOME-2B	99,28	50,72	99,98
OMPS	57,22	55,45	72,67

**Tab. 2** presenta los resultados de precisión obtenidos con los clasificadores NaiveBayes, IBk y J48, tras el reprocesamiento/refinamiento de las bases GOME-2A y GOME-2B.

**Tab. 2**  
Nuevos datos de precisión porcentual tras el reprocesamiento

Dataset	NaiveBayes	IBk	J48
OMI	74,83	66,04	82,57
GOME-2A	68,64	50,65	76,10
GOME-2B	68,71	50,30	74,48
OMPS	57,22	55,45	72,67

La Tab. 3 presenta los resultados obtenidos con el algoritmo evaluador del conjunto de parámetros.

Tras un análisis crítico de los resultados obtenidos, se pueden deducir rápidamente dos consideraciones:

**(a)** el algoritmo IBk obtuvo un rendimiento mucho menor que los otros dos algoritmos para las cuatro bases de datos;

**(b)** los algoritmos NaiveBayes y J48 obtuvieron un alto rendimiento para GOME-2A y GOME-2B.

**Tab. 3**

Porcentaje de precisión utilizando  
AttributeSelectedClassifier

Dataset	AttributeSelectedClassifier + WrapperSubsetEval + J48
OMI	84,92
GOME-2A	76,87
GOME-2B	77,47
OMPS	73,62

En cuanto al índice de alto rendimiento de los algoritmos NaiveBayes y J48, se pudo observar tras un análisis más detallado de estas bases de datos que presentan para el parámetro VCD\_OCLO una clara distinción de valores entre el periodo del año 2016 y 2017. En el periodo del año 2016, para las 2580 instancias de este periodo en la base GOME-2A hay 1557 valores distintos para el parámetro VCD\_OCLO. En el periodo de 2017, de las 2604 instancias de la misma base para este periodo solo hay un valor distinto. Esta discrepancia en la variabilidad de los valores puede causar un problema muy común en la minería de datos llamado *overfitting*. Este comportamiento es exactamente lo que se trató de evitar al excluir los parámetros relacionados con la fecha de la base de datos. El sobreajuste crea un clasificador muy especializado a la base de datos utilizada para el entrenamiento y que no generalizará bien a una base de datos independiente que se probará en el futuro.

Un enfoque necesario puede ser una evaluación más específica, realizada por vulcanólogos, sobre la

relación de este parámetro con la actividad volcánica. Ya que cabe destacar que estos datos son obtenidos por instrumentos que miden no sólo gases de origen volcánico, sino también varios otros gases importantes para el conocimiento de la disminución del volumen de ozono en la estratosfera, siendo el dióxido de cloro (OCLO) uno de ellos (Adams, 2012).

Lampel et al. (2017) comentan la posible existencia de OCLO en las columnas eruptivas de los volcanes; sin embargo, también llaman la atención sobre los posibles errores de medición de la concentración de OCLO a través del análisis espectral en el ultravioleta, principalmente asociados a la interferencia del vapor de agua.

A partir de esta información se consideró prudente volver a evaluar las bases de datos GOME-2A y GOME-2B, excluyendo el parámetro VCD\_OCLO, para obtener un clasificador más generalista con valores de precisión más realistas.

Los resultados obtenidos tras el reprocesamiento se recogen en la Tab. 3 y muestran un descenso esperado en la precisión de los algoritmos para las bases GOME-2A y GOME-2B.

Tras estas evaluaciones iniciales, se observó que para todas las bases de datos, el algoritmo que mejor preparaba un clasificador, medido por la precisión de la predicción, era J48. Por lo tanto, este fue el algoritmo elegido para buscar el mejor conjunto de parámetros en asociación con los algoritmos AttributeSelectedClassifier y WrapperSubsetEval.

En este enfoque, se pudo observar que para todas las bases de datos hubo una ganancia de rendimiento, obteniendo una mayor precisión con este tipo de modelado, que crea un clasificador utilizando sólo los parámetros más significativos dentro de la base de datos.

Finalmente, el resultado más positivo del estudio fue la precisión del 84,92 % en la predicción del nivel de alerta en la base de datos IMO utilizando el algoritmo AttributeSelectedClassifier con WrapperSubsetEval como evaluador y el algoritmo J48 como clasificador. Se considera innovador este resultado, que puede servir de guía para futuras investigaciones en el uso de los datos de vigilancia para la predicción de los niveles

de alerta volcanológica, así como para otras actividades volcánicas.

Los resultados obtenidos al final del proceso de minería de datos corresponden a un enfoque innovador para predecir el nivel de alerta de las actividades volcánicas. Los objetivos propuestos en este trabajo se cumplieron, una vez realizadas las técnicas de minería de datos sobre los conjuntos de datos disponibles, alcanzando un resultado de precisión de los algoritmos de clasificación en la predicción del nivel de alerta de actividad volcánica.

El uso de los datos recogidos por los instrumentos a bordo de los satélites meteorológicos demuestra su importancia para la vigilancia volcánica. Así, a partir de

los resultados obtenidos, se concluye que las técnicas de minería de datos contribuyen de forma eficiente y eficaz a determinar los niveles de alerta de las actividades volcánicas. Además, se contempla como posibilidad futura la investigación de un preprocesamiento que pueda unir varias bases de datos, con el fin de construir un único conjunto de datos, con un seguimiento multidisciplinar de los mismos. Así, en la misma base de datos se podrán tener instancias que contengan datos sobre los volúmenes de gases en la atmósfera, anomalías térmicas y datos sísmicos relacionados con el volcán para intentar construir un clasificador más robusto y con mayor precisión en las predicciones de los niveles de alerta.

## REFERENCIAS

- ▶ Adams, C. (2012). Measurements of Atmospheric Ozone, NO<sub>2</sub>, OClO, and BrO at 80°N using UV-Visible Spectroscopy, Toronto.
- ▶ AVDC. (2019). Data/ Archive Overview/ NPP/ OMPS/ NMSO2-PCA-L2. Disponible en: <<https://avdc.gsfc.nasa.gov/index.php?site=1871694987&id=65&go=list&path=/NMSO2-PCA-L2>>. Acceso en: 27 mar 2019.
- ▶ Boué, A. (2015). Data mining and volcanic eruption forecasting, Grenoble.
- ▶ Castro, L. N., Ferrari, D. G. (2016). Introdução a mineração de dados: conceitos básicos, algoritmos e aplicações, São Paulo.
- ▶ IGP, Instituto Geofísico del Perú. (2019). Reportes Volcán Sabancaya. 2019. Disponible en: <<http://intranet.igp.gob.pe/cenvul/reportessabancaya>>. Acceso en: 05 jun 2019.
- ▶ INGEMMET, Instituto Geofísico, Minero y Metalúrgico. (2019). Redes de Monitoreo Volcán Sabancaya. Disponible en: <[http://ovi.ingemmet.gob.pe/?page\\_id=681](http://ovi.ingemmet.gob.pe/?page_id=681)>. Acceso en: 05 jun 2019.
- ▶ Kohavi, R., John, G. H. (1997). Wrappers for feature subset selection. Artificial Intelligence 97, 273-324.
- ▶ Lampel, J. et al. (2017). Detection of water vapour absorption around 363 nm in measured atmospheric absorption spectra and its effect on DOAS evaluations. Atmospheric Chemistry and Physics 17, 1271-1295.
- ▶ Parra, J. et al., (2017). Use of Machine Learning to Analyze and - Hopefully - Predict Volcano Activity. Acta Polytechnica Hungarica 14.
- ▶ Provost, F., Fawcett, T. (2013). Data Science for Business: What you need to know about data mining data-analytic thinking. Sebastopol.
- ▶ Salzberg, S. L. (1993). C4.5: Programs for Machine Learning by J. Ross Quinlan. Morgan Kaufmann Publishers, Inc., Machine Learning 16, 235-240.
- ▶ Universidade de Waikato (Nova Zelândia), 2019. WrapperSubsetEval. Weka. Disponible en: <http://weka.sourceforge.net/doc.dev/weka/attributeSelection/WrapperSubsetEval.html>. Acceso en: 05 jun 2019.
- ▶ Università Degli Studi di Torino (Italia). Dipartimento di Scienze della Terra. (2019). MIROVA. Disponible en: <<http://www.mirovaweb.it/?action=about>>. Acceso en: 05 jun 2019.

# Discontinuidades cosísmicas identificadas a partir de datos GNSS relacionadas a actividades sísmicas

Rafael Miranda<sup>1</sup>, Rosa Ancasi<sup>1</sup>, Luis Cruz<sup>1</sup>, Edu Taipe<sup>1</sup> y Alfonso Añamuro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI - INGEMMET), Arequipa, Perú - ovi@ingemmet.gob.pe

**Palabras clave:** Desplazamientos cosísmicos, Series GNSS, Sismos CVASHH.

## RESUMEN

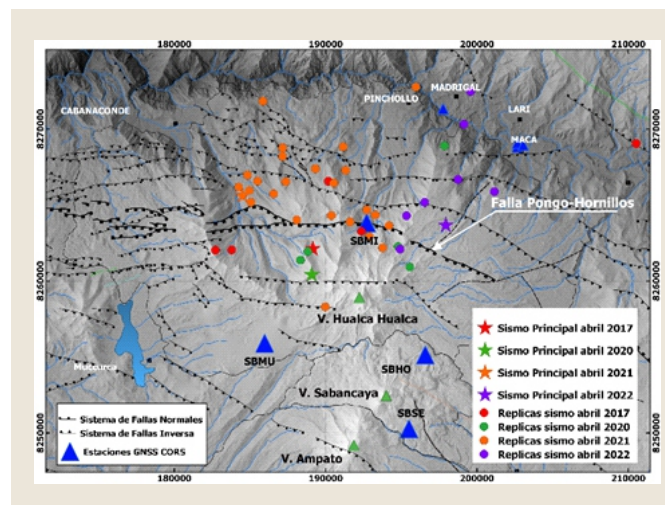
El presente resumen describe los episodios de discontinuidades y desplazamientos co-sísmico asociados a sismos de diferentes magnitudes ocurridos en la zona norte del Complejo Volcánico Amapto - Sabancaya - Hualca Hualca (CVASHH) y alrededores, áreas con recurrencia sísmica asociada a procesos volcánicos y tectónicos. En el año 2014 el Observatorio Vulcanológico del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (OVI - INGEMMET) instaló una red de 08 estaciones GNSS para el monitoreo de volcanes y deslizamientos. La estación GNSS identificada como Milluca (SBMI) se ubica sobre el bloque deslizante de la falla normal Pungo-Hornillos, ha registrado 4 procesos de desplazamiento cosísmico, la más significativa debido al sismo del 08 de octubre del 2021 (5.5 Magnitud Local), asociado a periodos de intrusiones magmáticas, que probablemente activó a un conjunto de sistemas de fallas de esta región, provocando un desplazamiento cosísmico horizontal de 12 cm y vertical de -24 cm, registrado por 11 estaciones de monitoreo GNSS y que a su vez restringe la estimación de las velocidades.

## INTRODUCCIÓN

Las discontinuidades en las series GNSS están inducidas por sismos que provocan impacto significativo en la tasa de desplazamiento súbito de una o varias estaciones GNSS, asociados a sismos de diferentes magnitudes entre 4.7 - 5.5ML (catálogo sísmico IGP) y que a su vez dependen de su ubicación espacial. La estación SBMI que se situó sobre el plano de falla normal Pungo - Hornillos, con la prioridad de medir las discontinuidades relacionadas directamente con la actividad sísmica que constantemente ocurren en el sector norte de CVASHH. Con los datos de esta estación se muestran los diferentes episodios de desplazamientos co-

sísmico y sus magnitudes relacionadas a sismos que provocaron un cambio en las series GNSS, en trabajos futuros se proponen realizar análisis y modelamiento por cada episodio.

Marco Geodinámico: Los procesos tectónicos locales que controlan el CVASHH, es debido a su ubicación dentro de la cadena volcánica de los andes centrales, tectónicamente es un ambiente complejo y muy activo, según Rivera (2014), está limitado por un sin número de lineamientos, fallas activas (Fig. 1), fracturas de dimensiones y rumbos variados. Este complejo sistemas de fallas, se distribuyen en tres grupos: (1) Sistema de fallas normales Trigal, con rumbo hacia el E-O de longitud entre 12 a 10 km, (2) Sistema de fallas normales Solarpampa-Puye Puye-Pillo, con una longitud de ~100 km, con lineamientos en dirección N-S, (3) Sistema de fallas Sepina, con orientación hacia el NE-SO, Rivera et al (2014), Benavente et al (2017), Jay et al (2015), Pritchard et al (2015), Gerbe y Thouret (2004), Antayhua y Tavera (2003), Huaman (1993), Mering (1996). Es un área



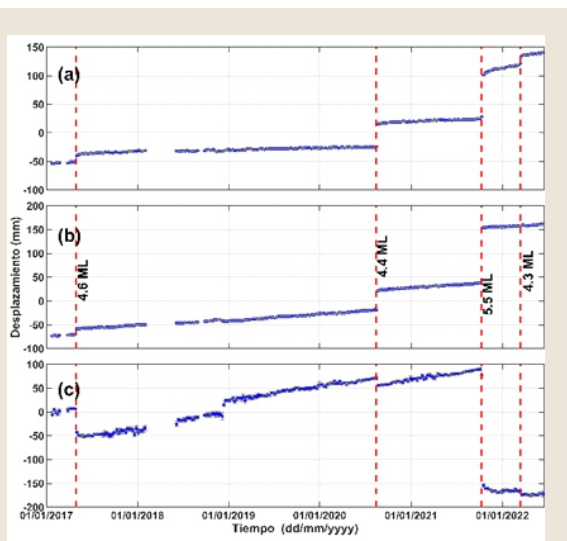
► Fig. 1 - Mapa de distribución de los sistemas de fallas, sismicidad representativa y estaciones GNSS, generadora de procesos de desplazamiento co-sísmico.



sísmicamente muy activa que registran a una fuente de generación de sismos que se distribuyen de manera dispersa entre el N, NW y NE del CVASHH, estos procesos tectónicos locales evidencian una relación entre el vulcanismo actual y los sistemas de fallas. En este grupo de sistema de fallas, se sitúa la falla normal Pungo - Hornillos (Fig. 1), desde que se tiene datos de sismicidad y GNSS, se ha registrado desplazamientos co-sísmico recurrentes con una tasa de hundimiento entre -24 a -1.5 cm.

Observaciones GNSS CORS: Después de haberse iniciado la actividad eruptiva del volcán Sabancaya (6 de noviembre del 2016), se estableció una cuarta estación GNSS permanente en octubre del 2016 al norte del volcán, con el objetivo de medir y cuantificar deformación asociada a intrusiones magmáticas, sin esperar medir desplazamientos co-sísmico del bloque deslizante de la falla normal Pungo - Hornillos, probablemente asociados a procesos de intrusión magmática desde fuentes profundas que terminaron activando los sistemas de falla. Analizamos datos de 11 estaciones GNSS CORS (Fig. 1), configurados para muestrear cada 15 segundos. El procesamiento diario se realiza con el software GAMIT/GLOBK v.10.7.1, (Herring y McClusky et al 2010).

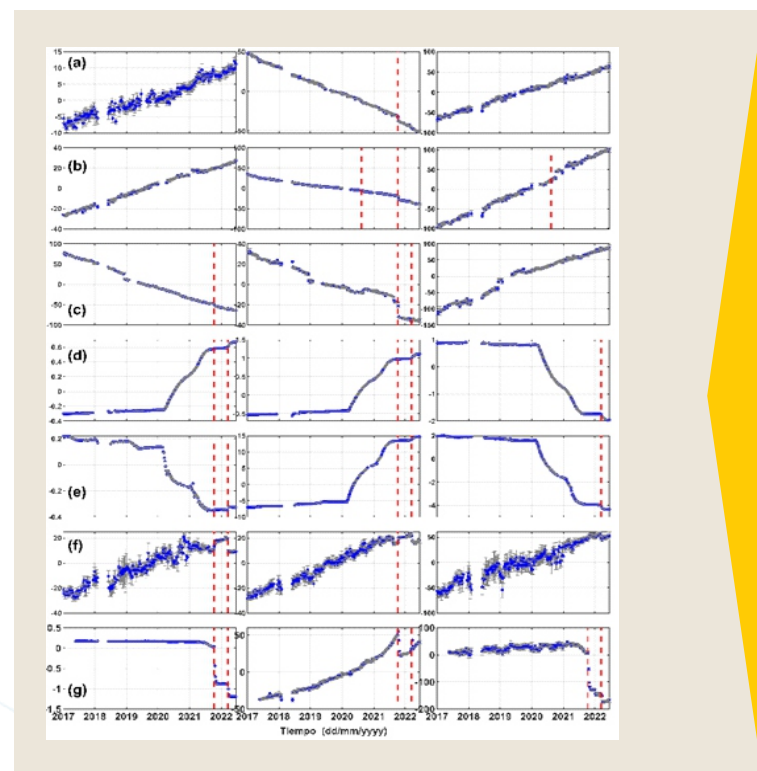
Para estimar las posiciones diarias absolutas incluimos en el procesamiento 22 sitios permanentes



► Fig. 2 - Serie temporal de la estación GNSS SBMI (Milluca), con desplazamientos co-sísmico de 04 episodios, asociados a sismo con magnitudes >4.3 (líneas rojas).

del Servicio GNSS Internacional (IGS) de la placa de Sudamérica, empleando las efemérides finales, parámetros de rotación de la tierra, del modelo de ionosfera y los sesgos de código diferencial para satélites y receptores. La estación GNSS SBMI (Milluca) registro 4 episodios de deformación co-sísmica de hasta -24 cm (componente vertical) con un periodo post-sísmico de ~ 2 meses después del sismo del 08 de octubre del 2021, en la Fig. 2 se ilustra la serie temporal más representativa del desplazamiento co-sísmico.

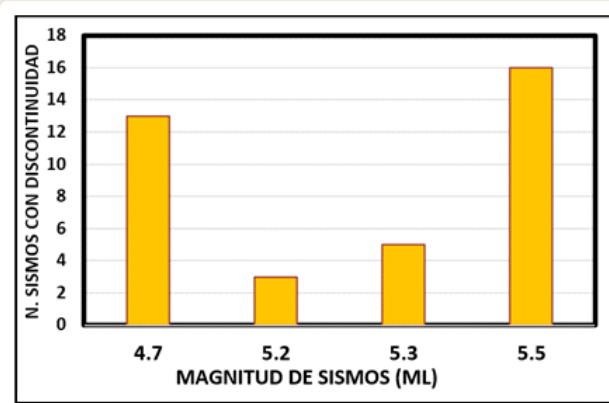
Registro De Discontinuidades En Los Datos GNSS: Las discontinuidades identificadas en las series de tiempo en las diferentes estaciones de monitoreo de volcanes y deslizamientos se visualizan en la Fig. 3, registrándose desplazamientos horizontales y verticales en al menos una componente, inducidos por sismos de magnitudes mayores >4ML y compensaciones co-sísmico relacionados a estos sismos importantes (Tabla 1) registrados desde el año 2015. Es probable que existan discontinuidades no identificadas en las series de tiempo inducidas por



► Fig. 3 - Discontinuidades observadas en 08 estaciones GNSS asociado a sismos > de 4.7 ML, serie temporal de la a) estación SurEste, b) estación Hornillos, c) estación Mucurca, d) estación Maca 1, e) estación Maca 3, f) estación Maca 2 y g) estación Madrigal.

sismos de menores magnitudes, dada la alta tasa de deformación del Sabancaya (~ 3.4 cm/año) y en los deslizamientos del Colca, enmascaran muchos procesos co-sísmicos, asociados a procesos de recarga de magma hacia la cámara magmática regional situada entre 12 - 13 km de profundidad (Boxiart et al. 2020), determinándose un volumen instruido de 155 millones m<sup>3</sup>, (mayor volumen de magma calculado). De acuerdo a MacQueen et al 2020, dicha área está altamente estresada por las altas presiones, asociadas al volumen de magma en ascenso, y su ubicación dentro de un sistema hidrotermal, que activan diferentes sistemas de fallas, como Pungo-hornillos.

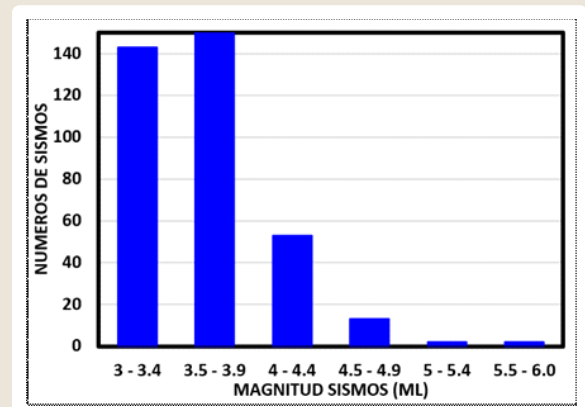
Desde nuestro enfoque se han identificado 37 discontinuidades en las series de tiempo GNSS, asociados a desplazamientos inducidos por sismos (Tabla 1). Sin embargo, entendemos que existen discontinuidades en la base de datos que requieren mayor análisis. La Fig. 1, muestra la red de estaciones GNSS que registraron discontinuidades inducidos por sismos de magnitud > 4ML. En la Fig. 4 se muestra un histograma del número de discontinuidades con respecto a la magnitud de los sismos que indujeron discontinuidades, sismos de 5.5ML inducen mayores magnitudes de deformaciones registrados a fecha.



► Fig. 4 - Histograma del número total de discontinuidades identificadas con respecto a la magnitud de los sismos.

La Fig. 5, muestra el número de sismos que originaron discontinuidades en las estaciones GNSS en relación con su magnitud. De este conjunto de sismos, un total de 553 eventos registrados corresponde a un ámbito de 50 km con respecto a los sistemas de fallas, 4

eventos sísmicos son responsables de las discontinuidades visibles en nuestra base de datos, diremos que en el rango de magnitud 3 - 3.9ML que representa al 87 % de los sismos registrados entre el 2017 - 2022 (mayo), rara vez inducen discontinuidades, el 12% de estos sismos que corresponde a magnitudes entre 4.0 - 4.9 ML son responsables del 57% de las deformaciones co-sísmicas, que indujeron al menos una discontinuidad en una componente en las series GNSS.



► Fig. 5 - Número total de sismo registrados por la red del IGP y clasificados dentro de un radio de 50 km, respecto al sistema de fallas que indujeron discontinuidades.

Observamos que los sismos entre 5.0 - 5.5 que representan el 1% y son responsables del 43% de los desplazamientos co-sísmicos registrados en las series GNSS de la red de monitoreo. Un sismo importante de magnitud 6.0ML (1 de noviembre del 2016) registrado en la región de Puno a ~ 100 km del sistema de fallas Pungo -Hornillos, no genero cambios en las series GNSS.

Discontinuidades Inducidos Por Sismos Importantes en el CVASHH.

Sismo del 30 de abril del 2017: Ocurrido a lo largo del sistema de fallas activas normales Pungo-Hornillos y Hualca Hualca-Jatun Rumi, un 30 de abril de 2017 de magnitud 5.2ML (13:29 UTC) a 3.9 km al suroeste de la estación GNSS SBMI, con una profundidad de 11 km, acompañado de 5 réplicas de magnitudes entre 3.4 - 4.5 ML, generando discontinuidades en tres componentes de la estación GNSS SBMI, con un desplazamiento co-sísmico máximo en la

componente horizontal de 1.5 cm y un desplazamiento co-sísmico registrado en la componente vertical de -4.4 cm de hundimiento, la dirección predominante del desplazamiento co-sísmico con la estimación de velocidades presenta una orientación hacia el noreste.

Sismo del 14 de agosto del 2020: Ocurrido el 14 de agosto de 2020 de magnitud 5.3ML (15:34 Hora Local) a 5 km al suroeste de la estación GNSS SBMI, con una profundidad de 7 km, sin replicas después del evento principal, los días del 15 y 16 se registraron sismos próximos al evento del día 15, las magnitudes estuvieron entre 3.4 - 3.9 ML, el epicentro del sismo se localizó a lo largo del límite del sistema de fallas activas normales de Hualca Hualca - Jatun Rumi, provocando hasta 5 discontinuidades, de las cuales 3 se observaron en la estación GNSS SBMI con desplazamiento co-sísmico horizontal de 3.9 cm, en dirección noreste y un desplazamiento co-sísmico vertical máximo de -1.5 cm, dos de estas discontinuidades se registraron en la estación GNSS SBHO con desplazamientos horizontales de 3 mm y vertical de -8 mm.

Sismo del 09 de octubre del 2021: Uno de los sismos de mayor magnitud registrado en el ámbito del sistema de fallas normales, ocurrió el 8 de octubre de 2021 con magnitud 5.5ML a 8.4 km al oeste de la estación GNSS SBMI, con una profundidad de 10 km, genero 22 réplicas de magnitudes entre 3.4 - 4.3 ML. La red de estaciones GNSS (Fig. 1) registraron desplazamientos co-sísmicos horizontales y verticales

en 8 estaciones de monitoreo volcánico y deslizamientos (Tabla 1). La estación GNSS SBMI registro un desplazamiento horizontal de 11.7 cm y vertical de -24.1 cm, con dirección predominante hacia el noreste., mientras las estaciones GNSS SBSE, SBHO y SBMU, presentaron una dirección de desplazamiento co-sísmico horizontal hacia el suroeste, la estación GNSS MGAL de monitoreo de deslizamientos registro un desplazamiento horizontal de 78.6 cm y vertical de -12.7 cm, activando al deslizamiento, las estaciones GNSS permanentes MAD1, MADM y MAD3, presentaron una dirección de desplazamiento en sentido de la pendiente del deslizamiento.

Sismo del 15 de marzo del 2022: Es el cuarto sismo que genero un impacto significativo en la tasa de desplazamiento y deformación en las estaciones de monitoreo de volcanes y deslizamientos, este sismo fue detectado entre el límite del sistema de fallas activas normales Pungo Hornillos - Hualca Hualca - Jatun Rumi, ocurrido el 15 de marzo del 2022 de magnitud 4.7ML a 5.2 km al este de la estación GNSS SBMI, con una profundidad de 11 km, con un total de 6 réplicas asociados al sismo principal, las magnitudes fueron entre 3.2 - 4.1 ML, las discontinuidades inducidas en las series GNSS, fueron un total de 13 (Tabla 1), registrados en 5 estaciones GNSS (Fig. 1), el mayor desplazamiento co-sísmico horizontal fue de 26.8 cm (MGAL) y vertical de -14.5 cm (estación MAD3), las compensaciones co-sísmicas se llegaron a estabilizar después de 2 meses de ocurrido el evento.

## CONCLUSIONES

El propósito de este resumen es la identificar y estimar desplazamientos y movimientos co-sísmicos en registros GNSS asociados con sismos registrados en ámbito del CVASHH, como mencionamos, en trabajos futuros se proponen realizar estimaciones del desplazamiento co-sísmico y modelamiento usando geodesia espacial.

Los registros de discontinuidades en la data GNSS evidencian que sismos con magnitudes menores a 4.5 inducen desplazamientos co-sísmicos de menor magnitud, sismos de magnitud 5.5ML son los responsables de generar las mayores discontinuidades visibles en las series GNSS, que significan tan solo el 1% de los sismos registrados en el ámbito de los sistemas de fallas y que provocan el 43% de las discontinuidades, con un radio de afectación de 20 km con respecto al sistema de fallas activas. Las magnitudes de desplazamiento en la componente vertical fueron de -24 cm y en las componentes horizontales de hasta 12 cm, registrados por la red de monitoreo volcánico. La red de monitoreo de deslizamientos registro hasta 78 cm de desplazamiento en la componente horizontal y en la vertical de -14 cm, geográficamente asociados al epicentro del sismo, su profundidad y proximidad a los sistemas de fallas activas.

Observamos que la región más activa se refiere al sector norte del complejo, región con alta actividad extensiva asociado al incremento de esfuerzos litosféricos típico de fallas normales, que probablemente estén asociados con los periodos de intrusiones magmáticas que correlacionan con los periodos de los sismos ocurridos. El estrés debido a las altas presiones que es provocado por el volumen de magma en ascenso genera una compresión del área circundante provocando un acomodamiento y compensación regional del área limitado por los sistemas de fallas activas de Pungo – Hornillos y Hualca Hualca - Jatun Rumi, la cual se sitúa dentro de un sistema hidrotermal activo, como respuesta a la compresión ejercido por el ascenso de magmas hacia las regiones más superficiales del volcán Sabancaya.

## REFERENCIAS

- ▶ Antayhua, Y., & Tavera, H. (2003). Volcanes y sismicidad en la región del volcán Sabancaya (Arequipa). Gerbe, M. C., & Thouret, J. C. (2004). Role of magma mixing in the petrogenesis of tephra erupted during the 1990-98 explosive activity of Nevado Sabancaya, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 66(6), 541-561.
- ▶ Antayhua, Y., & Tavera, H. (2003). Volcanes y sismicidad en la región del volcán Sabancaya (Arequipa). Benavente, C., Delgado, G., García, B., Aguirre, E., & Audin, L. (2017). Neotectónica, evolución del relieve y peligro sísmico en la región Arequipa. *INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 64, 370.
- ▶ Boixart G, Cruz LF, Miranda Cruz R, Euillades PA, Euillades LD, Battaglia M (2020) Source model for Sabancaya volcano constrained by dinsar and GNSS surface Deformation Observation. *Remote Sensing* 12:1852. <https://doi.org/10.3390/rs12111852>.
- ▶ Gerbe, M. C., & Thouret, J. C. (2004). Role of magma mixing in the petrogenesis of tephra erupted during the 1990-98 explosive activity of Nevado Sabancaya, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 66(6), 541-561.
- ▶ Herring, T.; King, B.; McClusky, S. Introduction to GAMIT/GLOBK Reference manual Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program. Release 10.3. EAPS. 2010.
- ▶ Huaman et al (1993): Cadre structural et risques géologiques étudiés à l'aide de l'imagerie spatiale: la région du Colca (Andes du Sud Perú): *Bull. Soc. Géol. France*, t. 164, no 6, 807-818.
- ▶ Jay, J. A., Delgado, F. J., Torres, J. L., Pritchard, M. E., Macedo, O., & Aguilar, V. (2015). Deformation and seismicity near Sabancaya volcano, southern Peru, from 2002 to 2015. *Geophysical Research Letters*, 42(8), 2780-2788.
- ▶ MacQueen, P., Delgado, F., Reath, K.A., Pritchard, M.E., Bagnardi, M., Milillo, P., Lundgren, P.R., Macedo, O., Aguilar, V., Ortega, M., Ancasi, R., Lazarte Zerpa, I.A., Miranda, R., 2020. Volcanotectonic interactions at Sabancaya volcano, peru eruptions, magmatic inflation, moderate earthquakes, and fault creep. <https://doi.org/10.1002/essoar.10501561.1>
- ▶ Mering, C.; Huamán, D.; Chorowicz, J.; Deffontaines, B. & Guillaude, R. (1996) - New data on the geodynamics of southern Perú from computerized analysis of SPOT and SAR ERS-1 images. *Tectonophysics*, 259(1-3): 153-169.
- ▶ Rivera Porras, M. A., Mariño Salazar, J., Samaniego Eguiguren, P., Delgado Ramos, R., & Manrique Llerena, N. (2016). Geología y evaluación de peligros del complejo volcánico Ampato-Sabancaya, Arequipa - [Boletín C 61].



# Actividad volcánica asociada a procesos de formación y destrucción de domos de lava en el volcán Sabancaya, 2019 - 2022

Mayra Ortega<sup>1</sup>, Luis Cruz<sup>1</sup>, Fredy Apaza<sup>1</sup>, Rosa Anccasi<sup>1</sup>, Rosario Paxi<sup>1</sup>, Edu Taipe<sup>1</sup>, Videl Chavez<sup>1</sup>

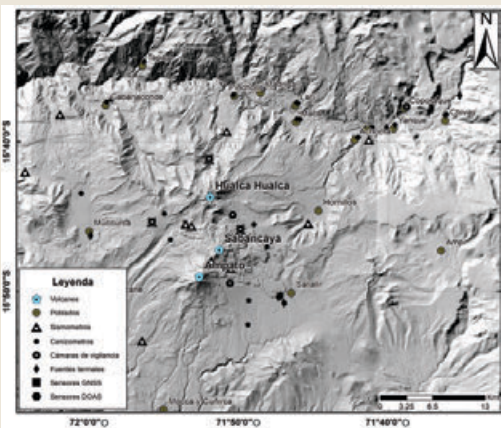
<sup>1</sup> Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, Arequipa, Perú - mortega@ingemmet.gob.pe

**Palabras clave:** volcán Sabancaya, Domos de lava, Monitoreo multidisciplinario.

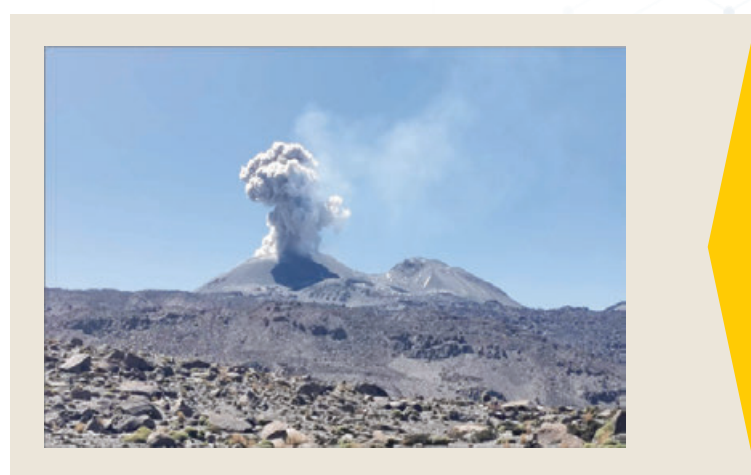
## INTRODUCCIÓN

El volcán Sabancaya (5,980 msnm) se localiza en la parte sur-central de la provincia de Caylloma, departamento de Arequipa, aproximadamente a 76 km en dirección noroeste de la ciudad de Arequipa (Figura 1). Entre 10 y 25 km desde el cráter, se ubican más de veinte centros poblados de la provincia de Caylloma, cuya población actualmente se encuentra afectada por la actividad eruptiva del volcán. El volcán Sabancaya limita por el norte con el volcán Hualca Hualca y al sur con el volcán Ampato, con el cráter activo ubicado en las coordenadas geográficas 15°47' latitud sur y 71°50' longitud oeste.

constituido por dos conos superpuestos, al medio de los cuales se encuentra el cráter activo. Los estudios geológicos, muestran que este volcán se ha edificado en tres etapas: Sabancaya I (compuesto por flujos de lava andesítica y dacítica que conforman la base del volcán, al pie del flanco este y oeste), Sabancaya II (conformada por flujos de lava que sobreyacen a las lavas de la primera etapa, además de un domo de lava andesítico ubicado al sur del cono de cenizas del volcán Sabancaya cortando los flujos de lava de esta etapa) y Sabancaya III (conformado por flujos de lava que forman la parte superior del cono noreste del Sabancaya y también por flujos de lava del cráter adventicio).



► Fig. 1 – Mapa de ubicación del volcán Sabancaya y red de monitoreo multiparamétrico operada por el OVI.



► Fig. 2 – Volcán Sabancaya, vista desde el flanco Noroeste.

## Contexto Geológico

El volcán Sabancaya (Figura 2), en su mayoría está conformado por secuencias de flujos de lava de composición andesítica y dacítica, con limitados depósitos piroclásticos (Rivera et al., 2016; Samaniego et al., 2016). El volcán Sabancaya está

## Contexto Estructural

Benavente et al. (2010, 2012) describen un control estructural en dirección noroeste-sureste conformado por fallas normales, principalmente con buzamientos opuestos que cortan depósitos volcánicos cuaternarios, depósitos fluvio-glaciares y aluviales.

Posteriormente, los estudios de neotectónica realizados por Benavente et al. (2018) evidenciaron 14 nuevas fallas activas en el sector del valle del Colca y nuevas características sobre las ya identificadas anteriormente.

### METODOLOGÍA

El presente trabajo resulta de la adquisición, procesamiento, análisis e interpretación de la información geo-científica adquirida a través de la instrumentación multiparamétrica instalada de manera permanente y temporal entre los años 2013 a la fecha alrededor del volcán Sabancaya y Hualca Hualca, a fin de llevar un registro continuo y detallado del comportamiento del volcán antes y durante su reciente proceso eruptivo, y de los diferentes procesos geológicos identificados, como fue la formación y destrucción de domos de lava.

Es importante resaltar que, para el trabajo de gabinete, primero se analizaron los parámetros de forma individual y posteriormente se procedió a la integración de interpretación en conjunto.

**Tabla 1** – Métodos y tipo de instrumentación que conformaron la red de monitoreo multidisciplinario del volcán Sabancaya (2019–2022).

MÉTODO	INSTRUMENTO	CANTIDAD
GEOLOGÍA	Cenizómetros	43
DEFORMACIÓN VOLCÁNICA	Receptores GNSS	04
SISMOLOGÍA VOLCÁNICA y ACÚSTICA	Sismómetros	15
	Infrasonido	01
QUÍMICA DE GASES VOLCÁNICOS	Escáner DOAS	02
HIDROQUÍMICA	Registrador de temperatura	01
	Estación meteorológica	01
MONITOREO VISUAL Y SENSORES REMOTOS	Cámaras IP	05
	Cámara térmica	01

### Data y Red de monitoreo

El volcán Sabancaya actualmente se encuentra en proceso eruptivo desde el año 2016 y en reiteradas ocasiones, durante periodo de importante actividad volcánica, la caída de ceniza, ha sido el principal peligro que ha afectado zonas proximales y distales al volcán. De acuerdo a la evaluación de riesgo volcánico en el sur del Perú (Macedo et al. 2016), el volcán Sabancaya se encuentra dentro de un nivel MUY ALTO de riesgo volcánico relativo. En tal sentido, este volcán cuenta con una red de monitoreo multiparamétrico denso y robusto con transmisión de datos en tiempo real (Figura 1 y Tabla 1).

### ACTIVIDAD VOLCÁNICA ASOCIADA A PROCESOS DE FORMACIÓN Y DESTRUCCIÓN DE DOMOS DE LAVA, 2019 - 2022

Durante el 2019 a la fecha, el volcán Sabancaya ha presentado una actividad que ha oscilado entre niveles leves y moderados, caracterizándose por procesos de intrusión magmática, que posteriormente repercutieron en un incremento en la actividad explosiva, y procesos de formación y destrucción de domos de lava en el cráter activo del volcán.

#### 1.1 Domo HUK

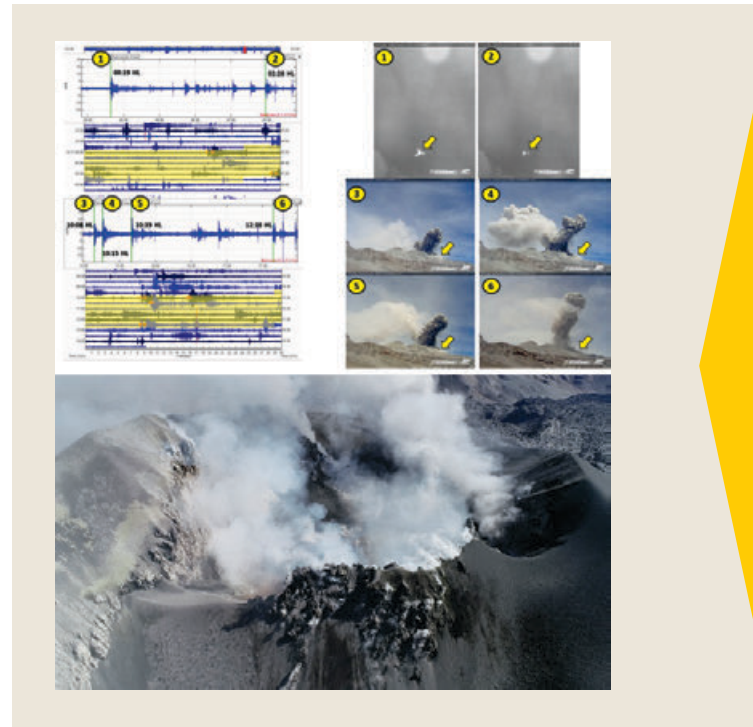
Se identificó a través de imágenes satelitales MODIS y Sentinel – 2, que este primer domo comenzó a formarse lentamente desde febrero del 2017, pero no fue sino hasta el año 2019 (septiembre - noviembre), donde se registró un crecimiento acelerado de este cuerpo de lava, proceso identificado mediante la sismicidad (volúmenes importantes de magma intruído e incremento de la energía sísmica liberada), flujos de dióxido de azufre SO<sub>2</sub> muy altos y anomalías térmicas moderadas, lo cual, sugirió el ascenso de volúmenes importantes de magma muy cerca de la superficie dando lugar al crecimiento acelerado del domo (Figura 3).

Posteriormente, a partir de diciembre del 2019, se registró un cambio en la actividad del volcán, la cual se prolongó hasta julio del 2020, caracterizándose por un descenso de la cantidad y energía de la sismicidad por movimiento de fluidos. De igual manera ocurrió con los flujos de SO<sub>2</sub> y las anomalías térmicas,

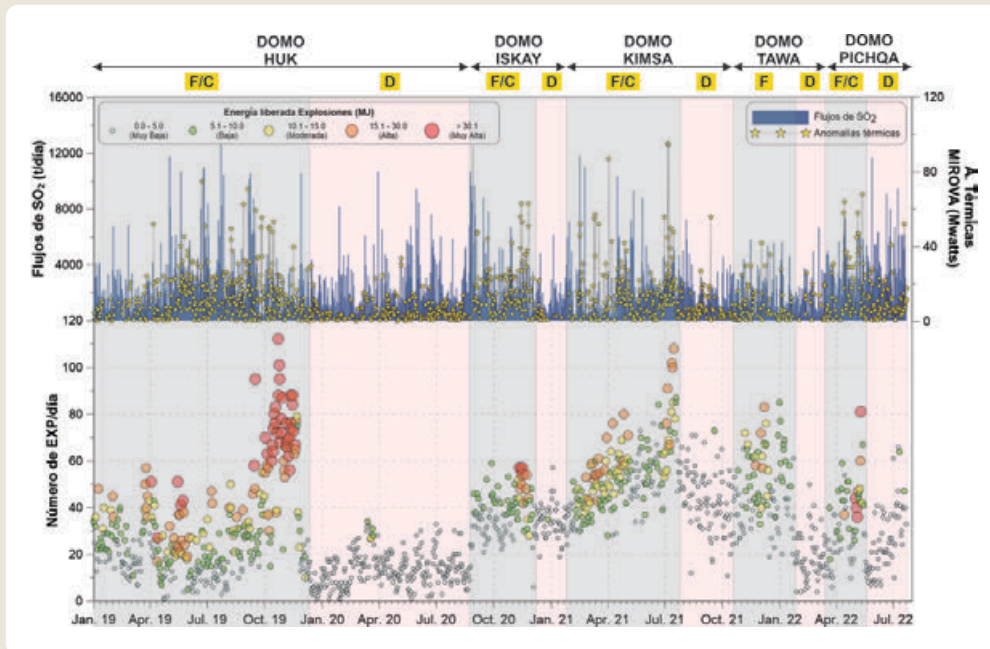
comenzaron a predominar explosiones poco energéticas acompañadas de tremor volcánico que mediante las cámaras de video vigilancia se correlacionaron con la ocurrencia de pequeños flujos piroclásticos generados por colapso de las columnas eruptivas de gases y ceniza (Figura 4), lo cual, indicó la progresivamente destrucción del domo HUK.

### 1.1 Domo ISKAY

Entre julio y noviembre del 2020, se registró nuevamente un incremento en la sismicidad distal y proximal al volcán, la cual se asoció a procesos de intrusión magmática y migración de este hacia profundidades más someras respectivamente. Por otra parte, el registro de anomalías térmicas moderadas, la acumulación de gases por debajo de la superficie (reflejado en los flujos de SO<sub>2</sub>) debido a la poca permeabilidad, provocó la formación de este segundo domo de lava (Figura 3 y 5).



► Fig. 3 –Destrucción parcial del domo de lava HUK, registrado mediante los parámetros de monitoreo.



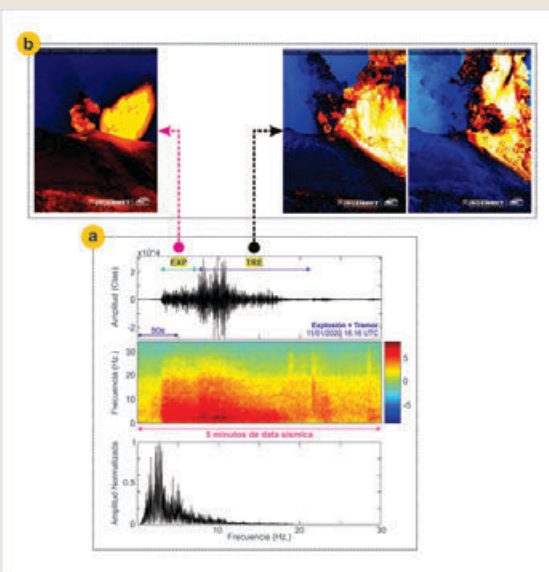
► Fig. 4 –Seguimiento de la actividad volcánica asociada a los procesos de formación y destrucción de domos de lava en el volcán Sabancaya (periodo 2019 -2022). F/C: Periodos de Formación/Crecimiento de domo de lava y D: Periodos de destrucción parcial de los domos de lava.





► Fig. 5 – Sobrevuelo con dron del 01 de diciembre del 2020, donde se evidencia el crecimiento del domo ISKAY

Seguidamente, a partir de diciembre del 2020 hasta principios de febrero del 2021, la actividad volcánica descendió de manera significativa, registrándose principalmente tremor volcánico, valores bajos de flujos de SO<sub>2</sub> (por lo general < 4000 t/día) y anomalías térmicas leves (< 20 MW) y al igual que en el proceso de destrucción del domo HUK, se comenzó a observar explosiones poco energéticas acompañadas de tremor volcánico que en superficie se correlacionaron con la ocurrencia de pequeños flujos piroclásticos (Figura 6), sugiriendo la destrucción de este segundo domo de lava (ISKAY).

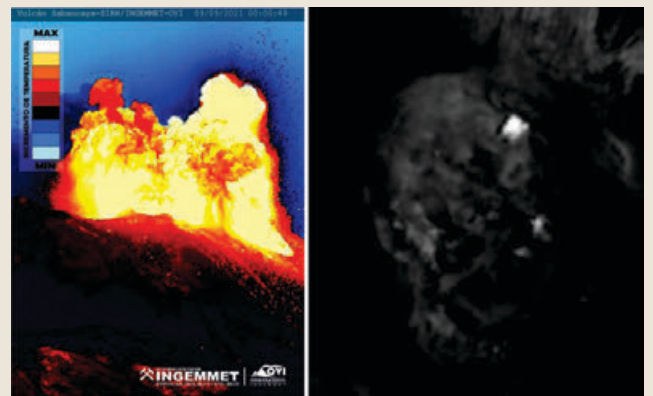


► Fig. 6 – Destrucción parcial del domo de lava ISKAY, registrado mediante los parámetros de monitoreo.

### 1.1 Domo KIMSA

Entre febrero y julio del 2021, un incremento en la sismicidad distal a manera de enjambres, indicó el inicio de un nuevo periodo de intrusión magmática que posteriormente repercutió en un aumento de la actividad proximal del volcán, reflejándose en el registro de sismicidad por fluidos energética, incremento sostenido del flujo de SO<sub>2</sub> y frecuentes anomalías térmicas moderadas, lo cual indicó la migración de magma hacia la superficie, dándose las condiciones necesarias para la formación de este tercer domo de lava denominado KIMSA (Figura 3), sin embargo, al no observarse en superficie texturas correspondientes a un cuerpo de lava, éste fue catalogado como un domo endógeno.

Luego, entre agosto y octubre del 2021, este domo endógeno empezó a sufrir procesos de destrucción parcial, evidenciándose sobre todo en el parámetro sísmico, con la ocurrencia de explosiones de baja energía acompañadas de tremor volcánico y que en superficie se correlacionó con emisiones de gases y ceniza y fragmentos de roca (Figura 7).



► Fig. 7 – Destrucción parcial del domo de lava endógeno KIMSA. Izquierda: Emisiones con eyección de fragmentos de roca. Derecha: Ausencia de texturas correspondientes a este domo (imagen PlanetScope).

### 1.1 Domo TAWA

A principios de noviembre del 2021 y mediados de enero del 2022, se registraron nuevamente señales de incremento en la actividad volcánica del Sabancaya



(energía de explosiones ~ 21 MJ, anomalías térmicas moderadas ~ 42 MW y flujos > 4000 t/día), lo cual, sugirió un nuevo proceso de formación de domo de lava, sin embargo, los cambios observados no alcanzaron magnitudes importantes como para superar en tamaño los procesos de formación anteriores, y debido a que fue un pulso pequeño de aporte de magma a niveles superficiales también tuvo una rápida destrucción (Figura 3).

## 1.2. Domo PICHQA

Desde mediados de marzo a mediados de mayo, se registró un proceso de intrusión, que posteriormente repercutió en un incremento en la actividad proximal al volcán, registrándose flujos de SO<sub>2</sub> altos (> 4000 t/día), incremento en la energía de las explosiones (~ 50 MJ), de igual manera, las anomalías térmicas registradas por MIROVA, comenzaron a presentarse con mayor frecuencia y con valores moderados (> 50 MW), lo cual, indicó un nuevo proceso de formación y crecimiento del quinto domo de lava identificado en el volcán Sabancaya denominado "PICHQA" (Figura 3 y 8), el mismo que, ha sufrido etapas de destrucción



► Fig. 8 -Sobrevuelo con dron del 26 de junio del 2022, donde se evidencia la presencia del domo PICHQA emplazado en superficie.

parcial, evidenciándose con el registro de señales tanto sísmicas y acústicas de alta frecuencia y emisiones de gases y ceniza acompañadas de fragmentos de roca (Figura 9).



► Fig. 9 -Periodos de destrucción parcial del domo de lava PICHQA, registro a través de las cámaras de vigilancia (18 de julio del 2022).

## Discusión

Mediante la integración e interpretación de los diferentes parámetros de monitoreo, durante el periodo de análisis del 2019 al 2022, el comportamiento del volcán Sabancaya ha presentado una erupción de leve a moderada, asociada a repetidos procesos de intrusión magmática, lo que a su vez desencadenó un incremento en la actividad volcánica proximal, generando la formación, crecimiento y destrucción de 5 domos de lava anidados en el cráter activo del volcán, cuya dinámica interna ocasionó una actividad explosiva con emanación de gases magmáticos, material juvenil y la eyección de proyectiles balísticos alrededor del cráter, todo lo anterior, a consecuencia del accionar de una cámara magmática principal ubicada a 12.6 km por debajo del volcán Hualca-Hualca (Cruz, L. 2019).

## CONCLUSIONES

Con base al seguimiento multiparamétrico de la actividad volcánica del Sabancaya, se identificaron periodos de intrusión magmática.

A lo largo del proceso eruptivo del volcán Sabancaya (2016 – a la fecha), se ha registrado la formación, crecimiento y destrucción de cinco domos de lava (Huk, Iskay, Kimsa, Tawa y Pishqa), los cuales estuvieron anidados en el cráter activo del volcán.

Realizar un monitoreo multidisciplinario ha permitido realizar una caracterización detallada de la actividad volcánica y asociarla a diferentes procesos geológicos.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece amablemente a todo el equipo de la ACT12 “Estudio y monitoreo de volcanes activos en el sur del Perú” por haber contribuido mediante el procesamiento y análisis de la información del volcán Sabancaya a lo largo de estos años.

## REFERENCIAS

- ▶ Benavente, C.; Carlotto, V. & Del Castillo, B. (2010). Extensión en el arco volcánico actual del sur del Perú.
- ▶ Benavente, C., Delgado, G., & Audin, L. (2012). Estratigrafía de las cuencas lacustres Colca y Omate: ejemplos de paleosismicidad y tectónica activa del arco volcánico cuaternario y actual de los Andes centrales del sur del Perú. In Congreso Peruano de Geología (Vol. 16, pp. 23-26).
- ▶ Benavente, C., Delgado, G. F., García, B., Aguirre, E. M., & Audin, L. (2018). Neotectónica, evolución del relieve y peligro sísmico en la región Arequipa. Boletín C 64. 1560-9928.
- ▶ Cruz, L. (2019). Análisis de deformación del volcán Sabancaya como herramienta útil en el pronóstico de erupciones periodo 2012-2017. Tesis Título Profesional. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- ▶ Macedo, O.; Taipe, E.; Del Carpio, J.; Ticona, J.; Ramos, D.; Puma, N.; Aguilar, V.; Machacca, R.; Torres, J.; Cueva, K.; Cruz, J.; Lazarte, I.; Centeno, R.; Miranda, R.; Álvarez, Y.; Masias, P.; Vilca, J.; Apaza, F.; Chijcheapaza, R.; Calderón, J.; Cáceres, J. y Vela, J. (2016). Evaluación del riesgo volcánico en el sur del Perú, situación actual y requerimientos de monitoreo en el futuro (Informe técnico, 69 pp).
- ▶ Rivera, M.; Mariño, J.; Samaniego, P.; Delgado, R. & Manrique, N. (2016). Geología y evaluación de peligros del complejo volcánico Ampato-Sabancaya, Arequipa. Boletín C 61.
- ▶ Samaniego, P., M. Rivera, J. Mariño, H. Guillou, C. Liorzou, S. Zerathe, R. Delgado, P. Valderrama, and V. Scao (2016), The eruptive chronology of the Ampato–Sabancaya volcanic complex (Southern Peru), *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 323, 110–128 pp.

# Monitoreo volcánico a través de infrasonido en volcanes de Colombia

Carlos Ospina<sup>1</sup>, Beatriz Galvis Arenas<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Servicio Geológico Colombiano - [cospina@sgc.gov.co](mailto:cospina@sgc.gov.co)

<sup>2</sup> Servicio Geológico Colombiano - [bgalvis@sgc.gov.co](mailto:bgalvis@sgc.gov.co)

**Palabras clave:** Infrasonido volcánico, volcán Nevado del Ruiz, Cadena volcánica de los Coconucos, volcán Puracé, monitoreo volcánico.

## INTRODUCCIÓN

Los volcanes producen una gran variedad de fenómenos con señales de infrasonido entre los que se cuentan aquellos ocurridos durante las erupciones como las explosiones (J. B. Johnson et al., 2003; Jeffrey Bruce Johnson & Ripepe, 2011), columnas eruptivas (McKee, Fee, Yokoo, Matoza, & Kim, 2017), lahares (Jeffrey B. Johnson & Palma, 2015) así como la salida de gases por cráteres y/o fumarolas. Por medio de las diferentes técnicas de monitoreo, como sismología, sensores remotos, mediciones de gases, etcétera, es posible detectar actividad superficial en un volcán y hacer junto a la técnica de infrasonido estudios detallados de esta actividad como los trabajos de Jeff B. Johnson & Aster (2005) y Sciotto et al. (2011), o cámaras de espectro visible, como en los casos de M. Ichihara, Takeo, Yokoo, Oikawa, & Ohminato (2012), y Lopez, Fee, & Dehn (2013). Sin embargo, en ocasiones, las condiciones de visibilidad no permiten corroborar esta actividad por medio de cámaras de espectro visible (IR o UV) o imágenes satelitales.

En Colombia, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) realiza el monitoreo de la actividad de volcanes activos en el país, utilizando varias metodologías de monitoreo, entre ellas la técnica de infrasonido desde hace más de 10 años, logrando así experiencia en el análisis y procesamiento de los datos obtenidos por medio de estos equipos.

En este trabajo se resumen algunas de las experiencias logradas en el uso del infrasonido para monitoreo volcánico en Colombia, desde la instalación de equipos hasta el procesamiento y análisis de la información por parte del equipo de trabajo. Para el volcán Nevado del Ruiz (VNR), se analizó el registro de múltiples erupciones desde el año 2016 (Castaño et

al., 2020) y para el caso de la cadena volcánica de los Coconucos (CVC), se consideró una erupción hidrotermal, registrada en marzo de 2022, en su volcán Curiqinga.

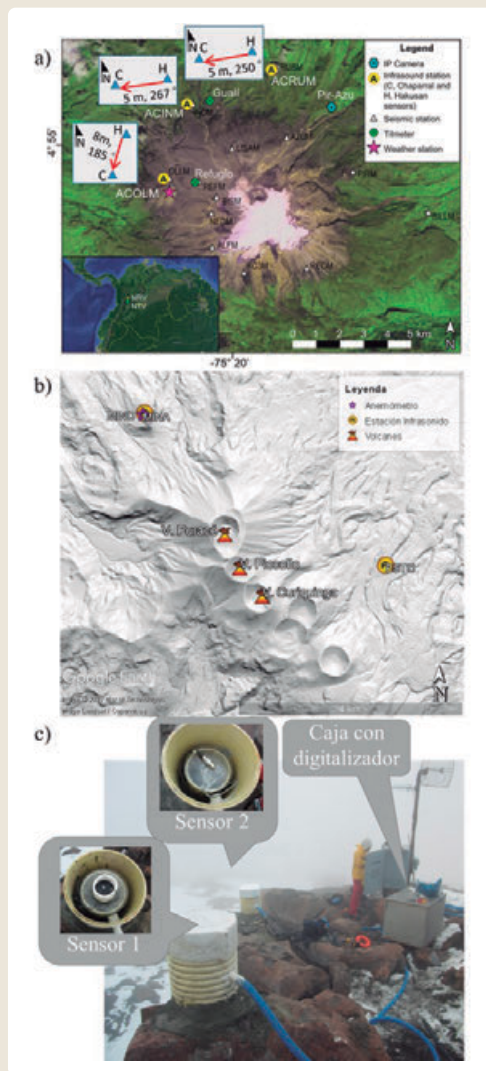
También se presenta la manera como se ha venido adelantando el monitoreo volcánico con esta técnica de infrasonido, teniendo en cuenta las dificultades en volcanes de gran altitud, las limitaciones en la cantidad de sensores y los retos en el procesamiento y análisis de datos dadas las anteriores condiciones. Así mismo, se presenta el programa denominado VolcanStudio que se ha venido desarrollando para afrontar estos retos, permitiendo procesar estos datos en tiempo casi real, por medio del uso de correlogramas y la estimación de parámetros como el back-azimut y energía en las señales detectadas.

## Equipos y red de estaciones

La instalación de estos equipos se ha realizado considerando la metodología aplicada por M. Ichihara et al. (2012), por medio de la correlación cruzada de datos entre un par de sensores de infrasonido o un par infrasonido-sísmico, instalados a una distancia mayor a la longitud de correlación del ruido por viento. Los equipos usados son Chaparral 60 Vx, 25 Vx y Hakusan SI104 digitalizados a 100 Hz.

Para el VNR, antes de 2016 se contaba con tres estaciones, cada una con un solo sensor de infrasonido. Sin embargo, desde diciembre de 2016 se cuenta con tres estaciones, cada una con dos sensores de infrasonido y un sensor sísmico; denominadas ACOM, ACINM y ARUM, instaladas entre 4 y 6 km de distancia del cráter como se puede apreciar en la Fig. 1a. La Fig. 1c muestra una fotografía de la estación ACOLM del VNR donde los equipos están a una distancia de 8 metros.

En el caso de la CVC (Fig. 1b), desde 2016, la estación MINO cuenta con un sensor de infrasonido y uno sísmico. En abril de 2022 se adicionó un sensor de infrasonido en la misma estación. Finalmente, desde junio de 2022 se cuenta en la estación ETQO, con un sensor de infrasonido y uno sísmico.



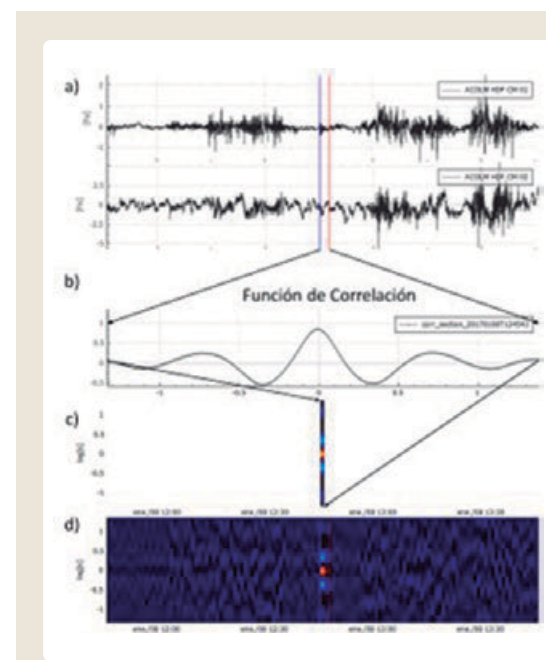
► Fig. 1 Red de sensores para monitoreo infrasónico para los volcanes CVC y VNR a) VNR, b) CVC destacando el volcán Puracé y el volcán Curiquinga y c) Fotografía de la estación ACOLM en el VNR.

### Método y procesamiento de datos

El nivel de ruido, producto de los fuertes vientos imperantes en las áreas volcánicas antes mencionadas, no permite hacer una detección confiable de señales de infrasonido volcánico solo con

la interpretación directa de los datos. Sin embargo, el uso de correlogramas entre los pares de sensores de infrasonido, metodología descrita en M. Ichihara et al. (2012) y en Castaño et al. (2020), permite distinguir señales provenientes de fuentes relativamente puntuales, como lo son los cráteres de estos volcanes respecto del ruido producto del viento.

En la Fig. 2, se muestra un ejemplo de detección de señales de infrasonido con este método para el par de sensores en ACOLM del VNR. Como se puede apreciar en la Fig. 2 a, la amplitud del ruido en varias ocasiones es mucho mayor que la señal de infrasonido detectada entre las líneas azul y roja. Las Figuras 2 b), 2c) y 2d) muestra un ejemplo de la obtención del correlograma a partir de la correlación de las señales de los sensores de infrasonido en ACOLM, en ventanas de tiempo de 5 segundos cada 1.12 s y luego promediadas a ventanas de 22.4 s.



► Fig. 2 a) Registro de infrasonido en la estación ACOLM del VNR el 8 de enero de 2017. b) y c). Función de correlación promediada en una ventana de tiempo de 22.4 s. d) Correlograma logrado. Las líneas azul y roja resaltan el inicio y fin de la señal de infrasonido producto de una erupción.

A cada señal detectada se le calcula los siguientes parámetros: presión máxima, presión reducida a 1km (Jeffrey Bruce Johnson & Ripepe, 2011), energía (J.B. Johnson, 2003) y estimación del back-azimut.



En la actualidad, la detección y medición de los parámetros antes mencionados, se puede realizar de forma automática y en tiempo casi real por medio de software que se viene desarrollando en el SGC, el cual se describirá más adelante bajo el nombre de VolcanStudio, mismo que se ha venido implementando para el VNR y la CVC.

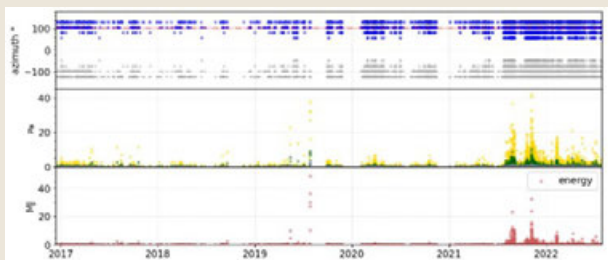
#### VolcanStudio

Se trata de una herramienta software desarrollada a medida para el monitoreo del infrasonido volcánico, desarrollada en Python y basada en librerías como ObsPy. Este software permite el procesamiento y visualización de datos, en tiempo casi real y no real; de infrasonido volcánico en el caso de estaciones con arreglos de pares de sensores de infrasonido o un sensor de infrasonido y uno sísmico. Dentro de sus características se resumen:

- ▶ Lectura de datos sísmicos: Winston y archivos mseed y uso de base de datos PostgreSQL
- ▶ Cálculo, visualización y grabación ordenada de correlogramas de pares de sensores: infrasonido-infrasonido o infrasonido-sísmico.
- ▶ Cálculo de presión máxima, presión reducida a 1km, energía y back-azimut a señales detectadas automáticamente.

#### Ejemplos de infrasonido por erupciones volcánicas.

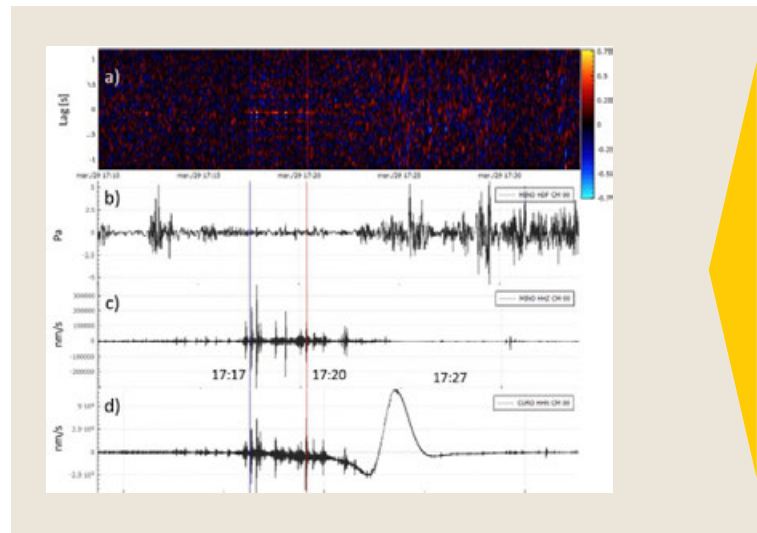
La actividad eruptiva del VNR se ha caracterizado por ser de tipo vulcaniano, con volúmenes de pluma de hasta  $6.98 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> para el periodo entre 2010 y 2017



▶ Fig. 3 –Gráficos de presión reducida y energía de eventos detectados entre diciembre de 2016 y 2022 para el VNR. La línea roja punteada en la primera gráfica corresponde al azimut del cráter Arenas del VNR.

(Londoño & Galvis, 2018). El registro de estos eventos usando infrasonido entre 2016 y 2022, ha permitido detectar más de 500 señales similares a la presentada en la Fig. 2, con presiones reducidas entre 0.12 y 25.4 Pa y energía de hasta 20 MJ en señales de menos de 300 segundos (ver Fig. 3).

En el caso del volcán Curiqinga, tercero en dirección NW-SE de la CVC, el 28 de marzo de 2022 se presentó una erupción hidrotermal que generó infrasonido con presiones de hasta 1.3 Pa, registrado con el par de sensores infrasonido-sísmico en la estación MINO como se puede apreciar en la Fig. 4. Señal asociada con la salida de ceniza previa a la apertura de dos nuevos cráteres internos en este volcán (Santacoloma et al., 2022).



▶ Fig. 4 –Registro de infrasonido entre un par de sensores infrasonido (MINO HDF) y sísmico (MINO HHZ), detectado durante la erupción del 28 de marzo de 2022 del volcán Curiqinga (en la CVC). a) correlograma en ventanas de tiempo de 1.12 s. b) y c) señal de sensores infrasonido (MINO HDF) y sísmico (MINO HHZ) respectivamente. d) Registro de la estación CURO HHN a menos de 100 metros del borde del cráter del volcán Curiqinga.

Al realizar una revisión detallada de los arribos de las señales, fue posible apreciar el retraso entre las señales sísmicas (señales de fractura) y las señales de infrasonido según un correlograma. Asumiendo que, la fuente de infrasonido es la superficie del cráter de Curiqinga, los retrasos esperados son entre 7 y 10 s, sin embargo, los retrasos observados son entre 13.4 y 14 s, lo que podría ser explicado, si se asume una fuente de infrasonido entre 900 y 1600 m de

profundidad bajo el cráter de Curiquinga; lo que indica un caso similar al registrado en Yukutake, Ichihara, & Honda (2018); además de que no es la primera vez que se asocian los cambios en el retraso de señales a cambios en la profundidad de la fuente de infrasonido como en el trabajo de Iezzi et al. (2020).

### Ruido y detección

Si bien, al contar con pares de sensores y el uso de los correlogramas mejora la detección de señales de infrasonido volcánico, esta técnica también tiene límites, ya que dependen del nivel de ruido y de la intensidad de la actividad volcánica

Entre diciembre 2016 y 2018, en el VNR las señales detectadas alcanzaron presiones máximas de hasta 2.46 Pa y un promedio de 0.45 Pa. Sin embargo, hubo erupciones apreciadas con cámaras de vigilancia y/o testigos, que no fueron detectadas con esta metodología, quizá porque su aporte energético en infrasonido fue pobre o porque el nivel de ruido del momento no lo permitió (ver Fig. 5).

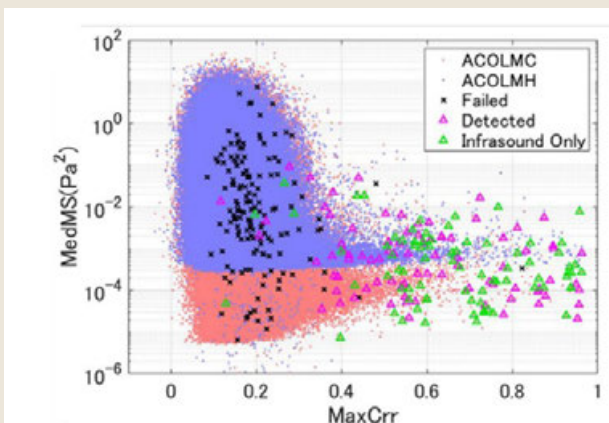
Para la CVC, la fumarola lateral de su volcán más activo, el volcán Puracé, es fuente continua de infrasonido con señales de hasta 2 Pa a 2.4 km de distancia de la fuente. Se ha observado que la detección de la misma es posible cuando el valor RMS de la señal en ventanas de 22.4 s es inferior a  $\sim 0.2$  Pa. La Fig. 6 presenta el registro de infrasonido proveniente de la fumarola lateral, con una presión máxima de 0.7 Pa, en la que, adicionalmente, se observan cambios en el back-azimut, probablemente producto de los cambios en la dirección del viento de la zona y/o a una barrera topográfica cercana.



► Fig. 6 –Detección de infrasonido en la estación MINO del volcán Puracé y su nivel de ruido el día 8 de mayo de 2022. Cada punto corresponde a una ventana de tiempo de 22.4 s en la que el máximo de correlación fue mayor a 0.4. Los puntos azules y grises corresponden a los dos ángulos de back-azimut posibles para la señal detectada. Los puntos amarillos y verdes corresponden a las presiones reducida y máxima. Los puntos rojos corresponden a la energía. La gráfica sombreada en gris corresponde al valor RMS cada 22.4 s durante todo el día.

Finalmente es importante destacar que, aún existen áreas de oportunidad en las que queda trabajar, tales como:

- Caracterización de señales de infrasonido con nuevos parámetros, como la eficiencia de acoplamiento aire-tierra (Mie Ichihara, Yamakawa, & Muramatsu, 2021) y con ello encontrar diferencias o familias de señales que permitan un análisis detallado de la actividad del volcán.
- Localización de señales: si bien en algunos volcanes podemos asumir que existe una única fuente o cráter, esto puede cambiar como en el caso de la CVC, o incluso se deben considerar variaciones en la profundidad de la fuente.
- Mejorar la detección de señales con pares de sensores infrasonido-sísmico para ampliar la cobertura en cada volcán.



► Fig. 5 –Máximo coeficiente de correlación (MaxCrr) y el valor medio del promedio cuadrado (MedMS) en ventanas de 200 s. Los puntos rosados (coral) y morados corresponden a los datos de los sensores Chaparral (C) y Hakusan (H) de la estación ACOLM del VNR. Sobre los valores de los sensores de Chaparral en las ventanas de tiempo correspondientes a los momentos de ocurrencia de erupciones reportadas, si la detección de infrasonidos falla o es exitosa mediante las cruces negras (fallido) y los triángulos magenta (detectado), respectivamente. Los triángulos verdes indican las erupciones confirmadas por cámaras o reportes. Tomado de la figura 6 de (Castaño et al., 2020)

## AGRADECIMIENTOS

Al Servicio Geológico Colombiano, gran institución en la que ha sido posible aprender y ampliar mis horizontes hacia el monitoreo volcánico.

Al grupo de trabajo de los Observatorios Vulcanológicos y Sismológicos de Manizales, Pasto y Popayán (mi ciudad) quienes han apoyado todos estos trabajos y un agradecimiento especial a Alejandro Collazos por su apoyo en la codificación de muchas líneas de código de VolcanStudio.

Finalmente, a la PhD Mie Ichihara quien por medio del proyecto SATREPS nos impulsó en el conocimiento y uso del infrasonido para el monitoreo volcánico.

## REFERENCIAS

- ▶ Castaño, L. M., Ospina, C. A., Cadena, O. E., Arenas, B. G., Londono, J. M., Laverde, C. A., ... Ichihara, M. (2020). Continuous monitoring of the 2015 – 2018 Nevado del Ruiz activity, Colombia, using satellite infrared images and local infrasound records. *Earth, Planets and Space*, 18. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01197-z>
- ▶ Ichihara, M., Takeo, M., Yokoo, A., Oikawa, J., & Ohminato, T. (2012). Monitoring volcanic activity using correlation patterns between infrasound and ground motion. *Geophysical Research Letters*, 39(4), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2011GL050542>
- ▶ Ichihara, Mie, Yamakawa, K., & Muramatsu, D. (2021). A simple method to evaluate the air-to-ground coupling efficiency: a tool helping the assessment of seismic/infrasound energy partitioning during an eruption. *Earth, Planets and Space*, 73(1). <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01510-4>
- ▶ Iezzi, A. M., Fee, D., Haney, M. M., Lyons, J. J., Johnson, J. H., De Angelis, S., & McNutt, S. R. (2020). Seismo-Acoustic Characterization of Mount Cleveland Volcano Explosions, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.573368>
- ▶ Johnson, J. B., Aster, R. C., Ruiz, M. C., Malone, S. D., McChesney, P. J., Lees, J. M., & Kyle, P. R. (2003). Interpretation and utility of infrasonic records from erupting volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121(1–2), 15–63. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00409-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00409-2)
- ▶ Johnson, J.B. (2003). Generation and propagation of infrasonic airwaves from volcanic explosions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121(1), 1–14. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00408-0](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00408-0)
- ▶ Johnson, Jeff B., & Aster, R. C. (2005). Relative partitioning of acoustic and seismic energy during Strombolian eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 148(3–4), 334–354. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.05.002>
- ▶ Johnson, Jeffrey B., & Palma, J. L. (2015). Lahar infrasound associated with Volcán Villarrica's 3 March 2015 eruption. *Geophysical Research Letters*, 42(15), 6324–6331. <https://doi.org/10.1002/2015GL065024>
- ▶ Johnson, Jeffrey Bruce, & Ripepe, M. (2011). Volcano infrasound: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 206(3), 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.06.006>
- ▶ Londoño, J. M., & Galvis, B. (2018). Seismic data, photographic images and physical modeling of volcanic plumes as a tool for monitoring the activity of Nevado del Ruiz volcano, Colombia. *Frontiers in Earth Science*, 6(November). <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00162>

- ▶ Lopez, T., Fee, D., & Dehn, J. (2013). Characterization and interpretation of volcanic activity at Karymsky Volcano, Kamchatka, Russia, using observations of infrasound, volcanic emissions, and thermal imagery, 14(12). <https://doi.org/10.1002/2013GC004817>
- ▶ McKee, K., Fee, D., Yokoo, A., Matoza, R. S., & Kim, K. (2017). Analysis of gas jetting and fumarole acoustics at Aso Volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 340, 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.03.029>
- ▶ Sciotto, M., Cannata, A., Di Grazia, G., Gresta, S., Privitera, E., & Spina, L. (2011). Seismoacoustic investigations of paroxysmal activity at Mt. Etna volcano: New insights into the 16 November 2006 eruption. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(9). <https://doi.org/10.1029/2010JB008138>
- ▶ Yukutake, Y., Ichihara, M., & Honda, R. (2018). Infrasonic wave accompanying a crack opening during the 2015 Hakone eruption. *Earth, Planets and Space*, 70(1). <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0820-x>
- ▶ Santacoloma, C., Narváez, A., Ospina, C., Quintero, D., Raigosa, J., Cerón, D., ... Alpala, T. (2022).
- ▶ Informe mensual de actividad de los volcanes Nevado del Huila, Puracé, Sotaráy y Sucubún. Marzo de 2022. Popayán. Retrieved from [https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Informes\\_tcnicos/Informe\\_actividad\\_volcanica\\_segmento\\_central\\_marzo\\_2022.pdf](https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Informes_tcnicos/Informe_actividad_volcanica_segmento_central_marzo_2022.pdf)



# Determinación preliminar de parámetros morfológicos de los Domos Potrero - Complejo Volcánico Chachani

Elizabeth Pacsi<sup>1,2</sup>, Néida Manrique<sup>2,3</sup>, Magdalena Oryaëlle Cheverel<sup>4</sup>, Rigoberto Aguilar<sup>2,3</sup>, Benjamin van Wyk de Vries<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional del Altiplano, Av. Floral 1153, Puno, Perú

<sup>2</sup> IGCP Project 692 Geoheritage for Geohazard Resilience

<sup>3</sup> Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, Urb. Magisterial 2 B-16, Yanahuara, Arequipa, Perú

<sup>4</sup> Université Clermont Auvergne, Laboratoire Magmas et Volcans UMR 6524 CNRS, OPGC, IRD, Campus Universitaire des Cézeaux, 6 Avenue Blaise Pascal, 63178 Aubière Cedex, France

**Palabras clave:** Complejo Volcánico Chachani, domos Potrero, morfometría, domo-colada.

## INTRODUCCIÓN

Los flujos de lava son uno de los productos volcánicos más representativos de las erupciones efusivas, y se forman cuando el magma extruye efusivamente a través de un cráter o una fisura. Son muchos los factores que determinan el emplazamiento de los flujos de lava, incluida la tasa de efusión, el volumen, la topografía y la reología, que a su vez depende de la composición del magma y del proceso de enfriamiento en la superficie (Castruccio et al., 2013; Harris & Rowland, 2015; Miyamoto & Sasaki, 1997; Vallejo, 2017). Los flujos de lava son una mezcla de roca fundida (fase líquida), cristales (fase sólida), burbujas (fase gaseosa). Macdonald (1953) describió las características superficiales y secciones transversales de tres tipos de lava: Pāhoehoe, 'a'ā y lava en bloques.

Los flujos de lava emitidos por los volcanes del sur del Perú son principalmente de tipo lava en bloques y presentan una alta viscosidad debido a su composición andesítica a riolítica. Siendo uno de los ejemplos más emblemáticos, los flujos de lava emitidos por los distintos edificios que componen el Complejo Volcánico Chachani (CVC) (Aguilar et al., 2022).

El CVC se encuentra a 22 km al noroeste del centro de la ciudad de Arequipa y es catalogado como un volcán potencialmente activo (Fig. 1). Con un área de ~ 600 km<sup>2</sup> y un volumen estimado de 290 – 350 km<sup>3</sup>, el Chachani es considerado como uno de los complejos volcánicos más extensos y voluminosos de la Zona Volcánica Central de los Andes (Aguilar et al., 2022). El CVC está compuesto por al menos 12 edificios volcánicos agrupados espacial y temporalmente en: (1) Grupo de

Edificios Antiguos, y (2) Grupo de Edificios Jóvenes. El Grupo de Edificios Antiguos estuvo en actividad durante el Pleistoceno Temprano - Medio (<1100 - 640 ka), y está formado por los edificios Chingana, Nocarane, Estribo, domo el Colorado; mientras que el Grupo de Edificios Jóvenes pertenecen al Pleistoceno Medio - Tardío (> 400 - 56 ka), formado por los edificios El Ángel, Domos Potrero, La Horqueta, El Rodado, flujos de lava Uyupampa, Chachani, Cabrerías y el domo Volcancillo (Aguilar et al., 2022). Este segundo grupo estuvo caracterizado por el emplazamiento de flujos de lava, domos y domos-colada.

Si bien, se conoce la historia eruptiva del CVC, los trabajos no se han enfocado en la caracterización morfológica de los flujos de lava y de los domo-colada, por lo cual, el presente estudio tiene por objetivo calcular los parámetros morfológicos y así, entender el dinamismo eruptivo de los flujos de lava.



► Fig. 1 - Mapa que ilustra los volcanes activos y potencialmente activos del Perú. Los Volcanes potencialmente activos son Sara Sara, Solimana, Ampato y Chachani. (Fuente: INGEMMET).

### Domos Potrero

Los domos Potrero están ubicados en el flanco sur del CVC (Fig. 2), corresponden a un complejo de domos constituido por domos y domo-colada en bloques, y ocupan un área de 68 km<sup>2</sup> y un volumen de 11,22 - 12,53 km<sup>3</sup> (Aguilar et al., 2022). El complejo de domos Potrero presenta tres unidades. La unidad inferior datada en  $397 \pm 40 \text{ ka} - 368.8 \pm 61.9 \text{ ka}$ , y un flujo de lava de la unidad superior fue datada en  $291.6 \pm 44.7$  (Aguilar et al., 2022). La composición química de los domos varía de andesitas a dacitas. Tanto los domos, como el domo-colada se encuentran bien preservados, por lo cual, es posible reconocer características típicas del emplazamiento de los flujos de lava como levées y crestas de avance. También se puede observar ventos alineados a lo largo de fisuras con dirección  $10^\circ\text{N} - 40^\circ\text{E}$  y  $\text{N}130^\circ\text{E}$  (Aguilar et al., 2022) y que han podido controlar el crecimiento de los domos.

### MÉTODOS

#### Mapeo de los flujos de lava

Las tres unidades de domos y domo-colada Potreros fueron delimitadas y codificadas por colores para indicar su orden cronológico, realizado por el Proyecto GA17D "Geología y mapa de peligros del Complejo Volcánico Chachani" (Fig. 3a). La subdivisión de las unidades y de la unidad inferior domos Potrero 1 (Qq-Dp1) fue modificado de Aguilar et al.

(2022), con base en las observaciones de un modelo digital de elevación, imágenes satelitales de Google Earth y el Basemap del ArcGIS®.

#### Estimación de los parámetros morfométricos

La morfología de los domos Potrero está notablemente bien preservada y expuesta. Se ha realizado la selección del domo-colada Qp-Dp1/3, para la identificación de las principales características morfológicas de la superficie (Fig. 3 a, b) y para la determinación de los parámetros morfométricos. Los parámetros morfométricos calculados son el espesor máximo, espesor mínimo, espesor promedio, ancho, longitud, volumen y área, en base al DEM SPOT 6 de 10 m de resolución.

Se extrajeron trece secciones transversales perpendiculares a la dirección del flujo (Fig. 3c), para obtener valores de ancho y espesor, metodología aplicada por Reyes-Guzmán et al. (2021). Los valores del ancho, espesor y la longitud son un promedio de diez mediciones individuales de cada perfil. Después de establecer el límite del domo-colada Qp-Dp1/3 se calculó el área y la longitud. El volumen del domo-colada se estimó utilizando la herramienta de diferencia de superficie de ArcGIS que calcula la diferencia volumétrica entre la superficie del edificio real y la paleo-superficie estimada a partir de un modelo digital de elevación (e.g. Chevrel et al., 2015).



► Fig. 2 – Fotografía tomada al sur del Complejo Volcánico Chachani, a primera vista se aprecia los Domos Poteros y al fondo los edificios volcánicos La Horqueta, Chachani y Estribo.

#### Análisis de las muestras de lava

El análisis modal de las secciones delgadas se determinó mediante el método de Zhang et al. (2014). El método consiste, primeramente, en tomar fotografías bajo el

microscopio polarizado (para cada sección delgada se hicieron tomas fotográficas de la tercera parte de una sección delgada, que luego se unieron haciendo el uso del programa AutoStitch) y posterior a ello, se realizó el

tratamiento de la imagen en Adobe Photoshop®. En el Adobe Photoshop las imágenes Bits utilizan los píxeles para representar imágenes. El número de píxel es fijo cuando se realiza una selección de un tipo de mineral. Se puede leer directamente el número de píxel de los minerales seleccionados desde el comando histograma. El número de píxeles de una selección se utiliza para calcular el porcentaje relativo de los minerales.

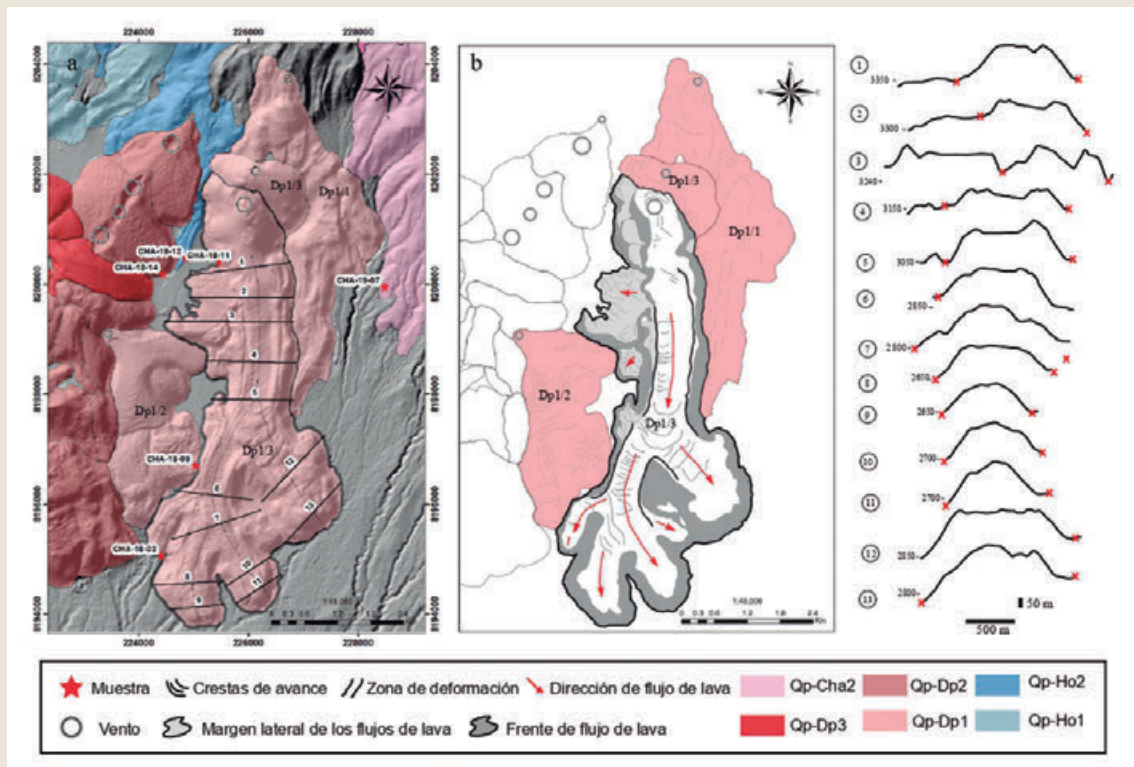
## RESULTADOS

### Morfometría del domo colada Potrero

La unidad domo-colada Qp-Dp1/3 (Fig. 3) se extiende desde el flanco sur del edificio Chachani, a los ~3910 m.s.n.m., hasta su frente en los ~2600 m.s.n.m., alcanzando una longitud aproximada de  $7.7 \pm 0.07$  km; con un volumen de  $1.4 \pm 0.04$  km<sup>3</sup>; con un área de  $13 \pm 4$  km<sup>2</sup>. En la parte

proximal al viento, la expansión lateral del domo-colada varía de  $2342 \pm 14$  m a  $1119 \pm 17$  m, la expansión lateral promedio de los trece perfiles es de  $1504 \pm 14$  m. El ancho del canal varía de  $220 \pm 11$  m a  $768 \pm 12$  m, y el ancho del canal promedio de los trece perfiles es de  $500 \pm 12$  m. El espesor máximo es de  $189 \pm 18$  m, espesor mínimo es de  $24 \pm 11$  m en la parte menos potente del domo colada, y el espesor promedio de los trece perfiles es de  $128 \pm 11$  m. El domo-colada se encuentra sobre una superficie de pendiente de alrededor de  $7^\circ \pm 0.4^\circ$ .

La colada presenta una morfología de tipo bloques- 'a'ã, con su canal central y levées bien formados (Figura 3 b), éstos levées parecen tener un centro macizo cubierto por bloques sueltos, que van entre ~2 m a ~10 cm. Estos bloques presentan cortezas brechozas e interior macizo.



► Fig. 3 –(a) Hillshade – DEM, que muestra el domo-colada Domo Potrero bien expuestos. Líneas punteadas: eje central del domo colada. (b) Representación esquemática del domo-colada Dp1/3. (c) Secciones transversales (perpendiculares a la dirección del flujo) a través del domo-colada Dp1/3 bien expuestos, a partir de los cuales se estimaron el ancho, el espesor. X: Margen del flujo de lava.

### Geoquímica y Petrografía

El análisis geoquímico se realizó en una muestra del domo colada Qp-Dp1/3, el cual presenta una composición traquiandesita (61.1 wt% SiO<sub>2</sub>, 4.0 wt% Na<sub>2</sub>O, 3.2 wt% K<sub>2</sub>O) (Fig. 4).

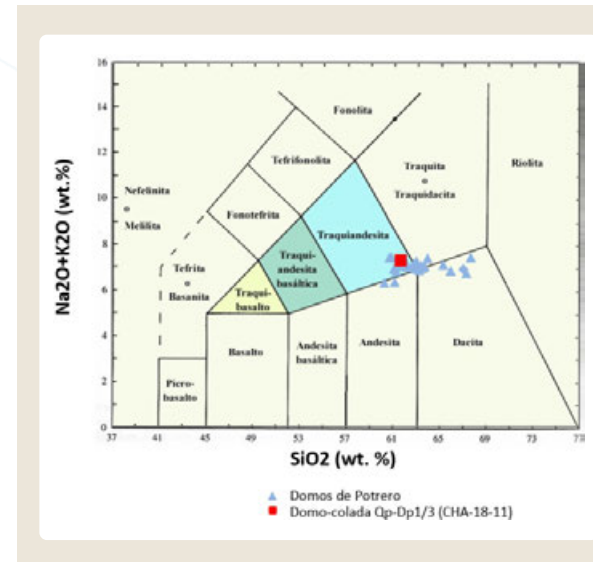
El análisis modal se realizó en dos muestras. La muestra CHA-18-11 tomada del frente de lava de la zona proximal al viento (Figs. 3; 5 a,b,c) tiene una textura porfírica y porcentajes modales de fenocristales ( $27 \pm 14$  vol.%) y matriz ( $73 \pm 14$  vol.%). Está compuesta de cristales tabulares y subhedrales de plagioclasas ( $\leq 5$  mm; 19 vol.%); anfíboles



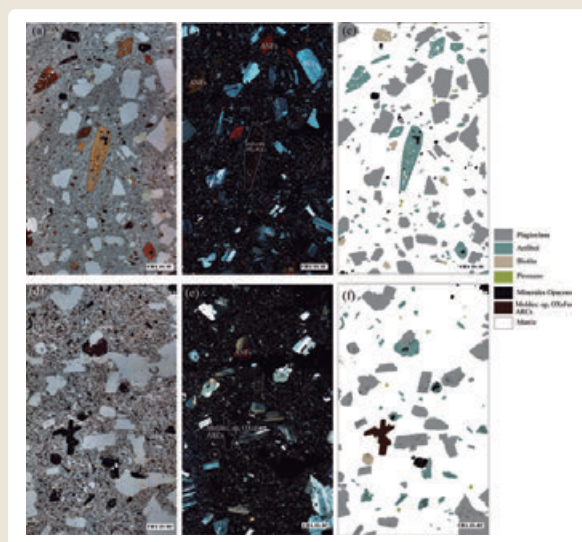
( $\leq 6$  mm; 6 vol.%) de formas subhedrales de hábito prismático y hexagonal; biotitas ( $\leq 1.8$  mm; 1 vol.%) de formas subhedrales de hábito tabular; piroxenos ( $\leq 0.5$  mm; 0.4 vol.%) con formas subhedrales de hábito prismático y minerales opacos ( $\leq 0.9$  mm; 0.6 vol.%) con formas anhedrales, en forma diseminada. La matriz está constituida por microcristales de plagioclasas, anfíboles, piroxenos y vidrio volcánico de forma intersticial.

La muestra CHA-18-02 tomada del frente de lava de la zona distal (Figs. 3; 5 d,e,f) tiene una textura porfírica y porcentajes modales de fenocristales ( $22 \pm 11$  vol.%) y matriz ( $78 \pm 11$  vol.%). Está compuesta de cristales de plagioclasa ( $\leq 6$  mm; 14 vol.%) de formas subhedrales a euhedrales, con diseminación de minerales opacos, se encuentran incipientemente alterados a arcillas; anfíboles ( $\leq 2.4$  mm; 5 vol.%) con formas anhedrales y subhedrales, de hábito prismático y hexagonal, alterados por opacita y óxidos de hierro y en algunos sectores se encuentran como moldes reemplazados por opacita, óxidos de hierro y arcillas (1 vol.%), con diseminación de minerales opacos; cristales escasos de botita ( $\leq 1.5$  mm; 1 vol.%) de formas subhedrales de hábito tabular, con inclusiones de minerales opacos; piroxenos ( $\leq 0.7$  mm; 0.1 vol.%) de formas subhedrales de hábito prismático y minerales opacos ( $\leq 0.5$

mm; 0.9 vol.%) de formas anhedrales a subhedrales. La matriz está constituida por microcristales de plagioclasas, anfíboles, piroxenos y vidrio volcánico de forma intersticial.



► Fig. 4 -Clasificación química de los domos Potrero en base de la relación entre el contenido de minerales alcalinos ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) y el contenido de silicatos ( $\text{SiO}_2$ ).



► Fig. 5 -Fotomicrografías de las secciones delgadas CHA-18-11 (a,b,c) y CHA-18-02 (d,e,f), en nicolos paralelos, nicolos cruzados y el análisis modal en Adobe Photoshop. (a,b,c) Traqui-andesita, formado en su mayoría por fenocristales de plagioclasas, anfíboles y cristales de biotita, piroxenos y minerales opacos. (d,e,f) Andesita, formado por fenocristales de plagioclasa, cristales de anfíboles, moldes de opacita, piroxenos y arcillas, minerales opacos diseminados, en menor cantidad cristales piroxenos, biotitas y vidrio volcánico de forma intersticial.



El análisis modal de las muestras tomadas en el flujo de lava Qp-Dp1/3 indica que existe una ligera disminución de  $27 \pm 14$  vol.% a  $22 \pm 11$  vol.% de fenocristales de la zona proximal hacia la zona distal. Además, la muestra de la zona distal indica que los cristales de anfíboles están siendo alterados por opacita y óxidos de hierro y en algunos sectores se encuentran como moldes reemplazados por opacita, óxidos de hierro y arcillas, como producto de la oxidación en el proceso de meteorización de los anfíboles.

Lo siguiente es determinar la dinámica del emplazamiento, la duración de la erupción, la viscosidad y otros parámetros necesarios de los flujos de lava que conforman el CVC, para realizar simulaciones y así, entender la dinámica de los flujos de lava viscosos en los Andes. Teniendo como producto final el mapa de peligros por flujos de lava del Complejo Volcánico Chachani.

## AGRADECIMIENTOS

El presente estudio se realizó en el marco del Proyecto IGCP 692 - "Patrimonio Geológico para la Resiliencia ante Peligros Geológicos" y el Proyecto GA17F- "Estudiar y evaluar los peligros asociados a los volcanes Chachani y Casiri".

## REFERENCIAS

- ▶ Aguilar, R., Thouret, J.-C., Samaniego, P., Wörner, G., Jicha, B., Paquette, J.-L., Suaña, E., & Finizola, A. (2022). Growth and evolution of long-lived, large volcanic clusters in the Central Andes: The Chachani Volcano Cluster, southern Peru. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 426, 107539. <https://doi.org/10.1016/J.JVOLGEORES.2022.107539>
- ▶ Castruccio, A., Rust, A. C., & Sparks, R. S. J. (2013). Evolution of crust- and core-dominated lava flows using scaling analysis. *Bulletin of Volcanology* 2013 75:1, 75(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/S00445-012-0681-2>
- ▶ Chevrel, M. O., Siebe, C., Guilbaud, M. N., & Salinas, S. (2015). The AD 1250 El Metate shield volcano (Michoacán): Mexico's most voluminous Holocene eruption and its significance for archaeology and hazards: <https://doi.org/10.1177/0959683615609757>
- ▶ Harris, A. J. L., & Rowland, S. K. (2015). Lava Flows and Rheology. *The Encyclopedia of Volcanoes*, 321–342. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00017-1>
- ▶ Macdonald, G. A. (1953). Pahoehoe, aa, and block lava. *American Journal of Science*, 251(3), 169–191. <https://doi.org/10.2475/AJS.251.3.169>
- ▶ Miyamoto, H., & Sasaki, S. (1997). Simulating lava flows by an improved cellular automata method. *Computers & Geosciences*, 23(3), 283–292. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(96\)00089-1](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(96)00089-1)
- ▶ Reyes-Guzmán, N., Siebe, C., Chevrel, M. O., & Pereira, G. (2021). Late Holocene Malpaís de Zacapu (Michoacán, Mexico) andesitic lava flows: rheology and eruption properties based on LiDAR image. *Bulletin of Volcanology*, 83(4), 1–21. <https://doi.org/10.1007/S00445-021-01449-0>
- ▶ Vallejo, S. (2017). Numerical models of volcanic flows for an estimation and delimitation of volcanic hazards, the case of Reventador volcano (Ecuador). [ Doctoral Thesis, Université Clermont Auvergne, Francia]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01930269>
- ▶ Zhang, X., Liu, B., Wang, J., Zhang, Z., Shi, K., & Wu, S. (2014). Adobe photoshop quantification (PSQ) rather than point-counting: A rapid and precise method for quantifying rock textural data and porosities. *Computers & Geosciences*, 69, 62–71. <https://doi.org/10.1016/J.CAGEO.2014.04.003>

# Tufo Yura: la ignimbrita más joven de Arequipa, sur del Perú

Carla Palacios<sup>1</sup>, Nélica Manrique<sup>1</sup>, Rigoberto Aguilar<sup>1,2</sup> y David Arteaga<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, Urb. Magisterial 2 B-16, Yanahuara, Arequipa, Perú - cpalaciosn@ingemmet.gob.pe

<sup>2</sup> Université Clermont Auvergne, Laboratoire Magmas et Volcans UMR 6524 CNRS, OPGC, IRD, Campus Universitaire des Cézeaux, 6 Avenue Blaise Pascal, 63178 Aubière Cedex, France

**Palabras clave:** PDC, ignimbrita, Tufo Yura.

## INTRODUCCIÓN

Dentro de los peligros asociados a las erupciones volcánicas, las Corrientes de Densidad Piroclástica (PDC) son uno de los fenómenos más peligrosos para las poblaciones aledañas al volcán. Debido a factores como su alta velocidad de emplazamiento y alta temperatura, son capaces de arrasar y calcinar todo por su paso. Eventos catastróficos generados por los PDC son las ocurridas en 1902 en los volcanes Monte Pelée (Isla Martinica) y Santa María (Guatemala) donde hubieron más de 28.000 y 6.000 víctimas respectivamente (Pérez y Fernández, 2015).

Los depósitos de PDC se pueden clasificar según composición, volumen del depósito y las litofacies dominantes (Brown y Calder, 2005). Según Wilson y Hildreth (2003) aquellos depósitos de PDC que superan 1 km<sup>3</sup>, son considerados como ignimbritas producidas por erupciones plinianas, con una composición de magma diferenciado. Las ignimbritas están constituidas por ceniza y piedra pómez, la cuales, se forman por el colapso de columnas eruptivas, o por derrames a partir de fisuras casi concéntricas que luego pueden generar la formación de una caldera (e.g. Aguilar et al. 2022).

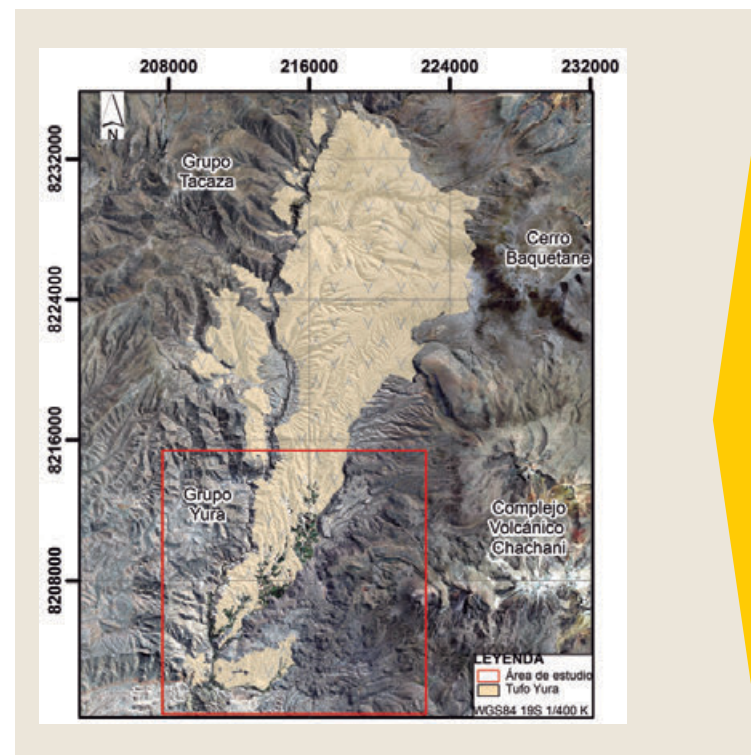
El sur del Perú es el segundo campo de ignimbritas del Neógeno más grande de los Andes (Thouret et al., 2018); solo en Arequipa, alrededor del Complejo Volcánico Chachani (CVC), se han identificado cuatro unidades de ignimbritas riolíticas (1) La ignimbrita Río Chili (ca. 13.33 Ma), (2) La Joya (ca. 4.87 Ma), (3) Aeropuerto de Arequipa (ca. 1.6 Ma) y (4) Tufo Yura (ca. 1.02 Ma) (Paquereau - Lebti et al. 2006, 2008).

En el presente trabajo se describe la geomorfología, geología y la estratigrafía del Tufo Yura, a partir del

trabajo de campo y el levantamiento de columnas tefroestratigráficas de los depósitos, con el fin de entender el proceso eruptivo y los mecanismos que generaron los depósitos del Tufo Yura.

## METODOLOGÍA

El presente estudio se enfocó en el sector suroeste del Cerro Baquetane (Figura 1), y se realizó en tres etapas. En la etapa de pre campo se realizó una recopilación de información bibliográfica, y a partir de la imagen satelital del mapa base de ArcMap y Google Earth se realizó la fotointerpretación geomorfológica y geológica. En la etapa de campo, se realizó el estudio



► Fig. 1 – Mapa de ubicación del área de estudio.

geomorfológico, geológico, y estratigráfico mediante el cartografiado y levantamiento de columnas tefro – estratigráficas de los depósitos expuestos del Tufo Yura. Finalmente, en la etapa de post campo (gabinete), el análisis de los datos obtenidos en campo.

Los depósitos del Tufo Yura afloran al noroeste del Complejo Volcánico Chachani y al oeste del Cerro

Baquetane, en territorio de los distritos de Yura, Achoma y Yanque, de la provincia y Región de Arequipa.

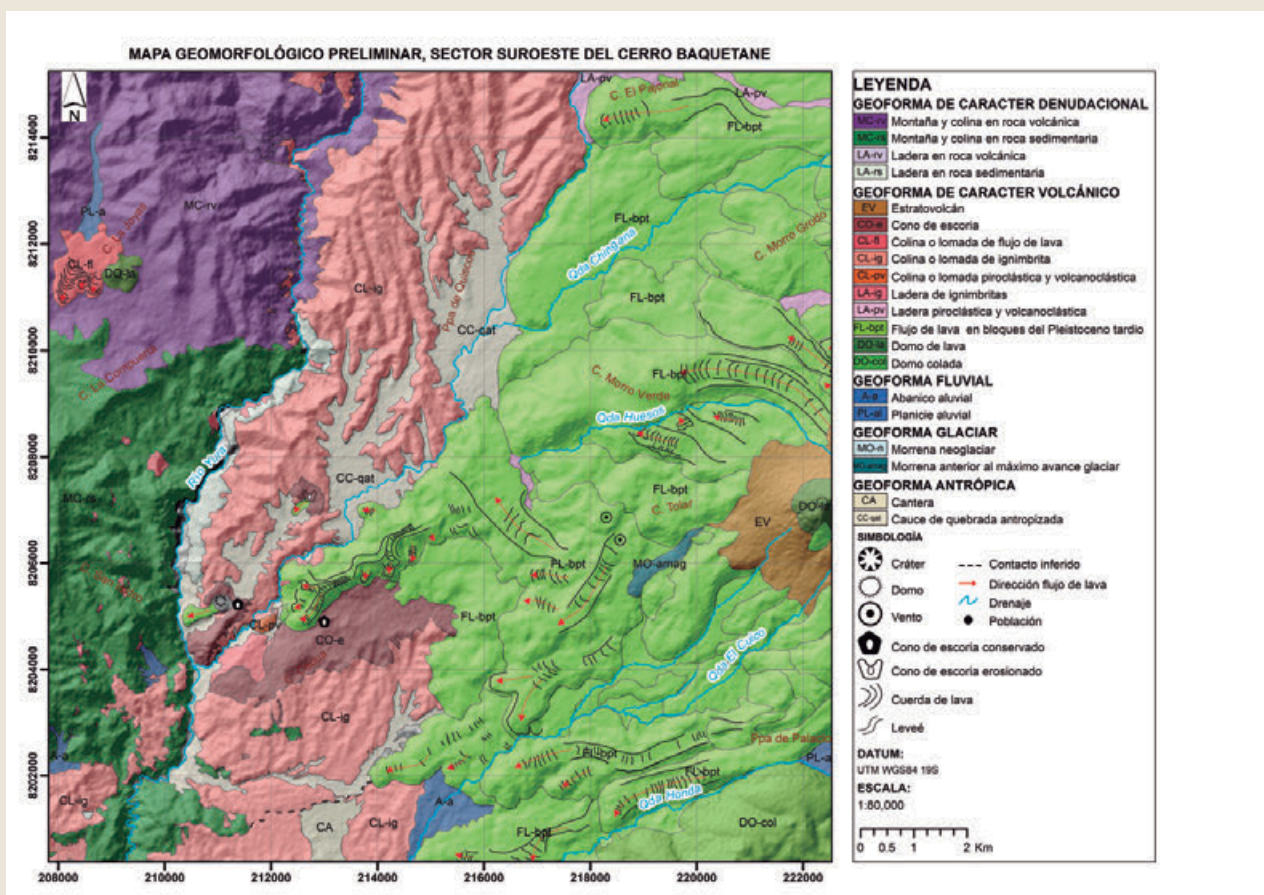
Geomorfológicamente el área de estudio está conformada por unidades de carácter denudacional, volcánico, fluvial, glaciar y antrópico (Figura 2). La descripción de las unidades geomorfológicas se encuentra resumida en la Tabla 1.

Unidad	Subunidad	Ubicación	Descripción	Pendiente	Tipo de roca
Geoforma de carácter denudacional	Montañas y colinas en roca volcánica (MCrv)	Cerro Las Joyas	Brechas y lavas hidrotermalizadas	Muy escarpado (>45°)	Grupo Tacaza
	Montañas y colinas en roca sedimentaria (MCrs)	Sector medio del río Yura	Rocas sedimentarias	Muy fuerte a muy escarpado (30° - >45°)	Grupo Yura
Geoforma de carácter volcánico	Estratovolcán (EV)	Cerro Morro Verte y Tolar	Sucesiones de flujo de lava (4600 msnm)	Muy fuerte (30° - 45°)	Estratovolcán Rodado (CVC)
	Conos de escoria (CO-es)	Sectores de Ccapua, Yura Viejo y Uyupampa (Arteaga et al. 2021)	Flujos de escoria, caída de escoria y ceniza.	Fuerte y muy fuerte (12° - 45°)	Campos monongenéticos
	Colinas o lomadas de flujos de lava (CL -fl)	Pampa del Chiral	Flujos de lava y escorias andesíticas – basálticas, con estructuras de cordones y una dirección de flujo hacia el sur	Muy fuerte (30° - 45°)	Grupo Barroso
	Colinas o lomadas de ignimbrita (CL -ig)	Sector suroeste del Cerro Baquetane y oeste del CVC	Presenta un drenaje dendrítico disectado por quebradas poco profundas.	Suave a moderada (0° - 12°) y fuerte (12° - 30°)	Tufo Yura
	Colinas o lomadas piroclásticas y volcanoclasticas (CL -pv)	Cerro Capua	Flujo piroclástico de pómez y ceniza.	Muy fuerte (30° - 45°)	Edificio Nozarane (CVC)
	Laderas de ignimbrita (LA -ig)	Margen derecha del río Yura	Aflora en las laderas del Grupo Yura y Grupo Tacaza	Muy fuerte a muy escarpado (30° - >45°)	Tufo Yura
	Laderas piroclásticas y volcanoclasticas (LA -pv)		Depósitos de flujo piroclástico de bloques y cenizas	Suave a moderado (0° - 12°)	Domo Cabrerías (CVC)
	Flujos de lava en bloque del Pleistoceno Tardío (FL -bpt)	Oeste del CVC	Afloran en los flancos del CVC, presentan estructuras de cordones y leveés	Moderada a fuerte (3° - 30°)	Edificio Noazarane, Rodado y Uyupampa (CVC)
	Domos lava (Do -la)	Distrito de Yura	Con estructura en forma de herradura abierta hacia el sureste con un ancho de ~1.2 km (Aguilar et al. 2016) Forma de cúpula de ~ 350 m de altura.	Muy fuerte (30° - 45°)	El Rodado Grupo Barroso
	Domos coladas (Do -col)	Distrito de Yura	Superficie suave y ondulada.	Fuerte a muy fuerte (12° - 45°)	Domo Potrero
Geoforma de carácter fluvial	Abanico aluvial (A -a)	Sector suroeste del CVC y pie del frente montañoso del Grupo Yura	Presenta drenaje radial que se abre en forma de "abanico"	Moderado (3° - 12°)	Depósito aluvial
	Planicie aluvial (PL -al)	Pampa del Chiral		Suave (0° - 3°)	Depósito aluvial
Geoforma glaciar	Morrena anterior al máximo avance glaciar (Moamag)	Oeste del Edificio Rodado	Alcanza altitudes mayores a 3627 msnm con forma ovalada y una distancia de 200m.	Muy fuerte (30° - 45°)	Depósitos morrénicos
Geoforma antrópica	Cantera (CA)	Distrito de Yura	Cantera de Cementos Yura.	Suave (0° - 3°)	Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa
	Cauce de quebrada antropizada (CC -qat)	Oeste del CVC	Contorno irregular alargado en dirección suroeste. Sobre el cual se desarrollan actividad agrícola y viviendas.	Suave a moderada (0° - 12°)	Depósitos lacustres



Los depósitos del Tufo Yura, han rellenado una depresión entre el edificio Nocarane (edificio del CVC) al este y las escarpas del Grupo Yura y Grupo Tacaza al oeste. Las unidades litoestratigráficas más antiguas que afloran en el área de estudio son rocas sedimentarias, lutitas, calizas y areniscas del Grupo Yura (Jurásico Superior – Cretácico Inferior), seguido por la Formación Arcurquina (Cretácico Inferior – Cretácico Superior), constituida por calizas con intercalaciones lutáceas. Además; brechas, y lavas hidrotermalizadas de Grupo

Tacaza (Oligoceno), luego la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa, Tufo Yura, lavas andesíticas y basálticas del Pleistoceno Inferior, atribuidas al Grupo Barroso Superior. Cubriendo estos depósitos se observan flujos de escoria, caída de escoria y ceniza asociado a los volcanes monogenéticos de Yura Viejo, Uyupampa, y Ccapua, (Arteaga et al. 2021), flujos y domos de lava de los edificios del Complejo Volcánico Chachani (Pleistoceno Medio – Superior). Finalmente, depósitos morrénicos, lacustres, coluviales y aluviales (Figura 3).



► Fig. 2 – Mapa geomorfológico preliminar del sector SO del Cerro Baquetane.

## Estratigrafía

El Tufo Yura está conformado por al menos seis niveles de flujo piroclástico, un depósito de caída piroclástica y dos niveles de oleadas piroclásticas (Figura 4). El primer nivel inferior de flujo piroclástico de pómez y ceniza se caracteriza por ser suelto, pobremente

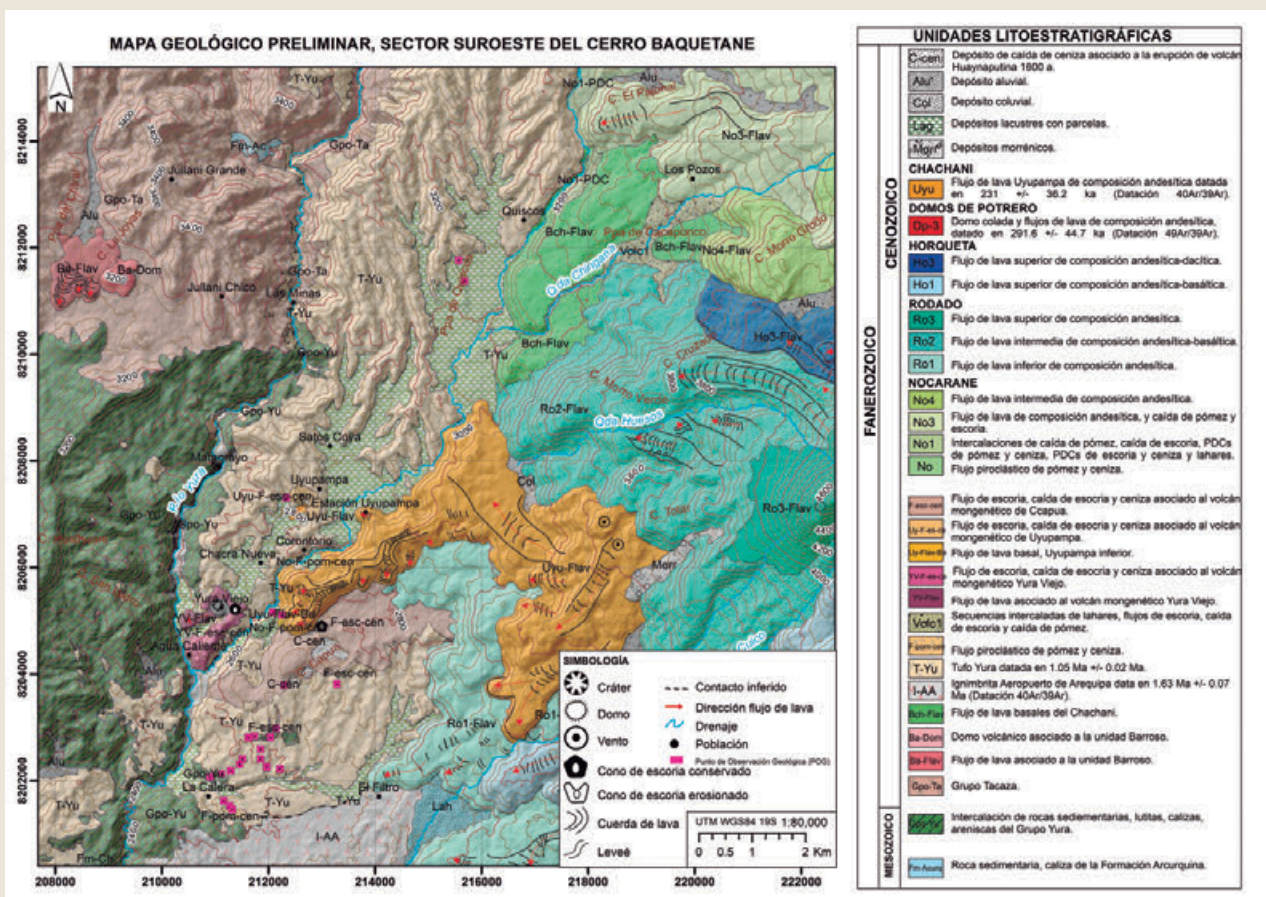
sorteado, con 15% de matriz y 85% fragmentos. El segundo nivel, caída de lapilli pómez con 35% de matriz y 65% de fragmentos, con lentes de acumulación de pómez (<4.5 cm) hacia el tope. El tercer nivel, oleada de lapilli pómez con estratificación laminar. El cuarto nivel, flujo piroclástico de pómez con fragmentos que varían entre lapilli y ceniza (40%), y



60% de matriz. El quinto nivel, oleada piroclástica de lapilli con estratificación laminar. El sexto nivel, suelto, matriz soportado con 60% de matriz y 40% de fragmentos con lentes de acumulación de pómez de ~2cm en la base. En el último nivel se ha observado 2 tipos de pómez; de textura fibrosa (22%) y masiva (3%).

Cada unidad presenta, características petrográficas similares en los fragmentos juveniles (pómez de textura fibrosa) y fragmentos líticos (negros, grises

oscuros, rojizos y bandeados) (Figura 5). Por otro lado, los flujos de lava del Cerro Baquetane sobreyacen estratigráficamente los depósitos del Tufo Yura. Se identificaron 2 tipos de flujos de lava; flujo de lava en bloques con estructura laminar, de color gris medio, de textura porfírica con fenocristales de plagioclasa en una matriz afanítica y flujo de lava en bloques de color gris claro, de textura porfírica con fenocristales de plagioclasa y anfíbol englobados en una matriz afanítica.



► Fig. 3 – Mapa geológico preliminar del sector SO del Cerro Baquetane, modificado de Aguilar et al. (2012).

### Discusión y conclusiones

La distribución espacial de los depósitos del Tufo Yura, muestra que estos están controlados por la paleotopografía, rellenando preferentemente un valle, de orientación NE – SO.

Según Paquereau-Lebti et al. (2006) la fuente de emisión de los depósitos del Tufo Yura se ubica en un volcán "paleo – Chachani" al norte del Nocarane y al sur del Cerro Baquetane siendo concordante con lo visto en campo, puesto que se observó los flujos de lava del Cerro Baquetane sobreyaciendo a los depósitos del Tufo Yura.

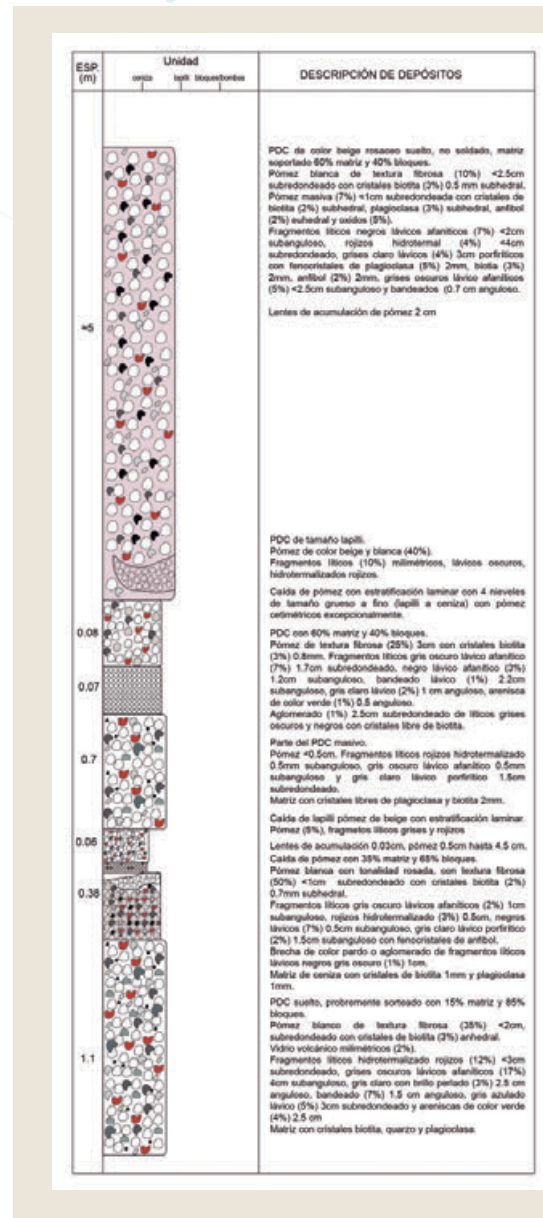
La posición estratigráfica de los depósitos indica que el Tufo Yura es más antiguo que los depósitos del Cerro Baquetane.

Las características macroscópicas (estratigrafía y petrología) de los depósitos y el grado de compactación de la ignimbrita (no soldada) permiten sugerir que el Tufo Yura está conformado por varias unidades de PDC; sin embargo, es necesario realizar estudios microscópicos y dataciones radiométricas, a fin de que se determine el lapso de tiempo que duró la erupción.

Según, Freundt et al. (2000) en ignimbritas de volumen moderado a grande, y especialmente en ignimbritas soldadas, es difícil identificar las unidades de flujo siendo coherente con lo visto en campo ya que los depósitos del Tufo Yura son no soldados y tiene un volumen de 1.5 km<sup>3</sup> (Paquereau – Lebti, 2006).



► Fig. 4 –Afloramiento de los depósitos del Tufo Yura.



► Fig. 5 –Columna tefro – estratigráfica del sector SO del Cerro Baquetane – Pampa de Quiscos (coordenadas E 216016N 8212740).

**AGRADECIMIENTOS**

El presente trabajo se realiza en el marco del Proyecto IGCP 692 Geopatrimonio para la resiliencia ante riesgos geológicos – UNESCO y el proyecto GA17F Estudio y evaluación de los peligros asociados a los volcanes Chachani y Casiri. Agradecemos al Dr. Benjamin Van Wyk de Vries por sus valiosos comentarios en el desarrollo del estudio, colegas del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET y amigos, Yaldri Bravo, por su disposición y apoyo en los trabajos de campo.

## REFERENCIAS

- ▶ Aguilar R., Thouret J., Samaniego P., Worner G., Jicha B., Paquette J., Suaña E., Finizola A. (2022). Growth and evolution of long – lived, large volcanic clusters in the Central Andes: The Chachani Volcano Cluster, southern Peru. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 426.
- ▶ Aguilar R., Thouret J., Suaña E., Rivera M., Jicha B. (2012). Implicancias de los sistemas de fallas regionales en el magmatismo del sur del Perú: estratigrafía del Complejo Volcánico Chachani. XVI Congreso Peruano de Geología.
- ▶ Arteaga D., Manrique N., Aguilar R. (2021). Volcanes monogenéticos de Yura: Geología y petrografía para el entendimiento de la actividad volcánica en Arequipa. Vigésimo Congreso Peruano de Geología.  
  
Brown R., Calder E. (2004). Pyroclastics (Including Tuff, Ignimbrites and Ash). In Selley, R.C., Cocks, L.R.M. and Plimer, I.R. (eds) *Encyclopedia of Geology*. Elsevier Press.
- ▶ Freundt A., Wilson C., Carey S. (2000). Ignimbrites and block and ash flow deposits. *Encyclopedia of Volcanoes*.
- ▶ Paquereau L., Fornari M., Roperch P., Thouret J.- C., Macedo O. (2008). Paleomagnetic, magnetic fabric properties, and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating, of Neogene - Quaternary ignimbrites in the Arequipa area, Southern Peru. Flow directions and implications for the emplacement mechanisms. *Bulletin of Volcanology*, 70, 977-997.
- ▶ Paquereau L., Thouret J.-C., Wörner G., Fornari M., 2006. Neogene and Quaternary ignimbrites in the area of Arequipa, Southern Peru: Stratigraphical and petrological correlations. *J Volcanol Geotherm Res*, 154, 251–275.
- ▶ Pérez F., Fernández J., 2015. Peligros asociados a los depósitos piroclásticos. *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*.
- ▶ Thouret J.-C., Jicha B., Paquette J.-L. (2018). Cronoestratigrafía del volcanismo con énfasis en ignimbritas desde hace 25 Ma en el SO del Perú – Implicaciones para la evolución de los Andes centrales. *Foro Internacional: Los volcanes y su impacto*.
- ▶ Wilson C., Hildreth W., 2003. Assembling an Ignimbrite: Mechanical and Thermal Building Blocks in the Bishop Tuff, California. *The Journal of Geology*, 111:653–670.



# Comunicación de peligros volcánicos a corto plazo mediante el uso de mapas dinámicos en los Reportes de Actividad Volcánica en Chile

Constanza Perales<sup>1</sup>, Virginia Toloza<sup>1</sup>, Maira Figueroa<sup>2</sup>, Gabriela Jara<sup>1</sup>, Franco Vera<sup>1</sup>, Felipe Flores<sup>1</sup>, Laura Bono<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Unidad de Geología y Peligros de Sistemas Volcánicos, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile – constanza.perales@sernageomin.cl

<sup>2</sup> Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Servicio Nacional de Geología y Minería, Temuco, Chile.

**Palabras clave:** Mapas de peligro, Actividad volcánica, Riesgo volcánico

La Red Nacional de Vigilancia Volcánica (RNVV) del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) es responsable del monitoreo multiparamétrico de los volcanes activos presentes en el territorio chileno, así como del levantamiento de información geológica de éstos para la reconstrucción de sus historias eruptivas, lo cual permite generar posibles escenarios eruptivos que podrían afectar a las comunidades y zonas alrededor de los volcanes.

Para llevar a cabo el monitoreo y la evaluación de los peligros asociados a cada sistema volcánico de manera sistematizada, la RNVV se conforma por dos equipos de trabajo principales: la Unidad de Geología y Peligros de Sistemas Volcánicos (UGPSV) y el Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS). Este último, a su vez, se compone por las áreas de Sismología y Geovulcanología (subdivida en los grupos de Geoquímica de fluidos, Geodesia y Geología).

Aunque ambos equipos poseen actividades específicas asociadas a sus respectivos objetivos de trabajo, es necesaria la constante interacción entre ellos para complementar la comprensión del comportamiento volcánico en tiempos geológicos, histórico y actual. Esta interacción se hace efectiva mediante reuniones quincenales y mensuales, donde se realiza la evaluación de actividad volcánica. En dichas instancias, cada área informa sobre el estado de sus respectivos parámetros de monitoreo y con ello, si lo amerita, se propone una zonificación de posible afectación por procesos volcánicos.

Posterior a la revisión y evaluación de la actividad volcánica, se establece el estado de cada sistema volcánico según cuatro niveles de alerta técnica (Fig. 1).

Estos niveles de alerta técnica son declarados por SERNAGEOMIN hacia la Oficina Nacional de Emergencias del Ministerio del Interior (ONEMI), autoridades y ciudadanía, a través de los Reportes de Actividad Volcánica (RAV), los que son publicados periódicamente de acuerdo con el estado de alerta técnica de cada volcán. Por otra parte, cuando un sistema volcánico presenta actividad inusual o anómala en su comportamiento y es reflejada en las señales de monitoreo de OVDAS, sobre los parámetros cuantificados para los distintos niveles de alerta técnica, se emiten Reportes Especiales de Actividad Volcánica (REAV), similares a los RAV, en forma, pero enfocados en la actividad causante de dicho reporte y personalizado al sistema volcánico en cuestión. Ejemplos de actividad volcánica por las cuales se emiten REAV son la ocurrencia de sismos de magnitud local igual o superior a 3, presencia de desgasificación en centros volcánicos donde no es de usual registro, ocurrencia de enjambre o disparos sísmicos, entre otras.

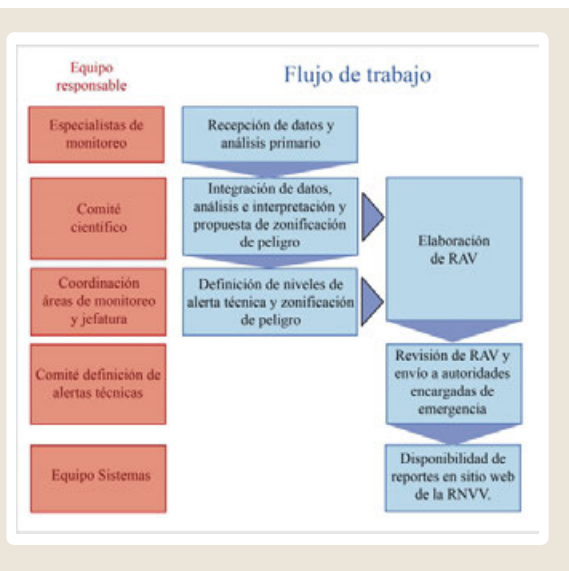


► Fig. 1 –Esquema resumen de los niveles de alerta técnica de SERNAGEOMIN y periodicidad en la emisión de RAV.



En general, la información que se entrega en los RAV, ya sea quincenal o mensualmente, consiste principalmente en el estado de los parámetros de monitoreo (cantidad, energía, localización y clasificación de los sismos; deformación superficial; presencia de anomalías térmicas; descripción de actividad superficial, como emisión de partículas y/o gases, altura de columna, morfología de cuerpos efusivos u otros), junto a la declaración del nivel de alerta técnica, observaciones y, de ser necesario según la actividad volcánica registrada, una zonificación radial que represente la susceptibilidad de un sector de ser afectado por procesos volcánicos, en torno al cráter activo o posible centro de emisión.

Sin embargo, el contenido y la forma en que actualmente se presenta la información en los reportes no ha sido siempre de igual manera, habiendo evolucionado considerablemente en el tiempo, y solo a partir del año 2019, con la firma de un protocolo entre ONEMI y SERNAGEOMIN para monitoreo y alerta frente al riesgo volcánico, se establece y estandariza la emisión de reportes y compromete la incorporación de un mapa dinámico de zonificación, lo que generó una estructuración y organización en cuando al flujo de trabajo en la elaboración de los reportes (Fig. 2).



► Fig. 2 – Esquema resumen de los niveles de alerta técnica de SERNAGEOMIN y periodicidad en la emisión de RAV.

Los mapas dinámicos de zonificación de peligros volcánicos, presentados en los RAV y REAV, corresponden a la visualización geoespacial de las zonas de posible afectación por procesos volcánicos en

el corto plazo, a partir de escenarios eruptivos acordes a la actividad reflejada en los parámetros de monitoreo en curso. Esta evaluación de escenarios eruptivos a corto plazo marca la principal diferencia de los mapas dinámicos de peligros volcánicos con los Mapas de Peligros Volcánicos Regulares (MPVR) publicados por SERNAGEOMIN desde el año 1999, ya que la escala temporal de evaluación geológica para establecer la zonificación de peligro en los MPVR abarca un análisis en detalle de la historia eruptiva del sistema volcánico en estudio, comprendiendo una evaluación del peligro a largo plazo, basado en los antecedentes geológicos del sistema volcánico. En otras palabras, los mapas de peligros volcánicos regulares comprenden una diversidad de posibles escenarios eruptivos según el comportamiento del volcán en el pasado, reflejado en una zonificación del peligro más amplia espacialmente, mientras que los mapas dinámicos se ajustan al contexto actual de cada volcán.

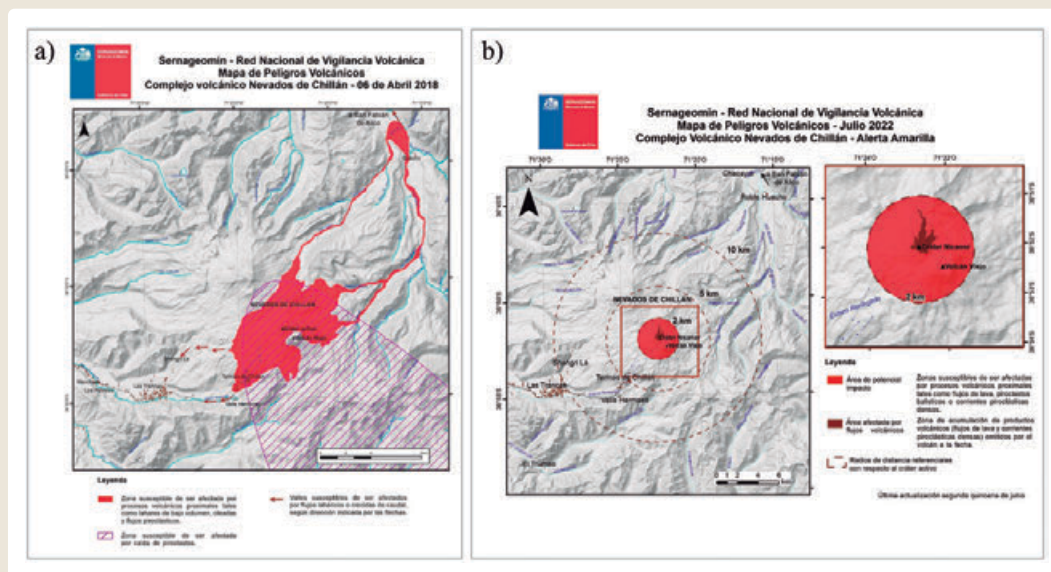
Aunque la mayoría de los sistemas volcánicos presentes en el territorio nacional que se encuentran en alerta técnica verde no presentan zonificación de peligros en mapas dinámicos, existen excepciones debido a la ocurrencia de actividad superficial como parte del comportamiento base de cada volcán. Actualmente, estos casos son los RAV de los volcanes Láscar (norte de Chile), Complejo Volcánico Planchón-Peteroa, Complejo Volcánico Laguna del Maule (Chile central), Copahue y Villarrica (sur de Chile) se presentan radios de zonificación de peligros en torno al cráter activo, que pueden abarcar desde varias centenas de metros hasta kilómetros.

Por otro lado, una oportunidad excepcional que ha permitido la evolución en la manera de reportar la zonificación de peligros en los mapas dinámicos ha sido el ciclo eruptivo actual en el Complejo Volcánico Nevados de Chillán, cuyos primeros mapas dinámicos reportados, en el año 2018, se basaban en el mapa de peligros volcánicos de este sistema, publicado por SERNAGEOMIN a escala 1:75000 (Orozco et al., 2016), lo cual difiere de la zonificación de peligros a corto plazo presentadas actualmente en cada RAV y REAV (Fig. 3). Esto se debe a que el Complejo Volcánico Nevados de Chillán ha presentado actividad efusiva y explosiva en un ciclo eruptivo desde el año 2016 hasta la fecha, por lo que la comunicación y coordinaciones

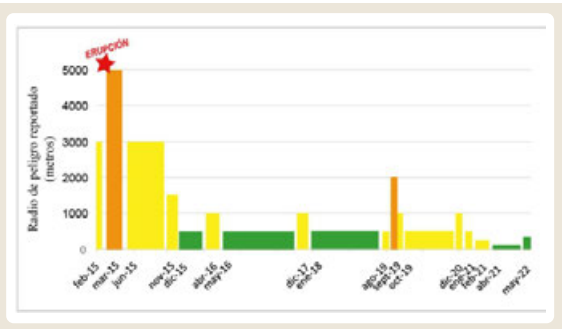
entre las autoridades encargadas de gestionar la emergencia y SERNAGEOMIN han tenido que adaptarse al contexto actual del sistema volcánico, para poder otorgar una información eficaz y clara a la comunidad local.

No obstante, se deben señalar diversos desafíos que surgen a la hora de zonificar la potencial área de afectación por procesos volcánicos a corto plazo, los cuales son de variada índole dependiendo del contexto volcanológico de cada sistema. En este sentido, el volcán Villarrica presenta la complejidad asociada al hecho de corresponder a uno de los principales atractivos turísticos del sur del país, pues el ascenso al cráter del volcán es de gran interés nacional e internacional, dada su condición de volcán con conducto abierto. Esto hace que cualquier radio de

posible afectación por procesos volcánicos propuesto en mapas dinámicos en el volcán Villarrica genere reacciones en los principales operadores turísticos de la zona, abriendo el debate sobre la convivencia entre la mitigación del riesgo volcánico y el desarrollo del turismo. Además, la variabilidad de alcances que han tenido los proyectiles balísticos en períodos de relativa quiescencia dificulta el establecimiento con certeza del radio de zonificación. No obstante, y dadas las características del volcán Villarrica, en los últimos años se ha optado por mantener la zonificación de potencial afectación por procesos volcánicos en torno al cráter (Fig. 4), la cual ha ido variando según el estado de actividad del volcán reflejado en los parámetros de monitoreo, principalmente asociados a las fluctuaciones de profundidad del lago de lava.



► Fig. 3 - Mapas dinámicos del Complejo Volcánico Nevados Chillán: a) abril de 2018, y b) en julio de 2022.



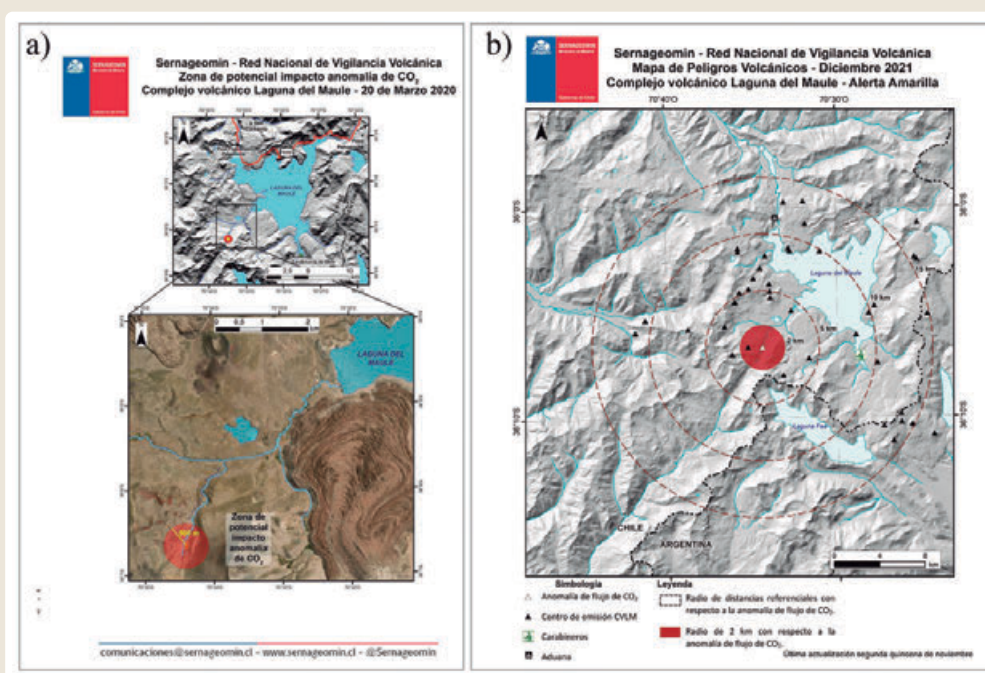
► Fig. 4 - Cronología de alertas técnicas y radios de zonificación de peligro en el volcán Villarrica, a partir de febrero de 2015.

Otro ejemplo de sistema volcánico que ha significado un desafío para los equipos de la RNW al momento de establecer radios de potencial afectación por procesos volcánicos es el Complejo Volcánico Laguna del Maule, ya que dificultad inicial en el proceso está asociada al establecimiento del centro de la circunferencia, es decir, al potencial centro de emisión. En este sistema volcánico se tiene registro geológico de diversos centros eruptivos y la ubicación de las señales sísmicas y estructuras geológicas abarca una amplia

distribución espacial y temporal. Ante esto, se han realizado esfuerzos por parte de los equipos de trabajo para disminuir la incertidumbre en cuanto a la localización más probable de centros de emisión futuros, a través de la elaboración de mapas de susceptibilidad basados en análisis multicriterio.

Sin embargo, en febrero de 2019 se detectó la presencia de CO<sub>2</sub> difuso en el sector denominado Cajón de Troncoso, al suroeste de la laguna, lo cual marcó un precedente en el monitoreo del complejo

volcánico y en la zonificación de peligros presentada en los mapas dinámicos entregados en los reportes. Los altos niveles de concentración de flujo de CO<sub>2</sub> (sobre 1200 g m<sup>-1</sup> d<sup>-2</sup>) conllevaron a la declaración de radios desde 500 m a 2 km en distintas temporalidades, entorno al sector donde se midió la anomalía, de acuerdo con la variación de la evaluación multiparamétrica del monitoreo volcánico (Fig. 5). De esta manera, fue posible establecer un centro de la circunferencia de manera más acertada al contexto de la actividad volcánica.



► Fig. 5 – Mapas dinámicos del Complejo Volcánico Laguna del Maule en: a) marzo de 2020 y b) diciembre de 2021.

Por otra parte, los avances que se han alcanzado en los últimos años con respecto a la forma de reportar la actividad volcánica, se basan en la necesidad de entregar información de una forma eficaz y comprensible a especialistas en volcanología, y también a personas que no necesariamente estén familiarizadas con el lenguaje técnico utilizado en la descripción de la actividad volcánica. Así, el nuevo enfoque de gestión de la información, por parte de la RNVV, está orientado a una comprensión integral de diversos usuarios sobre los parámetros de monitoreo, el reconocimiento de cada sistema volcánico como un sistema natural único en cuanto a su comportamiento y consecuente peligrosidad.

Para ello, se ha trabajado en identificar diversos usuarios o grupos de interés que acceden a la información de los reportes, para luego generar instancias de retroalimentación, a través de la aplicación de encuestas y entrevistas, y con ello mejorar la entrega de información oportuna a los organismos integrantes del Sistema de Protección Civil, geocientíficos y geocientíficas, prestadores de servicios turísticos en torno a los sistemas volcánicos y comunidad.

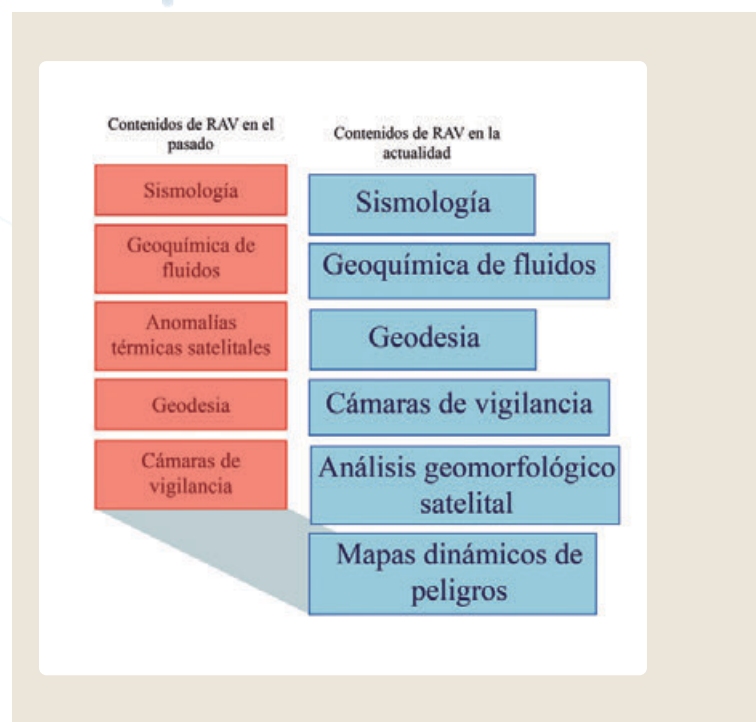
Aunque la evolución en los reportes de actividad volcánica en cuanto a contenidos ha sido sustancial, con respecto a los primeros RAV emitidos por la Red



Nacional de Vigilancia Volcánica de SERNAGEOMIN (Fig. 6), un aspecto importante al momento de comunicar el peligro de convivir con un sistema volcánico activo es transparentar a la comunidad civil y autoridades las zonas que son susceptibles de ser afectadas por procesos volcánicos.

Por esta razón, la implementación de mapas dinámicos en los RAV y REAV ha permitido visualizar dichas zonas de manera óptima a los usuarios. Sin embargo, tal zonificación está sujeta a incertidumbres intrínsecas de la comprensión completa de un sistema volcánico. Además, el manejo de una comunicación y concientización eficiente hacia la comunidad depende, en gran parte, de los diversos contextos socioculturales de cada población que convive con volcanes activos.

Sin duda, el reporte de actividad volcánica es un proceso dinámico que ha ido, y seguirá, evolucionando de acuerdo con los avances en herramientas de monitoreo volcánico, en modelaciones de procesos volcánicos, y en las necesidades y requerimientos de una sociedad en desarrollo.



► Fig. 6 –Comparación del contenido de la información de reportes de actividad volcánica del pasado versus actualidad.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los diversos actores encargados de la gestión del riesgo volcánico en Chile: ex funcionarios de la UGPSV y equipo de OVDAS; ONEMI; encargados de emergencias locales y comunidad civil, los que han contribuido en la mejora de la comunicación del peligro volcánico presente en el territorio.

## REFERENCIAS

- Orozco, G.; Jara, G.; Bertin, D. (2016). Peligros del Complejo Volcánico Nevados de Chillán, Región del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental 28: 34 p., 1 mapa escala 1:75.000. Santiago.



# Características preliminares del sistema hidrotermal volcánico Casiri - Purupuruni

Daniel Ramírez, Pablo Masías, Fredy Apaza, Jorge Alcántara y Gianella Paredes

Observatorio Vulcanológico del INGEMMET Arequipa - Perú)

**Palabras clave:** Sistema hidrotermal, características químicas y volcán.

## RESUMEN

Dentro de la zona volcánica central de América del Sur en la región de Tacna encontramos a los volcanes Tutupaca, Yucamani, Purupuruni y Casiri. Cada uno de ellos cuenta con un sistema hidrotermal asociado el cual tiene características inherentes en la composición química de sus aguas.

El volcán Casiri es considerado como un complejo volcánico latente, y el volcán Purupuruni es considerado como un domo inactivo (Fidel Smoll et al., 1997). Ambos cuentan con sistemas hidrotermales asociados los cuales son objeto de interés en el presente resumen.

La importancia de caracterizar las zonas hidrotermales cercanas a los volcanes activos como el Casiri es para poder monitorear los cambios que se pueden generar en estas por la activación de un ciclo eruptivo y de esta forma contribuir con el entendimiento de los peligros asociados a los volcanes y aportar indicios para la gestión de riesgos asociados a los peligros volcánicos en la zona. (Bromley et al., 2019).

Además, la caracterización del sistema hidrotermal que posiblemente se encuentre relacionado al volcán Casiri nos brindara un mayor entendimiento de su comportamiento y estructura como base para mayores estudios.

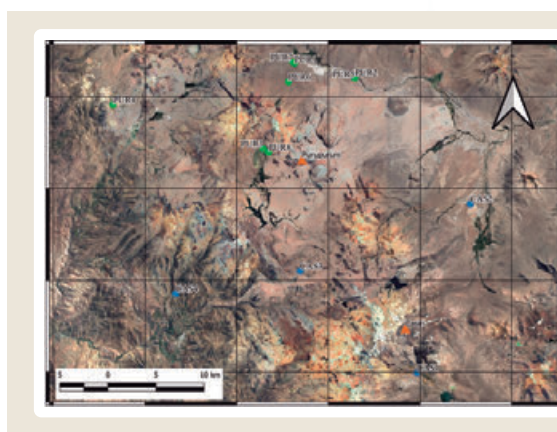
## INTRODUCCIÓN

La hidroquímica es la parte del monitoreo volcánico que se encarga de evidenciar la interacción del magma y sistema hidrotermal asociado a un volcán activo, a través de la composición química del agua termal y fría. Es por ello por lo que mediante el análisis de la composición química de estas fuentes podremos determinar las características de los sistemas hidrotermales de estos volcanes.

El Casiri se encuentra ubicado en las coordenadas geográficas: 17.467° latitud sur; 69.813° longitud oeste y tiene una altitud de 5650 m.s.n.m. Se sitúa a aproximadamente a 76 km al noreste de la ciudad de Tacna.

El Purupuruni se encuentra ubicado en las coordenadas geográficas: -17.309167° latitud sur; -69.914719° longitud oeste y tiene una altitud de 5315 m.s.n.m. Está situado en el distrito de Ticaco, provincia de Tarata, región de Tacna. (Cruz Paucara et al., 2020).

Este cuenta con la zona geotermal se encuentra en la parte oriental de la Cordillera Occidental de los Andes entre 4200 a 4800 m s. n. m. de altitud, en una zona Altiplánica, de la cual analizaremos varias fuentes termales para determinar las características y posible procedencia de cada una de ellas.



► Fig. 1 - Mapa de ubicación de las fuentes termales analizadas para el volcán Casiri y el volcán Purupuruni.

## METODOLOGÍA

En el presente estudio se tiene como objetivo caracterizar del sistema hidrotermal asociado a los volcanes Casiri y Purupuruni para lo que se tomaron 8 puntos de muestreo.

Tabla. 1 - Coordenadas de las fuentes termales analizadas para el volcán Casiri y Purupuruni.

CODIGO	LATITUD	LONGITUD
CAS1	-17.508441°	-69.802017°
CAS2	-17.350607°	-69.749648°
CAS3	-17.413207°	-69.916487°
CAS4	-17.434418°	-70.038486°
PUR1	-17.218975°	-69.922099°
PUR2	-17.232598°	-69.862602°
PUR3	-17.299019°	-69.953047°
PUR4	-17.258175°	-70.099972°
PUR5	-17.232822°	-69.863083°
PUR6	-17.236657°	-69.928062°
PUR7	-17.218081°	-69.923947°
PUR8	-17.302525°	-69.947570°

El muestreo de agua, se realizó utilizando 2 botellas de plástico de alta densidad, de 250 mL, una se llena por inmersión simple, la otra se llena con agua filtrada (0.45  $\mu\text{m}$ ) y preservada con  $\text{HNO}_3$  1:1. La primera, para aniones y la segunda para metales disueltos. Estas muestras se trasladan en condiciones óptimas al laboratorio de INGEMMET.

Los análisis realizados fueron los siguientes:

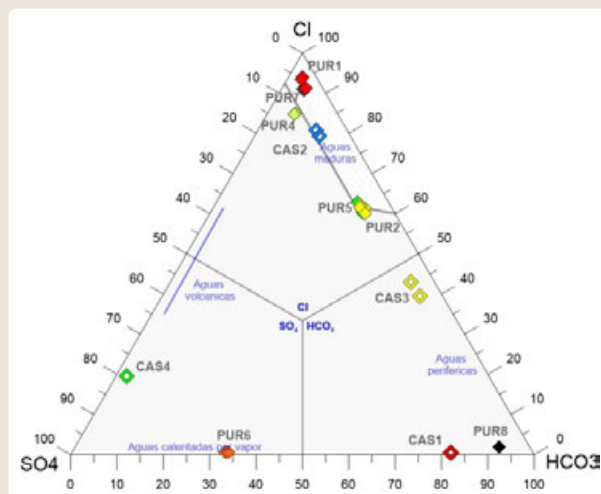
Metales disueltos (Na, Mg, K, Ca, Sr, Li,  $\text{SiO}_2$ , B, Ba, Be, Bi, Fe, S y Zn) por Espectrometría de Emisión Atómica por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) utilizando un equipo marca VARIAN modelo waterproof. (Ag, Al, As, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, La, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Sn, Th, Tl, Ti, U, V, W, Y) por Espectrometría de Masa por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS), utilizando un equipo marca Perkin Elmer modelo Nexion 300D.

Aniones ( $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ) por cromatografía iónica, utilizando un equipo marca Thermo Scientific - Dionex modelo ICS 5000. Además ( $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) por método Titrimétrico, utilizando un equipo marca Thermo Scientific.

## RESULTADOS

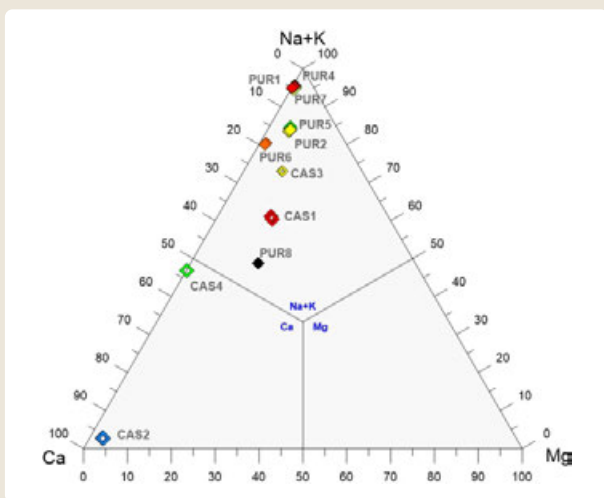
Al procesar los resultados de laboratorio y tener los valores de concentraciones de los analitos podemos graficar de acuerdo a diferentes criterios.

Entre los diagramas ternarios más utilizados se encuentra el de Na - K - Mg propuesto por Giggenbach (1988), el cual permite evaluar el equilibrio agua mineral e identificar el tipo de aguas entre completamente equilibradas, parcialmente equilibradas (mezcladas) o inmaduras y permite estimar la temperatura del reservorio. El diagrama ternario de Cl -  $\text{SO}_4$  -  $\text{HCO}_3$  permite relacionar el contenido de estos aniones con los procesos que experimenta el fluido en su ascenso a la superficie; clasificando los yacimientos termales en origen volcánico si la composición es elevada en sulfatos, maduras si poseen elevado contenido de cloruros, pluvial (periféricas) si presentan contenidos importantes de carbonato/bicarbonato o calentadas por vapor geotérmico. (Robles-Chaves & Arias-Molina, 2022).



► Fig. 2 - Resultados del monitoreo de fuentes graficados en el diagrama ternario  $\text{SO}_4$ -Cl- $\text{HCO}_3$  modificado de Giggenbach, (1998).

De las fuentes analizadas podemos observar que muchas de ellas tienen mayor cantidad de cloruros y en su minoría contienen sulfatos y bicarbonatos sin embargo, también podemos encontrar algunas que muestran una composición mixta entre bicarbonatos y cloruros.



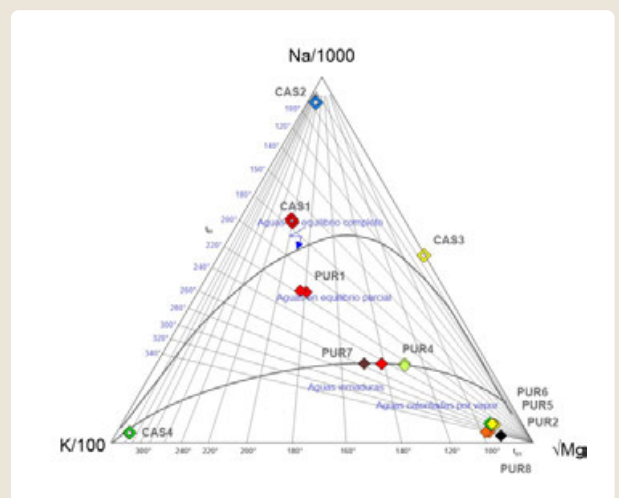
► Fig. 3 - Resultados del monitoreo de fuentes graficados en el diagrama ternario SO<sub>4</sub>-Cl-HCO<sub>3</sub> modificado de Giggenbach, (1998).

Si analizamos la composición de cationes entonces podemos encontrar que la mayoría de las fuentes en estudio poseen sodio y potasio y solo una de ellas tiene mayor influencia de calcio.

La grafica del geotermómetro nos muestra gran que estas fuentes en su mayoría son aguas inmaduras o que han sido calentadas por vapor en el sistema hidrotermal al que están asociadas.

### I. DISCUSION

Al observar y analizar las graficas podemos decir que la fuente CAS4 tiene influencia volcánica dado su que tiene aguas sulfatadas (Fig. 2), las fuentes PUR1, PUR2, PUR4, PUR7 y CAS2 son aguas maduras las cuales tienen gran cantidad de cloruros lo que indica que pueden tener influencia de la fallas cercanas a la zona y las fuentes PUR2, PUR5 y CAS3 son aguas cloruradas-bicarbonatadas esto puede deberse a la dilución de las aguas maduras con aguas superficiales de origen meteórico; además tenemos las fuentes CAS1 y PUR8 las que podemos caracterizar como bicarbonatadas y son principalmente aguas periféricas (Fig. 2).



► Fig. 4 - Diagrama del geotermómetro de las fuentes relacionadas a los sistemas hidrotermales en estudio.

Analizando los resultados de la siguiente gráfica podemos decir que las fuentes PUR1, PUR2, PUR4, PUR5, PUR6, PUR7, CAS1 y CAS3 son aguas alcalinas y las fuentes CAS2 y CAS4 son alcalinas terreas (Fig. 3).

En la gráfica del geotermómetro encontramos que las fuentes PUR2, PUR4, PUR5, PUR6, PUR7 y CAS4 son fuentes que tienen aguas inmaduras o influenciadas por vapores de agua del sistema, así mismo la fuente PUR1 tiene un equilibrio parcial lo que indica un mayor recorrido sin influencia de aguas periféricas y las fuentes CAS1, CAS2 y CAS3 son aguas maduras lo que denota un gran recorrido en el sistema por ello una gran carga de cationes y sales (Fig. 4).

En conclusión, de acuerdo con los resultados podemos decir que las fuentes analizadas tienen diferentes orígenes y al mismo tiempo que es importante mantener su monitoreo constante de sulfatos, cloruros, bicarbonatos entre los cationes y aniones y sodio, potasio y magnesio para los metales disueltos además debemos tener en cuenta parámetros fisicoquímicos como la temperatura y el pH, dado que los cambios que estos presenten nos darán indicios de la actividad del volcán Casiri y del volcán Purupuruni.

## REFERENCIAS

- ▶ Bromley, G.R.M., Thouret, J., Schimmelpfennig, I., Mariño, S., Valdivia, D., Rademaker, K., Vivanco, S., Aster Team, Aumaître, G., Bourlès, D., Keddadouche, K. (2019). In situ cosmogenic  $^3\text{He}$  and  $^{36}\text{Cl}$  and radiocarbon dating of volcanic deposits refine the Pleistocene and Holocene eruption chronology of SW Peru. *Bulletin of Volcanology*, 81(11), 64.
- ▶ Cruz Paucara, V., Flores Jacobo, R., & Velarde Benavente, Y. (2020). Caracterización y evaluación del potencial geotérmico de la zona geotermal Casiri- Kallapuma, Región Tacna.
- ▶ <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2801>  
Fidel Smoll, L., Morche, W., & Nuñez Juarez, S. (1997). Inventario de volcanes del Perú.
- ▶ Giggenbach, W. F. (1988). Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(12), 2749-2765. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90143-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90143-3)
- ▶ Robles-Chaves, D., & Arias-Molina, O. A. (2022). Implementación de metodologías analíticas para la caracterización de aguas geotérmicas para aplicación en usos directos. *Revista Tecnología en Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v35i2.5561>



# Diseño e implementación de un registrador de parámetros eléctricos para estaciones de monitoreo volcánico

Juan Albert Ramos, Javier Calderón, Gonzalo Borja

Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, Arequipa, Perú - Autonomodgar26@ingemmet.gob.pe

**Palabras clave:** parámetros eléctricos, voltaje, corriente, SOH, registrador, estación de monitoreo, sistemas eléctrico fotovoltaico

## INTRODUCCIÓN

El observatorio vulcanológico del INGEMMET cuenta con una red de telemetría compuesta por estaciones multiparamétricas de monitoreo volcánico y repetidoras, en las cuales se tiene instalada instrumentación útil para el monitoreo volcánico y equipos de radio enlace, todo este equipamiento es alimentado por energía eléctrica proporcionada por sistemas eléctricos fotovoltaicos, cada estación cuenta con dos sistemas eléctricos fotovoltaicos independientes que funcionan en paralelo, de manera que si, por alguna razón uno de ellos llegara a fallar, entra el otro sistema a alimentar la estación de manera automática.

Cada sistema eléctrico fotovoltaico consta de tres partes principales que son el panel solar que capta radiación solar y la convierte en energía corriente eléctrica, un controlador de carga que controla el nivel de carga y descarga de las baterías, y una batería que almacena la energía eléctrica generada por los paneles.

## Planteamiento del problema

Aun si se tienen sistemas eléctricos fotovoltaicos independientes es difícil afirmar si uno de ellos ha fallado o cuál de los dos y más aún los motivos exactos del fallo, si no se tiene información del estado de salud, parámetros como los voltajes, corrientes de los componentes, este tipo de fallos resultan frecuentes en épocas de lluvias donde la radiación solar se ve afectada llegando a ser nula durante varios días, superando los días de autonomía ofrecidas por las baterías.

Si bien en época de lluvias no resulta complicado prever una reducción de la radiación solar no era

posible gestionar la energía según orden de prioridad, o el momento exacto en que racionar la energía eléctrica.

Por otro lado, aunque un problema no muy frecuente, es el fallo de algún equipo instalado, que siempre y cuando no sea un fallo grave, es posible solucionar con un reinicio forzado. Tampoco era posible programar el encendido de ciertos equipos que no requieren funcionar continuamente, solo por períodos de tiempo determinados.

## Solución implementada

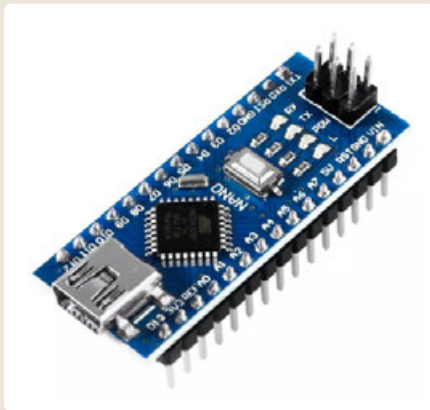
Ante los problemas mencionados se planteó diseñar e implementar un registrador que nos permita conocer los parámetros eléctricos como corrientes y voltajes de paneles solares y baterías, con esa información, el estado de salud del sistema, al mismo tiempo tener un registro y transmisión de datos en tiempo real, con un bajo costo de ancho de banda y bajo consumo de energía.

Así mismo el registrador debe permitir la gestión de la energía en una estación, es decir debe ser capaz de alimentar o cortar la alimentación a todos los instrumentos de una estación, excepto equipos de radio enlace, al mismo tiempo el registrador debe ser programable para encender o apagar un equipo determinado en tiempos determinados, otro detalle no menos importante es la regulación del voltaje, como se sabe el voltaje de una batería durante el proceso de carga y descarga varía entre 14v y 10v que son los voltajes de corte del controlador de carga, es decir cuando el voltaje llega a un valor aproximado de 14v desconecta el suministro del panel hacia la batería y cuando baja hasta 10v el controlador desconecta la batería de la carga, entonces el voltaje hacia la carga ha de ser regulado por este.

El protocolo seleccionado para la comunicación con el registrador es el RS232 ya que en la radio se cuenta con dos puertos seriales RS232 o RS485 y un puerto de red ethernet, estando disponibles solamente los puertos seriales, de los cuales ocuparemos uno.

### Diseño

Para la implementación del registrador se tuvo que elegir una plataforma de desarrollo, actualmente existen innumerables plataformas de desarrollo, con distintas características y capacidades de memoria y procesamiento sin embargo la plataforma elegida es arduino debido a su bajo costo, capacidades de memoria Rom y Ram aceptables, y especialmente a que es la plataforma de desarrollo más difundida y con una comunidad amplia, esto facilita mucho el desarrollo de código fuente. La familia arduino está conformado por varios integrantes, entre ellos destacan el arduino UNO, que es el más difundido, el arduino MEGA, arduino DUE, etc. y sus pares reducidas como el arduino MINI y arduino NANO, para nuestra aplicación elegimos el arduino NANO debido a su pequeño tamaño y prestaciones iguales a un arduino UNO. La figura 1 muestra un arduino NANO.



► Fig. 1 - Arduino NANO

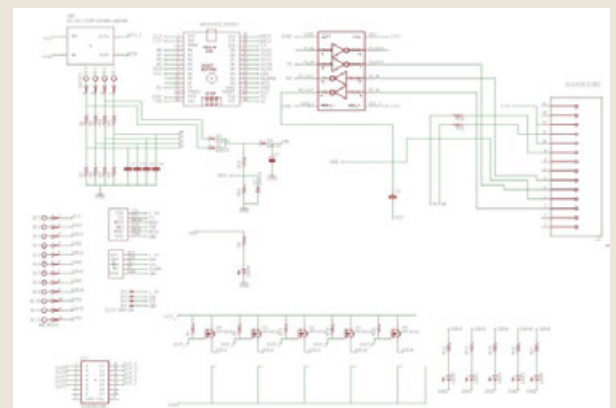
Luego debemos definir la cantidad de variables a leer, es decir voltajes y corrientes, teniendo dos sistemas eléctricos fotovoltaicos tendremos:

- Dos voltajes de panel
- Dos voltajes de baterías
- 2 corrientes.

Por lo tanto, se tendrá 4 entradas analógicas correspondientes a los voltajes, y para las corrientes se requerirá un ADC diferencial por lo tanto no se podrá usar las entradas analógicas de arduino, por eso usaremos el ADC ADS1115, debido a que se requiere medir corrientes de carga y de consumo, es decir corrientes en ambas direcciones.

Por estación se estiman hasta 5 equipos de monitoreo, por lo tanto, el registrador debe contar con 5 salidas de 12v sin caída de tensión, para ello se destinan 5 salidas del arduino que excitan un pre driver que es el ULN2003 y que a su vez activan los mosfet tipo P IRF9540, que actúan como un switch casi sin caída de tensión, con capacidad de manejar hasta 5Amp sin problemas.

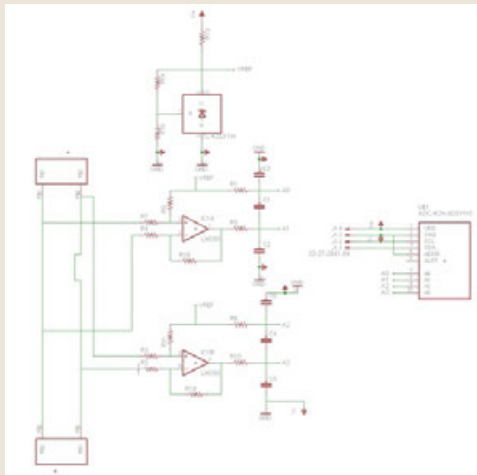
Luego para dotar de una base de tiempo se usa un reloj en tiempo real (RTC) DS3231, de muy buenas prestaciones, para la comunicación serial se usó un chip MAX232, el cual es un chip bastante usado, y accesible, la regulación de voltaje de salida hacia los instrumentos de monitoreo está dada por el convertidor DC-DC XL6009, y un lector de memorias micro SD para guardar el registro de la información de las lecturas hechas por el registrador. La figura 2 muestra el esquema eléctrico del registrador.



► Fig. 2 - Esquema de registrador de parámetros eléctricos.

El sensor de corriente, como se mencionó anteriormente, se basa en un convertidor ADC ADS1115, el cual es un ADC de 16 bits de resolución y 4 entradas single ended o 2 entradas diferenciales, para nuestro caso nos valdremos de la configuración

de las dos entradas diferenciales, sin embargo, a pesar de que el ADC tiene amplificadores programables y podría usarse directamente, no es lo recomendable debido a que las entradas pueden resultar dañadas y por ende el mismo ADC, es por ello que optamos por usar un amplificador operacional en configuración de amplificador diferencial, con esto conseguimos mejor resolución de lecturas de corriente y también asegurar al ADC de daños causados por conexiones inapropiadas y/o accidentales. La figura 3 muestra el esquema del sensor de corriente, la comunicación del sensor de corriente con el arduino es a través del protocolo I<sup>2</sup>C.



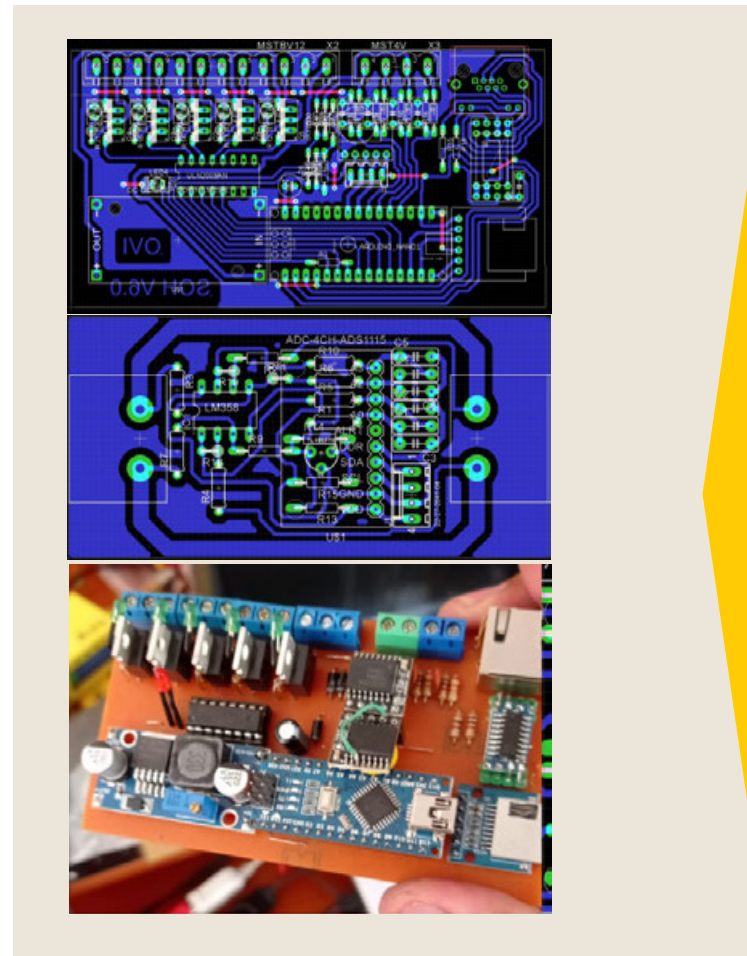
► Fig. 3 - Esquema del sensor de corriente.

### Implementación

Para implementar el registrador se diseñó primeramente la placa para circuito impreso PCB, esto se hizo en el software EAGLE v6.3, la figura 4 muestra el resultado del diseño en Eagle del registrador y la figura 5 muestra el diseño del sensor de corriente, luego con los archivos gerber generados es posible cargarlos a una fresadora CNC con la cual realizamos la placa PCB.

La CNC te entrega una placa con las pistas y espacios realizados y con los agujeros a su medida y en sus lugares, solo que montar los componentes, y cargar el código fuente.

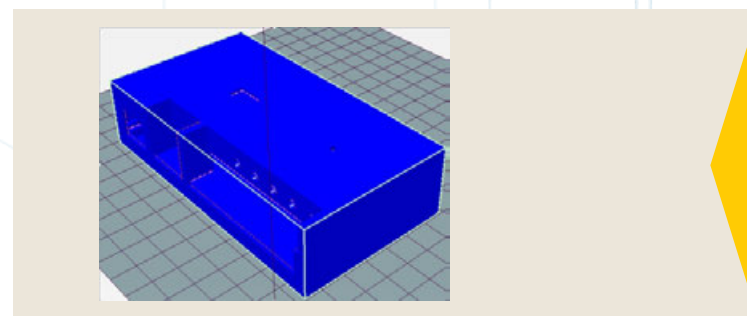
La figura 6 muestra el registrador con componentes montados.



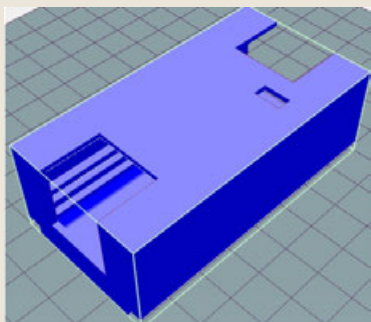
► Fig. 4 - Registrador de parámetros eléctricos montado.

El código fuente fue desarrollado en el software arduino IDE, cabe mencionar que el puerto de comunicación del registrador es el mismo usado para la programación o carga del código fuente desarrollado.

Se diseñó una carcasa para darle consistencia y seguridad a la placa y poder manejarla con confianza, el diseño se hizo en AutoCAD y se mandó a una impresora 3D mediante el software REPETIER.



► Fig. 5 - Caja de registrador de parámetros eléctricos.

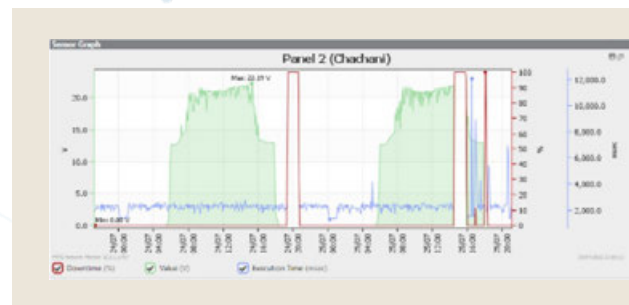


► Fig. 6 - Caja de sensor de corriente.

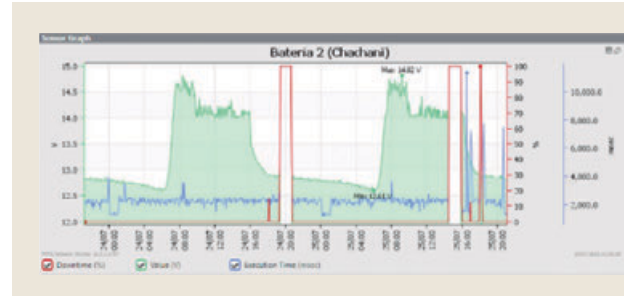
## Resultados

La recolección de datos se hace con el software PRTG, que es un software de monitorización proactiva de red capaz de monitorear en tiempo real sistemas dispositivos y aplicaciones, que hace una petición de datos cada minuto a través de una conexión telnet a través de la red de telemetría utilizando la dirección IP de la radio donde se conecta el registrador, y guarda un registro y muestra los datos gráficamente. Las siguientes figuras muestran las gráficas obtenidas de la instalación de unos de los sistemas eléctricos fotovoltaicos de la estación Chachani.

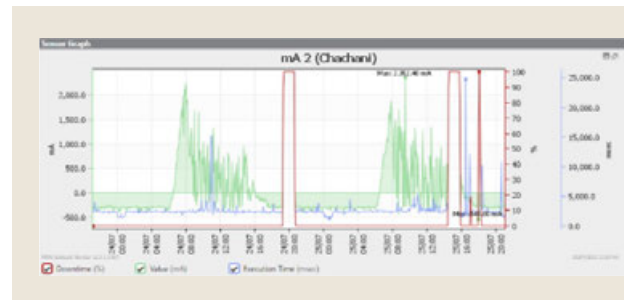
La figura 7 muestra la señal característica del voltaje de un panel solar, la figura 8 muestra la señal característica del voltaje de una batería, la figura 9 muestra la señal característica de la corriente, y la figura 10 muestra la señal característica de carga y descarga de una batería.



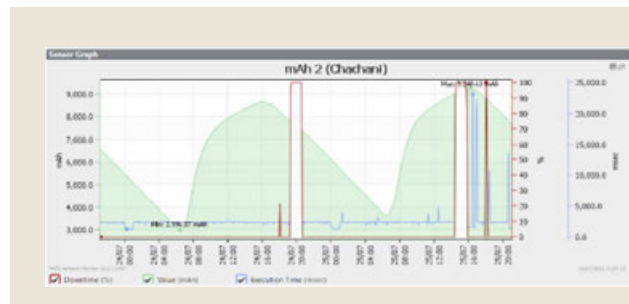
► Fig. 7 - Señal de voltaje panel solar.



► Fig. 8 - Señal de voltaje de batería.



► Fig. 9 - Señal de corriente de batería.



► Fig. 10 - Señal de corriente de batería.

## CONCLUSIONES

- El registrador nos permite conocer los parámetros eléctricos de los sistemas fotovoltaicos en tiempo real, con esta información es posible determinar el comportamiento de las baterías, paneles solares, controladores de carga y el consumo de los equipos de monitoreo.
- El registrador nos permite gestionar la energía de manera que podamos dar prioridad a equipos cuya información sea más relevante y prescindir de otros equipos en épocas donde la radiación solar escasea y por ende la energía disponible.



- ▶ El registrador nos permite forzar reinicios remotamente de equipos que por alguna razón desconocida salen de funcionamiento, en el pasado ese problema se resolvía yendo hasta el lugar y forzar el reinicio.
- ▶ Nos permite también establecer encendidos y apagados programados muy útil para equipos como el DOAS.

### TRABAJOS FUTUROS

El registrador se ha convertido en parte primordial de una estación de monitoreo, teniendo una constante evolución, por ello se plantean las siguientes mejoras.

- ▶ Cambiar el protocolo de comunicación a RS485, el cual es un protocolo industrial, que permite la conexión de muchos instrumentos por un solo bus.
- ▶ Cambiar la plataforma de desarrollo por una de la familia ESP32 debido a que la capacidad de la memoria ROM del arduino NANO llego a su límite.
- ▶ Agregar un modulador y demodulador FSK para medición remota de temperatura de baterías montando la señal en los cables de alimentación.
- ▶ Agregar funciones extras en el firmware.

### REFERENCIAS

- ▶ Alonso, N.O. (2013). Redes de comunicaciones industriales. Editorial UNED Tobajas, M.C. (2020). Energía solar fotovoltaica. ECOE ediciones Ltda
- ▶ Artero, Ó.T. (2013). ARDUINO. Curso práctico de formación. RC libros

# Mapa Regional y Ranking de Riesgos Volcánicos de la Zona Volcánica Central de los Andes

María-Paz Reyes-Hardy<sup>1</sup>, Luigia Di Maio<sup>1</sup>, Lucia Dominguez<sup>1</sup>, Corine Frischknecht<sup>1</sup>, Sébastien Biass<sup>1</sup>, Leticia Freitas Guimarães<sup>2</sup>, Amiel Nieto-Torres<sup>3</sup>, Manuela Elissondo<sup>4</sup>, Maira Figueroa<sup>5</sup>, Álvaro Amigo<sup>5</sup>, Sebastián García<sup>4</sup> y Costanza Bonadonna<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Earth Sciences, University of Geneva, 1205 Geneva, Switzerland – maria-paz.reyeshardy@unige.ch

<sup>2</sup> Geoscience Institute, University of São Paulo, São Paulo, Brazil

<sup>3</sup> Departamento de Vulcanología, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, Mexico

<sup>4</sup> Servicio Geológico Minero Argentino, SEGEMAR, Argentina

<sup>5</sup> Servicio Nacional de Geología y Minería, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Temuco, Chile

**Palabras clave:** Zona Volcánica Central, Ranking de Riesgo Volcánico, Peligros Volcánicos, Exposición, Vulnerabilidad, Resiliencia.

## INTRODUCCIÓN

La Zona Volcánica Central de los Andes (ZVCA) es una de las zonas volcánicas más activas de América del Sur y es una de las áreas en las que la mayoría de los volcanes se encuentran dentro de los 25 km de una frontera internacional comprendiendo Argentina, Chile, Bolivia y Perú, con importantes desafíos transfronterizos (Donovan & Oppenheimer, 2019). En esta región, los volcanes se ubican en el Altiplano-Puna (sobre los 4000 m de altitud) y, por lo tanto, varios volcanes superan los 6000 m s.n.m., entre ellos el Ojos del Salado que es la cumbre volcánica más alta del mundo.

Durante décadas, la ZVCA ha sido un sitio importante para entender una gran cantidad de procesos geológicos (e.g. evolución geológica, tectónica, espesor de la corteza, erosión y geometría por subducción, segmentación del arco volcánico y génesis del magma), pero debido al difícil acceso, los registros de erupciones eran bastante escasos, hasta hace muy poco. Durante los últimos 20 años, la agitación volcánica en varias partes de la ZVCA ha permitido la implementación de nuevas capacidades de monitoreo e inversiones en investigación (Aguilera et al., 2022) y como consecuencia, se ha puesto a disposición nueva información detallada. La priorización de estrategias de reducción de riesgos es especialmente importante para la ZVCA debido a su gran cantidad de volcanes.

Además, el número de personas expuestas a la actividad volcánica en la ZVCA depende de la dinámica eruptiva y la magnitud de las erupciones potenciales.

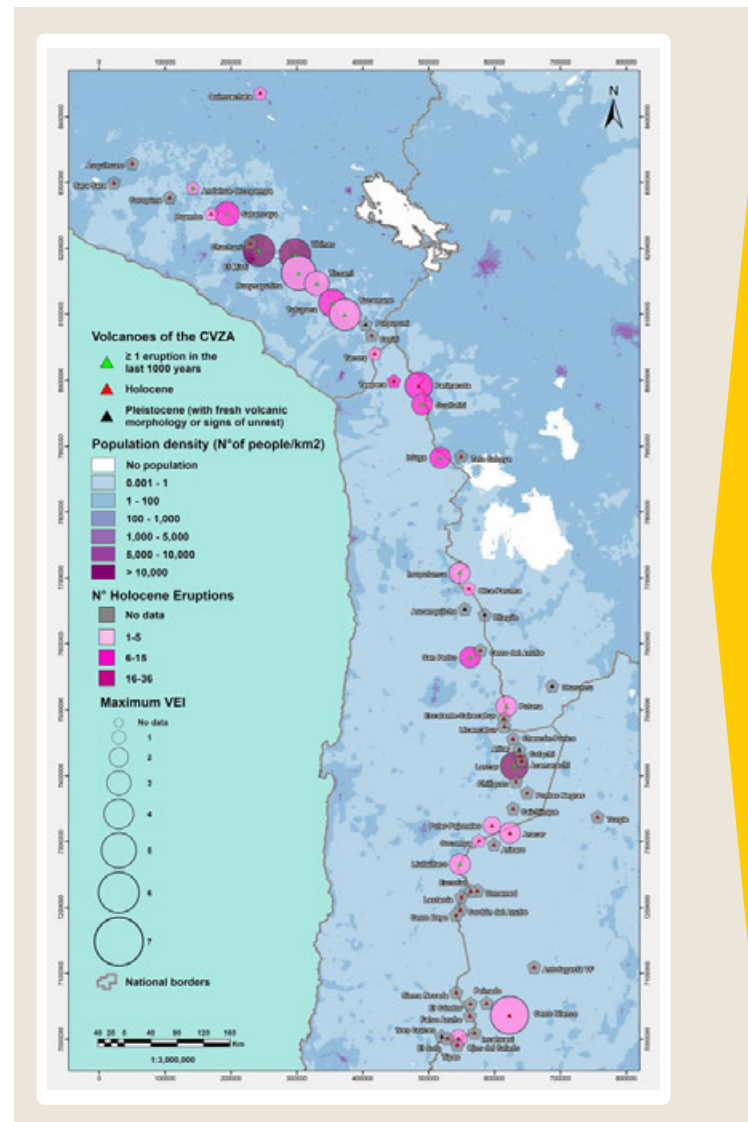
La presencia de áreas urbanas e infraestructura crítica cerca de algunos de estos volcanes representa una amenaza importante para toda la región. Por ejemplo, la población que vive ~ 30 km de cualquiera de los volcanes activos en Perú es ~ 1.5 millones (Aguilera et al., 2022). Sin embargo, el área potencialmente afectada por una gran erupción como la de Huaynaputina (VEI 6) se extendería hasta 1000 km desde el cráter, exponiendo a ~3 millones de personas, principalmente ubicadas en las regiones de Arequipa, Moquegua, Tacna y Puno. En el caso del norte de Chile, la mayoría de los volcanes se encuentran en zonas remotas a excepción del complejo volcánico Taapaca, ubicado muy cerca de Putre, una de las principales localidades pobladas del Altiplano chileno con 1716 habitantes (INE, 2017). No obstante, las grandes erupciones explosivas de los volcanes chilenos de la ZVCA podrían afectar amplias áreas y el espacio aéreo de Argentina y el sur de Bolivia debido a los vientos provenientes del oeste (e.g., Lascar 1986, 1993, 2000; Viramonte et al., 2001; Amigo, 2021). A pesar de que Argentina alberga pocos volcanes dentro de la ZVCA, cualquier erupción podría tener importantes impactos socioeconómicos y ambientales producidos por la dispersión y caída de tefra en Argentina y también en los países vecinos (Dominguez et al., 2021; Elissondo et al., 2016; García y Badi, 2021).

Durante las últimas décadas, se han propuesto diversas estrategias para evaluar la amenaza y el riesgo volcánico a nivel mundial (Alberico et al., 2011; Alcorn et al., 2013; Bernal et al., 2017; Biass et al., 2012; Hayes et al., 2019; Hicks et al., 2014; Kaufman, 2019;

Lirer et al., 2010; Marzocchi et al., 2012; Reyes-Hardy et al., 2021; Sandri et al., 2014; Scaini et al., 2014; Thierry et al., 2008), así como para clasificar los volcanes solo teniendo en cuenta los factores de peligro y los factores de exposición que se combinan para definir la clasificación de amenaza relativa (Auker et al., 2015; Bailey et al., 1983; Ewert et al., 1998, 2005, 2014, 2018; Ewert, 2007; Lowenstein y Talai, 1984; Macedo et al., 2016; Magill y Blong, 2005; Scandone et al., 2016; Yokoyama et al., 1984). Uno de los análisis de clasificación de volcanes más completo es el enfoque desarrollado por el Volcano Disaster Assistance Program de USA, desarrollado inicialmente para volcanes fuera de USA, posteriormente mejorado para los volcanes de Estados Unidos, Alaska, Hawái y las Islas Marianas por Ewert et al. (2005, 2007) y actualizado recientemente (Ewert et al., 2018). Se ha utilizado en varios países de Latinoamérica, entre ellos México (Espinasa-Pereña, 2018), América Central (Palma et al., 2009), Chile (Lara et al., 2006), Ecuador (Santamaría and Bernard, 2018), y Argentina (Elisondo et al., 2016b) Elisondo et al. (2016b) clasificó el riesgo de los volcanes ubicados en Argentina y en la frontera con Chile (total de 38 volcanes del Holoceno) en base al procedimiento sugerido por Ewert et al. (2005, 2007). En consecuencia, los volcanes se evaluaron en función de 15 parámetros de peligro y 10 parámetros de exposición. A partir de los resultados de este análisis se definieron cuatro categorías de riesgo relativo: Muy Alto, Alto, Moderado y Bajo. Sin embargo, no se consideró la evaluación de los factores de vulnerabilidad y resiliencia.

Recientemente, se desarrolló una nueva estrategia de clasificación de riesgos que se basa en la propuesta de Ewert et al. (1998) y Elisondo et al., (2016b) incluyendo factores de riesgo adicionales (i.e., factores de vulnerabilidad y resiliencia). La nueva metodología de clasificación de riesgos se probó en volcanes mexicanos, Centro y Sur América con actividad registrada en los últimos 1000 años (Guimarães et al., 2021; Nieto-Torres et al., 2021).

Un aspecto clave a la hora de aplicar una estrategia de ranking de riesgo en una determinada zona volcánica es la determinación del número de volcanes a evaluar. Esto es especialmente importante en la ZVCA debido a



► Fig. 1 – Mapa regional basado en amenazas. Incluye los 62 volcanes activos y potencialmente activos a evaluar. Mapa escala 1: 3.000.000. Créditos de la capa de servicio: Fuentes: Esri, USGS, NOAA.

la falta de evidencia geocronológica y/o registros históricos preservados (Lara et al., 2021). Por tanto, el primer paso de nuestro estudio ha sido la identificación de los volcanes de la ZVCA a evaluar (Fig. 1).

En este estudio, comparamos diferentes enfoques para identificar los volcanes de la ZVCA con el posible impacto potencial más alto: i) el mapeo regional basado en amenazas que considera peligro volcánico y exposición, ii) la clasificación de riesgo volcánico de 2 factores que considera peligro y exposición (Ewert et al., 2005; Ewert, 2007), iii) el Ranking de Riesgos Volcánicos de 3 factores considerando amenaza,

exposición y vulnerabilidad (Guimarães et al., 2021; Nieto-Torres et al., 2021), y iv) el Ranking de Riesgo Volcánico de 4 factores considerando amenaza, exposición, vulnerabilidad y resiliencia (Guimarães et al., 2021; Nieto-Torres et al., 2021).

Vale la pena enfatizar que para nuestro mapeo regional basado en amenazas evaluamos tanto el total de volcanes activos de la ZVCA como los volcanes de la ZVCA que tuvieron al menos una erupción en los últimos 1000 años, considerando solo los peligros volcánicos y los factores de exposición (62 volcanes) (Fig. 1). Para llevar a cabo la nueva metodología de clasificación de riesgo aplicada a la ZVCA, evaluamos los sistemas volcánicos con al menos una erupción en

los últimos 1000 años siguiendo a Freitas Guimarães et al. (2021) y algunos centros volcánicos del Pleistoceno, que muestran morfologías volcánicas frescas y/o signos de agitación (como desgasificación, sismicidad o deformación del suelo), combinados con nueva información detallada sobre peligro, exposición, vulnerabilidad y resiliencia que se puso a disposición recientemente.

Este trabajo no solo destaca los centros volcánicos con los peligros volcánicos más intensos y frecuentes asociados con la mayor densidad de elementos expuestos, sino que también aquellos con el mayor impacto potencial que requieren las acciones de mitigación de riesgo más urgentes.

#### AGRADECIMIENTOS

Este estudio está financiado por el proyecto SNSF #188757 "A new probabilistic framework for regional volcanic risk assessment including hazards interacting at multiple temporal and spatial scales", y se llevó a cabo en el marco de una colaboración entre la Universidad de Ginebra, SERNAGEOMIN y SEGEMAR.

Agradecemos la fructífera discusión con Rigoberto Aguilar que nos permitió enriquecer esta investigación y también a Cintia Bengoa, Gabriela Pedreros, María Angélica Contreras Vargas y Johanna Kaufman por su apoyo. Este trabajo se basa en la cooperación entre los países de la ZVCA también gracias al apoyo de la Asociación Vulcanológica Latinoamericana (ALVO).

#### REFERENCIAS

- ▶ Aguilar, R., Taípe Maquerhua, E., Antayhua Vera, Y., Ortega Gonzales, M., Apaza Choquehuayta, F., & Cruz Mamani, L. (2021). Hazard assessment studies and multiparametric volcano monitoring developed by the Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico in Peru. *Volcanica*, 4(S1), 73-92.
- ▶ Aguilera, F., Apaza, F., Del Carpio, J., Grosse, P., Jiménez, N., Ureta, G., Inostroza, M., Báez, W., Layana, S., Gonzalez, C., Rivera, M., Ortega, M., Gonzalez, R., & Iriarte, R. (2022). Advances in scientific understanding of the Central Volcanic Zone of the Andes: a review of contributing factors. *Bulletin of Volcanology*, 84(3), 1-8.
- ▶ Alberico, I., Petrosino, P., & Lirer, L. (2011). Volcanic hazard and risk assessment in a multi-source volcanic area: the example of Napoli city (Southern Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(4), 1057-1070.
- ▶ Alcorn, R., Panter, K. S., & Gorsevski, P. V. (2013). A GIS-based volcanic hazard and risk assessment of eruptions sourced within Valles Caldera, New Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 267, 1-14.
- ▶ Amigo, A. (2021). Volcano monitoring and hazard assessments in Chile. *Volcanica*, 4(S1), 1-20.



- ▶ Auken, M. R., Sparks, R. S. J., Jenkins, S. F., Aspinall, W., Brown, S. K., Deligne, N. I., Jolly, G., Loughlin, S. C., Marzocchi, W., Newhall, C. G., & Palma, J. L. (2015). Development of a new global Volcanic Hazard Index (VHI). In *Global Volcanic Hazards and Risk* (Issue 2015, pp. 349–358). Cambridge University Press.
- ▶ Bailey, R. A., Beauchemin, P. R., Kapinos, F. P., & Klick, D. W. (1983). *The Volcano Hazards Program: objectives and long-range plans*. Open-File Report 83-400. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 33 p.
- ▶ Bernal, G. A., Salgado-Gálvez, M. A., Zuloaga, D., Trisancho, J., González, D., & Cardona, O.-D. (2017). Integration of Probabilistic and Multi-Hazard Risk Assessment Within Urban Development Planning and Emergency Preparedness and Response: Application to Manizales, Colombia. *International Journal of Disaster Risk Science*, 8(3), 270–283.
- ▶ Biass, S., Frischknecht, C., & Bonadonna, C. (2012). A fast GIS-based risk assessment for tephra fallout: the example of Cotopaxi volcano, Ecuador. *Natural Hazards*, 65(1), 497–521.
- ▶ Dominguez, L., Bonadonna, C., Frischknecht, C., Menoni, S., & Garcia, A. (2021). Integrative Post-event Impact Assessment Framework for Volcanic Eruptions: A Disaster Forensic Investigation of the 2011–2012 Eruption of the Cordón Caulle Volcano (Chile). *Frontiers in Earth Science*, 9(June), 2012–2019.
- ▶ Donovan, A., & Oppenheimer, C. (2019). Volcanoes on borders: a scientific and (geo)political challenge. *Bulletin of Volcanology*, 81(5), 31.
- ▶ Elissondo, M., Farías, C., & Collini, E. (2016). Evaluación del riesgo volcánico relativo en Argentina. *Cities on Volcanoes 9*, Puerto Varas, Chile., 2, Poster.
- ▶ Elissondo, M., Baumann, V., Bonadonna, C., Pistolesi, M., Cioni, R., Bertagnini, A., Biass, S., Herrero, J. C., & Gonzalez, R. (2016). Chronology and impact of the 2011 Cordón Caulle eruption, Chile. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(3), 675–704.
- ▶ Espinasa-Pereña, R. (2018). Evaluación Del Riesgo Relativo De Los Volcanes De México. *Foro Internacional: Los Volcanes y Su Impacto*. Arequipa, Perú, 12.  
[https://www1.cenapred.unam.mx/DIR\\_INVESTIGACION/2109/FRACCION\\_XLI/RV/14\\_Evaluacion\\_Riesgo\\_Relativo\\_2018.pdf](https://www1.cenapred.unam.mx/DIR_INVESTIGACION/2109/FRACCION_XLI/RV/14_Evaluacion_Riesgo_Relativo_2018.pdf)
- ▶ Ewert, J.W., Guffanti, M., & Murray, T. L. (2005). An assessment of volcanic threat and monitoring capabilities in the United States: Framework for a National Volcano Early Warning System (NVEWS). USGS Open-File Report 2005-1164, 62. [papers://a2ff6e5a-f401-4dac-bc3a-c83939ad6272/Paper/p738](https://pubs.usgs.gov/ofr/2005/1164/p738/)
- ▶ Ewert, J.W., Hazards, N., Uhira, K., Baba, T., Mori, H., Katayama, H., & Bulletin, N. H. (2014). Revised definitions and classification of active volcanoes in Japan, based on their past activities. April, 2014.
- ▶ Ewert, J. W., Miller, C. D., Tilling, R. I., & Neal, C. A. (1998). Revised Criteria for Identifying High-Risk Volcanoes Around the World. *EOS Trans. Am. Geophys. Union.*, 79(45), 993.
- ▶ Ewert, John W. (2007). System for Ranking Relative Threats of U.S. Volcanoes. *Natural Hazards Review*, 8(4), 112–124.
- ▶ Ewert, John W., Diefenbach, A. K., & Ramsey, D. W. (2018). 2018 Update to the U.S. Geological Survey National Volcanic Threat Assessment. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2018-5140, 40.

- ▶ Forte, P., Rodríguez, L., Jácome Paz, M. P., Caballero García, L., Alpizar Segura, Y., Bustos, E., Perales Moya, C., Espinoza, E., Vallejo, S., & Agosto, M. (2021). Volcano monitoring in Latin America: taking a step forward. *Volcanica*, 4(S1), vii-xxxiii.
- ▶ Garcia, S., & Badi, G. (2021). Towards the development of the first permanent volcano observatory in Argentina. *Volcanica*, 4(S1), 21-48.
- ▶ Guimarães, L., Nieto-Torres, A., Bonadonna, C., & Frischknecht, C. (2021). A New Inclusive Volcanic Risk Ranking, Part 2: Application to Latin America. *Frontiers in Earth Science*, 9(October), 1-24.
- ▶ Hayes, J. L., Wilson, T. M., Stewart, C., Villarosa, G., Salgado, P., Beigt, D., Outes, V., Deligne, N. I., & Leonard, G. S. (2019). Tephra clean-up after the 2015 eruption of Calbuco volcano, Chile: A quantitative geospatial assessment in four communities. *Journal of Applied Volcanology*, 8(1).
- ▶ Hicks, A., Barclay, J., Simmons, P., & Loughlin, S. (2014). An interdisciplinary approach to volcanic risk reduction under conditions of uncertainty: a case study of Tristan da Cunha. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(7), 1871-1887.
- ▶ INE. (2017). Instituto Nacional de Estadísticas, Chile. Censo de población y vivienda.
- ▶ Kaufman, J. (2019). Exposure Based Multi-Hazard Risk Assessment of Copahue Volcano, Neuquén, Argentina. Specialization Certificate in the Assessment and Management of Geological and Climate Related Risk, 57.
- ▶ Lara, L. E., Clavero, J., Hinojosa, M., Huerta, S., Wall, R., & Moreno, H. (2006). NVEWS-CHILE: Sistema de Clasificación semicuantitativa de la vulnerabilidad volcánica. *Congreso Geológico Chileno.*, 11(Actas 2), 487-490.
- ▶ Lirer, L., Petrosino, P., & Alberico, I. (2010). Hazard and risk assessment in a complex multi-source volcanic area: the example of the Campania Region, Italy. *Bulletin of Volcanology*, 72(4), 411-429.
- ▶ Lowenstein, P. L., & Talai, B. (1984). Volcanoes and Volcanic Hazards in Papua New Guinea. Tokyo: Geological Survey of Japan, 263, 315-331.
- ▶ Macedo, O., Taipe, E., Del Carpio, J., Ticona, J., Ramos, D., Puma, N., Aguilar, V., Machacca, R., Torres, J., Cueva, K., Cruz, J., Lazarte, I., Centeno, R., Miranda, R., Álvarez, Y., Masias, P., Vilca, J., Apaza, F., Chijcheapaza, R., ... Vela, J. (2016). Evaluación del Riesgo Volcánico en el Sur del Perú, situación actual de la vigilancia actual y requerimientos de monitoreo en el futuro.
- ▶ Machacca, R., Del Carpio Calienes, J. A., Rivera Porras, M. A., Tavera Huarache, H. J., Macedo Franco, L. D., Concha Calle, J. A., Lazarte Zerpa, I. A., Centeno Quico, R. G., Puma Sacsí, N. C., Torres Aguilar, J. L., Vargas Alva, K. A., Cruz Igme, J. E., Velarde Quispe, L., Vilca Nina, J., & Malpartida Garay, A. R. (2021). Monitoring of active volcanoes in Peru by the Instituto Geofísico del Perú. *Volcanica*, 4(S1), 49-71.
- ▶ Magill, C., & Blong, R. (2005). Volcanic risk ranking for Auckland, New Zealand. II: Hazard consequences and risk calculation. *Bulletin of Volcanology*, 67(4), 340-349.
- ▶ Marzocchi, W., Garcia-Aristizabal, A., Gasparini, P., Mastellone, M. L., & Di Ruocco, A. (2012). Basic principles of multi-risk assessment: a case study in Italy. *Natural Hazards*, 62(2), 551-573.
- ▶ Nieto-Torres, A., Guimarães, L. F., Bonadonna, C., & Frischknecht, C. (2021). A New Inclusive Volcanic Risk Ranking, Part 1: Methodology. *Frontiers in Earth Science*, 9(August), 1-22.

- ▶ Palma, J. L., Rose, W. I., & Escobar-Wolf, R. (2009). Volcanic threat in Central America: Assessment and comparison of volcanic hazards and associate vulnerability in Guatemala, El Salvador, Nicaragua, and Costa Rica. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 41(4), 55.
- ▶ Reyes-Hardy, M.-P., Aguilera Barraza, F., Sepúlveda Birke, J. P., Esquivel Cáceres, A., & Inostroza Pizarro, M. (2021). GIS-based volcanic hazards, vulnerability and risks assessment of the Guallatiri Volcano, Arica y Parinacota Region, Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 109(February), 103262.
- ▶ Sandri, L., Thouret, J.-C., Constantinescu, R., Biass, S., & Tonini, R. (2014). Long-term multi-hazard assessment for El Misti volcano (Peru). *Bulletin of Volcanology*, 76(2), 771.
- ▶ Santamaría, S., & Bernard, B. (2018). Hierarchization of the volcanoes of continental and insular Ecuador based on their threat potential. Abstract ID: 170 for Cities on Volcanoes 10. Session: S02.03 - From Volcanic Hazard to Risk Assessment: The Key Role of Exposure and Vulnerability.
- ▶ Scaini, C., Biass, S., Galderisi, A., Bonadonna, C., Folch, A., Smith, K., & Höskuldsson, A. (2014). A multi-scale risk assessment for tephra fallout and airborne concentration from multiple Icelandic volcanoes - Part 2: Vulnerability and impact. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(8), 2289-2312.
- ▶ Scandone, R., Bartolini, S., & Martí, J. (2016). A scale for ranking volcanoes by risk. *Bulletin of Volcanology*, 78(1), 2.
- ▶ Thierry, P., Stieltjes, L., Kouokam, E., Nguéya, P., & Salley, P. M. (2008). Multi-hazard risk mapping and assessment on an active volcano: the GRINP project at Mount Cameroon. *Natural Hazards*, 45(3), 429-456.
- ▶ Yokoyama, I., Tilling, R. I., & Scarpa, R. (1984). International Mobile Early-Warning System(s) for Volcanic Eruptions and Related Seismic Activities. Report of an Unesco/UNEP Sponsored Preparatory Study in 1982-84. Paris: UNESCO., 01(2286), 105.

# Mapas de dispersión de gases y de partículas: Un insumo que permite alertar a la población en caso de actividad de los volcanes Poás, Turrialba y Rincón de la Vieja

José Pablo Sibaja Brenes<sup>1</sup>, Rosa Alfaro Solís<sup>2</sup>, María Martínez Cruz<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT-UNA), Escuela de Química, Universidad Nacional, Costa Rica – [jose.sibaja.brenes@una.cr](mailto:jose.sibaja.brenes@una.cr)

<sup>2</sup> Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT-UNA), Escuela de Química, Universidad Nacional, Costa Rica

<sup>3</sup> Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Costa Rica

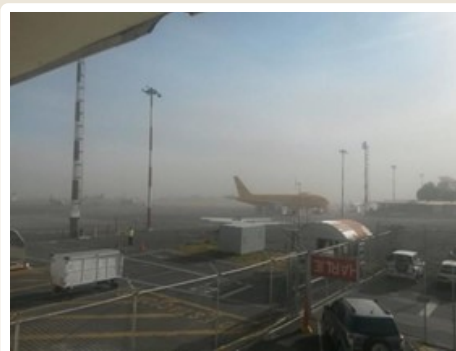
**Palabras clave:** Mapas de dispersión, dióxido de azufre, ceniza.

## INTRODUCCIÓN

En Costa Rica, la actividad volcánica se distribuye en 3 conos principales: Poás, Turrialba y Rincón de la Vieja. Los volcanes Poás y Turrialba, los cuales están situados en Alajuela y Cartago, respectivamente, manifiestan su actividad a través de la emisión continua de gases y ceniza desde hace algunos años. Por su parte, el Rincón de la Vieja en el 2018 manifestó una actividad significativa a través de algunas erupciones y lahares notables (CNE, 2019; SINAC, 2019). Las emisiones gaseosas de los volcanes suelen tener una liberación de varias sustancias que pueden generar una afectación a la población (en función del tipo de sustancia, la concentración y el tiempo de exposición), donde se tienen: vapor de agua ( $H_2O(g)$ , 30 % a 90 %), dióxido de azufre ( $SO_2(g)$ , 5 % a 50 %), dióxido de carbono ( $CO_2(g)$ , 5 % a 40 %), sulfuro de hidrógeno ( $H_2S(g)$ , < 2 %), hidrógeno ( $H_2(g)$ , < 2 %), monóxido de carbono ( $CO(g)$ , < 2 %) y bajas concentraciones de otros gases como radón (Rn) y helio (He) (Baxter y Horwell, 2015). Además, se ha observado la emisión de especies fuertemente ácidas como el fluoruro de hidrógeno ( $HF(g)$ ) y el cloruro de hidrógeno ( $HCl(g)$ ), el ácido nítrico ( $HNO_3(ac)$ ) y el ácido sulfúrico ( $H_2SO_4(ac)$ ) (Williams-Jones y Rymer, 2015).

El volcán Turrialba inició su actividad en el 2010, con emanaciones de gases y ceniza aisladas. Para el 2015, se dio una serie de fuertes emanaciones por parte del nuevo cráter formado en la cima del volcán. El 18 de mayo del 2015 se dio una erupción fuerte, en donde se formó una columna de más de 3 km de gases y ceniza, la cual se dispersó hacia el Valle Central,

generando problemas de salud, de visibilidad y tránsito aéreo. En la Fig. 1 se muestra la reducción en la visibilidad presentada el 18 de mayo del 2015 en el aeropuerto Internacional Juan Santamaría (a 49 km del cráter del volcán Turrialba), en donde se dio el cierre repentino debido a la cantidad de ceniza que había suspendida en el aire y precipitada en la pista de aterrizaje. En consecuencia, se dio la movilización de aviones a otro aeropuerto del país. Dicha situación generó un movimiento de instituciones en pro de la salud y de la continuidad de los servicios en el país. Además, se realizó el desalojo de comunidades en Cartago y Heredia, debido a la caída de ceniza y a las complicaciones respiratorias que se presentaron.



► Fig. 1 – Vista de Aeropuerto Internacional Juan Santamaría el 18 de mayo del 2015 con la caída de ceniza sobre la pista y el cierre del lugar. (<https://www.diarioextra.com/Noticia/detalle/255152/aeropuerto-juan-santamar-a-estar-cerrado-hasta-ma-ana>)

Con lo sucedido, el país se mostró a nivel nacional e internacional sin un plan de manejo de emergencias volcánicas y sin una respuesta para alertar a la población y a las instituciones sobre la caída de ceniza



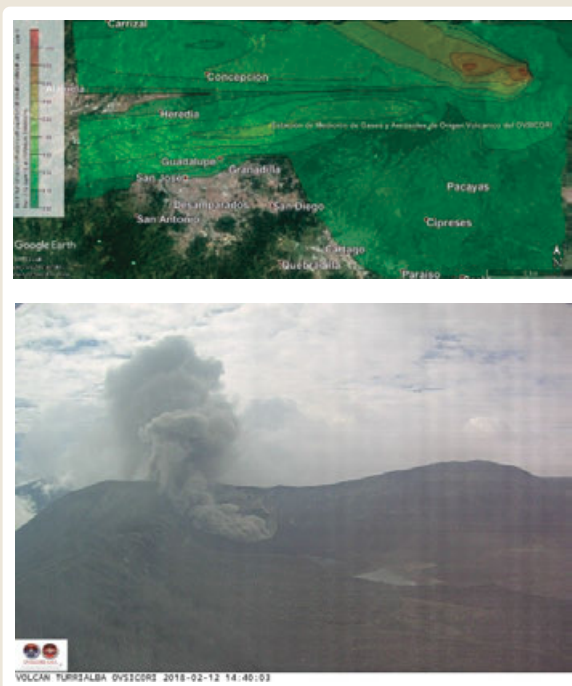
y la percepción de gases azufrados en el ambiente. A partir de esta situación, una serie de instituciones se unieron a nivel nacional para construir una estrategia de organización, tomando en consideración los actores que realizan mediciones, con el objetivo de contar con los parámetros necesarios para la toma de decisiones en el momento en que se dé una erupción volcánica por parte de alguno de los focos de emisión. En las reuniones participaron: La Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Dirección General de Aviación Civil (DGAC) y la Universidad Nacional (UNA). La UNA estuvo representada por el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI) y por el Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT-UNA), quienes presentaron la iniciativa de realizar el modelaje de las emisiones volcánicas por medio del programa computacional AERMOD, el cual ha sido aceptado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) para calcular el alcance de una emisión. Dicho software genera mapas de dispersión en la plataforma de Google Earth, para materiales sólidos y gases a 50 km a la redonda de la fuente de emisión, tomando en cuenta los parámetros de la erupción (flujo de gases y de partículas, temperatura de gases, diámetro y altura de la fuente emisora, velocidad de salida de los gases, entre otros), las características geográficas y los datos meteorológicos (temperatura, humedad relativa, lluvia, radiación solar, velocidad y dirección del viento, entre otros). Se utiliza una escala numérica y de colores (verde, amarillo y rojo) para explicar las zonas de menor o mayor afectación. La finalidad de utilizar este modelo matemático de pluma gaussiana es conocer el alcance de la dispersión y la magnitud de la concentración de los gases a nivel de la superficie, lo cual puede ser utilizado en la toma de decisiones. Los datos meteorológicos se extraen de las estaciones colocadas en los volcanes, por parte del IMN y de las estimaciones satelitales de vientos en las zonas donde no se dispone de información.

Con esto, se inició la elaboración de los modelos de dispersión con el programa AERMOD, para alertar a las instituciones tomadoras de decisiones sobre el área geográfica con posible caída de ceniza o afectación por

gases. Las instituciones que desde el inicio se vieron favorecidas con esta herramienta fueron: La Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), La Dirección General de Aviación Civil (DGAC), El Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y La Oficina Nacional Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés). Además, se habilitó una página web del Observatorio Ambiental de la Universidad Nacional (<http://www.observatorioambiental.una.ac.cr/>) para la consulta pública de los mapas de dispersión de ceniza y de SO<sub>2</sub>, además, se publican los mapas por Facebook para informar más rápidamente a la población. A raíz del uso de esta herramienta y mediante la implementación de la metodología propuesta, el país contó con un instrumento adicional para la toma de decisiones y la alerta temprana (al menos una hora antes que cayera ceniza en la zona de residencia o trabajo) a la población en caso de una erupción volcánica. Desde el 2015 hasta la fecha, se han realizado las estimaciones diarias de la dispersión de gases y de partículas en el aire entre las 5:00 am y las 6:00 am, y en el momento que se presente una erupción volcánica. Aunado a esto, se han realizado mapas de dispersión para los volcanes Turrialba, Poás y Rincón de la Vieja, y mapas de peligro y simulaciones de erupciones presentadas hace varios años en Costa Rica.

### **Volcán Turrialba**

El volcán Turrialba ha sido el lugar con más mapas de estimaciones de gases y cenizas realizados por parte de la UNA. Es donde se ha tenido más comparaciones con respecto a las mediciones in situ para el ajuste del software. Es por lo anterior, que se localizaron zonas en donde las concentraciones de gases y de ceniza podían afectar a la población (Ortiz-Apuy et al., 2022). Tales lugares fueron: las fincas al norte y al noreste del volcán Irazú, Coronado, Ipis, Guadalupe en San José, y San Isidro, San Rafael, Santo Domingo en Heredia (Fig. 2). Con el modelo de dispersión de gases y de ceniza AERMOD, se logró visualizar los sitios que serían afectados, ocasionando problemas para la población y se colocó la Estación de Medición de Gases y Aerosoles de Origen Volcánico del OVSICORI, en donde se mide: dióxido de azufre y material particulado (PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>) de forma continua desde el 2017.



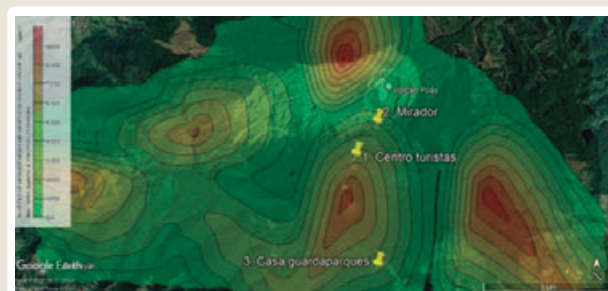
► Fig. 2 – Erupción del volcán Turrialba del 12 de febrero del 2018 a. Modelo de dispersión de cenizas calculado, b. fotografía del cráter del volcán Turrialba desde la cámara del OVSICORI.

Como parte de este proyecto, se han realizado estudios sobre el impacto que generan los gases y la ceniza respirada por las personas y la afluencia que tienen a los centros de salud. Según lo reportado por el sistema de salud de la zona, durante el 2017 se tuvo ingresos por Infecciones Respiratorias Agudas (IRAS) de hasta 7000 casos por mes (junio, 2017). Las IRAS incluye: infecciones agudas de las vías respiratorias superiores, enfermedades crónicas de las vías respiratorias inferiores, influenza (gripe) y neumonía y enfermedades del pulmón debidas a agentes externos (Anchía, 2022).

### Volcán Poás

Para el volcán Poás, en la Figura 3 se muestra un ejemplo de las emisiones de SO<sub>2</sub>, donde se brinda la dispersión calculada de SO<sub>2</sub> con el software AERMOD, para el 11 de junio del 2017, con una emisión de SO<sub>2</sub> de 1017 toneladas por día (<https://SO2.gsfc.nasa.gov/>) y datos meteorológicos entre las 18 horas y las 24 horas. Para este día la afectación se estimó que fue en la totalidad del área del Parque Nacional Volcán Poás y los

alrededores. Este proceso de concentración de gases y de aerosoles se debió a una disminución de la altura de mezcla con una estabilidad atmosférica según Pasquill Gifford tipo E o F (ligeramente estable o estable), esto debido a que el evento ocurrió en horas de la noche. La disminución de la altura de mezcla hace una compresión de la atmósfera, concentrando los gases en un volumen menor de aire, cerca de la superficie y de paso, afectando a la población cercana. Durante este día, tal y como se muestra en la Fig. 3, alrededor del cráter principal, se generan zonas de alta concentración de SO<sub>2</sub> que no necesariamente es en el propio cráter. Esta situación hace referencia a que se generan domos o zonas con masas de aire ricas en gases volcánicos que no se desplazan a lo largo de un área, sino que se almacenan y se acumulan en la atmósfera, debido también a la baja velocidad del viento y a la variación en la dirección del viento.



► Fig. 3 – Erupción del volcán Turrialba del 12 de febrero del 2018 a. Modelo de dispersión de cenizas calculado, b. fotografía del cráter del volcán Turrialba desde la cámara del OVSICORI.

La dirección predominante del viento en la zona es hacia el oeste y hacia el suroeste del cráter, sin embargo, con condiciones específicas de humedad relativa, temperatura, radiación solar, velocidad y dirección del viento, hace que la pluma de emisión se dirija hacia otros lugares no habituales. Estas condiciones son presentadas con baja velocidad del viento y falta de radiación solar, por lo que las masas de aire se concentran en la zona y se acumulan por la inyección de emisiones de SO<sub>2</sub>, y no se dispersan en la atmósfera; lo cual orientó a la Comisión Nacional de Emergencias (CNE) y el Ministerio de Salud a tomar las decisiones para mejorar la calidad de vida de los turistas, de los guardaparques y de la población que podría ser

afectada. Para este día, las personas que estaban en la Casa de Guardaparques presentaron vómito, dolor de cabeza y sangrado nasal. La Cruz Roja realizó la evacuación de la zona para evitar la pérdida de vidas. Según las mediciones realizadas por el LAQAT-UNA para ese día la concentración de SO<sub>2</sub> fue de 49360 µg/m<sup>3</sup> para un periodo de 4 horas.

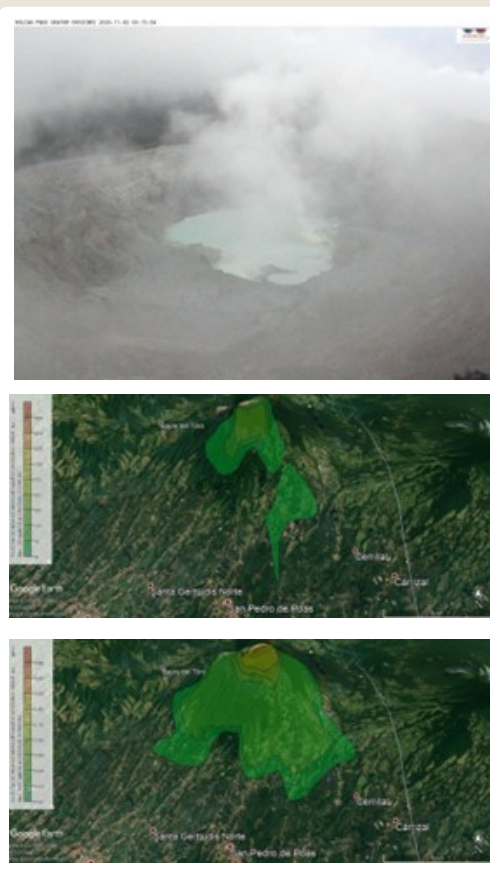
Por lo anterior, se realizaron charlas sobre los peligros volcánicos y el plan de manejo y evacuación del parque. Las presentaciones fueron dirigidas a los guardaparques, los guías turísticos y los pobladores de las zonas cercanas (Fig. 4). Con esta actividad que tomó alrededor de 5 días, con más de 300 participantes, se tuvo una retroalimentación de parte de las personas que están día a día en los alrededores del volcán. Además, se presentaron los mapas de dispersión de gases y ceniza, y a los guardaparques se les entrenó sobre el uso de equipos portátiles de medición de SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, para que fueran utilizados en los lugares de visitación del parque.



► Fig. 4 - Capacitación realizada a representantes de las comunidades cercanas al volcán Poás, agosto, 2018.

Para el 2 de octubre del 2020, se dio un evento de lluvia ácida extrema en el volcán Poás, con una emisión de SO<sub>2</sub> mostrada en la Fig. 5-a y 5-b. Este evento hizo que las prendas de los turistas se mancharan, al estar 20 min exponiéndose al aire libre. Además, se presentó una generación de espuma en las calles, debido a la reacción ácido-base entre la lluvia ácida y el asfalto. El nivel de acidez, según la escala de pH, medido para ese día fue de 0.8, lo cual refleja un nivel bastante ácido para un agua de lluvia, si se compara con el valor medido en otras ocasiones (entre 2.5 a 4.0). Con el modelo

AERMOD se efectuó un mapa de dispersión de SO<sub>2</sub> (Fig. 5-b) con base en las emisiones del gas azufrado y, en la Fig. 5-c, se presenta la precipitación húmeda (lluvia) debido al arrastre del SO<sub>2</sub>. Se observa que la dispersión de la lluvia tuvo una afectación hacia el sur del parque, lo cual concuerda con los problemas y cambios presentados en los materiales y en la vegetación del lugar.



► Fig. 5 - Muestra de la emisión de gases y lluvia ácida en el volcán Poás, a. Fotografía del cráter por parte del OVSICORI, b. Mapa de dispersión de SO<sub>2</sub> en aire con el programa AERMOD, c. Mapa de precipitación húmeda (lluvia) de SO<sub>2</sub> con el programa AERMOD.

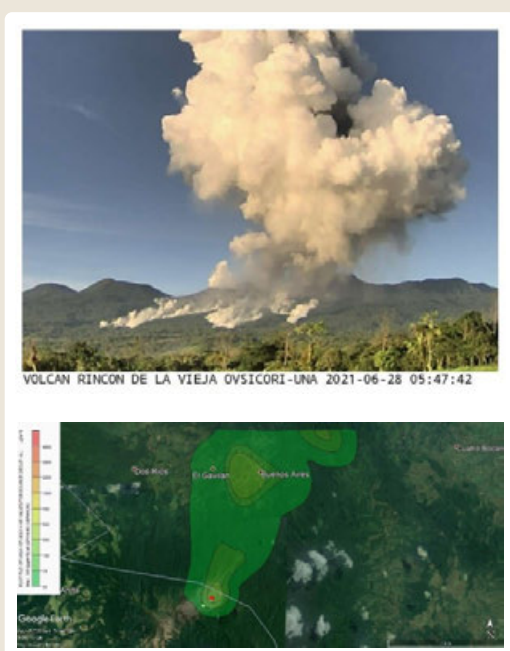
### Volcán Rincón de la Vieja

El volcán Rincón de la Vieja inició la actividad volcánica en el siglo XXI, a partir del 2011. En el 2017 incrementó su actividad con emisiones de gases y cenizas, en donde los pobladores reportaron olor a azufre y caída de material particulado, aunado a los lahares que afectan a la zona norte del volcán, específicamente en Upala, Buenos Aires y El Gavilán. Debido a esto, se inició con los



mapas de dispersión con el programa AERMOD, en la zona.

El 28 de junio del 2021 (Fig. 6) se dio una erupción fuerte, en donde la pluma tuvo una altura superior a los 4 km de altura. Los gases se dispersaron hacia el norte y el noreste, hacia la zona de Upala y alrededores. A pesar de la erupción, las concentraciones de SO<sub>2</sub> fueron bajas y la percepción por parte de la población fue baja también. Si se dio una caída de ceniza en los alrededores del volcán.



► Fig. 6 –Erupción del volcán Rincón de la Vieja presentada el 28 de junio del 2021 a. Fotografía del volcán por parte del OVSICORI b. Mapa de dispersión de SO<sub>2</sub> para la erupción presentada.

Por lo anterior, en los alrededores de los volcanes Rincón de la Vieja, Poás e Irazú, se ha iniciado con el proyecto de

“Vigilantes Volcánicos”, el cual está conformado por personas de la comunidad, representantes de hoteles y de restaurantes, quienes pueden realizar mediciones de ceniza y de gases, con materiales sencillos de utilizar. En la Fig. 7 se muestra una de las capacitaciones que se efectuó durante el 2021, para personeros de la Cruz Roja y de la comunidad de Poás y alrededores. Las charlas toman temas relevantes para la población, como lo son los peligros volcánicos, además, de una sección



► Fig. 7 – Charla sobre la construcción de los cenizómetros con material reciclable, 2021.

práctica para la construcción de cenizómetros con material reciclable. Los cenizómetros son instrumentos construidos para medir la cantidad de ceniza caída en un lugar y a la vez, recuperar la muestra para los análisis posteriores por parte del equipo científico.

A futuro se espera que los vigilantes volcánicos de cada región estén empoderados con la zona y con un historial de mediciones de ceniza y de SO<sub>2</sub>. Además, de mediciones en ríos donde se podría dar una afectación por la actividad volcánica, con mediciones de pH y de concentración de sulfatos y cloruros.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a todos los guardaparques del Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Dirección General de Aviación Civil (DGAC), El Observatorio Ambiental de la Universidad Nacional, Oficina Nacional Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA), por el apoyo y la confianza para realizar las mediciones.



Agradecer al equipo de muestreo y de análisis del Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT-UNA), a saber: Danilo Umaña Castro, Brenda Rodríguez Artavia, Mario Cambroneró Luna, Liseth Sandoval Soto, además de todos los estudiantes tesisistas que colaboraron para la generación de datos oportunos y útiles para la toma de decisiones, en pro de la salud humana y ambiental en los parques volcánicos de Costa Rica.

## REFERENCIAS

- ▶ Anchiá-Pastrán, D. (2022). Análisis de la calidad del aire en San Isidro de Coronado y los riesgos a la salud en relación con el material particulado y el dióxido de azufre emanado por el volcán Turrialba durante el período de 2016-2018. Tesis de Licenciatura en Ingeniería en Gestión Ambiental, Universidad Nacional (en revisión).
- ▶ Baxter, P.; Horwell, C. (2015). Impacts of Eruptions on Human Health: The Encyclopedia of Volcanoes; Sigurdsson, H., Ed.; Academic Press: Amsterdam, 1035-1047. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00060-2>.
- ▶ Comisión Nacional de Emergencias (CNE). (2019). Se solicita a la población el no ingreso a zonas de restricción volcánica. Disponible en: <https://www.cne.go.cr/noticias/2019/04%2020190114%20CNE%20solicita%20a%20la%20poblacion%20el%20no%20ingreso%20a%20zonas%20de%20restriccion%20volcanica.aspx>
- ▶ Diario Extra (2015). Aeropuerto Juan Santamaría estará cerrado hasta mañana, Según Director de Aviación Civil. (<https://www.diarioextra.com/Noticia/detalle/255152/aeropuerto-juan-santamar-a-estar-cerrado-hasta-ma-ana>).
- ▶ Hansell, A.; Horwell, C. J.; Oppenheimer, C. (2006). The Health Hazards of Volcanoes and Geothermal Areas. *Occup Environ Med*, 63, 149-156. <https://doi.org/10.1136/oem.2005.022459>.
- ▶ Ortiz-Apuy, E.; Mora-Barrantes, J.C.; Sibaja-Brenes, J.P. (2022). Estudio preliminar con respecto a los efectos en la salud de trabajadores y su relación con la exposición a emisiones gaseosas volcánicas. Un caso de estudio en dos volcanes activos de Costa Rica. *Uniciencia* (en revisión).
- ▶ Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC). (2019). Parque Nacional Volcán Turrialba. (<http://www.sinac.go.cr/ES/ac/accvc/pnvt/Paginas/default.aspx>).
- ▶ Williams-Jones, G.; Rymer, H. (2015). Hazards of Volcanic Gases: The Encyclopedia of Volcanoes; Sigurdsson, H., Ed.; Academic Press: Amsterdam, 985-992. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00057-2>.

# Cálculo de volumen de flujo de detritos (huaicos) y lahares secundarios. Considerando la infiltración según la teoría del número de curva (CN)

Yhon Soncco<sup>1</sup>, Juan Cuno<sup>1</sup>, Segundo Núñez<sup>1</sup> y Kevin Cueva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> INGEMMET Av. Canadá 1470, San Borja, Lima (autonomodgar38@ingemmet.gob.pe; [yhon.sc@gmail.com](mailto:yhon.sc@gmail.com))

**Palabras clave:** Flujo, detritos, precipitación, infiltración.

## INTRODUCCIÓN

Las precipitaciones pluviales ocurren con cierta periodicidad, incidiendo y saturando superficies con elevada pendiente, suelos poco cohesivos, no consolidados, etc; generando flujos de detritos (huaicos) y/o lahares en ambientes volcánicos. Estos discurren principalmente por quebradas y torrenteras que cruzan las grandes ciudades, y a su vez producen inundaciones en las zonas de bajas pendientes como lo son las llanuras aluviales.

Los flujos de detritos consisten en una mezcla de agua y sedimentos de varios tamaños que van desde las arcillas hasta bloques. Los flujos son generalmente generados por precipitaciones de alta intensidad de lluvia (Takahashi, 1981; Johnson y Rodine, 1984).

Actualmente se aplican simulaciones de huaicos o lahares en software de base física o estadística, cuyo parámetro principal es el volumen del flujo a simular. El cálculo del volumen total del flujo se torna dificultoso, debido a que en ciertas zonas no se cuenta con estudios previos de flujos de detritos o lahares; o si se tienen depósitos, estos han sido modificados por la actividad humana o erosionados por flujos más recientes. Por ello se propone una metodología para poder calcular el volumen, involucrando el cálculo de agua captado por las cuencas y la premisa que los flujos generados contienen un porcentaje de sólidos el cual debe ser elegido en función a la experiencia del investigador.

Dicho procedimiento ha demostrado ser útil en la evaluación de peligros, el cual viene siendo aplicado en eventos recientes de inundación por flujos en el sur del Perú, con resultados coherentes con lo observado en campo, aumentando la precisión en la identificación de zonas afectadas o de posible afectación

## METODOLOGÍA

El volumen de un flujo de detritos está dado por la sumatoria del volumen de agua y el de sedimentos, en base a porcentajes proporcionales. Por lo tanto, el volumen total de un flujo está dado por la ecuación 1.

$$V_{\text{flujo}} = V_{\text{agua}} + V_{\text{sedimentos}} \quad (1)$$

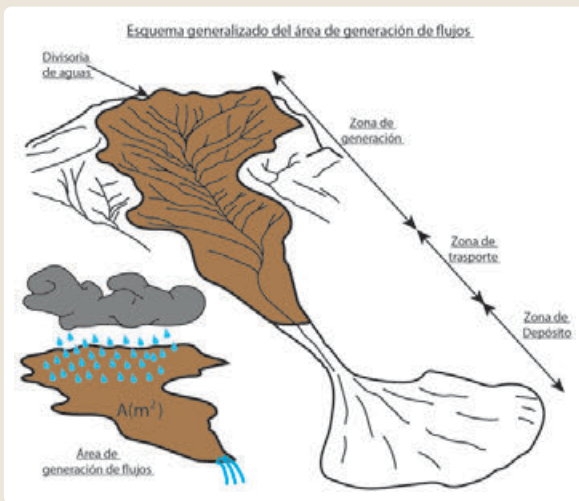
las referencias principales consultadas, sobre las proporciones agua/sedimentos son: Scott et al., 1995; Vallance (2000, 2005); Vascones, 2009; Córdoba et al., 2014, entre otras.

En Perú, actualmente la principal fuente de agua para el cálculo del volumen de los flujos de detritos y lahares secundarios está dada por la precipitación de lluvias intensas y/o excepcionales. Cuyos valores se adquieren del SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú).

Los flujos de detritos, en una quebrada se generan en la parte alta de la cuenca, durante su recorrido pasan por una zona de transporte, para finalmente depositarse en las partes bajas formando abanicos (Bateman et al., 2006). En ocasiones se forman conos.

El volumen de agua involucrado depende directamente de la precipitación neta (pn), expresado en (m) y el área de la zona de generación de flujo, representado como A(m<sup>2</sup>), cuyo límite horizontal se determina por el divortium aquarum, la cual es una línea imaginaria que traza la separación entre dos vertientes o cuencas fluviales limítrofes (Casaverde, 2011); mientras que el límite vertical se obtiene de la zonación planteada por Bateman et al., (2006).

Con base en lo explicado, se delimita el área de la zona de generación de un flujo (Fig. 1).



► Fig. 1 –Esquema generalizado del área de generación de un flujo de detritos y/o lahares secundarios.

El volumen de agua se representa por:

$$V_{\text{agua}} = P_n * A^2 \quad (2)$$

Donde:

- $P_n(m)$ , precipitación neta
- $A(m^2)$ , área de zona de generación de flujos

Con base en el porcentaje de agua y sedimentos de un flujo de detritos o lahar, se calcula el volumen total. Emplearemos la relación de 60 % de agua y 40 % de sedimentos.

$$V_{\text{agua}} = 60\% V_{\text{flujo}} = P_n * A^2 \quad (3)$$

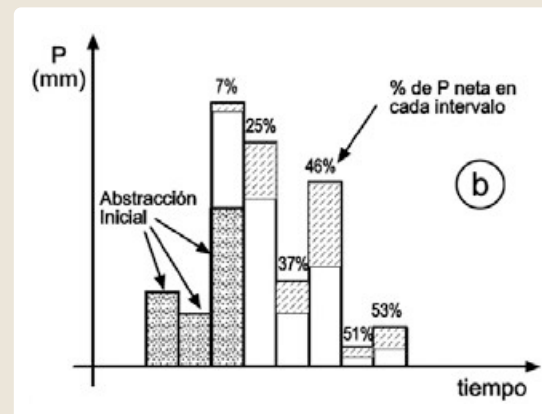
A continuación, se explica de donde se obtiene la precipitación neta ( $P_n$ )

### Precipitación neta mediante el método del S.C.S.

Parte del agua de lluvia tiende a infiltrarse, debido a esto se tiene que separar dicha precipitación infiltrada, denominada (abstracción). El exceso de precipitación o precipitación neta es la precipitación que no se retiene en la superficie y no se infiltra en el suelo.

Para nuestro caso es esta fracción, denominada precipitación neta, la cual genera la escorrentía directa.

El suelo retiene una cierta cantidad de caída de lluvia al principio, y después las abstracciones van disminuyendo progresivamente (Fig. 2).



► Fig. 2 – Después de un umbral inicial (o abstracción inicial), el porcentaje de precipitación neta aumenta progresivamente. Adaptada por, (Sánchez, F.J. 2011).

El cálculo de la precipitación neta fue establecido empíricamente por el Servicio de Conservación de Suelos (S.C.S), USA (Mockus, V., 1964).

La clave es la precipitación inicial que no produce escorrentía directa. Esta magnitud se denomina abstracción inicial o umbral de escorrentía. Para su evaluación se emplean tablas en función del tipo de suelo (arenosos, arcillosos, etc), uso del suelo (bosques, cultivos, etc), pendientes, etc. Las tablas americanas proporcionan valores de CN ("curve number", que es una función de la abstracción inicial), mientras que las tablas españolas indican valores del umbral de escorrentía ( $P_o$ ).

El cálculo del umbral de escorrentía,  $P_o$  (o "abstracción inicial"). Es un dato que aparece tabulado en función del uso de la superficie, de la pendiente y del tipo de suelos (A, B, C o D, de más arenoso y permeable a más arcilloso e impermeable). Las tablas de  $P_o$  pueden modificarse si los días anteriores han sido muy secos o húmedos.

Para el cálculo de  $P_n$ . Se utiliza la expresión siguiente. (Mockus, V., 1964).

$$P_n = \frac{(P - P_o)^2}{P + 4P_o} \quad (4)$$

Donde:

- ▶ P = precipitación total registrada (SENAMHI)
- ▶ Pn = precipitación neta
- ▶ Po = abstracción inicial o umbral de escorrentía.

La precipitación total registrada, se puede tomar de las estaciones meteorológicas del SENAMHI.

La única dificultad para el procedimiento es la obtención del umbral de escorrentía Po o su valor equivalente de CN. Estos valores se consultan en las tablas que aparecen en todos los manuales de hidrología (tabla 1). Mientras que las tablas españolas facilitan el Po, las tablas americanas proporcionan los valores de CN. (Sánchez, F.J. 2011).

Todas estas tablas proporcionan valores de CN o de Po en función del tipo y utilización de la superficie (área pavimentada, cultivos, bosques, etc.). La descripción original se detalla en NRCS (2007).

Si el área considerada comprende varios usos del terreno, hay que calcular la media ponderada, por ejemplo (valores de la tabla 1).

- ▶ 75 % Bosque espeso, suelo tipo B: Po = 47
- ▶ 25 % Barbecho, pendiente menor a 3%, suelo tipo C: Po = 11.

Se tomará la media ponderada de la siguiente manera.

$$Po = 47 \cdot 0.75 + 11 \cdot 0.25 = 38$$

### VOLUMEN DE FLUJO

Ahora que sabemos cómo determinar la precipitación neta Pn (m), continuamos a partir de la ecuación 4.

$$V_{\text{agua}} = 60\% V_{\text{flujo}} = Pn \cdot A^2$$

$$V_{\text{flujo}} = Pn \cdot A^2 \cdot (60\%)^{-1} \quad (5)$$

Si empleamos la relación de 50 % de agua y 50 % de sedimentos planteado por Vallance (2000). Y la introducimos en la ecuación número 5; el resultado sería el siguiente.

$$V_{\text{flujo}} = Pn \cdot A^2 \cdot 2 \quad (6)$$

ESTIMACION INICIAL DEL UMBRAL DE ESCORRENTIA Po (mm) PARA HUMEDAD PREVIA INTERMEDIA						
Uso de la tierra	Pendiente (%)	Características hidrologicas	Grupo de suelo			
			A	B	C	D
Barbecho	≥3	R	15	8	6	4
	<3	R/N	20	14	11	8
Cultivos en hilera	≥3	R	23	13	8	6
	<3	R/N	28	19	14	11
Cereales de invierno	≥3	R	29	17	10	8
	<3	R/N	34	21	14	12
Rotación de cultivos pobres	≥3	R	26	15	9	6
	<3	R/N	30	19	13	10
Rotación de cultivos densos	≥3	R	37	20	12	9
	<3	R/N	47	25	16	13
Praderas	≥3	Pobre	24	14	8	6
		Media	53	23	14	9
		Buena	*	33	18	13
		Muy buena	*	41	22	15
Praderas	<3	Pobre	58	25	12	7
		Media	*	35	17	10
		Buena	*	22	14	
		Muy buena	*	25	16	
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	≥3	Pobre	62	26	15	10
		Media	*	34	19	14
	<3	Buena	*	42	22	15
		Buena	*	34	19	14
Masas forestales (bosques, Monte bajo, etc.)	Muy clara	Muy clara	40	17	8	5
		Clara	60	24	14	10
		Media	*	34	22	16
		Espesa	*	47	31	23
Muy espesa	Muy espesa	*	65	43	33	

Tipo de terreno	Pendiente (%)	Umbral de escorrentia (mm)
Rocas permeables	≥3	3
	<3	5
Rocas impermeables	≥3	2
	<3	4
Firmes granulares sin pavimento		2
Adoquinados		1.5
Pavimentos bituminosos o de hormigón		1

Notas: 1. N: denota cultivo según las curvas de nivel.  
 2. \*: denota que esa parte de cuenca debe considerarse relevante a efectos de cálculo de caudales de avenida.  
 3. Las zonas abarcadas se incluirán entre las de pendiente menor del 3 por 100.

Tabla 1. De valores de Po, España. MOPU,

El volumen de flujos de detritos (huaico) y/o lahares secundarios, depende de la relación agua y sedimentos, tal como lo muestran los resultados de las ecuaciones 5 y 6.

Finalmente, la ecuación para el cálculo del volumen de flujo es el siguiente.

$$V_{\text{flujo}} = Pn \cdot A^2 \cdot (X\%)^{-1}$$

Donde:

- ▶ Pn (m), precipitación neta
- ▶ A (m<sup>2</sup>), área de zona de generación de flujos
- ▶ X, porcentaje de agua asumido por el investigador.



## REFERENCIAS

- ▶ Bateman, A., Medina, V., Hürlimann, M., Velasco, D. (2007). Modelo bidimensional para simulación de flujos detríticos: FLAT Model. Aplicación a una cuenca del Pirineo Catalán: Ingeniería hidráulica en México, XXII (4), 5-20.
- ▶ Johnson, A.M. y Rodine, J.R. Debris flow. En: Brunsden, D. y Prior, D.B. (editores), Slope Stability. New York: John Wiley and Sons, 1984, pp. 257-361.
- ▶ Takahashi, T. Debris flow. Annual reviews of fluid mechanics. Vol. 13, 1981, pp. 57-77.
- ▶ MOPU (1990). Instrucción de Carretera 5.2 - IC drenaje superficial (BOE de 23 de mayo de 1990)
- ▶ Mockus, V., (1964). Estimation of direct runoff from storm rainfall. SCS, National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, 30. pp.
- ▶ NRCS (2007). National Engineering Handbook. Part 630: Hydrology, chapter 10. National Resources Conservation Service.
- ▶ Scott, K. M., J.W. Vallance, and P.T. Pringle, Sedimentology, Behavior, and hazards of debris flow at Mount Rainier Washington, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 1547, 56pp., 1995.
- ▶ Sánchez, F.J. (2011). Cálculo de la precipitación neta.
- ▶ Sánchez, F.J. (2011). Hidrología superficial (III).

# Análisis geológico y numérico del flujo de lodo de la quebrada El Tejado del 31 de enero de 2022, Quito - Ecuador

Liliana Paulina Troncoso<sup>1</sup>, Gustavo Córdoba Guerrero<sup>2</sup>, Jorge Vallejo Morillo<sup>2</sup>, Nicolás Rondal<sup>1</sup>, Luis Pilatasig<sup>1</sup>, Elías Ibadango<sup>1</sup>, Stalin Solano<sup>1</sup>, Andrés Gorki Ruiz<sup>1</sup>, Cristian Zura<sup>1</sup>, Francisco Viteri<sup>1</sup>, Alex Mateus<sup>1</sup>, Rafael Alulema<sup>1</sup>, Andrés Murillo<sup>1</sup>, Rai Torres<sup>1</sup>, Alexis Cantares<sup>1</sup>, Jorge Ordóñez<sup>3</sup> y Gustavo Pinto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Carrera de Geología, FIGEMPA,,Universidad Central del Ecuador- lptroncoso@uce.edu.ec

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Nariño, Colombia- [gcordobaquerrero@gmail.com](mailto:gcordobaquerrero@gmail.com)

<sup>3</sup> Dirección Metropolitana de Gestión de Riesgos del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito

**Palabras clave:** Flujo de lodo, Complejo volcánico Pichincha, Titan2F

## INTRODUCCIÓN

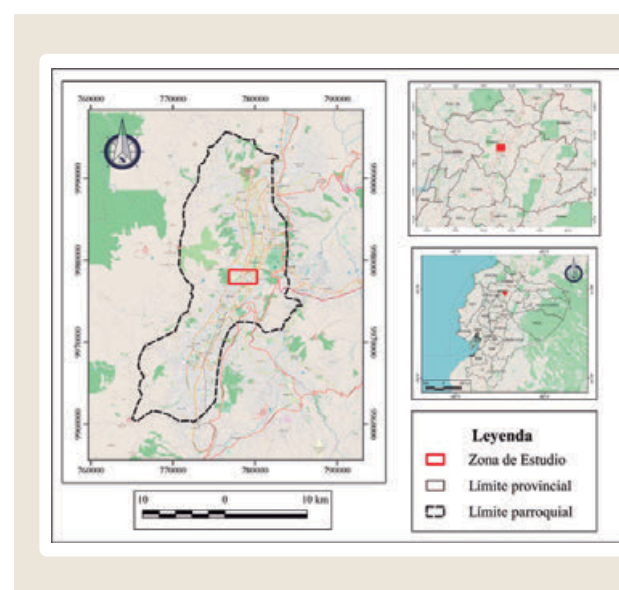
El Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), capital del Ecuador, está localizada en una cuenca a 2800 m.s.n.m. en el denominado Valle Interando. Se desarrolla en un contexto geológico marcado por la presencia de las laderas asociadas al complejo volcánico Pichincha al oeste y una serie de colinas, expresión de un sistema de fallas inversas al este.

En el límite urbano occidental del DMQ existen cerca de 85 quebradas que se alimentan del agua de escorrentía del Complejo volcánico Pichincha, y a lo largo de la historia y desarrollo de la ciudad, han sido reemplazadas o modificadas por rellenos o alcantarillado (Fernández, 1990). La relación de la ciudad con las quebradas ha sido compleja debido a que son utilizadas como sitios para desalojo de basura, acumulación de escombros y la falta de políticas públicas o el incumplimiento de las mismas ha permitido un alto grado de exposición a fenómenos vinculados a la evolución y funcionamiento de dichos drenajes, como son movimientos en masa, hundimientos, flujos de lodo, inundaciones, entre otros.

Desde el siglo XIX se ha documentado en la prensa escrita quiteña la afectación por flujos de lodo en sitios relacionados a drenajes intervenidos por el humano. Siendo uno de los más recordados el flujo de lodo o aluvión de La Gasca (sector residencial relacionado a la zona de estudio), del 25 de febrero de 1975, con un volumen aproximado de 52 000 m<sup>3</sup>, un espesor del depósito de 20 a 50 cm, que movilizó escombros, bloques de tamaño métricos, fragmentos de árboles y dejó como resultado dos muertos, destrucción parcial de varias viviendas, automóviles y la afectación a las vías del sector (Feininger, 1975).

A finales de los años 90 y en la primera década del siglo XXI se realizaron intervenciones ingenieriles (obras estructurales de mitigación) a varios de los drenajes de las laderas del Pichincha, incluida la quebrada El Tejado, mediante la construcción de presas de embalse de cemento armado, presas de tierra, diques, rejillas para la retención de lodo, túneles de desvío de las aguas, canalización parcial de algunas quebradas, entre otras obras (Sierra, 2009).

Desde el año 2019 la ciudad comenzó a enfrentar de nuevo la afectación directa por flujos de lodo generados en los drenajes intervenidos de las laderas del Pichincha, siendo el caso de mayor impacto por el número de víctimas mortales (más de 20) el ocurrido la tarde del 31 de enero de 2022, caso de estudio de la presente propuesta.



► Fig. 1 – Mapa de ubicación de la zona de estudio relacionado con el flujo de lodo de la quebrada El Tejado. Tomado de Rondal (2022).

### Flujo de lodo de la quebrada El Tejado

La zona de deposición e impacto del flujo de lodo de la quebrada El Tejado, se localiza en el sector centro norte de la ciudad de Quito (Fig. 1).

El 31 de enero de 2022 aproximadamente a las 18:00 (hora local) (Dirección Metropolitana de Gestión de Riesgos, 2022) producto de las intensas lluvias en la cuenca, se produjo un flujo de lodo que afectó a los sectores denominados La Comuna y La Gasca. El análisis de los archivos multimedia publicados en redes sociales sugiere que una hora antes del evento se reportó al SISECU-911 el taponamiento del colector en la quebrada El Tejado (Sánchez, 2022).

El flujo de lodo recorrió una distancia de 3.2 km desde el sector de La Comuna (desde el colector) hasta la Avenida 6 de diciembre (UCE, 2022) y considerando su comportamiento se dividió en 4 secciones (Fig. 2) (Rondal, 2022):

1. La zona de impacto directo
2. Eje norte (Calle Núñez de Bonilla)
3. El eje sur (Avenida La Gasca)
4. La zona distal (Avenida 6 de diciembre)

El eje norte y sur no pueden ser considerados una misma sección debido a que sus comportamientos (como flujo y depósito) son totalmente diferentes y son resultado de estructuras antrópicas (escombrera de origen urbano) que erosionó el eje norte en su desarrollo.

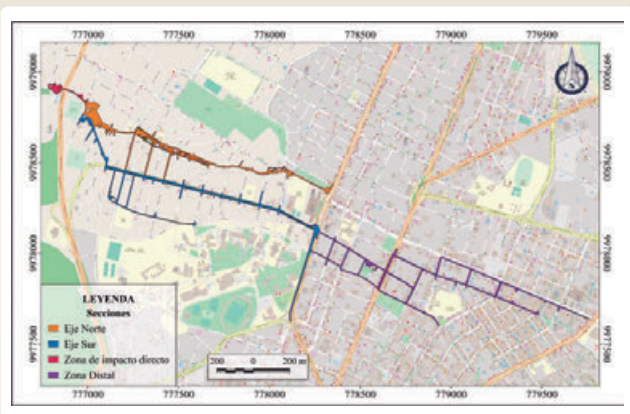
Rondal (2022) señala que la zona de impacto directo (zona roja en la Fig. 3) corresponde al sector de La Comuna y de acuerdo con el video de la cámara de seguridad del conjunto residencial "Colinas de la Gasca" (UTM: 776943.23, 9978750.99) a las 18:09 (tiempo local), el material acumulado en el colector se desbordó y avanzó hasta la cancha de vóley Belisario Quevedo. En esta zona el flujo mostró un comportamiento turbulento, arrastrando automóviles, troncos de hasta 3 metros, cercas de malla y escombros hasta de 1.5 metros de longitud. Este sector se consideró como una zona de erosión debido a las pendientes entre 12° y 5° de inclinación y el espesor del depósito fue de hasta de 1 cm.



► Fig. 3 – Zonas de afectación, Sector La Comuna. Tomado de Rondal, 2022.

El flujo del lodo al llegar a la cancha Belisario Quevedo destruyó la estructura asociada y se llevó a cerca de 50 personas que se encontraban ahí en ese momento (Radio Pichincha, 2022). En esta zona el flujo se dividió en 2 ramales, uno que continuó por la calle N24C al norte y la otra por la calle José Berrutieta hasta llegar a la Avenida La Gasca, al sur (Fig. 3).

En el caso del eje norte, el flujo abarcó desde la cancha de vóley a lo largo de las calles N24C y Núñez de Bonilla hasta la avenida América y las transversales Francisco Lizarazu, Domingo Espinar y Fernández de Recalde de oeste a este (Fig. 4).



► Fig. 2 – Secciones del depósito del aluvión de la quebrada El Tejado. Tomado de Rondal, 2022.





► Fig. 4 – Zonas de afectación eje norte. Tomado de Rondal, 2022.

Esta sección del flujo tuvo un comportamiento distinto al eje sur debido a que, al este de la cancha de vóley, separado por un talud de  $35^\circ$  de inclinación, se encontraba una escombrera con material de origen urbano no consolidado. El talud causó un efecto de cascada que provocó el impacto directo del flujo en el depósito generando un efecto erosivo que permitió enriquecer de material (sedimentos y escombros) al flujo norte (Fig. 5).



► Fig. 5 – Zona de afectación del eje norte. Detalle de la influencia del flujo de lodo sobre la escombrera (zona con escalones tipo terraza en el cuadro rojo) y la presencia del talud al este de la cancha de vóley. Tomado de El Comercio, (2022).

En el eje sur el flujo avanzó a lo largo de la calle José Berrutieta y las avenidas La Gasca y América, se observó el aporte de material hacia la calle Diego Zorrilla al sur por el pasaje Atacames y las calles Francisco Javier Lizarazu y Romualdo Navarro (Fig. 6).

En la avenida La Gasca el flujo tuvo una alta capacidad de carga transportando automóviles, contenedores de basura, escombros y troncos de hasta 2.5 metros, el espesor promedio del depósito a lo largo de la avenida fue de 5 centímetros. En esta sección se observó un comportamiento de olas debido a que la fracción de material más grande (hasta 4 metros) se depositó y la parte acuosa se acumuló y desbordó nuevamente generando este fenómeno (Rondal, 2022). De manera adicional se señala que la huella de la inundación máxima, dejada en las paredes, en la Avenida La Gasca fue de aproximadamente 35 centímetros.



► Fig. 6 – Zonas de afectación en el eje sur. Tomado de Rondal, 2022.

El flujo llegó hasta la intersección con la avenida América a las 18:38 (tiempo local) (Sistema de videovigilancia del ECU911, 2022) y durante 30 minutos el flujo se desarrolló con un promedio de 4 olas por minuto (Rondal, 2022).

En la zona distal el flujo avanzó siguiendo el cauce de la calle Alonso de Mercadillo afectando a las transversales hasta llegar a las avenidas principales como la 10 de agosto, Cristóbal Colón y 6 de diciembre. Durante el levantamiento de información realizado el 2 de febrero de 2022 se determinó que el depósito en esta zona estaba conformado de material primario y removilizado. El espesor promedio fue de 5 cm, a excepción de la avenida 10 de agosto y su intersección con la calle Alonso de Mercadillo en donde se acumuló una gran cantidad de material abarcando un área total de 2937 m<sup>2</sup> con un espesor promedio de 54.9 cm. La

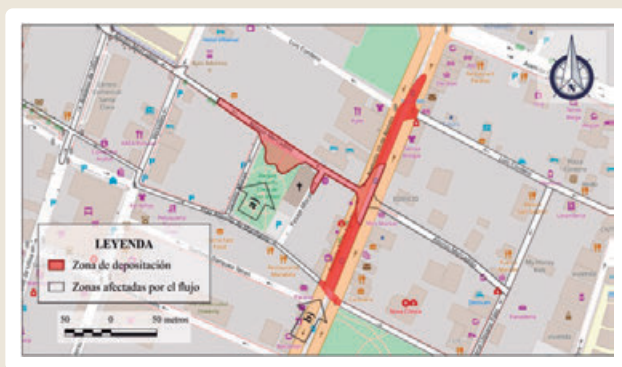


mayor zona de acumulación se encontró en las inmediaciones del parque Santa Clara de Millán (Fig. 7 y Fig. 8). El cambio de comportamiento en el espesor se debe a que en la zona se evidenció la presencia de una depresión topográfica (propia del territorio) y la influencia de las estructuras (desniveles de las calles) que actuaron como barreras al avance del flujo de lodo hacia el este.



► Fig. 7 - Zonas de afectación en el eje distal Tomado de Rondal (2022).

La acumulación del material detallado en la Fig. 8 fue resultado del cambio de pendiente de la calle Mercadillo, desde la avenida América hasta la altura del colegio Spellman con un valor de  $5^\circ$  que gradualmente cambia a  $0^\circ$ . Los parterres de la avenida 10 de agosto también influyeron en la deposición del material en la zona, ya que presentan un desnivel de 26 centímetros, haciendo que el flujo choque con esta estructura y se desvíe hacia los lados por la avenida Ignacio de Veintimilla al sur y la calle Luis Cordero al norte (Fig. 8).



► Fig. 8 - Detalle de la zona de acumulación en el eje distal en el sector del Parque Santa Clara de Millán, Calle Mercadillo y Avenida 10 de Agosto. Tomado de Rondal (2022).

Las mayores afectaciones se registraron en la zona de impacto directo y el saldo total del evento fueron 28 fallecidos, 52 heridos y 1 persona desaparecida; los daños materiales provocados a los inmuebles incluyeron un total de 55 viviendas afectadas, de las cuales 7 colapsaron, 27 fueron declaradas no habitables y 14 con cerramientos colapsados, además afectó a 555 personas pertenecientes a 160 familias (Municipio de Quito, 2022). En toda la zona de afectación se identificó el colapso del sistema de alcantarillado, el cierre total o parcial de vías de transporte, caída de poste de energía eléctrica, lucro cesante de locales comerciales, entre otros.

### Características generales del depósito

De acuerdo a Rondal (2022), el depósito del flujo de lodo cubrió un área de  $122\,790.74\text{ m}^2$ , extendiéndose un máximo de 3.2 km hacia el este y 500 m de norte a sur. El volumen del depósito sólido fue de  $7\,162.77\text{ m}^3$  y del flujo considerando sólidos y líquidos fue de  $46,218.91\text{ m}^3$ , estos valores corresponden a un flujo de tamaño pequeño, con una velocidad muy rápida ( $0.75\text{ m/s}$ ) y con la suficiente cantidad de agua que le permitió comportarse como un líquido de acuerdo con la clasificación de Cruden y Varnes (1996). Los valores de volúmenes señalados no pueden ser considerados como finales debido que existen incertidumbres relacionadas a la pérdida de material en la red de alcantarillado y en los pisos subterráneos de varias edificaciones.

El depósito estaba conformado por 3 tipos de materiales: orgánico (hojas, ramas o pedazos de corteza), antrópico (fragmentos de concreto, ladrillos, carbón y plásticos) y litológico, constituido por clastos de pómez, fragmentos de roca de composición andesítica y dacítica y fragmentos minerales de cuarzo, plagioclasa, anfíboles y magnetita. La fuente de los componentes litológicos corresponde al Complejo Volcánico Pichincha descrito en los trabajos de Barberi et al. (1992) y Robin et al. (2010) como un complejo compuesto por dos edificios: Rucu Pichincha (comprende andesitas ácidas, básicas y dacitas) y el Guagua Pichincha que corresponde al centro activo del complejo (formado principalmente por depósitos de flujos piroclásticos y caída de pómez).

El análisis textural permitió determinar que los fragmentos de andesitas y dacitas son subangulosos a

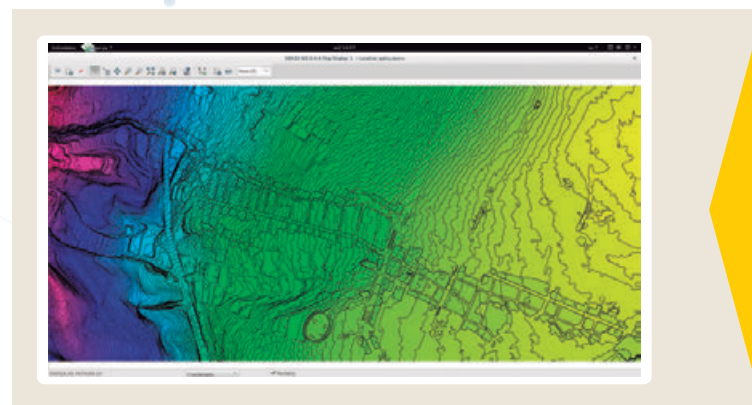
subredondeados, en tanto que los fragmentos minerales de plagioclasa, cuarzo y anfíboles fueron angulosos a subangulosos. Las propiedades mencionadas indican que el material litológico y mineral no sufrió intensos procesos de transporte y su fuente era proximal. En cambio, los fragmentos de pómez (pertenecientes a la misma fuente) estaban redondeados debido a la acción erosiva del tipo de transporte en la quebrada y su baja resistencia a la abrasión (Rondal, 2022).

Con respecto a los componentes antrópicos se resalta que se relaciona con la ocupación e influencia de las actividades humanas desde los 3000 m.s.n.m hasta la zona del colector en la quebrada El Tejado. Otra fuente que alimentó de material al depósito, fue la escombrera con materiales de origen antrópico no consolidado, ubicada al este de la cancha de vóley Belisario Quevedo (Fig. 3 y Fig. 5).

### Modelamiento del evento

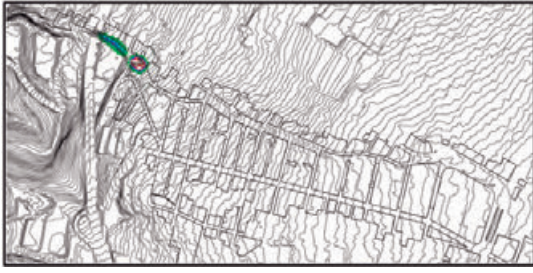
Para realizar este tipo de análisis, se requiere el uso de un programa capaz de modelar las condiciones bifásicas de este tipo de flujos, para lo cual se recurre en este trabajo al programa Titan2F, que simula mezclas de agua-sólido con distintas concentraciones sobre un modelo digital de elevación (DEM) o de terreno (DTM). El DEM se obtuvo gracias al Municipio del Distrito Metropolitano de Quito con resolución de un metro por pixel. Este programa describe diferentes características del flujo simulado como la velocidad, concentración de sólidos y presión dinámica para cada punto de la malla computacional. Titan2F requiere como datos de entrada: las coordenadas de localización de la pila de material inicial, su altura, velocidad y concentración de sólidos (Córdoba et al, 2018).

Para tener en cuenta el intrincado canal que son las calles, se recurrió a extraer la información catastral del sector de La Gasca en el DEM. La información catastral utilizada, se restringe con el levantamiento del área de influencia del flujo, como se observa en la Fig. 9. Una vez extraídos los bloques de edificios, se procede a corregir y alisar el DEM por posibles errores o vacíos en el mismo, o como resultado de la extrusión. La Fig. 9 muestra el resultado de esta operación, donde se observan sobre el DEM, curvas de nivel y los bloques de edificaciones.



► Fig. 9 - Modelo digital de elevación con curvas de nivel del sector afectado por el deslave del 31 de enero de 2022. Se pueden observar que se han extruido sobre el DEM los bloques construidos permitiendo delinear las calles por donde sucedió el flujo.

Una vez realizado el tratamiento del DEM, se procedió a definir las condiciones iniciales que aseguren un modelamiento con condiciones muy similares a las presentadas en el evento real. El volumen de sólidos depositado fue de aproximadamente 7.000 m<sup>3</sup>. Para el estimar el volumen total a modelar, se analizó la huella del flujo y se la comparó con el espesor medio del depósito, lo cual permitió deducir como una primera aproximación, un porcentaje de agua de aproximadamente 37%, resultando en un volumen total que fluyó por las calles, bajo lo asumido, de unos 19.000 m<sup>3</sup>. Tras un análisis fotográfico del volumen de escombros movilizadopor el impacto del deslave se dedujo que su volumen incorporado, incluyendo el agua, debió ser de unos 8.000 m<sup>3</sup>; por tanto se tiene para el deslave de la quebrada El Tejado unos 11.000 m<sup>3</sup>. La pila correspondiente a los escombros se ubicó en el lugar que fue usado como escombrera. Debido al alto costo computacional del modelamiento, se optó por ubicar el material proveniente directamente de la quebrada El Tejado dentro del perímetro urbano. Se realizaron varias pruebas dividiendo este volumen en varias pilas. Un análisis aproximado de la velocidad de llegada de la avalancha al túnel indicó que debió ser de alrededor de 2.5 m/s. Sin embargo, sea cual fuere la configuración y cantidad de las pilas en que se dividió el volumen, se encontró que a la salida del túnel la velocidad resulta aproximadamente entre 4 m/s. Por otra parte, iniciar la pila dentro del túnel, condujo a inestabilidades computacionales que se prefirió evitar. Por lo anterior se optó por ubicar dos pilas contiguas de material justo a la salida del túnel, con 5.000 m<sup>3</sup> y 6.000 m<sup>3</sup>, como se observa en la Fig. 10.

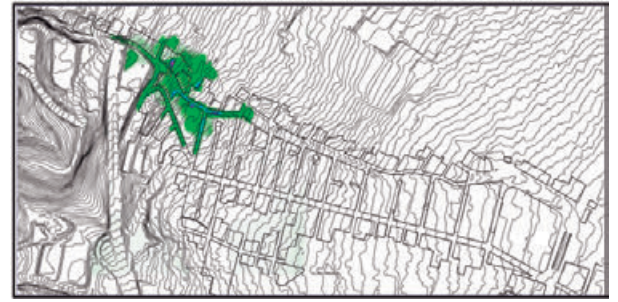


► Fig. 10 - Ubicación de las pilas de material iniciales. En azul, el material proveniente de la quebrada El Tejar, a la salida del túnel. En rojo la pila de material correspondiente a los escombros que fue incorporado por el flujo.

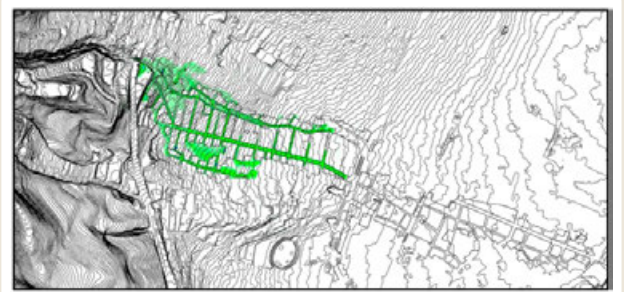
El siguiente parámetro que requiere Titan2F es la concentración inicial de sólidos. Del análisis de los depósitos, como el contenido de humedad, huella del flujo y profundidad del depósito, como se menciona más arriba, se llegó a estimar una concentración volumétrica de sólidos media de un 37%.

Con estas condiciones iniciales de entrada, se procede a realizar la simulación. Es de notar que debido a la complejidad del canal artificial en que se convierten las calles, se tiene un alto costo computacional, del orden de un día y medio de cómputo por cada minuto simulado. La Fig. 11 muestra cómo el flujo se dispersa en dos ramas. La rama norte incorpora los escombros y por inercia avanza acelerada y peligrosamente por las calles N24C y Núñez de Bonilla, con presiones dinámicas capaces de derribar y arrastrar personas, y de afectar muros no confinados que sufran impacto frontal. En la rama sur fluye más lentamente con gran control topográfico donde un pequeño talud casi vertical desvía esta rama hacia la Avenida La Gasca. Adicionalmente la rama norte, por la calle Francisco Lizarazu aporta material al flujo de la rama sur llegando a la Avenida La Gasca antes que el flujo que desciende originalmente por esa rama.

El modelo muestra que pasados 8 minutos se ha definido claramente el flujo entre las calles Núñez de



► Fig. 11 - El deslave a los 60 segundos de simulación. Se nota como el flujo se ha dividido en dos ramas principales. Detalles en el texto.



► Fig. 12 - El flujo después de 8 minutos después de su paso por el túnel. Nótese que, a ese tiempo, la rama sur es la que más material lleva consigo.

Bonilla y la Avenida La Gasca, notándose como la rama norte continúa aportando material a la rama sur, en especial cuando se presentan alteraciones estructurales que fuerzan al flujo a desviarse por los ramales que conectan a estas calles, como se ve en la Figura 12. Lo anterior resulta en que gran parte del flujo fluya por la rama sur. La velocidad media predicha por el programa a este tiempo es de aproximadamente 0.8 m/s.

El modelo muestra también las oleadas que se forman unas en cambios topográficos y otras cuando llega el aporte de material desde las calles ortogonales al flujo. Estas oleadas se pueden corroborar con los videos tomados por la ciudadanía.



## Discusión y conclusiones

El flujo de lodo del 31 de enero de 2022 de la quebrada El Tejado fue detonado por las intensas lluvias registradas en la cuenca, pero agravado por el componente antrópico relacionado con la presencia de las obras de mitigación dentro del drenaje, el diseño de las vías y la existencia de escombreras de origen urbano en la zona de impacto.

De acuerdo al volumen del depósito (menos de 10000 m<sup>3</sup>) y la extensión (3.2 km), este evento es considerado como de pequeña magnitud, que debido a la alta exposición de la población y a las dinámicas del territorio (presencia de una estructura deportiva), generó un desastre local con más de 28 víctimas mortales y 1 persona desaparecida.

En conclusión, el flujo de lodo, aunque puede ser considerado como relativamente pequeño, ocasionó un desastre debido a la ausencia de políticas públicas de planificación y uso del territorio, así como a la falta de herramientas del cumplimiento de las mismas.

El aporte tanto de los estudios geológicos como los resultados de las simulaciones numéricas desarrolladas en este trabajo, ayudaron a entender la dinámica del flujo al entrar a la ciudad de Quito, particularmente el efecto de colocar material en la ruta del deslave, el cual fue incorporado por el flujo, aumentando su volumen, inercia e impacto.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo brindado por las autoridades de la Universidad Central del Ecuador, la Facultad de Ingeniería en Geología, Mina, Petróleos y Ambiental y la Carrera de Geología para el levantamiento de la información en la zona afectada. Los análisis granulométricos fueron realizados gracias a la ayuda de los laboratorios de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la UCE. El análisis del comportamiento del flujo de lodo fue gracias al acceso brindado a los vídeos de las cámaras de vigilancia por parte del Sistema Integrado de Seguridad del ECU-911. El modelamiento se realizó en las instalaciones del Grupo de Investigación Grama de la Universidad de Nariño, Colombia.

## REFERENCIAS

- ▶ Barberi, F., Coltelli, M., Ferrara, G., Innocenti, F., Navarro, J., & Santacroce, R. (1988). Plio-Quaternary volcanism in Ecuador. *Geol. Mag.*, 1-14.
- ▶ Cordoba, G., Sheridan, M.F., Pitman, B., 2018. Titan2F code for lahar hazard assessment: derivation, validation and verification. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 70, 611-631.
- ▶ Cruden, D. (1991). A Simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, 27-29.
- ▶ Dirección Metropolitana de Gestión de Riesgos. (2022). Aluvión sector La Comuna y La Gasca. Informe de Puesto de Mando. Quito.
- ▶ El Comercio. (Febrero de 2022). Especiales El Comercio, Aluvión en La Gasca. El Comercio. Obtenido de <https://especiales.elcomercio.com/2022/02/aluvion-la-gasca-galeria-donaciones-mapa/#galeria>
- ▶ Feiniger, T. (1976). El Flujo de escombros en La Gasca. Un informe científico. Quito: Boletín de la Sección Nacional del Ecuador.
- ▶ Fernández, M. (1990). El medio físico de Quito: sus limitaciones y su incidencia en la adaptación del hombre. Quito.



- ▶ Radio Pichincha . (02 de Febrero de 2022). Obtenido de Situación en La Comuna y La Gasca, tras aluvión: <https://www.facebook.com/PichinchaRadio/videos/696725658415957/>
- ▶ Rondal Viscaíno, N. (2022). Caracterización del depósito del flujo de lodo de la quebrada El Tejado, Quito, 31 de enero del 2022 (Bachelor's thesis, Quito: UCE).
- ▶ Sánchez, K. (2022). [@Lesliekatherine2]. (4 de febrero del 2022). Esto fue lo que realmente pasó, pero jamás me imagine que sera una catástrofe [Video]. Obtenido de: [https://www.tiktok.com/@lesliekatherine2/video/7060274235595427078?is\\_from\\_webapp=1&sender\\_de\\_vice=pc&web\\_id=7110656154522748421](https://www.tiktok.com/@lesliekatherine2/video/7060274235595427078?is_from_webapp=1&sender_de_vice=pc&web_id=7110656154522748421).
- ▶ Robin, C., Samaniego, P., Le Pennec, J. L., Fornari, M., Mothes, P., & Van Der Plicht, J. (2010). New radiometric and petrological constraints on the evolution of the Pichincha volcanic complex (Ecuador). *Bulletin of volcanology*, 72(9), 1109-1129.
- ▶ Sierra, A. (2009). La política de mitigación de los riesgos en las laderas de Quito: ¿qué vulnerabilidad combatir? *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, (38(3)), 737-753.
- ▶ Sistema de Videovigilancia del ECU911. (31 de enero de 2022). La Gasca y Francisco Viteri
- ▶ Universidad Central del Ecuador, Comisión Técnica. (2022). ANÁLISIS PRELIMINAR DEL FLUJO DE LODOS DE LA QUEBRADA EL TEJADO. Quito.

# Análisis probabilístico de la amenaza por lahares del volcán Galeras en la Universidad de Nariño, sede Torobajo, mediante simulación en Titan2F

Jorge Vallejo<sup>1</sup>, Ivan Solarte<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Nariño - [jvallejomorillo@gmail.com](mailto:jvallejomorillo@gmail.com)

<sup>2</sup> Universidad de Nariño

**Palabras clave:** Lahares, Simulación, Titan2F.

## INTRODUCCIÓN

La Universidad de Nariño (UdeNar) sede Torobajo es una de las sedes más concurridas, en donde se encuentra gran cantidad de estudiantes, docentes, y personal administrativo. Debido a su localización (Pasto, sobre la calle 18, en la Cuenca del Cuscungo, a aproximadamente 7,5 Km del volcán Galeras) presenta un gran riesgo para las personas que se encuentran en este establecimiento.

En este trabajo se estudia y evalúa la probabilidad de la amenaza por flujos de lodos provenientes de la cuenca del Cuscungo hacia la UdeNar sede Torobajo con ayuda de Modelos de Elevación Digital (DEM), donde se pueden calcular diferentes parámetros los cuales son requeridos para realizar simulaciones en Titan2F.

Titan2F es un programa el cual analiza flujos bifásicos - flujos de lodo- determinando la evolución espacial y temporal de este fenómeno considerado altamente destructivo, generando un resultado preciso (Guerrero et al., 2019).

Para lograr resultados estadísticamente válidos se hace uso de diferentes métodos de muestreo, tales como Muestreo de Hipercubos Latinos y Cuadratura del Caos Polinómico.

## Zona de estudio

El volcán Galeras está ubicado en el Departamento de Nariño (Colombia), aproximadamente a 9 km al occidente de la capital del departamento, San Juan de Pasto, en las coordenadas 1° 13' 43,8" de latitud norte y 77° 21' 33,0" de longitud oeste, con una altura de 4276 m s.n.m., catalogado como uno de los volcanes más activos de Colombia.

La Universidad de Nariño es una institución universitaria, autónoma de carácter oficial (Universidad de Nariño, n.d.). La sede Torobajo se encuentra localizada en Pasto, sobre la calle 18, en la salida al municipio de Nariño. Según el Plan de Ordenamiento Territorial de Pasto (Alcaldía Municipal de Pasto, 2015) la UdeNar sede Torobajo se encuentra en un área expuesta a flujo de lodos provenientes del Río Pasto, sin embargo no se toma en cuenta la posibilidad de un flujo de lodos provenientes de la Cuenca del Cuscungo, tal como lo estudiado por Franco y Silva (2017).

## Flujos de lodo (Lahares)

"Los lahares, también llamados flujos de lodo o flujos de escombros, son masas de lodo, roca y agua que se parecen mucho al hormigón fluyendo" (Vallance et al., 2001). El origen de estos fenómenos puede ser directa o indirectamente por actividad volcánica, siendo de tipo primario cuando ocurre la erupción y de tipo secundario cuando es posterior a la erupción, además de que permite la interacción del agua con materiales volcánicos y no volcánicos, las fuentes de agua pueden ser de cualquier tipo, desde derretimiento de nieve o hielo, así como de lluvias, corrientes fluviales o reservorios de agua existentes al interior del volcán. Uno de los lugares en donde podemos encontrar este fenómeno es en las laderas y cerca al nacimiento de quebradas, debido a la inclinación de sus laderas donde se presenta un alto grado de erosión (Guerrero et al., 2019).

El agua es el agente desencadenante, debido a que se genera una pérdida en la resistencia en los materiales cohesivos existentes (Franco y Silva, 2017). Este fenómeno se produce cuando el agua moviliza

grandes volúmenes de lodo suelto, roca y escombros volcánicos, los cuales pueden recorrer decenas de kilómetros por los valles a velocidades de decenas de kilómetros por hora (Vallance et al., 2001).

Los lahares destruyen o dañan todo lo que encuentran a su paso debido a que pueden enterrar o impactar generando grandes afectaciones, dejando grandes depósitos de arena y grava fangosa que pueden tener varios metros de espesor. Son especialmente peligrosos porque se desplazan más lejos de un volcán que cualquier otro fenómeno peligroso (Vallance et al., 2001). Es por eso que los lahares constituyen la amenaza más común relacionada con la actividad eruptiva de los volcanes, además que por el alto riesgo que presenta este tipo de flujo, los mapas de amenaza volcánica consideran una amenaza alta por la presencia de este fenómeno (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

## MARCOTEÓRICO Y METODOLOGÍAS

### ► Probabilidad Condicional

La probabilidad condicional es la probabilidad de que ocurra un evento A dado que un evento B haya ocurrido. En general se define como: dado un evento y su espacio muestral, se requiere determinar cómo afecta la probabilidad de A con el hecho de saber que ha ocurrido un evento B. Tal que la  $P(B) > 0$ , la probabilidad del evento A está condicionado a la ocurrencia de B es (Bianco y Martínez, 2004):

$$P(A|B) = (P(A \cap B)) / (P(B))$$

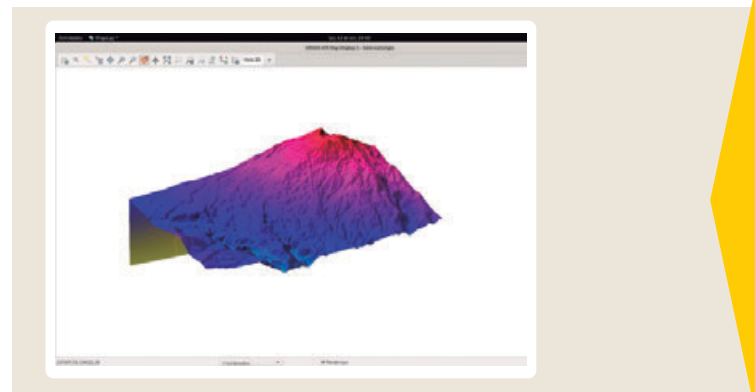
Dado un evento B fijo, tal que  $P(B) > 0$ ,  $P(A|B)$  es una "probabilidad en el sentido que satisface los axiomas de probabilidad y por lo tanto todas las propiedades que se deducen a partir de ellos". (Bianco y Martínez, 2004)

Esta investigación está basada en el "peor escenario posible", es decir a que el flujo de lodos ocurra y llegue hasta el sitio de interés.

### Modelos de Elevación Digital (DEM)

Un DEM es una representación digital de la altitud como variable continua sobre una superficie bidimensional de un área de estudio determinada, obteniendo características del relieve y elementos

existentes en la zona a través de una red regular de valores NE referenciados a un datum común (e.g. Fig.1). Los DEM son usados especialmente para representar el relieve de un terreno (International Association of Assessing Officers, 2015) por lo cual un DEM representa las características topográficas de un paisaje determinado (Roa y Kamp, 2008).



► Fig. 1 - Mapa Ráster en 3D del Volcán Galeras.

### ► Cuadratura Del Caos Polinómico (PCQ)

PCQ tiene su origen en el Caos Polinómico (PC), este método fue estudiado principalmente por Xiu y Karniadakis (2003), en donde la función de distribución de la probabilidad de entrada se aproxima mediante una expansión en términos de un número finito de polinomios ortogonales (Sheridan et al., 2010).

El PC genera problemas para sistemas que se aproximan a modelos no lineales, puesto que su solución implica ecuaciones diferenciales parciales que se deben integrar en el tiempo para poder obtener los coeficientes (Sheridan et al., 2010).

Sheridan et al (2010), desarrollaron la variante de este método, conocido como PCQ Polynomic Chaos Quadrature, donde esencialmente se realiza una sustitución de una cuadratura numérica por una cuadratura gaussiana para obtener una solución más rápida al anterior problema.

### ► Titan2F

Titan2F (Titan 2-Fases) es un programa desarrollado en la Universidad SUNY, Buffalo (Córdoba et al., 2015) y después, mejorado en la Universidad de Nariño (Córdoba et al., 2018). La finalidad de este programa

es realizar simulaciones para flujos bifásicos, en el caso de esta investigación se estudian lahares (Córdoba et al., 2018).

Titan2F usa un marco similar al desarrollado en Pitman y Long Le (2005). Sin embargo, cuenta con un sistema de ecuaciones diferentes para cada fase. Existe un sistema de ecuaciones para la fase granular y otro sistema para la fase fluida. Se realiza un modelamiento para la interacción de las fases mediante un amplio rango de fracciones volumétricas sólidas. Además, con la profundidad media y los supuestos de cierre con los cuales se demuestra que el sistema matemático es hiperbólico en condiciones comunes por lo que se completa el modelo de derivación (Córdoba et al., 2018).

El programa tiene ciertas condiciones que se mantienen a lo largo de las simulaciones, tal como lo planteado por Córdoba et al. (2018): conservación de la masa y conservación del momento de la fase sólida y líquida.

La derivación, validación y verificación de lo contenido en Titan2F, está detallado en el artículo de Córdoba et al. (2018), además hay variedad de investigaciones que validan los resultados obtenidos por este programa como en Sheridan et al. (2010), Córdoba et al. (2015), Guerrero et al. (2019).

Titan2F proporciona resultados de altura del flujo, velocidad, presión y concentración del flujo, así como sus coordenadas Norte y Oeste, y la altura topográfica. Indirectamente se puede calcular el tiempo de llegada del flujo hasta el punto de interés.

#### ► Relación de la presión dinámica y el daño en estructuras

La presión dinámica está asociada con movimiento del flujo, esta se define mediante la ecuación de Bernoulli para fluidos, sin embargo, la presión dinámica para lahares o flujos de lodo cambia debido a la presencia de la fase sólida, la cual modifica las propiedades del flujo. La fase sólida en un lahar aumenta considerablemente la densidad; además de la velocidad que suelen llevar este tipo de flujos, los hace altamente destructivos (Moriano et al., 2017).

La presión dinámica sobre una estructura se comporta como "una presión horizontal uniformemente

distribuida" sobre el área de impacto (Moriano et al., 2017; Zuccaro et al., 2012).

Es así que, presiones dinámicas de 10 kPa, son capaces de arrastrar a una persona, a 35 kPa, en cambio, la mampostería no reforzada y muros empiezan a verse afectados. A 55 kPa, se ven afectadas las estructuras de concreto reforzado y a 80 kPa cualquier estructura es vulnerable a daños graves.

#### ► Metodología aplicada al caso de estudio

En primer lugar se realizan correcciones al DEM de la zona en estudio, eliminando obstáculos o vacíos del archivo ráster que puedan afectar en los resultados de las simulaciones. Con ayuda de herramientas de los programas GIS (Geographic Information System), se calculan los parámetros morfométricos de la cuenca y finalmente se añade la infraestructura de la Universidad de Nariño.

Con los resultados de los parámetros morfométricos obtenidos, se realiza el cálculo de los volúmenes máximos y mínimos de los flujos de lodo. Para el cálculo del volumen de la fase líquida, se acude a tres métodos para cálculo del caudal máximo: método racional, método Creager y el Hidrograma Unitario Triangular. Con estos métodos obtenemos indirectamente el volumen total de agua para la cuenca de estudio.

Debido a que no se puede determinar la concentración de sólidos en un flujo de lodo, se establece un rango de concentración, el cual está sustentado por los mapas de probabilidad de caída de ceniza durante una erupción en la cuenca de estudio. La concentración varía entre lodo fangoso (20% de concentración de sólidos), a flujos hiperconcentrados (45% de concentración de sólidos) (Guerrero et al., 2019).

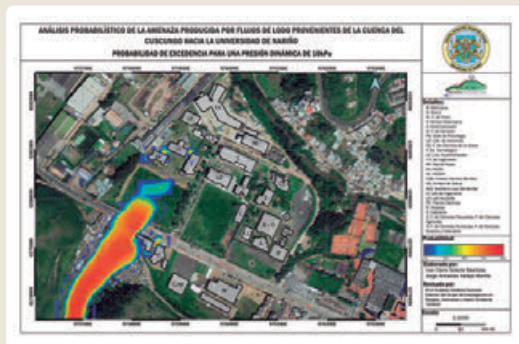
Cuando se han calculado los volúmenes máximos y mínimos, así como el rango de concentración de la fase sólida; se realiza la parte probabilística de la investigación. Para ello, se realiza un muestreo estadísticamente representativo para el rango de las variables calculadas anteriormente. Con ayuda de PCQ se obtienen 32 resultados, los cuales van a ser simulados en Titan2F, obteniendo un error de 10-4 comparado con los resultados que proporciona un MCS (Muestreo de Montecarlo) el cuál necesitaría 106



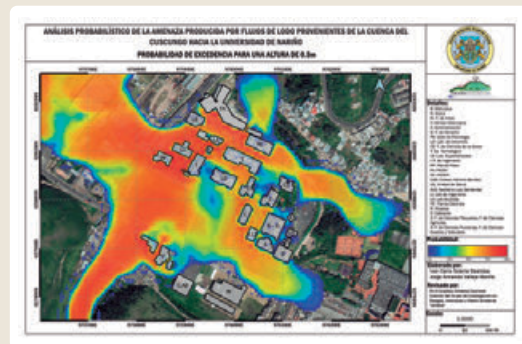
muestras para obtener la misma media que el generador por PCQ.

Después, se modelan los parámetros requeridos en Titan2F, tales como altura de la pila, velocidad inicial, posición de la pila, y otros parámetros generales, los cuales corroboran la información (proceso de calibración del modelo), para obtener simulaciones precisas para la ocurrencia de este fenómeno.

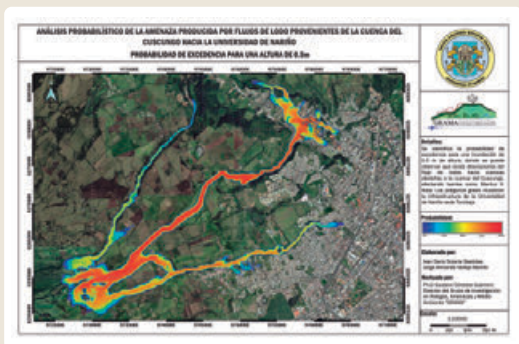
Una vez realizadas las simulaciones, se obtienen las probabilidades de ocurrencia para presiones dinámicas de 10 kPa (Fig. 2), 35 kPa, 55 kPa y 80 kPa, además de probabilidades de excedencias de alturas de 0.5 m (Figs. 3 y 4), 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m y 2.5 m, con el fin de obtener mapas detallados de los daños que podría generar el flujo de lodos "en el peor de los casos" a la Infraestructura de la UdeNar sede Torobajo.



► Fig. 2 - Probabilidad de excedencia para una presión dinámica de 10 kPa.



► Fig. 3 - Probabilidad de excedencia para una altura de 0.5 m



► Fig. 4 - Probabilidad de excedencia para una altura de 0.5 m (Mapa General)

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La probabilidad de excedencia de una inundación para la altura de flujo de 0.50 metros alcanzaría la mayor parte de la universidad (Fig. 3), lo que implica costos elevados en cuestión de limpieza y bloqueo de desagües.

La infraestructura más expuesta a una inundación por flujo de lodos es la Clínica Veterinaria, en donde la probabilidad de inundación para una altura de 2.5 m llega hasta el 70%, y para una altura de 1 m esta probabilidad aumenta llegando al 100%.

La Facultad de Ingeniería, Laboratorios de Ingeniería y la Planta Piloto son otras de las estructuras gravemente afectadas por inundación, donde la probabilidad máxima para una altura de 2.5 m es de aproximadamente 50%.

Ante una probabilidad de impacto de una presión dinámica de 10 kPa, la probabilidad de daño no es despreciable para la Clínica Veterinaria, Laboratorios de Ingeniería y la Planta Piloto; por lo tanto, se debe tener un especial cuidado a los equipos especializados que se encuentran en estas estructuras, ya que con una altura superior a 1 m el flujo podría filtrarse por las ventanas ocasionando la pérdida de estos equipos.

Debido a que no se tiene en cuenta la incorporación de material a través de todo el recorrido del flujo sobre la cuenca; el impacto esperado sobre estructuras y personas podría verse incrementado, invitando a realizar medidas de información sobre el riesgo que presentaría un posible flujo de lodos.

En las visitas de campo, se han observado distintas estructuras, las cuales están presentes a lo largo del recorrido del flujo de lodos simulado, mostrando en las simulaciones que dichas estructuras presentan una probabilidad muy alta de ser afectadas por este fenómeno. Se recomienda realizar una reubicación para los habitantes de esta zona, pues se presentan probabilidades de inundación del 100% para alturas de 2.5 m y un 80% de probabilidades de una presión dinámica superior a 80 kPa, por lo que estas estructuras serían afectadas en su totalidad, puesto que una presión dinámica superior a 80 kPa implica la destrucción total de cualquier tipo de infraestructura.

### AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial a todas las personas que han hecho posible el desarrollo de la Investigación, al grupo GRAMA de la Universidad de Nariño.

### REFERENCIAS

- ▶ Alcaldía Municipal de Pasto. (2015). PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL 2014-2027. Pasto Territorio Consentido. Documento Técnico de Soporte.
- ▶ Bianco, A. M., Martínez, E. J. (2004). Probabilidades y Estadística (Computación).
- ▶ Córdoba, G. A., Sheridan, M. F., Pitman, B. (2018). Titan2F code for lahar hazard assessment: Derivation, validation and verification. Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana, 70(3), 611-631. <https://doi.org/10.18268/BSGM2018v70n3a3>
- ▶ Córdoba, G., Villarosa, G., Sheridan, M. F., Viramonte, J. G., Beigt, D., Salmuni, G. (2015). Secondary lahar hazard assessment for Villa la Angostura, Argentina, using Two-Phase-Titan modelling code during 2011 Cordon Caulle eruption. Natural Hazards and Earth System Sciences, 15(4), 757-766. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-757-2015>.
- ▶ Córdoba, G., Villarosa, G., Guerrero, A. (2018). Probabilistic lahar hazard assessment by modeling: the case of Villa La Angostura, provincia de Neuquén, Argentina. Hazard and Risk Mapping The Arequipa-El Misti Case Study and Other Threatened Cities, 1, 79-82.
- ▶ Franco, O., Silva, J. (2017). Determinación preliminar de la amenaza por flujo de lodo provenientes de la quebrada cuscungo y del río pasto en la universidad de nariño sede torobajo mediante modelamientos numéricos y analíticos.
- ▶ Guerrero, A., Criollo, R., Córdoba, G., Rodríguez, D. (2019). A Modeling Approach for Lahar Hazard Assessment: the Case of Tamasagra Sector in the City of Pasto, Colombia. Ingeniería y Ciencia, 15(30), 53-77. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.15.30.1>
- ▶ International Association of Assessing Officers. (2015). Standard on Digital Cadastral Maps and Parcel Identifiers. International Association of Assessing Officers. <http://www.iaao.org>

- ▶ Moriano Tello, D. E., Paredes Ruiz, P. A., Córdoba Guerrero, G., Delgado Granados, H., Moriano Tello, D. E., Paredes Ruiz, P. A., Córdoba Guerrero, G., Delgado Granados, H. (2017). Evaluación de la vulnerabilidad de edificaciones ante la génesis de lahares: Caso de estudio en la población de Santiago Xalitzintla, en el flanco NE del volcán Popocatepetl (México). *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 69(1), 223-241. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-33222017000100223&lng=es&nrm=iso&lng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222017000100223&lng=es&nrm=iso&lng=es)
- ▶ Pitman, E. B., Long Le. (2005). A two-fluid model for avalanche and debris flows. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 363(1832), 1573-1601. <https://doi.org/10.1098/rsta.2005.1596>
- ▶ Roa Lobo, J., Kamp Ulrich. (2008). Modelos de elevación digital (MED) a partir de sistemas satelitales. Una introducción y análisis comparativo en la cordillera de Mérida-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 49(1), 11-42.
- ▶ Servicio Geológico Colombiano. (2015). ACTUALIZACIÓN DEL MAPA DE AMENAZA VOLCÁNICA DEL VOLCÁN GALERAS-COLOMBIA MEMORIA En cumplimiento a la Sentencia de la Corte Constitucional T-269 de 2015. [https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanGaleras/PDF/Memoria\\_Actualizacion\\_Mapa\\_Amenaza\\_Volcanica\\_Volcan\\_Galeras\\_2015.pdf](https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanGaleras/PDF/Memoria_Actualizacion_Mapa_Amenaza_Volcanica_Volcan_Galeras_2015.pdf)
- ▶ Sheridan, M. F., Patra, A. K., Dalbey, K., Hubbard, B. (2010). Probabilistic digital hazard maps for avalanches and massive pyroclastic flows using TITAN2D. *Special Paper of the Geological Society of America*, 464(14), 1-12. [https://doi.org/10.1130/2010.2464\(14\)](https://doi.org/10.1130/2010.2464(14))
- ▶ Universidad de Nariño. (n.d.). Sobre la Universidad - Universidad de Nariño. Retrieved January 9, 2022, de <https://www.udenar.edu.co/naturaleza/>
- ▶ Vallance, J. W., Schilling, S. P., Devoli, G., Howell, M. M. (2001). Lahar Hazards at Concepción Volcano, Nicaragua. *U.S. Geological Survey*, 01(457), 1-14. <https://webserver2.ineter.gob.ni/geofisica/vol/concepcion/doc/lahar-hazards-concepcion-vallance-2001.pdf>
- ▶ Xiu, D., Karniadakis, G. E. (2003). Modeling uncertainty in flow simulations via generalized polynomial chaos. *Journal of Computational Physics*, 187(1), 137-167. [https://doi.org/10.1016/S0021-9991\(03\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9991(03)00092-5)
- ▶ Zuccaro, G., Santo, A., Cacace, F., de Gregorio, D., di Crescenzo, G. (2012). Building vulnerability assessment under landslides actions: Castellammare di Stabia case study. *Rendiconti Online Società Geologica Italiana*, 21, 470-472.
- ▶ [https://www.researchgate.net/publication/256486032\\_Building\\_vulnerability\\_assessment\\_under\\_landslides\\_actions\\_Castellammare\\_di\\_Stabia\\_case\\_study/citations](https://www.researchgate.net/publication/256486032_Building_vulnerability_assessment_under_landslides_actions_Castellammare_di_Stabia_case_study/citations)

# Avances y Desafíos en la Evaluación de Peligros Volcánicos en la Red Nacional de Vigilancia Volcánica de Chile

Franco Vera<sup>1</sup>, Felipe Flores<sup>1</sup>, Virginia Toloza<sup>1</sup>, Gabriela Jara<sup>1</sup>, Constanza Perales<sup>1</sup>, Laura Bono<sup>1</sup>, Lizette Bertin<sup>2</sup> y Constanza Jorquera<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Unidad de Geología y Peligros de Sistemas Volcánicos, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile - franco.vera@sernageomin.cl

<sup>2</sup> Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Servicio Nacional de Geología y Minería, Temuco, Chile

<sup>3</sup> Oficina Técnica de Coyhaique, Departamento de Geología Aplicada, Servicio Nacional de Geología y Minería, Coyhaique, Chile

**Palabras clave:** Peligros volcánicos, Mapas de Peligro.

El territorio continental de Chile alcanza un largo de 4.270 km, en cuya extensión posee un arco volcánico casi-continuo que alberga cerca de 90 volcanes con actividad registrada en el periodo Holoceno (SERNAGEOMIN, 2019). Asimismo, en los Andes chilenos existe una marcada segmentación longitudinal en el espesor de la corteza, variando desde 70 km en los Andes Centrales hasta espesores menores a 40 km en los Andes Patagónicos (Tassara y Yañez, 2003). Estas características propician la variabilidad en los procesos de generación de magmas y, por ende, favorecen la heterogeneidad en estilos eruptivos, magnitudes y peligros volcánicos.

En los últimos 50 años en Chile, han ocurrido cerca de 20 erupciones de Índice de Explosividad Volcánica (IEV) superior a 2, incluyendo las erupciones plinianas del volcán Hudson del año 1991 y del volcán Chaitén entre los años 2008 y 2009, que tuvieron IEV superiores a 4. Adicional a esto, numerosas explosiones y/o emisiones menores de IEV 0-1 se han registrado en volcanes con actividad frecuente, tales como el Villarrica, Llaima, Láscar, Planchón-Peteroa, Copahue y Nevados de Chillán.

Sumado a la alta frecuencia eruptiva, un 20% de la población de Chile está expuesta al impacto directo de procesos volcánicos, la cual se concentra mayoritariamente en la zona centro-sur del país (desde Santiago hasta Puerto Montt) (Lara et al., 2011). Sin embargo, la afectación por peligros volcánicos aumenta ampliamente al considerar que elementos de importancia político-administrativa (ej. rutas de conectividad regional, nacional e internacional), económica y social se encuentran en zonas de alta susceptibilidad.

Este escenario de actividad volcánica y exposición, representa un desafío para la evaluación de peligros volcánicos en el corto y largo plazo, por lo que en este trabajo se desarrolla una revisión enfocada en la evolución de la cartografía de peligros volcánicos en Chile, sus variaciones metodológicas, la diversificación de productos y los desafíos futuros en el contexto nacional.

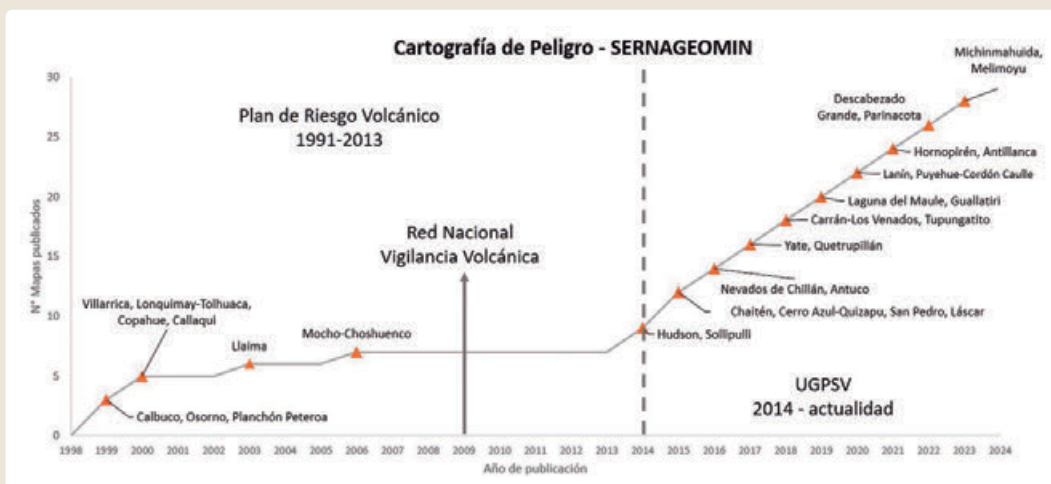
Los primeros esfuerzos por la evaluación de peligros volcánicos guiados por una política de Estado se remontan a los años 90. Esta fue impulsada por el progreso en el conocimiento geológico de los volcanes activos, en conjunto, con el surgimiento de la regulación ambiental (Ley 19.300, 1994) que exigía una línea de base de amenazas naturales. De esta forma, el Estado paulatinamente asumió la responsabilidad de incentivar el estudio sistemático del peligro volcánico, y fue a través de su servicio geológico, el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), que comienzan a materializarse.

Las primeras publicaciones oficiales de cartografía de peligros volcánicos por parte de SERNAGEOMIN comenzaron el año 1999. En este periodo se publicaron los mapas de los volcanes Calbuco, Osorno, Planchón - Peteroa, Villarrica y la zona del Alto Biobío, que incluía a los volcanes Lonquimay - Tolhuaca, Copahue y Callaqui (Fig. 1). Durante la década del 2000, hubo solo dos publicaciones de este tipo, que corresponden al Mapa de Peligros del volcán Llaima (publicado el año 2003) y al del Mocho Choshuenco (publicado el año 2006). En esta primera etapa, que podría extenderse hasta la erupción del volcán Chaitén en el año 2008, la elaboración de cartografía estaba fuertemente basada en el reconocimiento de



campo de los productos volcánicos, similar a la clasificación de mapas basados en geología que propone Calder et al. (2015), sin utilización de metodologías complementarias, tales como modelos numéricos, poco desarrolladas en aquella época. Por otro lado, la priorización de los volcanes en cuáles se evaluaría el peligro, no estaba basada en un criterio cuantitativo, como podría ser un ranking (e.g., Ewert et al., 2005). Sin embargo, el juicio experto de los profesionales a cargo, permitió que los volcanes que posteriormente iban a ser considerados en los primeros lugares del ranking de riesgo específico (e.g. Villarrica, Llaima y Calbuco; SERNAGEOMIN, 2019), fueran parte de este primer grupo de volcanes en Chile en contar con mapas de peligro volcánico.

La erupción del volcán Chaitén entre los años 2008 y 2009, sin duda marca un hito en el desarrollo de la volcanología en Chile. Si bien, la gestión de la emergencia podría considerarse exitosa, en cuanto no hubo fatalidades directas y se evacuaron más de 4.000 personas en forma oportuna, este evento sorprendió a autoridades, organismos de respuesta y, sobre todo, reveló la precariedad del monitoreo y del conocimiento de los peligros volcánicos en Chile. Con este diagnóstico, el Estado decide invertir en un sistema de monitoreo volcánico y acelerar el conocimiento volcanológico nacional, creando la Red Nacional de Vigilancia Volcánica (RNVV), con lo cual se inicia una nueva etapa en la producción de mapas de peligro.



► Fig. 1 – Gráfico acumulado de publicaciones de cartografía de peligro volcánico en SERNAGEOMIN desde el año 1999. En triángulo naranja se representa el año de publicación con el nombre del volcán evaluado.

Los primeros 5 años de la RNVV (2009 - 2013), comienzan con los estudios sistemáticos de cartografía de peligro, junto a una planificación de largo plazo para darle cobertura a los volcanes más riesgosos del país. Esta etapa tuvo un enfoque marcado por una mirada de gran escala, tendiente al desarrollo de un conocimiento base general y de amplia cobertura territorial. Es así como se publican el Mapa de Peligros Volcánicos de Chile junto con la primera versión del ranking de riesgo específico de los volcanes chilenos (Lara et al., 2011) y el Mapa de Peligros Volcánicos de la Zona Norte de Chile (Amigo et al., 2012).

En paralelo, se inicia un proceso de discusión y paulatina asimilación de las diferentes metodologías para la evaluación de peligro, tales como el uso de modelos numéricos y matrices de integración de peligro.

A partir del año 2014, se consolida un grupo dedicado al estudio de los volcanes y la evaluación de su peligro a corto y largo plazo dentro de la RNVV, denominado en la actualidad como Unidad de Geología y Peligros de Sistemas Volcánicos (UGPSV). Esta consolidación de un grupo de trabajo se sostiene bajo la implementación de flujogramas definidos y metodologías basadas en tres principios: Objetividad, Representatividad y

Replicabilidad. La evaluación de peligro a largo plazo se ha llevado a cabo bajo una estructura de gestión de proyecto, la cual ha garantizado una continuidad en la publicación de mapas de peligro volcánico, logrando publicar al menos 2 mapas por año (Fig. 1), y proyectando que al año 2023 se publique la totalidad de los mapas de peligro de los 30 primeros volcanes del ranking de riesgo específico vigente a la fecha (SERNAGEOMIN, 2019).

En la actualidad, la metodología para la elaboración de mapas de peligros utilizada por la UGPSV se basa en una evaluación multicriterio, la que representa el análisis de los diferentes peligros en un mapa integrado, similar a los mapas integrados identificados por Calder et al. (2015), pero con componentes de geología, modelación numérica y aplicación de técnicas probabilísticas.

Los procesos volcánicos evaluados se identifican y caracterizan en terreno, para luego complementarlos con modelos numéricos. Los peligros analizados junto con los modelos implementados a la fecha en la UGPSV son: 1) Coladas de lava: Q-LavHA (Mossoux et al., 2016); 2) Corrientes de densidad piroclásticas: Conos de energía de secciones transversales rectas (Malin y Sheridan, 1982) y parabólicas (Orozco et al., 2013; desarrollado por el geólogo D. Bertin), y Volcflow (Kelfoun y Druitt, 2005); 3) lahares: LaharZ (Schilling, 1998); 4) dispersión de cenizas: Tephra 2 (Bonadonna et al., 2005); 5) piroclastos de proyección balística: Ballistics (Bertin, 2017); y avalanchas volcánicas: Volcflow (Kelfoun y Druitt, 2005).

Este análisis de peligro se estructura en 4 etapas principales: 1) Recopilación de Antecedentes, 2) Levantamiento de Información, 3) Producción, y 4) Edición y Publicación (Fig. 2).

En la etapa de Recopilación de Antecedentes se planifica el proyecto. A partir de la conformación del equipo de trabajo, se discuten los objetivos y alcances que se esperan lograr con la evaluación. Aquí se hace un énfasis en la compilación de antecedentes, incluyendo bibliografía y entrevistas con profesionales, con especial atención en el registro de la actividad histórica e impactos asociados al volcán. Adicionalmente, se establece la escala temporal (que varía entre 8 y 25 ka) y la escala espacial (que varía entre 1:50.000 y 1:75.000). También, se considera la recopilación de insumos tales como imágenes satelitales y modelos de elevación digital, y se establecen los primeros contactos con los grupos de interés locales, con el objetivo de recoger experiencias de la comunidad e información sobre sitios de interés para el proyecto.

La segunda etapa corresponde al Levantamiento de Información. Consiste en el levantamiento de evidencia geológica para comprender el comportamiento eruptivo del sistema volcánico, y se sustenta en levantamientos de tipo: 1) tefroestratigráficos y geocronológicos, 2) geoquímicos y petrológicos, y 3) morfológicos y estructurales. Esta información, en conjunto con el análisis fotogeológico e hidrológico, permite identificar zonas susceptibles a ser afectadas por procesos volcánicos, además de complementar el catastro eruptivo. En esta etapa se describen físicamente los depósitos, realizando caracterización y correlación de ellos, detallando sus alcances, magnitudes, volúmenes y parámetros físicos que sean de utilidad para la posterior aplicación de modelos numéricos.

La etapa de Producción consiste en la consolidación de los resultados obtenidos en el levantamiento de información. En esta parte del estudio, se construye el modelo geológico, el análisis de susceptibilidad, modelamientos numéricos, análisis de recurrencias y magnitudes, cartografía de áreas de peligro y aplicación de matriz de integración. Aquí se evalúa la probabilidad de ocurrencia de cada peligro junto con los factores condicionantes que favorecen su



► Fig. 2 –Estructura general de las etapas desarrolladas en la cartografía de peligros volcánicos de SERNAGEOMIN.

ocurrencia, además de identificar y delimitar las áreas que podrían ser impactadas en futuras erupciones. Esta etapa se acompaña de clínicas de discusión internas, donde se presentan y discuten los resultados con los pares. En paralelo, se describe el procedimiento y los resultados obtenidos, lo que se plasma en una memoria explicativa que acompaña al mapa en la publicación.

Por último, cuando la evaluación del peligro ha finalizado, el producto se somete a un proceso editorial conducente a su publicación. Los encargados de este control de calidad son el Comité Editor, la Unidad de Sistemas de Información Geográfica (USIG) y Unidad de Publicación, todas pertenecientes al SERNAGEOMIN. Este proceso consiste en una serie de revisiones y correcciones, con editores internos y externos a la institución, que permiten mantener un estándar de publicación homogéneo entre los diferentes proyectos.

Otro aspecto a destacar en el avance de la evaluación de peligros de la RNVV, es la diversificación de productos en cuanto a escalas temporales (corto y largo plazo) y a escalas espaciales. En relación a las escalas temporales, se han desarrollado productos de largo plazo, como los explicados en los párrafos anteriores, y productos a corto plazo, enfocados en la respuesta a crisis y alertas volcánicas. Estos últimos se denominan Mapas Dinámicos, y corresponden a una representación geoespacial de las zonas de posible afectación por procesos volcánicos superficiales en curso, según los escenarios eruptivos de actividad reflejada en los parámetros de monitoreo. Asimismo, se han desarrollado evaluaciones geológicas de puntos de encuentro transitorio (PET), enfocados en la planificación de evacuación ante eventuales crisis eruptivas, las que han sido trabajadas con la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI) y con las municipalidades aledañas a volcanes activos.

Por otro lado, la UGPSV se encuentra desarrollando 3 tipos de mapas que se diferencian por escala espacial: Mapas de Peligros Volcánicos Regular, Mapas de Peligros Volcánicos Regional y Mapas de Peligros Volcánicos Microzonificado.

Los Mapas de Peligro Volcánico Regular representan la evaluación de peligro volcánico de un único volcán o

de un grupo de volcanes cercanos. Son confeccionados con objetivo en la planificación de la emergencia y su construcción abarca una ventana temporal que varía entre 8 y 25 ka, dependiendo de las características del sistema volcánico. Comúnmente son publicados en escala 1:50.000 o 1:75.000, y son acompañados de una memoria explicativa que describe la metodología utilizada, escenarios y limitaciones. Estos, además, incluyen elementos complementarios, tales como insertos de menor escala para representación de peligros de mayor cobertura (e.g. caída de piroclastos), línea de tiempo de erupciones en la ventana temporal, y leyendas extendidas. Este tipo de mapas tiene asociada una base de datos en SIG, que contiene la información necesaria de los polígonos, líneas y puntos del mapa de peligros. Cabe destacar que, en campos volcánicos distribuidos, se han realizado evaluaciones probabilísticas de aparición de un nuevo centro de emisión (susceptibilidad espacial volcánica), a través de la implementación de los softwares MathHaz (Bertin et al., 2019) y QVAST (Bartolini et al., 2013).

Los Mapas de Peligro Volcánico Regional consisten en una evaluación de una región volcánica en particular, considerando cada volcán de manera independiente, pero siendo integrados en un mapa síntesis. Las escalas utilizadas son de 1:250.000 y 1:3.000.000, las que incluyen los peligros proximales y distales, respectivamente. Su objetivo principal es la planificación estratégica regional, y suele entregar indicios de las zonas en que es necesario profundizar el análisis de peligro volcánico a escalas de mayor detalle, resultando de utilidad para el diseño de medidas de mitigación y de vigilancia instrumental.

Por otra parte, los Mapas de Peligro Volcánico Microzonificado son representaciones de alto detalle, a escala 1:25.000, enfocados al apoyo de labores de planificación territorial en los volcanes de mayor riesgo según el ranking de SERNAGEOMIN (2019). Estos se encuentran actualmente en desarrollo, y se espera su implementación dentro de los próximos años. Su confección se concentra en áreas prioritarias, tales como flancos de un volcán o valles en específico, y su priorización se realiza en base a las zonas de mayor exposición dentro de los volcanes activos chilenos. Adicionalmente, producto del desafío que conlleva el trabajo a mayor detalle, para este tipo de mapas se han implementado nuevas metodologías.

En colaboración con la Universidad de Concepción, se ha desarrollado una matriz semi-cuantitativa de integración de peligros, la que se basa en la relación entre frecuencia e intensidad de impacto (e.g. MIAVITA, 2012). Por otro lado, se han implementado nuevos modelos numéricos para la simulación de procesos volcánicos, principalmente para lahares, como por ejemplo Ramms (WSL, 2013) y LaharFlow (<https://www.laharflow.bristol.ac.uk/>), y para corrientes de densidad piroclástica, como por ejemplo Volcflow (Kelfoun y Druitt, 2005) y Conos de Energía de sección parabólica (Orozco et al., 2013). Cabe destacar, que algunos de estos modelos también han sido utilizados en los últimos Mapas de Peligro Regular publicados. Además, se han construido árboles probabilísticos de eventos a largo plazo (Newhall y Hoblitt, 2002), los que han aportado a la identificación de escenarios eruptivos probables.

Los más de 20 años de experiencia acumulada por SERNAGEOMIN en la evaluación de peligros volcánicos en Chile, en conjunto con la evolución en el conocimiento volcanológico a nivel mundial, ha conllevado diversos aprendizajes, pero ha dejado al descubierto problemáticas a resolver. Además de las limitaciones inherentes a la pérdida de registro geológico, existen desafíos relativos a cómo obtener mapas objetivos y reproducibles, a cómo evaluar la utilización de los resultados, cómo evaluar el error y la incertidumbre, y en qué enfocar nuestros productos: Comunicación, planificación territorial o emergencias.

Para ello, se ha implementado una estructura de definición de análisis de peligros volcánicos propuesta por Jorquera (2018), la que tiene como objetivo el apoyar la definición y documentación de análisis de peligros, y apoyar la comprensión del propósito del análisis, sus resultados, limitación e implementación. Esta consiste en 10 pasos, que consisten en: 1) Definición del problema, 2) Objetivos y utilización, 3)

Tipo, origen y magnitud de los peligros, 4) Escenarios eruptivos y escala de tiempo, 5) Escala y resolución espacial, 6) Elementos vulnerables, 7) Metodología a utilizar, 8) Formato de los resultados, 9) Limitaciones e incertidumbres y, finalmente, 10) Indicaciones y ejemplos para la utilización de los resultados.

En conclusión, en la actualidad la Red Nacional de Vigilancia Volcánica, a través de su Unidad de Geología y Peligros de Sistemas Volcánicos, ha avanzado en evaluaciones de peligro con mayor diversidad en su representación, en base a los principios de Objetividad, Representatividad y Replicabilidad. Se ha migrado a productos de mayor detalle, como la evaluación geológica de puntos de encuentro transitorio, enfocada en emergencias, y la elaboración de Mapas de Peligro Volcánico Microzonificado, enfocados en planificación territorial, así como también se ha aumentado la cobertura nacional con la elaboración de Mapas de Peligro Volcánico Regular y Mapas de Peligro Volcánico Regional. En este sentido, de los 92 volcanes considerados geológicamente activos en territorio nacional, 26 de ellos cuentan con un Mapa de Peligro Volcánico Regular, 6 se encuentran en etapa editorial o en proceso de publicación y 2 en etapa de levantamiento de información. Asimismo, se ha avanzado en la implementación de bases de datos SIG y visores interactivos en la web:

(ej. <https://rnvv.sernageomin.cl/volcan-villarrica/>), que han sido útiles en el orden de la información levantada y para la representación digital de las evaluaciones. Finalmente, se ha mantenido una continua mejora en la metodología empleada, llevando a cabo discusiones periódicas de revisión metodológica que han permitido la implementación de nuevas matrices de integración, calibración de modelos numéricos al contexto volcánico nacional, nuevas formas de representación de los peligros distales (e.g. caída de piroclastos y lahares secundarios), establecer las incertidumbres y reconocer las limitaciones de los productos.

## AGRADECIMIENTOS

El equipo agradece a los funcionarios que han apoyado a la elaboración de cartografía volcánica y a los profesionales externos que han aportado en el desarrollo de los proyectos.



## REFERENCIAS

- ▶ Amigo, A.; Bertin, D.; Orozco, G. (2012). Peligros Volcánicos de la Zona Norte de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental. 1 mapa escala 1:250.000. Santiago.
- ▶ Bartolini, S., Cappello, A., Martí, J., & Del Negro, C. (2013). QVAST: a new Quantum GIS plugin for estimating volcanic susceptibility. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(11), 3031-3042.
- ▶ Bertin, D. (2017). 3-D ballistic transport of ellipsoidal volcanic projectiles considering horizontal wind field and variable shape-dependent drag coefficients. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth* 122 (2): 1126-1151. doi: 10.1002/2016JB013320
- ▶ Bertin, D., Lindsay, J. M., Becerril, L., Cronin, S. J., & Bertin, L. J. (2019). MatHaz: a Matlab code to assist with probabilistic spatio-temporal volcanic hazard assessment in distributed volcanic fields. *Journal of Applied Volcanology*, 8(1), 1-25.
- ▶ Bonadonna, C.; Connor, C.B.; Houghton, B.F.; Connor, L.J.; Byrne, M.; Laing, A.; Hincks, T.K. (2005). Probabilistic modeling of tephra dispersal: Hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand. *Journal of Geophysical Research* 110(B3): 1-21. doi: 10.1029/2003JB002896.
- ▶ Calder, E., Wagner, K., & Ogburn, S. (2015). Volcanic hazard maps. *Global volcanic hazards and risk*, 335-342.
- ▶ Ewert, J. W., Guffanti, M., & Murray, T. L. (2005). An assessment of volcanic threat and monitoring capabilities in the United States: framework for a National Volcano Early Warning System (No. 2005-1164). US Geological Survey.
- ▶ Kelfoun, K.; Druitt, T.H. (2005). Numerical modeling of the emplacement of Socompa rock avalanche, Chile. *Journal of Geophysical Research* 110(B12). doi: 10.1029/2005JB003758.
- ▶ Lara, L.E.; Orozco, G.; Amigo, A.; Silva, C. (2011). Peligros Volcánicos de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental 13: 34 p., 1 mapa escala 1:2.000.000. Santiago.
- ▶ MIAVITA, 2012. Handbook for Volcanic Risk Management: Prevention, Crisis Management, Resilience. Orleans, Francia.
- ▶ Mossoux, S.; Saey, M.; Bartolini, S.; Poppe, S.; Canters, F.; Kervyn, M. 2016. Q-LAVHA: A flexible GIS plugin to simulate lava flows. *Computers and Geosciences* 97: 98-109. doi: 10.1016/j.cageo.2016.09.003.
- ▶ Newhall, C., & Hoblitt, R. (2002). Constructing event trees for volcanic crises. *Bulletin of Volcanology*, 64(1), 3-20.
- ▶ Orozco, G.; Amigo, A.; Bertin, D.; Lara, L.E. 2013. New empirical approach to estimate proximal volcanic hazard zones. In *Forecasting volcanic activity-Reading and translating the messages of nature for society*. International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI), Scientific Assembly, Poster Session 3W\_4C-P7. Kagoshima.
- ▶ Schilling, S.P. 1998. LAHARZ; GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones. U.S. Geological Survey, Open-File Report 98-638: 80 p. doi: 10.3133/ofr98638.
- ▶ SERNAGEOMIN. 2019. Ranking de riesgo específico para volcanes activos de Chile 2019. [https://www.sernageomin.cl/wpcontent/uploads/2020/07/2Ranking-2019\\_Tabla\\_Final.pdf](https://www.sernageomin.cl/wpcontent/uploads/2020/07/2Ranking-2019_Tabla_Final.pdf). (Última visita 15/07/2022).
- ▶ Tassara, A., & Yáñez, G. (2003). Relación entre el espesor elástico de la litosfera y la segmentación tectónica del margen andino (15-47 S). *Revista geológica de Chile*, 30(2), 159-186.
- ▶ WSL (Institute for Snow and Avalanche Research SLF), 2013. Rapid mass movements simulation (RAMMS): User Manual v1.5 Debris Flow. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Swiss Federal Institutes of Technology.

# Evaluación de peligros de los volcanes Descabezado Grande, Quizapu, Cerro Azul y Centros Eruptivos Aledaños (Chile): resultados preliminares

Franco Vera<sup>1</sup>, Constanza Jorquera<sup>2</sup>, Álvaro Amigo<sup>3</sup> y Lizette Bertin<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Unidad de Geología y Peligros de Sistemas Volcánicos, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile - franco.vera@sernageomin.cl

<sup>2</sup> Oficina Técnica de Coyhaique, Departamento de Geología Aplicada, Servicio Nacional de Geología y Minería, Coyhaique, Chile

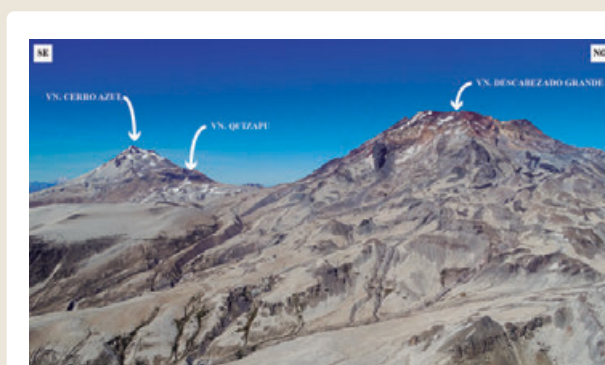
<sup>3</sup> Subdirección de Geología, Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile

<sup>4</sup> Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Servicio Nacional de Geología y Minería, Temuco, Chile

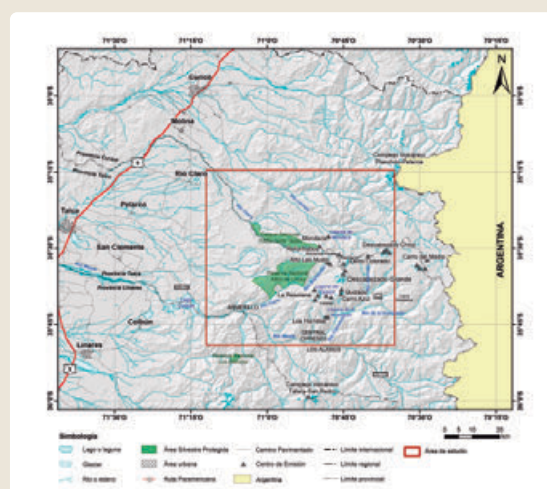
**Palabras clave:** mapa de peligros, modelación numérica, volcanismo postglacial

Los volcanes Descabezado Grande, Quizapu y Cerro Azul (Figura 1) forman parte de una agrupación de al menos 18 centros de emisión que se ubican en la parte septentrional de la Zona Volcánica Sur de los Andes (ZVS), específicamente en el sector cordillerano de la Región del Maule, Chile ( $35^{\circ}14' - 35^{\circ}49' S$ ;  $71^{\circ}11' - 70^{\circ}35' O$ ; Figura 2). Se incluyen en esta área los centros eruptivos menores Las Resolanas, Los Hornitos, Cerro Colorado, Reformados, Mondaca y Alto Las Mulas, todos ellos con actividad conocida o probable durante el periodo postglacial (para efectos de este trabajo <20.000 años AP). Sus características morfológicas varían entre estratovolcanes, conos piroclásticos, maares, domos y coladas de lava; los que se concentran en un área de 15x30 km. Dentro de la actividad eruptiva histórica de la zona de estudio, destacan dos de las erupciones de mayor magnitud en la historia reciente de los Andes, ambas ocurridas en el volcán Quizapu, en los años 1846-48 y 1932, las que en conjunto emitieron alrededor de 10 km<sup>3</sup> de magma a la superficie (Hildreth y Drake, 1992).

Este grupo de volcanes se localiza en la Cordillera Principal de una de las regiones con mayor cantidad de habitantes de Chile (1.153.043 hab.; INE, 2017; Figura 2), por lo que presenta una particular relevancia en términos político-administrativos y económicos, concentrando una importante porción de la actividad silvoagropecuaria y de generación eléctrica del país. En consecuencia, la exposición en la región en conjunto con la alta productividad magmática reciente, hacen que esta zona sea prioritaria dentro de las acciones en el contexto de la reducción del riesgo de desastres volcánicos a nivel nacional.



► Fig. 1 – Fotografía de los volcanes Descabezado Grande, Quizapu y Cerro Azul. Captura aérea desde el noreste.



► Fig. 2 – Mapa de ubicación y accesos a los volcanes Descabezado Grande, Quizapu, Cerro Azul y Centros Eruptivos Aledaños.

Este trabajo tiene como objetivo evaluar los peligros de los volcanes antes mencionados, con la finalidad de zonificar el peligro asociado y generar información cartográfica a escala 1:75.000, para ser utilizada en el contexto de la gestión del riesgo. Adicionalmente, se presentan nuevas evidencias de la actividad explosiva postglacial de los sistemas volcánicos en estudio, mejorando el conocimiento respecto a su recurrencia eruptiva, magnitudes y posibles impactos.

Dicho esto, la estructura del presente resumen comienza con una descripción de los centros eruptivos, la identificación de los procesos evaluados de acuerdo al registro geológico, una descripción general de la actividad histórica, un resumen de la metodología y resultados preliminares de la evaluación de peligros, los alcances y conclusiones.

La geología del área comprende unidades volcánicas y sedimentarias continentales y marinas, de edades mesozoicas a cenozoicas, que conforman el basamento de los productos volcánicos postglaciales, las que han sido descritas por diversos autores. Destaca en la zona un depósito de corriente de densidad piroclástica denominada Ignimbrita Loma Seca, la que consiste en tres flujos zonados y soldados

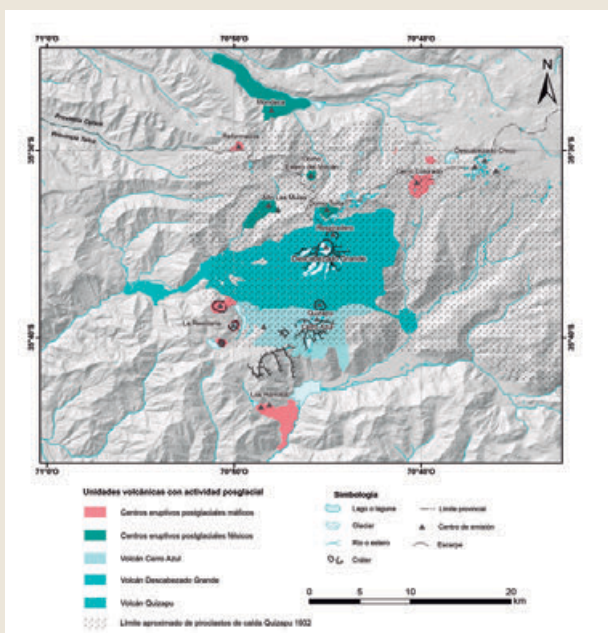
datados en 800 ka, 300 ka y 150 ka, respectivamente; cada uno representa un volumen entre 150 y 300 km<sup>3</sup> de magma (Hildreth et al., 1984). Esta se asocia a la formación de una caldera de 26x14 km, denominada Caldera Calabozos, ubicada hacia el este del área de estudio (Hildreth et al., 1984).

Sobre el basamento se construyeron centros eruptivos de variadas características, los que se clasifican de la siguiente manera (Figura 3):

**Volcán Descabezado Grande:** estratovolcán de cima truncada (3.953 m s.n.m), con un cráter de 1,5 km de diámetro cubierto por hielo, cuyo edificio principal presenta un diámetro basal de 11 km y un volumen de ca. 30 km<sup>3</sup> (Hildreth y Drake, 1992). Su formación habría comenzado durante el Pleistoceno Medio (330±20 ka según Drake, 1976), donde se habría empezado a construir la estructura volcánica actual. Durante el periodo postglacial, su actividad ha consistido en la formación de domos de lava adventicios, flujos de lava de corto alcance, corrientes de densidad piroclásticas, caídas de piroclastos relacionadas a erupciones plinianas y material piroclástico emitido por explosiones freatomagmáticas menores ocurridas en el cráter Respiradero, construido durante su última erupción entre 1932 y 1935. Sus litologías varían entre andesitas basálticas y riolitas (55-71% SiO<sub>2</sub>).

**Volcán Cerro Azul:** estratovolcán parcialmente erosionado (3.747 m s.n.m) cuya construcción habría comenzado en el Pleistoceno Superior (100±90 ka según Wulff, 2003). Su actividad postglacial ha consistido en corrientes de densidad piroclásticas y depósitos de caída escoriáceos, además de actividad adventicia en su flanco suroeste. Su composición varía entre 51 y 65% SiO<sub>2</sub>, con una predominancia de andesitas basálticas.

**Volcán Quizapu:** corresponde a un cráter de explosión ubicado en el flanco norte del volcán Cerro Azul. Este se habría formado con una erupción efusiva en 1846-48 (Domeyko 1849a, 1849b), de 5 km<sup>3</sup> de volumen, y luego habría mantenido una actividad intermitente de baja magnitud hasta 1929. Posteriormente, en 1932, se produjo una erupción explosiva de Índice de Explosividad Volcánica (IEV) 5-6 y de 10 km<sup>3</sup> de volumen (no-DRE), considerada la



► Fig. 3-Esquema geológico de unidades volcánicas postglaciales.



segunda erupción más grande de los Andes en tiempos históricos (Hildreth y Drake, 1992). Estas erupciones han generado corrientes de densidad piroclásticas, caída de piroclastos con dispersión de impacto global, y flujos de lava de ca. 18 km de longitud y de ca. 150 m de espesor. Sus productos varían entre 52 a 70% SiO<sub>2</sub>.

**Centros de emisión postglaciales máficos:** corresponde a una agrupación de 4 conos piroclásticos y 3 maers de dimensiones menores, que comparten características composicionales y eruptivas. Incluye a los conos piroclásticos Los Hornitos (cono este y oeste), Cerro Colorado y Reformados, y los maers La Resolana (Resolana Norte, Resolana Centro y Resolana Sur). Sus composiciones varían entre 49 y 55% SiO<sub>2</sub>.

**Centros eruptivos postglaciales félsicos:** conjunto de 5 centros de emisión que tienen similar composición química y condiciones eruptivas. Se incluyen los centros eruptivos Mondaca, Alto Las Mulas (dos centros de emisión), Domo Estero del Volcán y Domo Torta. Sus composiciones varían entre 67 y 73% de SiO<sub>2</sub>.

Con la descripción anterior queda en evidencia que el volcanismo postglacial (<20.000 años AP) está representado por un amplio rango de morfologías, estilos eruptivos y composiciones químicas. En particular, la actividad eruptiva pre-histórica (entre 20.000 y 530 años AP aproximadamente) fue identificada mediante mapeo geológico y estudios tefroestratigráficos, complementados con edades de radiocarbono, que permitieron catastrar al menos 36 erupciones explosivas y 8 episodios efusivos, a través de la descripción de depósitos piroclásticos de caída, flujos de lava, corrientes de densidad piroclásticas, lahares y piroclastos de proyección balística.

Los depósitos piroclásticos de caída están parcialmente erosionados, debido a las condiciones meteorológicas de la zona, por lo que su distribución espacial es restringida. De igual forma, fue posible identificar dos columnas estratigráficas expuestas en el sector del Cerro Monsalve (17 km al sureste del volcán Descabezado Grande) y en el sector de la Loma Seca (12 km al sureste del Descabezado Grande), que permitieron individualizar eventos eruptivos. Dentro de estas, se destaca la identificación de un potente

depósito de pómez de coloración amarillenta, que tiene un espesor cercano a los 17 m. Sus fragmentos juveniles alcanzan diámetros de hasta 60 cm, los cuales conservan texturas de tubos pumíceos debido al alineamiento de vesículas cilíndricas elongadas, mientras que sus clastos líticos presentan hasta 10 cm de diámetro con bordes angulosos. Este depósito fue datado en 7.650 años AP mediante la técnica AMS en un suelo carbonoso ubicado inmediatamente bajo la capa.

Los depósitos de corrientes de densidad piroclásticas reconocidos en la zona corresponden a flujos piroclásticos, oleadas y flujos de bloques y cenizas, que se asocian a diversos centros eruptivos. Se identificaron 10 depósitos en total, destacando la secuencia de formación del volcán Mondaca (1.250 años AP) consistente en 20 m de intercalaciones entre oleadas y caída, que finalizan hacia el techo con un depósito de flujos de bloques y ceniza. También, se destaca un depósito de oleada ubicado en la base de la columna estratigráfica Cerro Monsalve, ubicada a 17 km de los centros eruptivos, la cual tiene particular importancia en los escenarios por corrientes piroclásticas.

Los flujos de lava prehistóricos identificados, están relacionados a 6 centros de emisión, y destacan las coladas riódacíticas (70-73 SiO<sub>2</sub>) del volcán Mondaca que cubren un área de 12,5 km<sup>2</sup> y espesores cercanos a los 120 m, y las lavas aa basalto-andesíticas (54-55% SiO<sub>2</sub>) de Los Hornitos que cubren un área de 6,3 km<sup>2</sup> con espesores cercanos a 10 m.

Los depósitos de lahares son más escasos, pero se concentran particularmente en los valles Blanquillo, Lontué, Cipreses, y en las quebradas que drenan la cima del volcán Descabezado Grande. Por otro lado, los piroclastos de proyección balística se concentran en las inmediaciones de los volcanes La Resolana, Los Hornitos, Quizapu, Cerro Colorado, Reformados y Mondaca, cuyos alcances máximos varían entre 0,3 km y 6,8 km, y su eyección fue consecuencia de erupciones de estilos estrombolianos, vulcanianos, freatomagmáticos y plinianos.

Por otra parte, el volcanismo histórico se restringe, principalmente, a la actividad cuasi-continua que presentó el volcán Quizapu desde 1846 hasta la



década de 1960. En términos generales, entre sus dos mayores erupciones, este volcán emitió a la superficie un volumen de ca. 10 km<sup>3</sup> de magma, convirtiéndose en uno de los sistemas de mayor producción magmática en Los Andes en tiempos históricos (Domeyko, 1849; Hildreth y Drake, 1992). Se caracteriza por presentar una mezcla binaria de magmas, con un miembro máfico representado por composiciones andesítico-basálticas a andesíticas, y por un miembro félsico, predominantemente dacítico (Ruprecht et al., 2012). Su estilo eruptivo también ha tenido contrastes, ya que ha transitado desde actividad efusiva, durante la erupción de 1846-48, hasta actividad explosiva, en la erupción del año 1932, lo que lo convierte en un ejemplo a nivel mundial de transición efusiva-explosiva en sistemas magmáticos silíceos (Hildreth y Drake, 1992; Ruprecht et al., 2012). Por otro lado, se suma a la actividad del Quizapu, un evento reportado para el volcán Cerro Colorado en el siglo XIX y la formación del cráter Respiradero en el volcán Descabezado Grande entre 1932 y 1935 (Petit-Breuilh, 2004).

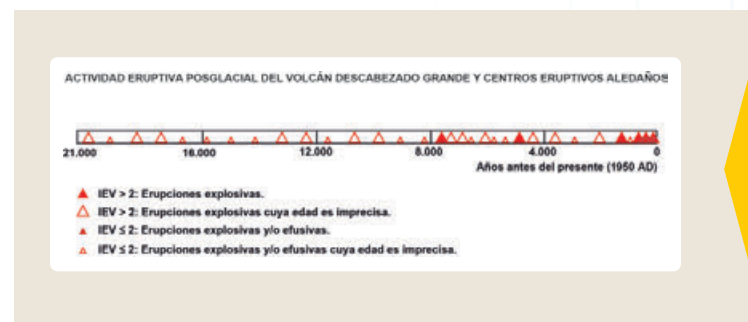
Como consecuencia de su actividad eruptiva, el área está monitoreada de forma permanente por el Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS) de SERNAGEOMIN, desde enero de 2012 y ha permanecido en alerta verde desde ese entonces.

Para la evaluación de peligros volcánicos, los eventos fueron individualizados y ordenados cronológicamente mediante correlación estratigráfica y dataciones radiométricas, lo que fue complementado con información histórica recopilada desde estudios previos. La descripción geológica fue apoyada con análisis químicos de roca total realizados en los laboratorios de SERNAGEOMIN y de la Universidad Estatal de Washington (Washington State University; WSU), Estados Unidos, mediante las técnicas de fluorescencia de rayos X (XRF por sus siglas en inglés) para identificación de elementos mayores y de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS por sus siglas en inglés) para elementos trazas y tierras raras.

A partir de la conjunción de los antecedentes se formularon distintos escenarios eruptivos que permitieron identificar áreas susceptibles de ser afectadas por procesos y productos volcánicos, las que

fueron trazadas de acuerdo con la geomorfología de la zona de estudio y con los resultados de las simulaciones realizadas mediante la utilización de modelos numéricos. Los programas utilizados para la representación espacial de cada peligro evaluado fueron: para coladas de lava, Q-LavHA (Mossoux et al., 2016); para las corrientes de densidad piroclásticas, conos de energía de secciones transversales rectas (Malin y Sheridan, 1982) y parabólicas (Orozco et al., 2013; desarrollado por el geólogo D. Bertin); para lahares, LaharZ (Schilling, 1998); para dispersión de cenizas, Tephra 2 (Bonadonna et al., 2005); y para los piroclastos de proyección balística, Ballistics (Bertin, 2017).

Sobre la base de lo anterior, se construyó un catastro de erupciones, que permitió ordenar los eventos reconocidos (Figura 4) con base en sus características principales: tipos de procesos desencadenados, magnitud y frecuencia de cada proceso. Así, se diferenciaron escenarios para los diferentes procesos reconocidos en cada centro eruptivo, los cuales fueron elaborados con base en el tipo de centro eruptivo, su composición magmática, las características físicas de sus depósitos y la frecuencia con que ha ocurrido cada fenómeno.



► Fig. 4- Distribución temporal de las erupciones conocidas en el registro geológico.

La representación integrada de los peligros volcánicos se expresa en cinco niveles de peligrosidad de acuerdo a una matriz de integración: Muy Alto, Alto, Moderado, Bajo y Muy Bajo, que se incluyen en un mapa de peligro volcánico integrado proximal (escala 1:75.000), uno distal (escala 1:400.000), y cuatro mapas de alcance regional (escala 1:1.000.000), en los que se ilustran las curvas de isoprobabilidad de acumulación de 1 cm de espesor de piroclastos de caída según cada estación del año.

Los resultados preliminares indican que:

El área de muy **alto peligro** incluye zonas potencialmente afectadas por escenarios eruptivos de magnitud similar a las erupciones históricas del volcán Quizapu, con flujos de lava de alcance de hasta 10 km, corrientes piroclásticas de hasta 9 km y balísticos dentro de un radio de 5 km.

El área de **alto peligro** incluye zonas afectadas durante erupciones de magnitudes similares a las ocurridas con mayor frecuencia durante el periodo postglacial, con flujos de lavas provenientes de los centros eruptivos Quizapu (<20 km de alcance), Los Hornitos (<5 km de alcance) y Mondaca (<7 km de alcance); por corrientes de densidad piroclásticas provenientes de los volcanes Descabezado Grande y Cerro Azul (<9 km de alcance), y Quizapu (<14 km de alcance), Las Resolanas y Los Hornitos (<6 km de alcance) y Mondaca (<10 km de alcance); y por lahares primarios originados en los volcanes Descabezado Grande, Cerro Azul y Quizapu (<5 millones m<sup>3</sup>), Mondaca (<3 millones m<sup>3</sup>), Los Hornitos y Las Resolanas (<1 millón m<sup>3</sup>).

El área de **moderado peligro** incluye zonas afectadas por procesos volcánicos de moderada recurrencia en los últimos 5.000 años. La zona está delimitada por flujos de lava provenientes de los volcanes Descabezado Grande y Cerro Azul, y de los centros de emisión Resolana Norte y Alto Las Mulas (<4 km de alcance), Los Hornitos (entre 5 y 8 km de alcance) y Mondaca (entre 7 y 10 km de alcance); por corrientes de densidad piroclásticas generadas en los volcanes Descabezado Grande y Cerro Azul (entre 9 y 13 km de alcance), y en los centros de emisión Los Hornitos y Las Resolanas (entre 6 y 10 km de alcance), Mondaca (entre 10 y 17 km de alcance) y Alto Las Mulas (<7 km de alcance); y por lahares primarios generados en los volcanes Descabezado Grande, Cerro Azul, y Quizapu (<20 millones m<sup>3</sup>), Mondaca y Alto Las Mulas (<5 millones m<sup>3</sup>), Los Hornitos y Las Resolanas (<3 millones m<sup>3</sup>). Adicionalmente, se incorporan lahares secundarios de hasta 200 millones m<sup>3</sup> generados por represamiento de corrientes piroclásticas a cursos de agua.

El área de **bajo peligro** incluye a la zona susceptible de ser afectada por procesos volcánicos de baja

recurrencia en los últimos 10.000 años. El área está delimitada por flujos de lava provenientes de los volcanes Descabezado Grande, Alto Las Mulas (entre 4 y 7 km de alcance), Cerro Azul (entre 5 y 8 km de alcance), Reformados y Cerro Colorado (<5 km de alcance); por corrientes de densidad piroclásticas generadas en los volcanes Descabezado Grande, y Cerro Azul (entre 13 y 18 km de alcance), Reformados y Cerro Colorado (<6 km de alcance); y por lahares primarios generados en los volcanes Descabezado Grande y Cerro Azul (<50 millones m<sup>3</sup>), Reformados y Cerro Colorado (<5 millones m<sup>3</sup>). Adicionalmente, se incorporan lahares secundarios de hasta 10 millones de m<sup>3</sup> generados por removilización de material piroclástico.

El área de muy bajo peligro incluye a la zona susceptible de ser afectada por procesos volcánicos de muy baja recurrencia en los últimos 20.000 años AP. El área está delimitada por corrientes de densidad piroclásticas generadas en los volcanes Descabezado Grande y Cerro Azul de hasta 40 km de alcance; y por lahares primarios generados en los volcanes Descabezado Grande y Cerro Azul (<100 millones m<sup>3</sup>).

En conclusión, de acuerdo al importante potencial de generar erupciones explosivas (IEV 5-6) con dispersión de piroclastos con impacto global y erupciones efusivas de alto volumen (ca. 5 km<sup>3</sup>), una futura erupción de alguno de los centros eruptivos analizados en este estudio podría afectar de manera directa a más de 600 personas (INE, 2017), impactando las actividades agrícolas, ganaderas, mineras, turísticas y energéticas de la Región del Maule, así como también, interrumpiendo la conectividad aérea y la ruta internacional CH-115, que une a Chile con la Provincia de Mendoza en Argentina. Adicionalmente, se estima que los cursos de los valles Barroso, Blanquillo, Claro (sur y norte), Lontué, Cipreses y Maule podrían ser parcialmente alterados debido a la generación de corrientes de densidad piroclásticas, lahares primarios y secundarios, flujos de lava y caída de piroclastos provenientes de los centros de emisión analizados.

Por otro lado, la compilación de actividad volcánica postglacial y el conocimiento actual de la geología, ha permitido individualizar al menos 53 eventos eruptivos en los últimos 20.000 años AP. Esto permite

evidenciar que el área de estudio presenta una alta frecuencia eruptiva y peligrosidad, por lo que la información y conocimiento aportados por este

estudio constituyen un insumo base para la gestión de emergencias y la reducción del riesgo de desastres en las localidades pobladas y sus actividades económicas.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la analista SIG Ximena Rivera, a los funcionarios de Sernageomin por el apoyo en terreno, a R. Gho, G. Orozco, D. Sellés y C. Silva, por su invaluable aporte en etapas iniciales de este proyecto, a D. Bertin, quien facilitó los códigos en Matlab de los programas Ballistics y EnergyCones, y a quienes participaron de las etapas de discusión y encuestas de criterio experto. Se extienden nuestros agradecimientos al Laboratorio de Sernageomin y los editores L. Becerril, A. Castruccio y J. Muñoz quienes contribuyeron a mejorar la presente publicación.

## REFERENCIAS

- ▶ Bertin, D. (2017). 3-D ballistic transport of ellipsoidal volcanic projectiles considering horizontal wind field and variable shape-dependent drag coefficients. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth* 122 (2): 1126-1151. doi: 10.1002/2016JB013320.
- ▶ Bonadonna, C.; Connor, C.B.; Houghton, B.F.; Connor, L.J.; Byrne, M.; Laing, A.; Hincks, T.K. (2005). Probabilistic modeling of tephra dispersal: Hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand. *Journal of Geophysical Research* 110 (B3): 1-21. doi: 10.1029/2003JB002896.
- ▶ Domeyko, I. (1849a). Primera Parte. In *Viajes a las Cordilleras de Talca y de Chillán*. Anales de la Universidad de Chile, Tomo VII: 9-29.
- ▶ Domeyko, I. (1849b). Segunda Parte. In *Viajes a las Cordilleras de Talca y de Chillán*. Anales de la Universidad de Chile, Tomo VII: 47-74.
- ▶ Drake, R.E. 1976. Chronology of cenozoic igneous and tectonic events in the central Chilean Andes-latitudes 35°30' to 36° S. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 1 (3): 265-284. doi: 10.1016/0377-0273(76)90011-1.
- ▶ Hildreth, W.; Drake, R.E. 1992. Volcán Quizapu, Chilean Andes. *Bulletin of Volcanology* 54 (2): 93-125. doi: 10.1007/BF00278002.
- ▶ Hildreth, W.; Grunder, A.L.; Drake, R.E. (1984). The Loma Seca tuff and the Calabozos caldera: A major ash-flow and caldera complex in the southern Andes of central Chile. *Geological Society of America Bulletin* 95 (1): 45-54.
- ▶ INE. (2017). Instituto Nacional de Estadísticas. Censo nacional de población y vivienda. <http://www.censo2017.cl/> (Última visita 1/10/2018).
- ▶ Malin, M.C.; Sheridan, M.F. 1982. Computer-assisted mapping of pyroclastic surges. *Science* 217: 637-640. doi: 10.1126/science.217.4560.637.
- ▶ Mossoux, S.; Saey, M.; Bartolini, S.; Poppe, S.; Canters, F.; Kervyn, M. (2016). Q-LAVHA: A flexible GIS plugin to simulate lava flows. *Computers and Geosciences* 97: 98-109. doi: 10.1016/j.cageo.2016.09.003.

- ▶ Orozco, G.; Amigo, Á.; Bertin, D.; Lara, L.E. (2013). New empirical approach to estimate proximal volcanic hazard zones. In *Forecasting volcanic activity-Reading and translating the messages of nature for society*. International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI), Scientific Assembly, Poster Session 3W\_4C-P7. Kagoshima.
- ▶ Petit-Breuilh, M.E. (2004). *La historia eruptiva de los volcanes hispanoamericanos (Siglos XVI al XX)*. Servicio de Publicaciones del Excmo. Cabildo Insular de Lanzarote-Casa de los volcanes: 431 p. Huelva.
- ▶ Ruprecht, P.; Bergantz, G.W.; Cooper, K.; Hildreth, W. (2012). The crustal magma storage system of volcán Quizapu, Chile, and the effects of magma mixing on magma diversity. *Journal of Petrology* 53 (4): 801-840. doi: 10.1093/petrology/egs002.
- ▶ Schilling, S.P. (1998). LAHARZ; GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones. U.S. Geological Survey, Open-File Report 98-638: 80 p. doi: 10.3133/ofr98638.
- ▶ Wulff, A.H. (2003). Composite chemostratigraphy of lavas from the Casitas Shield, Descabezado Grande-Cerro Azul Volcanic Complex, Chilean Andes. In *American Geophysical Union, Fall Meeteting, Abstract V32H-07*. Kentucky.
- ▶ Valderrama, A., Cardona, C., Gil-Cruz, F. (2016). Subplinian eruption of Calbuco volcano (Chile), April 22nd, an example of VEI-4 explosive eruption with few precursor signals. *Cities on volcanoes Congress, Puerto Varas - Chile, November 2016*.





# SESIÓN 2

## IMPACTO Y GESTIÓN DE ERUPCIONES VOLCÁNICAS RECIENTES



# Experiencias en los ascensos al volcán **Ubinas-Moquegua** entre los años 1992 y 2006

Víctor Aguilar<sup>1</sup>

Instituto de Investigación Geofísica, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa-Perú.

vaguilarpw@gmail.com

**Palabras clave:** Actividad fumarólica, cráter, caldera, cráter de impacto, explosión volcánica, Ubinas.

## RESUMEN

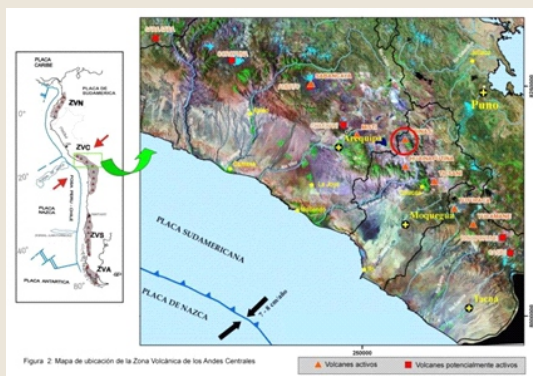
El volcán Ubinas, está localizado en el Sur del Perú, a 65 Km al Este-noreste de la ciudad de Arequipa y a 95 Km al Norte de la ciudad de Moquegua (Fig. 1).

Su actividad fumarólica fue apreciada por el suscrito, por primera vez en el 1992, durante un ascenso, e ingreso al interior del cráter. En los siguientes años, esta actividad fumarólica (vapor y gases), se fue incrementando, con emanaciones gaseosas por diferentes puntos dentro del cráter. Además, se oía un intenso ruido y un fuerte olor a azufre. En el año 1998, se observó un orificio (pequeño cráter) de aproximadamente 8 m de diámetro en el interior del cráter.

El 27 de marzo del 2006, inició la erupción del volcán Ubinas que duró hasta el 2009. Como consecuencia de esta erupción, se logró evacuar una población aproximada de 1150 personas de los poblados de

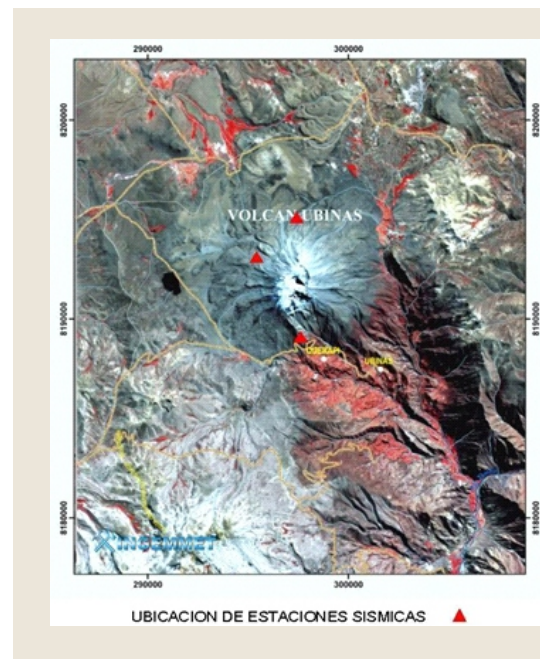
El Instituto Geofísico de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (IG-UNSA), a consecuencia de esta erupción, instaló 3 estaciones sísmicas portátiles analógicas alrededor del volcán (Fig. 2), desde el 18 de abril al 08 de junio del 2006.

Este documento describe en forma resumida, las experiencias vividas por el suscrito en sus diferentes ascensos al volcán Ubinas entre los años 1992 al 2006, año en que inició la primera de sus últimas erupciones.



► Fig. 1 – Ubicación del Volcán Ubinas.

Querapi, Tonohaya, San Miguel, Huatagua, Escacha y Ubinas, a los albergues de Sacuaya y Chacchagen. Esta evacuación estuvo a cargo de las autoridades de Defensa Civil de Moquegua.



► Fig. 2 – Ubicación de estaciones sísmicas instaladas por el Instituto Geofísico de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

## UBICACIÓN

El estratovolcán Ubinas ( $16^{\circ}22' S$ ,  $70^{\circ}54' O$ , 5,670 msnm), forma parte de la Zona Volcánica Central de los Andes de Sudamérica (ZVC). Está ubicado en el distrito de Ubinas, provincia de General Sánchez Cerro, departamento de Moquegua, al sur del Perú (Fig. 1).

En su cima, se observa una caldera muy amplia (Fig. 3), en forma de un estadio de fútbol, de 1.4 km de diámetro. En el interior de la caldera, hacia el sur, se encuentra un cráter interno profundo, por donde surge toda la actividad fumarólica de este volcán (Thouret, 2006).



► Fig. 3- Vista de la caldera del volcán Ubinas.

## GEOLOGÍA Y VULCANISMO

En este volcán predominan lavas andesíticas y dacíticas, pero también contiene depósitos piroclásticos de edad holocénica, es decir caída de pómez plinianas, caídas freato-magmáticas y flujos de escoria y cenizas (Rivera, 1998; 2000, Thouret, 2006).

Desde el año 1550 a la fecha, el Ubinas ha tenido 26 erupciones (Rivera, 1998/2000). La erupción histórica más importante fue la de 1677 DC, la cual consistió principalmente de flujos piroclásticos de escorias y cenizas de composición andesítica.

## APRECIACIONES DURANTE LOS ASCENSOS

En el primer ascenso que realizó el suscrito, al volcán Ubinas, fue en el año 1992. En esta oportunidad, se observó pequeñas bocanadas de gas acompañadas de un intenso y constante ruido. El vapor y gases salían con fuerza a través de 4 puntos desde el interior del cráter interno del volcán. Esta actividad fumarólica, se fue incrementando, año tras año. En 1995, fueron 7 los puntos de emisión fumarólica (Fig. 4), generados probablemente por la presión del interior del volcán. En el interior del cráter era insoportable permanecer sin máscara.

En el año 1998, se observó un orificio (cráter pequeño), de aproximadamente 8 metros de diámetro, en el fondo del cráter interno, donde surgía vapor y gases azulinos.



► Fig. 4- Fondo del cráter interno del volcán Ubinas, 1995.

## LOS INICIOS DE LA ERUPCIÓN

El 27 de marzo del 2006, comenzó la actividad eruptiva del volcán Ubinas. Sucedieron cambios significativos en sus emisiones fumarólicas, acompañada de importantes emisiones de ceniza volcánica que afectó un radio de 6 Km. Esta ceniza afectó los sembríos de papa, alfalfa y otros productos de consumo doméstico (Fig. 5). Así también, afectó a ganado de pastoreo de las partes altas en los sectores Norte, noreste y noroeste. Los pueblos afectados fueron: Querapi, Anascapa, Tonohaya, San Miguel, Huatagua y Ubinas. Además, debido a la importante cantidad de gases azules emitidos por este volcán, se asume que podría tratarse de SO<sub>2</sub>, también habría habido presencia de lluvia ácida.



► Fig. 5 - Productos y sembríos afectados por la ceniza volcánica emitida por la erupción del volcán Ubinas en el año 2006.

En el ascenso del 31 de marzo-2006, se observó varios puntos, en el interior del cráter interno del volcán, de



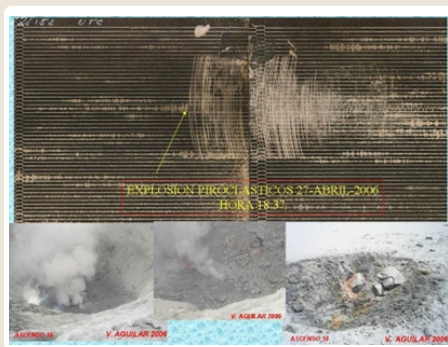
donde surgían: ceniza, vapor y gases. El principal conducto (cráter pequeño), ahora tenía un diámetro aproximadamente de 30 m.

En el ascenso del día 19 de abril-2006, se observó por primera vez material incandescente en el interior del cráter interno (Fig. 6), que ahora tenía un diámetro aproximado de 60 m. Se sentía un fuerte ruido, similar al sonido de un jet, las fumarolas eran acompañadas de ceniza, vapor y gases que salían de diferentes puntos en el fondo del cráter.



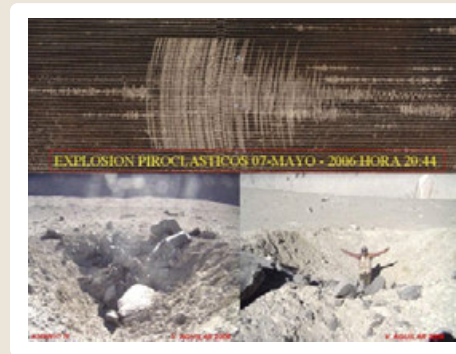
► Fig. 6- Vista del cráter interior del volcán Ubinas.

Durante el ascenso del 28 de abril-2006, después de una gran explosión, se verificó, que en el fondo de cráter ya no existía material incandescente, la explosión lo habría expulsado todo. Se observó también, un inmenso bloque de lava a 200 m al norte del borde del cráter interno, dentro de la caldera, que produjo un cráter de 80 cm de profundidad y un diámetro de 2 m (Fig. 7). Se sentía, además, un ruido ensordecedor, como el sonido de un jet, las emisiones de vapor y gases, salían del cráter interior. El sismograma de esta gran explosión es mostrado en la Fig. 7.



► Fig. 7- Señal sísmica de la explosión y cráter del 27 abril del 2006.

En el ascenso del 08 de mayo, después de una gran explosión producida el día anterior, se observó bloques de lavas a 1.8 km al norte de la caldera. También, se observó cráteres de impacto de 8 m de diámetro y 2.5 m de profundidad, a 100 m de distancia del borde del cráter interno (Fig. 8).

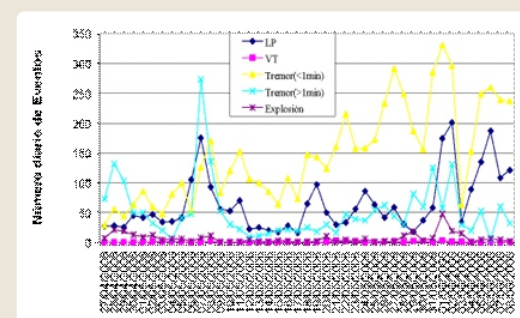


► Fig. 8- Señal sísmica y cráteres de impacto producidas por la caída de un bloque del 07 mayo del 2006.

Los siguientes meses, la actividad eruptiva del Ubinas se incrementó notoriamente. Esta actividad estuvo compuesta por explosiones volcánicas, emisiones de productos balísticos dentro y fuera de la caldera del volcán con importantes cráteres de impacto de



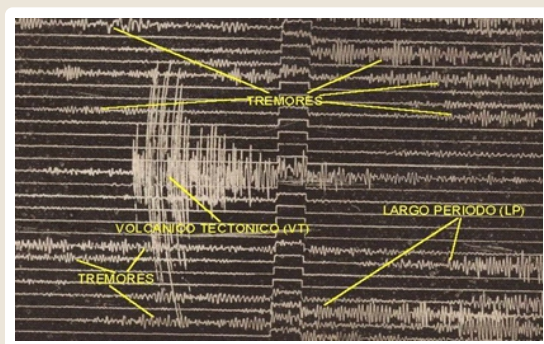
► Fig. 9- Señales sísmicas 01 junio del 2006.



► Fig. 10- Estadística sísmica del volcán Ubinas del 07 de abril al 08 de junio del 2006.



algunos metros de diámetro y hasta 1.7 m de profundidad. Los sismogramas registraban eventos tales como explosiones, sismos volcano-tectónicos (VT), tremores de baja y alta frecuencia, tremores bandeados, sismos de baja frecuencia, entre otros (Fig. 9, 10 y 11).



► Fig. 11- Diferentes señales sísmicas registradas en el volcán Ubinas.

Durante el ascenso del 27 de noviembre-2006, se constató que no existía material incandescente dentro del cráter interno. En su lugar, solo se observaba un conducto principal de 80 m de diámetro aproximadamente. En el fondo de este conducto, se logró apreciar una pequeña cantidad de material incandescente, había una pequeña columna de ceniza, gases y vapor de agua, que salían en forma permanente (Fig. 12).

#### AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento muy especial al Centro de Estudios de Volcanes Activos (CSAV) y a la Universidad de Hawaii en Hilo de los EEUU, quienes me favorecieron con una beca en Hawaii, donde aprendí mucho en temas volcánicos. A mi alma mater, la UNSA, donde aprendí las herramientas geofísicas, a mis familiares, amigos y colegas, por no perder las esperanzas en mí.

#### REFERENCIAS

- Rivera, M. (1998). El volcán Ubinas (Sur del Perú), Geología, historia eruptiva y evaluación de las amenazas volcánicas actuales. Tesis, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, 123 p.
- Rivera, M. (2000). Genere et avolution pétrologique des magmas émis durant l' histoire eruptive récente du volcán Ubinas (Pérou meridional): contribution a evaluation de aléas volcaniques. Diplome D.E.A. volcanologie, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand II, 60 p.
- Thouret, J-C. (2006). Volcán San Pedro de Ubinas, llamado Ubinas, Sur del Perú. Informe preliminar interno. Laboratoire Magmas et Volcans (LMV), Université Blaise Pascal, CNRS, IRD, INGENMET, y Red Raúl Porras Barrenechea, 6 p.

Esta erupción se prolongó hasta el año 2009, bajo el mismo patrón eruptivo. Como consecuencia de esta erupción, las autoridades de Moquegua, evacuaron a 1150 personas de los pueblos de Querapi, Tonohaya, San Miguel, Huatagua, Escacha y Ubinas, a los albergues de Sacuaya y Chacchagen.

Esta y otras erupciones que siguieron los años posteriores serán motivo de otro resumen. Por ahora, solo una reflexión: En aquel momento, nuestro país, no estaba preparado para enfrentar una crisis de este tipo. Cada institución hacía lo que podía como lo veía por conveniente y cuando lo podía hacer. Prueba de ello, los ascensos en tiempos de extremo peligro que se relatan en este documento. Hoy por hoy, todos hemos ganado mucha experiencia, adquirida en los últimos años.



► Fig. 12- Cráter interior del volcán Ubinas. Se constató que no había material incandescente en el interior del cráter.

# Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico - Ckelar Volcanes: Investigación, vigilancia volcánica y contribuciones a la mitigación del riesgo

Felipe Aguilera<sup>1,2,3</sup>, Pablo Salazar<sup>1,2,3</sup>, Daniel Díaz<sup>1,4</sup>, Rodrigo González<sup>1,2</sup>, Verónica Oliveros<sup>1,5</sup>, Mahesh Shrivastava<sup>1,2,3</sup>, Joseline Tapia<sup>1,2</sup>, Manuel Inostroza<sup>1</sup>, Susana Layana<sup>1</sup>, Gabriel Ureta<sup>1,3</sup>, Pablo Salas<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico - Ckelar Volcanes, Antofagasta, Chile

<sup>2</sup> Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile.

<sup>3</sup> Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Santiago, Chile

<sup>4</sup> Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, Santiago, Chile

<sup>5</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción, Concepción, Chile

**Palabras clave:** Redes de vigilancia, vulnerabilidad, procesos volcánicos, formación de investigadores.

## INTRODUCCIÓN

Diversas erupciones a lo largo de toda Latinoamérica en los últimos 5 siglos han tenido efectos mayores sobre la población, flora, fauna, infraestructura y medio ambiente, siendo algunas de ellas altamente significativas, tales como los casos de Huaynaputina (Perú, 1600), Santa María (Guatemala, 1902), Quizapu (Chile, 1932), Parícutin (México, 1943-1952), El Chichón (México, 1982), Nevado del Ruiz (Colombia, 1985), Lonquimay (Chile, 1988-1989), Hudson (Chile, 1991), Chaitén (Chile, 2008), Fuego (Guatemala, 2018). En algunos de estos casos, dichas erupciones condujeron a los países involucrados a crear y/o reforzar redes de vigilancia volcánica, a través de observatorios volcanológicos. Actualmente, en Latinoamérica existen 17 observatorios volcánicos distribuidos en 10 países distintos, los cuales son conducidos por instituciones gubernamentales, universidades, o por colaboración entre ellas (Forte et al., 2021).

A nivel de grupos, núcleos o institutos dedicados principalmente a la investigación en volcanología, sin necesariamente tener responsabilidad oficial de monitoreo o respuesta ante crisis volcánicas, en el caso Latinoamericano, la presencia de estos es mucho más limitada. Algunos ejemplos se encuentran en El Salvador (Instituto de Vulcanología - Universidad de El Salvador, IVUES), Colombia (Grupo de investigación en Estratigrafía y Vulcanología - GIEV - CUMANDAY, Universidad de Caldas), Argentina (Instituto de Bio y Geociencias del NOA - IBIGEO, Universidad Nacional

de Salta; Grupo de Estudio y Seguimiento de Volcanes Activos - GESVA, Universidad de Buenos Aires), entre otros. En el caso de Chile, desde el año 2016, el Grupo de Investigación en Volcanismo de la Universidad Católica del Norte (GIV - UCN) comenzó con un trabajo de investigación multidisciplinario principalmente enfocado en el norte de Chile, con el objetivo de mejorar el conocimiento del volcanismo no sólo en las zonas volcánicas activas de Chile, sino que también del resto de Sudamérica (Aguilera, 2017). En esta contribución se presentan los distintos ámbitos de acción del recientemente creado Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico - Ckelar Volcanes ([www.ckelar.org](http://www.ckelar.org)), y cómo este aporta actualmente al entendimiento de los distintos procesos volcánicos, vigilancia volcánica, y a la mitigación del riesgo.

## VISIÓN, OBJETIVOS, ESTRUCTURA E INVESTIGACIÓN EN CKELAR VOLCANES

La visión del Instituto Milenio de Investigación de Riesgo Volcánico - Ckelar Volcanes es la formación de un equipo científico avanzado de excelencia reconocido mundialmente para brindar y comunicar conocimiento sobre procesos volcánicos y mitigación de riesgo volcánico. El objetivo general es determinar los factores que controlan la tasa de recurrencia y el tamaño de la erupción a lo largo de la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVCA). Los objetivos específicos son 1) establecer los procesos fisicoquímicos que controlan la actividad volcánica; 2) precisar el papel de los procesos tectónicos regionales en la actividad magmática y volcánica; 3) restringir los efectos del

volcanismo en el medio ambiente; 4) evaluar los peligros y riesgos volcánicos.

Las actividades de investigación se centran en tres grandes áreas temáticas y diversas líneas de investigación específicas:

## A. Ciencias de la Tierra

**1. Procesos físicos y químicos en sistemas volcánicos:** Esta línea está enfocada en la comprensión de los procesos físicos y químicos, y su relación con el medio ambiente (endógenos y exógenos). Las disciplinas de trabajo incluyen la geofísica, sismología, petrología, volcanología física, geoquímica de fluidos, y la relación entre los productos eruptivos y el medio ambiente. Las principales metodologías utilizadas incluyen: 1) Geofísica, uso de técnicas magneto-telúricas (MT) y electromagnéticas transitorias (TEM) para determinar la ubicación, profundidad y volumen de los reservorios de magma, y la distribución de los sistemas hidrotermales en los volcanes; y el seguimiento de los procesos eruptivos mediante la medición de perturbaciones ionosféricas mediante el uso de perturbaciones ionosféricas co-volcánicas (CVID); 2) Sismicidad, detección de señales sísmicas para conocer procesos internos como movimiento de fluidos, fracturamiento de rocas, entre otros; 3) geoquímica de productos volcánicos, para determinar sus composiciones químicas e isotópicas y edades, y así establecer las firmas asociadas con la formación, ascenso, almacenamiento y erupción del magma, y el tiempo en que ocurrieron; 4) mapeo de productos volcánicos superficiales, para establecer la evolución de sistemas volcánicos individuales; 5) muestreo directo de gases de fumarolas, para determinar la composición química de los fluidos volcánicos emitidos a la superficie, tanto en fase gaseosa como líquida, y con ello establecer los estados de actividad de los sistemas volcánicos; 6) medición de SO<sub>2</sub> de plumas volcánicas a la atmósfera, siendo posible cuantificar las tasas de emisión de SO<sub>2</sub> y así relacionar las tasas de descarga de magma a la superficie; 7) movilidad de los elementos y compuestos contaminantes de los fluidos y productos eruptivos emitidos a la superficie, y de los cuales es posible conocer los mecanismos y alcances del transporte de contaminantes en el ambiente y sus implicaciones

para la salud; 8) uso de imágenes satelitales, para detectar anomalías térmicas y determinar patrones evolutivos en periodos eruptivos, con lo cual es posible cuantificar tasas de descarga de magma a la superficie.

**2. Deformación en sistemas volcánicos:** La actividad volcánica está directamente relacionada con cómo se produce la deformación en la corteza terrestre y cómo se distribuyen en ella las fuerzas tectónicas. De esta forma estudiamos la determinación de la distribución de estructuras y esfuerzos, la deformación de la corteza y de los edificios volcánicos. Las principales metodologías incluyen: 1) Mapeo de estructuras geológicas (locales y regionales) relacionadas con edificios volcánicos, para establecer la distribución de esfuerzos tectónicos; 2) uso de GPS e InSAR para establecer patrones de deformación local relacionados con eventos tectónicos de gran escala (e.g. terremotos) y/o procesos volcánicos individuales.

**3. Peligros volcánicos:** Los procesos volcánicos se pueden modelar para establecer las áreas que estos pueden alcanzar. Luego del mapeo geológico y conociendo la historia evolutiva de un volcán individual, identificación de sus productos eruptivos y magnitudes eruptivas pasadas, es posible aplicar modelos numéricos y probabilísticos. Estos permiten modelar futuras erupciones volcánicas bajo varios escenarios eruptivos, que son determinados por magnitudes eruptivas basadas en el registro eruptivo.

## B. Ingeniería/Ciencias Sociales

**4. Vulnerabilidad y resiliencia humana:** La vulnerabilidad de la comunidad a la actividad volcánica dependerá de sus niveles de exposición, directamente relacionados con la ubicación y distancia a los centros volcánicos. La resiliencia de la comunidad ante eventos volcánicos dependerá de factores como el grado de afectación, tipo y distribución de la infraestructura, grado de preparación y organización de la comunidad, nivel de educación y conocimiento de la actividad volcánica, percepción de riesgo, creencias, etnias, cultura, entre otros. En esta área temática aplicamos métodos asociados a: 1) Ingeniería, evaluación de la distribución y respuesta de la infraestructura a eventos volcánicos; 2) Psicología, con la aplicación de encuestas para conocer

los parámetros sociales previamente señalados. Posteriormente, mediante cartografía superficial, es posible conocer la distribución de infraestructura y población en el territorio, y en consecuencia, con la combinación de la información con los mapas de peligrosidad volcánica, se generan los mapas de riesgo volcánico para las variables de infraestructura y comunidad (riesgo físico, territorial, social, entre otros). Finalmente, se establecen planes de emergencia y resiliencia, de acuerdo con los resultados obtenidos por las respuestas de infraestructura y los diferentes factores psicosociales previamente analizados.

### C. Ciencias de la Comunicación

La transferencia de conocimiento a las instituciones públicas/privadas, medios de comunicación y público en general, es clave para enfrentar crisis, ordenamiento territorial, crear y ejecutar planes de emergencia, mitigación, educación y transmisión de información en un lenguaje sencillo y comprensible. Esta área temática desarrolla tareas de divulgación y difusión a través de diversas vías como medios digitales, escritos y audiovisuales. Esta área asesora a las demás áreas temáticas para simplificar el lenguaje de la información y el conocimiento producido en el Instituto.

### REDES Y SISTEMAS DE VIGILANCIA VOLCÁNICA

Actualmente el Instituto cuenta diversas redes y sistemas de vigilancia de volcanes. A nivel de redes de vigilancia, estas se encuentran desplegadas de forma permanente en los siguientes volcanes localizados en el norte de Chile: 1) Ollagüe, constituido por 4 sismómetros, 1 cámara de vigilancia óptica (VO); 2) Lascar, constituido por 5 estaciones sísmicas, 1 cámara ultravioleta (UV), y 4 cámaras VO; 3) Lastarria, formada por 4 sismómetros, 1 cámara UV, y 1 cámara VO. Los volcanes Olca, San Pedro y Putana cuentan cada uno con 1 cámara VO de forma permanente.

Adicionalmente, el Instituto cuenta con el llamado "Observatorio Volcánico Móvil" constituido por 15 sismómetros, 2 cámaras UV, 2 espectrómetros de absorción óptica diferencial (DOAS), 1 cámara infrarroja (IR), y 1 dron equipado con 2 cámaras (1 VO y 1 IR), lo que permite estudiar sistemas volcánicos individuales en periodos de tiempo acotados.

El principal sistema activo de vigilancia volcánica corresponde al Volcanic Anomalies Monitoring System (VOLCANOMS; Layana et al., 2020), el cual corresponde a un sistema basado en el uso de imágenes satelitales Landsat para la detección de anomalías termales en volcanes activos. Actualmente se monitorean de forma permanente los volcanes Lascar, Planchón-Peteroa, Nevados de Chillán y Villarrica en Chile (e.g. Layana et al., 2020; Aguilera et al., 2021; Caro et al., in prep), y los volcanes Sabancaya y Ubinas en Perú.

### CONTRIBUCIONES A LA MITIGACIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO

El caso del volcán Guallatiri y el primer mapa de riesgos volcánicos en Chile

El volcán Guallatiri (18,4225 °S; 69,0920 °W; 6.071 m s.n.m.), localizado en la Región de Arica y Parinacota, norte de Chile, ha sido ubicado en el puesto 30 del ranking específico de peligrosidad volcánica (SERNAGEOMIN, 2020), siendo el tercero de mayor peligrosidad del norte de Chile. Este volcán presenta dos campos fumarólicos activos, localizados en el flanco sur y en la cima, los cuales generan dos plumas de gas permanentes. Adicionalmente, este volcán presenta un glaciar en su cima. El volcán Guallatiri comenzó su construcción hace 28040 ka, siendo la erupción de mayor magnitud la registrada hace 2,60,003 ka, la cual generó extensos depósitos de flujos piroclásticos, lahares, y depósitos de caída piroclástica, los cuales alcanzaron al menos 12 km de distancia desde la cima (Sepúlveda et al., 2021). Los poblados de Guallatiri y Ancuta se encuentran actualmente emplazados sobre estos depósitos de flujos piroclásticos. La actividad fumarólica actual (temperaturas de emisión entre 80 y 265 °C) se caracteriza por la emisión de gases de origen magmáticos e hidrotermales, dominados por la presencia de H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S (Inostroza et al., 2020; 2021). Diversas emisiones termales se encuentran alrededor del edificio volcánico, donde son emitidas aguas del tipo bicarbonatadas sódicas y sulfatadas cálcicas (Inostroza et al., 2020).

El primer mapa de riesgos volcánicos publicado en Chile corresponde al desarrollado en el volcán Guallatiri (Reyes-Hardy et al., 2021). En esta



investigación, basado inicialmente en la evolución geológica de este volcán (Sepúlveda et al., 2021), se desarrolló un detallado mapa de peligros volcánicos, para luego, construir la base cartográfica para establecer la vulnerabilidad física, territorial y social de la zona de estudio, y con esto, construir los mapas de riesgo volcánico asociados a las vulnerabilidades previamente mencionadas. La base de trabajo de vulnerabilidad se basó en los datos del censo del año 2017, los elementos evaluados en dichos mapas temáticos incluyeron: 1) densidad de población, nivel educacional, e índice de dependencia (vulnerabilidad social); 2) número de casas (vulnerabilidad física); 3) catastro de infraestructura crítica (vulnerabilidad territorial).

El caso del volcán Lascar, el trabajo con la comunidad de Talabre y las experiencias de la explosión de enero de 2022

El volcán Lascar (23,3666 °S; 67,7463 °W; 5.592 m s.n.m.), localizado en la Región de Antofagasta, norte de Chile, es el 14° volcán del ranking específico de peligrosidad volcánica (SERNAGEOMIN, 2020), siendo el volcán de mayor peligrosidad en todo el norte de Chile. Esto se debe a la alta frecuencia eruptiva y la magnitud de algunas de sus erupciones, siendo la mayor registrada en tiempos históricos aquella ocurrida el 19-20 de abril de 1993; cuando una erupción sub-Pliniana de Índice de Explosividad (IEV) 4, alcanzó los 23 km de altura, y generó flujos piroclásticos que alcanzaron los 8 km de distancia desde el cráter central (Gardeweg y Medina, 1994). Actualmente, el volcán Lascar desgasifica de forma permanente, generando una pluma constante, la cual es emitida desde el cráter central activo. Desde el año 2013, este volcán presenta una actividad cíclica, caracterizada por la ocurrencia de explosiones menores (columnas eruptivas < 2 km de altura) y de corta duración (< 30 min), acompañadas por el incremento máximo de radiancia termal y tasas máximas de desgasificación de SO<sub>2</sub> (> 400 t/d; Layana, 2022). Posteriormente, la radiancia termal decrece hasta valores iguales a cero, mientras que las tasas de desgasificación no superan las 100 t/d. Finalmente, un nuevo ciclo inicia con la ocurrencia de nueva explosión, e incremento de la radiancia termal y las tasas de desgasificación (Layana, 2022).

Durante el día sábado 22 de enero de 2022, la comunidad de Talabre informó al instituto, la ocurrencia de incandescencia durante ese y los días previos en el cráter del volcán Lascar. Esta comunicación, basada en la directa relación entre la comunidad de dicho poblado y el instituto durante los últimos 4 años, permitió verificar mediante el procesamiento de imágenes Landsat, a través de la plataforma VOLCANOMS, el incremento en la radiancia termal y desgasificación, desde al menos el día 15 de enero de 2022. De acuerdo al comportamiento de los tres ciclos previos, se estableció como un posible escenario, la ocurrencia de explosiones menores en los siguientes días. Durante la mañana del domingo 23 de enero de 2022, una explosión menor, de unos 10 minutos de duración, generó una columna eruptiva de 1,5 km de altura sobre el cráter activo. Durante la siguiente semana, la desgasificación del volcán se mantuvo en niveles altos, con tasas de emisión de SO<sub>2</sub> de aproximadamente 450 t/d. La rápida comunicación entre la comunidad y el instituto permitió establecer un escenario probable, basado en los ciclos previos ocurridos desde el año 2013, y con ello, una reacción inmediata de las autoridades a cargo de la vigilancia volcánica (SERNAGEOMIN) y de la protección civil (ONEMI), quienes validaron la información emitida por el instituto, y establecer las acciones correspondientes ante este tipo de eventos. En particular, debido a la corta duración del evento, a la baja magnitud, y sobre todo basado en los parámetros de vigilancia volcánica realizado por SERNAGEOMIN, no fue necesario un cambio de alerta del volcán, y fue mantenido en nivel de alerta verde.

La experiencia previamente descrita, sumado a las actividades que se llevan a cabo en conjunto con la comunidad de Talabre, los cuales involucran el apoyo a las actividades turísticas, educación de la comunidad, pero sobre todo, a la evaluación de la vulnerabilidad del poblado ante eventos volcánicos (Esquivel et al., 2022), permiten demostrar que el trabajo colaborativo entre comunidades locales e instituciones científicas, logran incrementar el conocimiento de los procesos volcánicos, mejorar las capacidades de reacción ante posibles erupciones, y por sobre todo, aportar tanto a la vigilancia volcánica como al manejo de crisis llevado a cabo por la protección civil.

## REFERENCIAS

- ▶ Aguilera, F. (2017). Grupo de Investigación en Volcanismo (GIV-UCN) de la Universidad Católica del Norte, Chile: En búsqueda de la integración multidisciplinaria. 12° Encuentro del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra E-ICES 12, Mendoza, Argentina.
- ▶ Aguilera, F., Caro, J., Layana, S. (2021). The evolution of Peteroa volcano (Chile-Argentina) crater lakes between 1984 and 2020 based on Landsat and Planet Labs imagery analysis. *Frontiers in Earth Sciences* 9: 722056
- ▶ Caro, J., Aguilera, F., Layana, S., in prep. Controls of the explosive-effusive transitions in the eruptive cycles between 1972 and 2021 of Nevados de Chillán volcano (Chile).
- ▶ Esquivel, A., Aguilera, F., Ortiz, P., Rivera, M., Oemick, J., González, T., Bascuñan, I., Díaz, B. (2022). Evaluación de la exposición y vulnerabilidad asociada al volcán Lascar, Chile. IX Foro Internacional de Peligros Volcánicos "Volcanes y Sociedad: Riesgos y Prevención".
- ▶ Forte, P., Rodríguez, L., Jácome Paz, M., Caballero García, L., Alpízar Segura, Y., Bustos, E., Perales Moya, C., Espinoza, E., Vallejo, S. & Agosto, M. 2021. Volcano Monitoring in Latin America: taking a step forward. *Volcanica* 4: VII-XXXIII
- ▶ Gardeweg, M. & Medina, E., 1994. Erupción subpliniana del 19-20 abril de 1993. VI Congreso Geológico Chileno, Actas, Vol. 1, 299-304.
- ▶ Inostroza, M., Tassi, F., Aguilera, F., Sepúlveda, J., Capecciacci, F., Venturi, S., Capasso, G. (2020). Geochemistry of gas and water discharge from the magmatic-hydrothermal system of Guallatiri volcano, northern Chile. *Bulletin of Volcanology*, 82, 57.
- ▶ Inostroza, M., Rodríguez-Díaz, A., Aguilera, F., Pérez-Zárate, D. (2021). Evidence of boron-rich aqueous and crystalline phases associated with fumarolic emission at Guallatiri volcano, northern Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 416: 107270.
- ▶ Layana, S., Aguilera, F., Rojo, G., Vergara, A., Sapazar, P., Quispe, J., Urra, P., Urrutia, D. (2020). Volcanic Anomalies Monitoring System (VOLCANOMS), a low-cost volcanic monitoring system based on Landsat images. *Remote Sensing* 12: 1589.
- ▶ Layana, S. 2022. Procesos que controlan el balance térmico-magmático en sistemas volcánicos activos de la Zona Volcánica Central (ZVC). Tesis para optar al grado de doctor, Programa de doctorado en ciencias mención geología, Universidad Católica del Norte, 244 p.
- ▶ Reyes-Hardy, M.-P., Aguilera, F., Sepúlveda, J.P., Esquivel, A., Inostroza, M., (2021). GIS based volcanic hazards, vulnerability and risks assessment of the Guallatiri Volcano, Arica y Parinacota region, Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 109: 103262.
- ▶ Sepúlveda, J., Aguilera, F., Inostroza, M., Reyes-Hardy, M.-P. 2021. Geological evolution of the Guallatiri volcano, Arica y Parinacota Region, northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences* 107: 103117
- ▶ SERNAGEOMIN. (2020). Ranking de riesgo específico de volcanes activos en Chile.

## Experiencia colombiana sobre gestión del riesgo volcánico

Marta Lucia Calvache Velasco

<sup>1</sup> Independiente - mcalvache1@gmail.com

**Palabras clave:** gestión del riesgo, volcán Nevado del Ruiz, volcán Nevado del Huila

En esta ponencia se presentan las trágicas consecuencias, de la erupción del volcán Nevado del Ruiz, en 1985, en la cual se produjeron flujos de lodo o lahares que afectaron varias poblaciones ubicadas en los flancos del volcán, dejando aproximadamente 25.000 personas muertas y desaparecidas. Por el contrario en el 2007 y 2008, las consecuencias de las erupciones en el volcán Nevado de Huila que desencadenaron igualmente flujos de lodo o lahares, tan grandes o mas grandes que los ocurridos en el volcán Nevado del Ruiz, fueron la perdida de la vida de 12 personas, si bien es muy desafortunado la muerte de estas personas, las consecuencias están muy lejos de lo ocurrido en el país en 1985 con la erupción del volcán Nevado del Ruiz. En la presentación, se analizan las razones para lograr esta diferencia de los resultados de estas dos actividades volcánicas en Colombia.

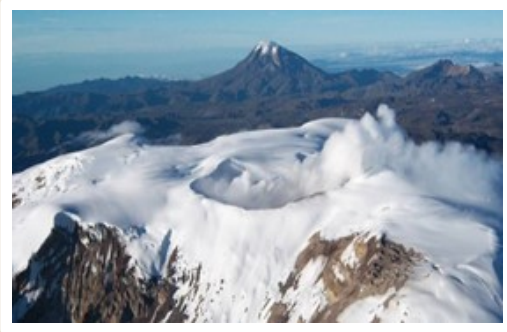
En 1985, las autoridades, instituciones y la población colombiana sabia que vivíamos en un territorio con volcanes activos, pero no se analizaba sistemáticamente las consecuencias que una erupción volcánica podría tener sobre las personas, la infraestructura y los medios de vida en la zona de influencia de un volcán activo. Tampoco existían responsabilidades claras sobre generación de conocimiento de los volcanes activos, no era claro quien definía las medidas para disminuir o mitigar el riesgo, además que existía en muchos casos, la percepción que ante la ocurrencia de grandes fenómenos naturales no hay nada que hacer, ya que son el producto de fuerzas mayores, sean naturales o divinas.

El volcán Nevado del Ruiz tiene una elevación de 5321 m.s.n.m. esta localizado en la Cordillera Central entre los departamentos de Caldas y Tolima, en la parte central de Colombia. Esta ubicado en la parte central

del país y en un día despejado se lo puede ver desde Bogotá, la capital del país.

En 1985 se conocían documentos históricos que narran las erupciones ocurridas en 1595 y 1845 del volcán Nevado del Ruiz y las trágicas consecuencias para las personas que ocupaban el sitio donde fue fundada siglos después la ciudad de Armero.

Adicionalmente en el volcán Nevado del Ruiz, existían, tres tesis doctorales sobre la estratigrafía mas reciente del volcán, que incluía por lo menos 14.000 años de estudios estratigráficos, estudio sobre geoquímica de las rocas volcánicas y estudios para un proyecto geotérmico en la zona del volcán.



► Fig. 1 – Crater Arenas del volcán Nevado del Ruiz

Las primeras evidencias de reactivación del volcán, fueron percibidas desde finales de 1984, o sea un año antes de la erupción con consecuencias devastadoras, en diciembre se sintieron sismos en zonas alrededor del volcán, al igual que durante los primeros meses de 1985, los montañistas que visitaban frecuentemente el volcán empezaron a ver cambios morfológicos en el cráter y la nieve con manchas de Azufre. Durante 1985, ocurrieron numerosos indicios de la nueva actividad en el volcán, por ejemplo, temores que se sentían continuamente en un refugio ubicado

aproximadamente a 3 km de distancia del cráter Arenas, la caída de ceniza, resaltando principalmente un evento ocurrido el 11 de septiembre del 1985, ceniza que cayó en la ciudad de Manizales, la principal ciudad ubicada al Nor-Oeste, el volcán aproximadamente a 25 km de distancia.

En julio de 1985, se instaló el primer sismógrafo y para septiembre había una incipiente red permanente de cuatro sismógrafos portátiles analógicos y se daban los primeros pasos en el seguimiento de la deformación volcánica, al igual que toma de muestras para análisis geoquímicos en los fluidos en el cráter y en fuentes termales en el volcán.

Como consecuencia de la importante caída de ceniza el 11 de septiembre de 1985, y basados en el conocimiento estratigráfico de las erupciones del volcán Nevado del Ruiz, en octubre de ese año, se presentó la primera versión del mapa de amenaza/peligro del volcán, donde claramente se definía que cualquier actividad en el volcán podía generar flujos de lodo o lahares que afectarían sitios como el ocupado por la población de Armero.

El 13 de noviembre de 1985, en las horas de la tarde ocurrió una erupción pequeña, la cual pasó desapercibida y produjo un flujo de lodo que afectó la parte alta del volcán y cayó ceniza en el flanco oriental, afectando a la población de Armero. En la noche ocurrieron erupciones a las 9:00 y 9:30 p.m. Corrientes de densidad piroclástica generaron flujos de lodo o lahares, que afectaron principalmente, tres ríos que drenan hacia el Oriente y uno hacia el Occidente y las poblaciones de Armero, Mariquita y



► Fig. 2- Fotografía del sitio donde estaba ubicada la población de Armero, arrasada por el flujo de lodos o lahar que bajó por el cañón del río Lagunillas

Honda en el Oriente y Chinchina en el Occidente, con un saldo trágico de más de 25.000 muertos.

El volcán Nevado del Huila es el volcán de mayor altura 5364 m.s.n.m. y tiene el glaciar de mayor extensión en Colombia. Está ubicado entre los departamentos de Cauca, Huila y Tolima, en la parte sur de Colombia.



► Fig. 3- Volcán Nevado del Huila.

El volcán Nevado del Huila es el volcán de mayor altura 5364 m.s.n.m. y tiene el glaciar de mayor extensión en Colombia. Está ubicado entre los departamentos de Cauca, Huila y Tolima, en la parte sur de Colombia. En febrero 2007, luego de aproximadamente 36 horas de actividad sísmica ocurrió la primera erupción, con la cual se abrió una grieta con dirección Norte - Sur y generó un flujo de lodo o lahar, sin mayores consecuencias sobre las poblaciones y la infraestructura de puentes existentes en el área. Más adelante, en abril de 2007, una nueva erupción ocurrió, formando una grieta con dirección NE-SO, esta vez los flujos de lodo o lahares afectaron los dos ríos principales que drenan el volcán y que se unen en el río Páez, afectando la mayoría de los puentes en la cuenca de ese río. En noviembre del 2008, una tercera erupción ocurrió, afectando la cuenca del río Páez. En las evaluaciones realizadas sobre el volumen del lahar, se estimó que el volumen es un poco menor a un tercio de kilómetro cúbico, En esta erupción murieron 12 personas.

La principal diferencia entre la erupción del volcán Nevado del Ruiz y las erupciones del volcán Nevado del Huila, es que el país tenía una normatividad que asigna responsabilidades claras sobre la generación del conocimiento útil para la toma de decisiones de gestión del riesgo. Existen instituciones que trabajan





► Fig. 4- Fotografía del flujo de lodo o lahar ocurrido en noviembre de 2008, que afectó la población de Belalcázar, Cauca.

en un sistema integral, donde tanto las autoridades, instituciones y comunidad tienen roles definidos. En el caso del volcán Nevado del Huila, las instituciones del Sistema de gestión del Riesgo, la comunidad indígena y las autoridades trabajaron conjuntamente. Adicionalmente, la comunidad tenía una clara percepción sobre los flujos de lodo, por ellos llamados "avalanchas". La información y las alertas con la información sobre la amenaza y el monitoreo emitidas por el Servicio Geológico Colombiano a través del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán, tuvieron una respuesta rápida para la evacuación por parte de las autoridades y comunidad.

## Experiencia reciente de la gestión local del riesgo volcánico y sísmico

Jackeline Choque<sup>1</sup>,

1 Centro de Estudios y Prevención de Desastres. Predes – [jchoque@predes.org.pe](mailto:jchoque@predes.org.pe)

**Palabras clave:** gestión de riesgo de desastres, peligro volcánico gobiernos locales.

En el sur del Perú se han identificado 16 estructuras volcánicas catalogadas como activos y potencialmente activos (Der Silbva & Francis, 1991; Simkim & Siebert, 1994; Smithsonian Institution, Global Volcanism Program, y desde 1550 ocho de ellos (Huaynaputina, Ubinas, Misti, Sabancaya, Tutupaca, Ticsani, Yucamane y volcanes de Andagua) han presentado erupciones (Ribera et al., 2006).

Los productos emitidos por los volcanes activos durante los últimos 500 años, causaron enormes estragos a varios poblados, terrenos de cultivo y obras de infraestructura (carreteras, canales de agua, etc.) localizados en sus inmediaciones. En la época histórica, los efectos más trágicos sucedidos en el sur peruano fueron generados por la erupción del volcán Huaynaputina en el año de 1600 d.C. durante el cual murieron más de 1500 personas y se destruyeron más de 10 poblados menores localizados en sus inmediaciones (Thouret et al., 2002).

Las erupciones más recientes en el sur de Perú tienen que ver con los Volcanes Sabancaya (Arequipa) y Ubinas (Moquegua). Por otro lado, el Volcán Misti ubicado a 17 km del centro de la ciudad de Arequipa, representa un riesgo latente para más de un millón de personas que viven en las inmediaciones del macizo; y de acuerdo a los estudios de las instituciones científicas como INGEMMET e IGP el Misti ha presentado erupciones pequeñas, moderadas y grandes, a lo largo de su historia.

Ante la recurrencia y severidad de desastres asociados a fenómenos naturales o inducidos por la actividad humana, el estado peruano viene impulsando la formulación y adopción de políticas públicas para la Gestión de Riesgos de Desastres, en consecuencia el año 2011 aprobó la ley N° 29664, Ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD), así como el Reglamento de la

precitada ley, aprobada mediante el Decreto Supremo N° 048-2011-PCM y recientemente la aprobación de la actualización de la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres al 2050.

“El Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (Sinagerd) es un Sistema interinstitucional, descentralizado, transversal y participativo, creado con la finalidad de identificar y reducir los riesgos asociados a peligros o minimizar sus efectos a fin de evitar la generación de nuevos riesgos, así como la preparación y atención ante situaciones de desastres, mediante el establecimiento de principios, lineamientos de política, componentes, procesos e instrumentos de la Gestión del Riesgo de Desastres” (Ley No 29664, ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres).

También señala la precitada ley que “las entidades públicas, en todos los niveles de gobierno, son responsables de implementar los lineamientos de la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres”.

El numeral 5.1 del artículo 5 de la Ley N° 29664, Ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD), define a la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres “como el conjunto de orientaciones dirigidas a impedir o reducir los riesgos de desastres, evitar la generación de nuevos riesgos y efectuar una adecuada preparación, atención, rehabilitación y reconstrucción ante situaciones de desastres, así como a minimizar sus efectos adversos sobre la población, la economía y el ambiente”.

En este contexto normativo y coyuntural, las organizaciones no gubernamentales (ONG): Agencia Adventista para el Desarrollo y Recursos Asistenciales (ADRA Perú) y el Centro de Estudios y Prevención de Desastres (PREDES), ejecutaron recientemente (2019-2020) el proyecto titulado “Fortalecimiento de

las capacidades para la reducción de riesgos y aumento de la resistencia en las comunidades de Caylloma, Arequipa" ("primera fase") con el financiamiento de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID). Las actividades comprendieron la transferencia de conocimientos sobre los riesgos volcánicos a las autoridades y a la población; la capacitación de funcionarios para utilizar instrumentos técnicos de gestión de riesgos y de respuesta en caso de emergencia; la capacitación de voluntarios para apoyar las actividades de emergencia y recuperación en caso de desastre; la formulación de un plan provincial de prevención y reducción de riesgos de desastre basado en escenarios de riesgo actualizados; la instalación de equipo de comunicación en el Centro de Operaciones de Emergencia provincial; y la elaboración de planes distritales de contingencia para terremotos y erupciones volcánicas.

En ésta misma línea las ONGs ADRA Perú y PREDES, para los años 2020 al 2022 han ejecutado en consorcio, el proyecto segunda fase "Aumento de la resiliencia de las comunidades y los gobiernos locales y regionales ante el peligro volcánico y sísmico" denominado también, en su nombre corto "Preparados ante Volcanes y Sismos" en las regiones de Arequipa y Moquegua, con el financiamiento de USAID; específicamente en 6 distritos de la provincia de Arequipa: Cayma, Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar, Paucarpata y Chiguata; y un distrito de la provincia de Sánchez Cerro: Ubinas (Fig. 1) respectivamente; ambos ámbitos regionales vulnerables y expuestos a fenómenos naturales recurrentes ya conocidos como son las lluvias intensas de estación, deslizamientos, heladas, etc. y otros como sismos y vulcanismo que han ocasionado gran afectación a su población, y que a la fecha siguen siendo vulnerables por la exposición frente a los volcanes Ubinas y Misti.

El objetivo principal del proyecto ha sido fomentar la capacidad de reducción del riesgo de desastres a nivel de los gobiernos locales y regionales de Arequipa y Moquegua desde el rol de sus funcionarios, líderes de comunidades hasta la población, con la participación activa de socios estratégicos del proyecto como las instituciones técnico científicas de INGEMMET e



► Fig. 1 - Área de intervención (Arequipa-Moquegua).

Instituto Geofísico del Perú – IGP, así como las entidades técnicas del Sinagerd del nivel nacional y local como el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) y el Centro Nacional de Estimación y Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED), entre otras entidades de la Plataforma de Defensa Civil de las zonas de intervención.

El proyecto denominado también "Preparados ante Volcanes y Sismos" se ha estructurado bajo tres ejes o componentes como son: i) Eje de sensibilización y movilización, basado en una estrategia comunicacional con la población, ii) Creación de capacidad y formación, con un enfoque de formación de capacidades en la población, líderes locales y funcionarios, y iii) Política y Planificación, enfocado a la formación de capacidades en los grupos de trabajo y plataformas de defensa civil de los gobiernos locales y regionales.

### Metodología del trabajo con funcionarios

En relación a las actividades del eje o componente Política y Planificación (iii) del proyecto, éstas se desarrollaron con la participación de los Grupos de Trabajo de Gestión de Riesgo de Desastres (GTGRD) y Plataformas de Defensa Civil conformados al interior de gobierno local. De acuerdo al art. 14º numeral 14.3 de la ley del Sinagerd, "los gobiernos regionales y gobiernos locales constituyen grupos de trabajo para la Gestión del Riesgo de Desastres, integrados por funcionarios de los niveles directivos superiores y

presididos por la máxima autoridad ejecutiva de la entidad”.

En este marco se han sostenido reuniones técnicas expositivas y participativas con los grupos de trabajo, de manera virtual y presencial a fin de sensibilizar y fortalecer los conocimientos y capacidades en materia de gestión del riesgo de desastres en sus tres componentes como son la gestión prospectiva, correctiva y reactiva; teniendo como productos de éste trabajo instrumentos como: Escenarios de riesgos volcánico: Misti y Ubinas, Planes de contingencia para peligros sísmicos y volcánicos (lahares); así como Planes de Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres ante actividad eruptiva del volcán Misti.

Las reuniones con los grupos de trabajo de gestión del riesgo de desastres (Fig 2), de los distritos del ámbito del proyecto, se han realizado en gabinete y también en salidas a campo (Fig. 3), lo cual ha permitido un acercamiento más directo y amigable con las entidades técnicas e instituciones científicas del Sinagerd, siendo una experiencia rica para dichos estamentos, sobre todo en el tema de redefinir o actualizar estrategias para la sensibilización y difusión de información técnica de una manera amigable y efectiva.

Por lo tanto, ha sido importante el involucramiento de las instituciones técnico-científicas en el proceso de fortalecimiento de los equipos técnicos de los Gobiernos locales y regionales.



► Fig. 2 - Reuniones técnicas con autoridades e instituciones técnico-científicas.



► Fig. 3 - Reconocimiento de los peligros del volcán Misti.

## CONCLUSIONES

En la experiencia de trabajo con los equipos técnicos de los GTGRD de los gobiernos locales, para el asesoramiento técnico en la implementación de acciones de preparación, prevención y reducción del riesgo volcánico y sísmico, se han identificado aspectos interesantes que se comparten a continuación.

## ASPECTOS POR MEJORAR

Los encargados de las áreas o sub gerencias de Gestión de Riesgo de Desastres (GRD) han mostrado interés, y entendimiento de la importancia de fortalecer debilidades en la implementación de la GRD en sus territorios, sin embargo sus capacidades se ven sobrepasadas en virtud a las múltiples funciones que desempeñan y el poco personal que integran estas áreas, que en algunos casos llegan a tener sólo dos personas, a lo cual se suma el poco tiempo que tienen para especializarse o fortalecer sus conocimientos sobre como implementar eficientemente la gestión del riesgo de desastres en sus ámbitos territoriales.



Por otro lado, una parte importante de funcionarios de otras unidades orgánicas de un mismo gobierno local, consideraban que la gestión del riesgo de desastres sólo se enfoca en acciones preparación y de respuesta frente a emergencias y que estas son responsabilidades de la Oficina de Defensa Civil y/o GRD, lo que debilita el concepto de la transversalidad de la gestión del riesgo de desastres que indica la ley.

La percepción del riesgo se valora desde una visión de la recurrencia de los fenómenos. Por ejemplo, en el caso de Arequipa los funcionarios y/o población perciben como peligros latentes, en primer lugar, a lluvias intensas, huaycos, deslizamientos, seguido por sismos, y por último al volcán Misti como un peligro muy lejano pues las evidencias señalan que su última actividad eruptiva ocurrió hace cientos de años y eso les da confianza, que no sucederá nada en un futuro cercano, por lo cual no es urgente o prioritario realizar acciones al respecto.

En cambio, en el distrito de Ubinas (Moquegua) ocurre lo contrario, los episodios recientes de actividad eruptiva del Volcán San Pedro de Ubinas y su impacto, hacen que la población tenga la percepción de peligro prioritario, seguido de otros como lluvias, deslizamientos, sismos, etc.

Esta situación de actividad eruptiva del Ubinas ha hecho que la población y sus autoridades internalicen el concepto de convivencia con el peligro, considerando que el volcán no siempre está en erupción y por otro lado no desean dejar sus tierras, y actividades productivas. Sin embargo, se ven afectados o abatidos cuando generan o gestionan proyectos de inversión pública que mejorarían sus condiciones de vida, pero reciben respuestas negativas o dilatorias para su ejecución por parte de los sectores nacionales; a esto se suma una aún débil continuidad en el acompañamiento técnico por parte del sector nacional y regional en la resolución de sus necesidades. Esta situación hace que los funcionarios no le den mucha importancia a la generación de instrumentos para implementar los procesos de prevención y reducción del riesgo de desastres frente a un peligro definido.

Por otro lado, muestran más interés en el fortalecimiento de capacidades para la preparación y respuesta, aun cuando tengan muy pocos recursos financieros para implementar actividades al respecto; un aspecto resaltante y muy conocido es, que en las zonas rurales los anexos y/o centros poblados están ubicados algo distantes uno del otro y en el área de gestión de riesgos de desastres del municipio distrital solo hay una persona, con el acompañamiento a veces de un auxiliar administrativo si el presupuesto lo permite. En estos casos es importante que los gobiernos provinciales o regionales asuman parte activa en el acompañamiento técnico para la implementación de la GRD en el territorio.

Los funcionarios de los gobiernos locales y regionales, sobre todo aquellos que trabajan en el área de Planeamiento y Desarrollo Institucional no están convencidos de la importancia de adecuar sus documentos de gestión institucional con el enfoque de GRD y consideran que estas acciones son muy engorrosas y otros que se les recargará más funciones a las que ya tienen. Esta situación es un tema que debe seguirse trabajando y no solo llegar a cambiar la denominación de la oficina o área. Aún es débil la institucionalidad y articulación del SINAGERD.

## ASPECTOS POSITIVOS

La Estimación del riesgo, como procedimiento para conocer los niveles de riesgo en un territorio, ha sido un tema que se viene entendiendo, ya que esto les permitirá tomar decisiones apropiadas en la generación de proyectos de desarrollo y gestionar los riesgos adecuadamente; sin embargo, es un tema que debe seguir siendo fortalecido, en los municipios más aun cuando se tiene muy cerca un nuevo proceso electoral.

Los funcionarios comprenden la necesidad de involucrar a líderes comunitarios para gestionar mejor el riesgo de desastres, pero también consideran que estos deben ser identificados minuciosamente pues han tenido experiencias con algunos dirigentes vinculados o traficantes de terrenos que buscan posicionarse en zonas de riesgo.

Los funcionarios consideran que, para el cumplimiento de sus roles y funciones en la gestión del riesgo de desastres en sus respectivos territorios, es necesario ser capacitados constantemente, con temas prácticos de la GRD, así como

la necesidad de una articulación real y eficiente entre los funcionarios de una misma entidad y el conocimiento de sus actividades, competencias o funciones.

Se ha logrado un entendimiento inicial del rol de los municipios, no sólo en la gestión reactiva, sino también en la gestión prospectiva y correctiva.

Es importante destacar también el acercamiento estrecho que han tenido las entidades técnico científicas en el trabajo con los equipos técnicos de los gobiernos locales y regionales, para el desarrollo de instrumentos como escenarios de riesgos, planes de prevención y reducción de riesgo de desastres, planes de contingencia, entre otros.

Los funcionarios consideraron importante el rol de los representantes del Instituto Nacional de Defensa Civil - INDECI y Centro Nacional de Estimación y Prevención y Reducción de Desastres - CENEPRED, pues aportan el respaldo normativo, así como el acompañamiento activo en el proceso de las actividades del proyecto.

### AGENDA PENDIENTE

- ▶ Si bien es cierto los gobiernos locales y regionales tiene conformados su GTGRD y en algunos casos sus equipos técnicos, es necesario que funcionen como tales, teniendo reuniones técnicas periódicas que permitan una agenda de trabajo establecida en sus programas de actividades anuales y que estos documentos de gestión sean elaborados por ellos mismos y en los primeros meses del año.
- ▶ Es importante conocer en mayor profundidad la realidad de cada municipio: capacidades institucionales, técnicas, recursos y sobre esa base diseñar estrategias o mecanismo diferenciados de capacitación. Se debe tener claro el perfil de los funcionarios/as, que no siempre son especialistas en GRD.
- ▶ Los planes de capacitación deben basarse en un buen diagnóstico de las necesidades y expectativas de los Gobiernos Locales y Gobiernos Regionales; ello con la finalidad de no entrar en una competencia de prioridades.
- ▶ La capacitación a los funcionarios/as debe promover en mayor medida la articulación con los líderes/as locales y población.
- ▶ Se concluye que es más efectiva la capacitación presencial vs la capacitación virtual, sin dejar de ser también importante; la diferencia está en el uso de metodologías participativas, muy dinámicas, y un lenguaje sencillo y práctico.
- ▶ Se requiere un mayor acompañamiento, retroalimentación y soporte a los funcionarios/as, con la finalidad de que no se pierda lo que se ha logrado.
- ▶ Se debe tener claro como condicionante, la alta rotación de funcionarios/as: Considerar acciones de respaldo como planes anuales de trabajo y otros documentos de compromiso, acciones de seguimiento y retroalimentación constantes.
- ▶ Para el caso del peligro volcánico sobre todo en Arequipa, es importante dejar claro que su abordaje parte primordialmente de una gestión prospectiva y correctiva, que integre de primera instancia el conocimiento de riesgo en el territorio, el control urbano, los procesos constructivos, el control de expansión urbana a través de medidas no estructurales como normativas regionales o nacionales, elaboradas en consenso con los gestores del territorio vale decir niveles locales, regionales, nacional (SBN) y las instancias involucradas.
- ▶ La normativa nacional de GRD y los proyectos en la materia, tendrían que considerar en su ejecución, las diferentes realidades y capacidades de los municipios y gobiernos regionales.
- ▶ En el caso de Arequipa, la amenaza volcánica del Misti quizás sea el motivo más importante para trabajar en la Prevención (evitar o reducir el riesgo a futuro). En otros términos, es la principal justificación o motivo para controlar la expansión urbana hacia el volcán, dado que está catalogada como zona de alto peligro. En tal sentido los

escenarios de riesgo juegan un papel muy importante en la toma de decisiones, pues son la base para la planificación del desarrollo adecuado del territorio, así como la implementación de los mecanismos de control urbano en estas zonas de alto peligro; de allí se destaca la importancia del trabajo de las instituciones científicas con los niveles municipal y regional.

#### AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento al Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (Ingemmet), por su acompañamiento y aporte científico durante la ejecución del proyecto, así como por brindarnos este espacio para compartir algunas de nuestras experiencias con los gobiernos locales y regionales.

#### REFERENCIAS

- ▶ INGEMMET. (2018). Informe Técnico "Evaluación del riesgo volcánico en el sur del Perú"; página web: [http://ovi.ingemmet.gob.pe/?page\\_id=104](http://ovi.ingemmet.gob.pe/?page_id=104).
- ▶ Decreto Supremo. N° 048-2011-PCM. Ley N° 29664, Ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. (19 de febrero de 2011). Normas Legales N° 436456. Diario Oficial El Peruano.

# Estudio de la erupción del volcán Huaynaputina del año 1600 d.C. Características de la erupción e impacto en poblaciones y el clima

K. Cueva<sup>1</sup>, Jersy Mariño<sup>1</sup>, Carla Arias<sup>1</sup>, Juan Cuno<sup>1</sup>, Andy Ancalle<sup>1</sup> y Andrés Ticse<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, Yanahuara, Arequipa, Perú

**Palabras clave:** Huaynaputina, pliniana, IEV, caídas, tefro-estratigrafía

## INTRODUCCIÓN

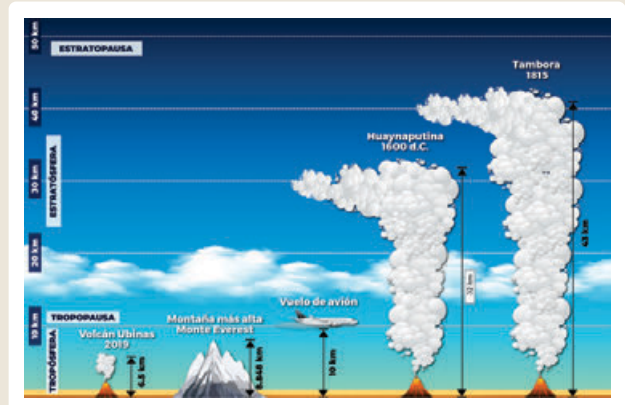
En el año de 1600 d.C. el volcán Huaynaputina (Fig. 1) ubicado en la provincia General Sánchez Cerro, al extremo norte de la región de Moquegua en el sur del Perú (8162195N, 302187E, 4860 msnm), presentó una erupción pliniana, considerada actualmente como la más grande de Sudamérica ocurrida en tiempos históricos en los Andes (Thouret et al. 1999, 2002; Adams et al. 2001). Según la tefroestratigrafía de la caída pliniana, esta erupción tuvo un volumen de 13-14 km<sup>3</sup>, 32 km (Fig. 2) e Índice de Explosividad Volcánica IEV 6 (Thouret et al. 1999, 2002; Adams et al. 2001, Prival et al. 2020), provocando efectos en el clima global y regional.



► Fig. 1 - Cráter del volcán Huaynaputina después de la erupción de 1600 d.C.

Trabajos multidisciplinarios de tefroestratigrafía, prospección geofísica y fotogrametría, han permitido conocer las características de 6 pueblos sepultados por la erupción: Estagagache, Calicanto, Chimpapampa, Moro Moro, San Juan de Dios y Cojraque (Fig. 3 y 4). A esta investigación se suman trabajos de comunicación

con Comunidades realizados en el periodo de 2015-2019 a los pueblos actuales que residen en las inmediaciones del volcán Huaynaputina. Es importante resaltar los beneficios de esta erupción con respecto a la importancia de la valoración del patrimonio natural y cultural, que se puede utilizar con fines geoturísticos (Mariño et al. 2021).



► Fig. 2 - Altura de la columna eruptiva de la erupción del volcán Huaynaputina del año 1600 d. C., comparada con la de los volcanes Tambora (1815); Monte Santa Elena (1980) y Ubinas (2019). (compilado de Prival et al. 2020; Thouret et al. 2002; OVI, 2019).

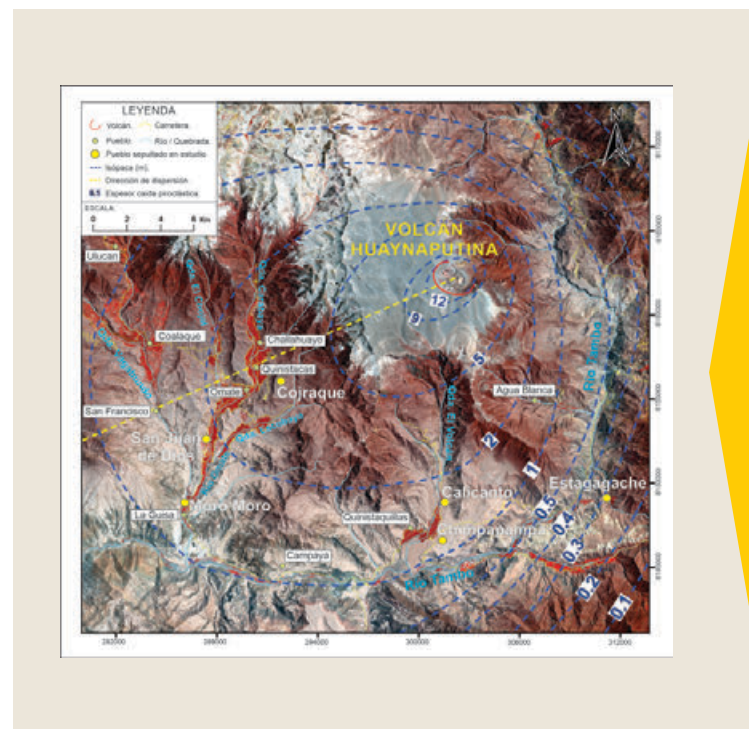
El estudio de la erupción de 1600 d. C. del volcán Huaynaputina es producto de un Proyecto del Ingemmet y el convenio de cofinanciamiento 015-2017 Fondecyt, con la participación de varias instituciones: La Universidad de Clermont-Auvergne, el Laboratorio de Magmas y Volcanes, el Instituto de Investigación para el Desarrollo IRD, la Universidad de la Reunión, etc.



### Unidades de la erupción de 1600 D.C.

A partir del análisis de crónicas españolas y trabajos tefro-estratigráficos, se identificaron cinco fases principales-unidades, durante la erupción (Thouret et al. 1999, 2002). La primera fase fue Pliniana emplazando un depósito de caída (Thouret et al. 2002; Japura, 2018, Prival et al. 2020). La segunda fase consistió en explosiones vulcanianas, evidenciadas en capas de ceniza de espesor milimétrico, alternadas con capas de ceniza gruesa y lapilli centimétrico. La tercera fase consistió en explosiones paroxismales, que emplazaron flujos piroclásticos de pómez y cenizas de entre 1.5 y 2 km<sup>3</sup> de volumen y ceniza co-ignimbrítica. En la cuarta fase se produjeron explosiones que emplazaron un depósito de caída de ceniza rico en cristales (hasta 80% de cristales libres) que se extiende entre 80 a 100 km del cráter. Finalmente, la quinta fase emplazó más flujos piroclásticos ricos en cenizas. (Mariño et al. 2021).

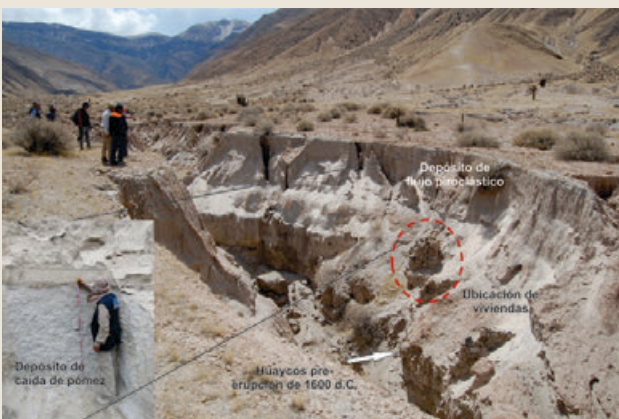
prospección con georradar y magnetómetros, así como elaboración de Modelos de Elevación Digital (DEM) de alta resolución (7 a 15 cm/pixel). La prospección con georradar se realizó utilizando el equipo GSSI SIR3000 con antenas de 200 y 400 MHz (Antoine et al. 2018; Finizola et al. 2018; Labazuy et al. 2018). Los DEM se adquirieron mediante sobrevuelos con un dron Phantom 4 PRO y levantamientos GNSS diferenciales.



► Fig. 4 - Ubicación de los pueblos estudiados que fueron destruidos por la erupción, se muestran también los pueblos sepultados por la erupción. (Mariño et al. 2021).

### Geología e impacto en los pueblos sepultados

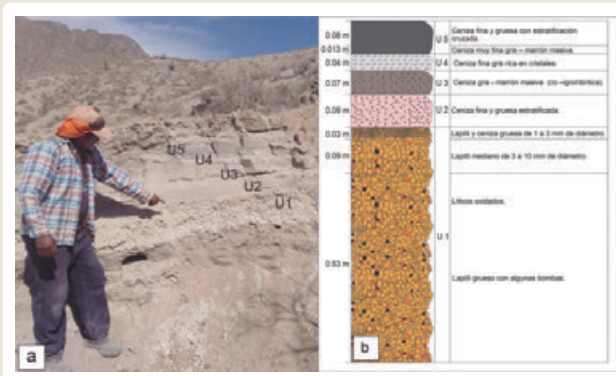
Estagagache es el pueblo más representativo, ubicado a 16 km al sureste del volcán, centro principal incaico, donde existen estructuras rectangulares de paredes de casas de hasta 2.5 m, las cuales fueron cubiertas por los piroclastos del volcán (Fig. 5), causando un gran impacto en la arquitectura de sus construcciones. Fue afectado primero por la caída Pliniana de lapilli, pómez y luego por oleadas piroclásticas (ash-cloud surge) de menor volumen, el cual es mostrado en el mapa geológico de la zona de Estagagache (Fig. 6).



► Fig. 3 - Corte de más de 6 m en la zona de Calicanto, donde se muestran depósitos volcánicos de la erupción. Se puede apreciar viviendas sepultadas por las unidades 1 y 2.

### METODOLOGÍA

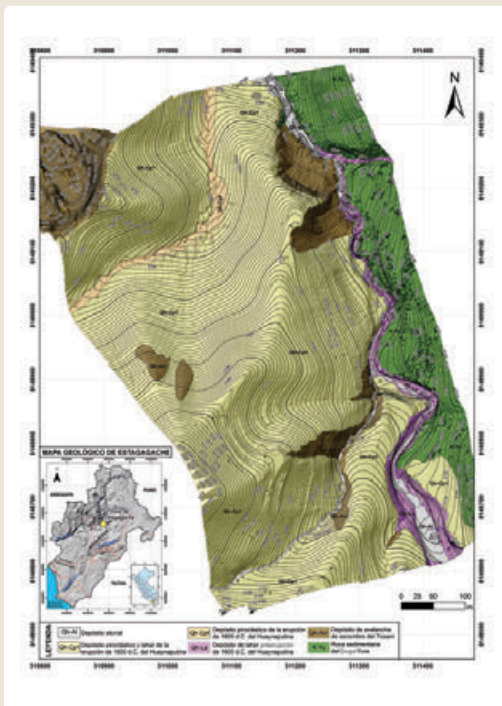
Para conocer mejor las características de los pueblos, así como el tipo de impacto de la erupción sobre estos, se han realizado estudios multidisciplinarios, los que incluyen trabajos de geología y tefroestratigrafía,



► Fig. 5 - Depósitos piroclásticos en la zona de Estagagache. a) Fotografía de los depósitos; b) Columna tefroestratigráfica. Tomado de Mariño et al. 2021.

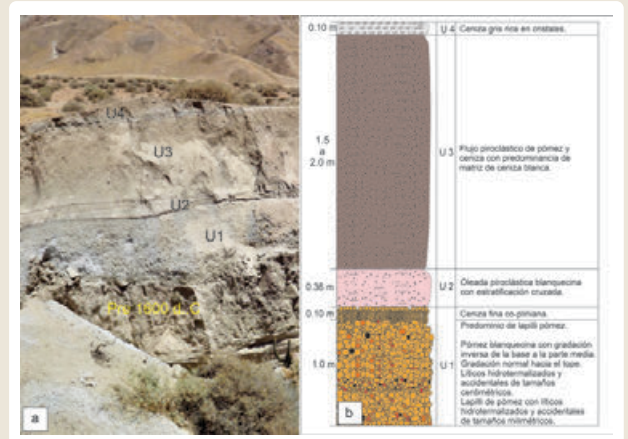
de pómez, flujos piroclásticos densos y canalizados de 2 a 6 m de espesor, que cubrieron las viviendas, además de lahares de espesores métricos que se movilizaron por las quebradas que descienden del volcán (Fig. 7).

En Chimpapampa, a 16 km del volcán se encontraron estructuras circulares de 9.5 m de diámetro, con paredes de piedra que poseen alrededor de 0.75 m de ancho y 1 m de altura. Estas estructuras fueron totalmente cubiertas por depósitos de la caída Pliniana y posiblemente por oleadas piroclásticas que luego fueron erosionadas (Mariño et al. 2021).



► Fig. 6 - Mapa geológico de la zona de Estagagache al Sureste del volcán Huaynaputina (Cueva et al. 2022).

El pueblo Inca Calicanto se encuentra situado a 13 km al sur del cráter del volcán Huaynaputina, en una planicie ubicada en la margen izquierda de la quebrada El Volcán (Fig. 4). Prevalece la caída Pliniana



► Fig. 7 - Afloramiento del pueblo Calicanto al sur del volcán Huaynaputina.

Las ruinas de Moro Moro se encuentran ubicadas a 21 km al SW del cráter del volcán Huaynaputina. Se han encontrado estructuras rectangulares, corrales o viviendas cubiertas por caídas de tefras, sin depósitos de flujos piroclásticos. La caída de lapilli pómez provocó el colapso de los techos de las viviendas y los cubrió casi por completo.

Cojraque ubicado a 12 km suroeste del Huaynaputina, se han identificado paredes de piedra con mortero de barro, con formas rectangulares, los cuales se encuentran cubiertos con depósitos de caída de más de 2 m de espesor, flujos piroclásticos más finos y poco densos de hasta 1 m, los cuales terminaron por destruir y sepultar la poca infraestructura que quedo.



## Comunicación y difusión

Con el objetivo de dar a conocer a las poblaciones locales (Quinistaquillas y Omate) y autoridades regionales (Moquegua y Arequipa) los recursos geoturísticos, se implementaron trabajos de educación, difusión y sensibilización entre los años 2015 y 2019 (Macedo et al. 2016; Thouret-Pina et al. 2018). Reuniones de trabajo, charlas y talleres de capacitación a profesores y alumnos de Instituciones Educativas, a pobladores locales, operadores y guías de turismo, difusión de los trabajos a través de radio y televisión, elaboración de materiales de difusión, como afiches, trípticos y posters.

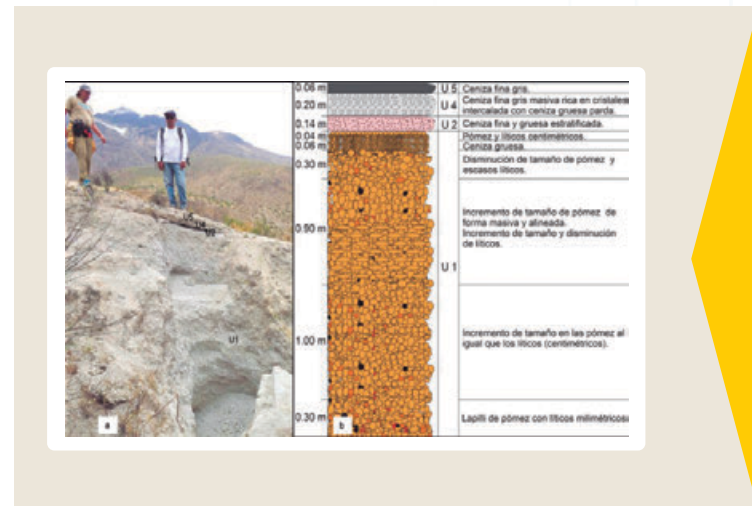
## Comentarios finales

La erupción del Huaynaputina modificó la geografía de la zona, donde se emplazaron voluminosos depósitos de caídas y flujos piroclásticos. Los estudios multidisciplinarios realizados, han permitido conocer mejor las características de seis pueblos Incas, destruidos por la erupción, los cuales estuvieron ubicados en el flanco suroeste, sureste, sur y noroeste del cráter del volcán Huaynaputina. Gracias a diferentes herramientas se identificaron importantes infraestructuras, cubiertos por tefras y flujos piroclásticos, como paredes de viviendas, corrales, canales de agua, caminos y andenes.

Se han elaborado los mapas geológicos de Calicanto, Chimpapampa y Estagagache a escalas 1:2000, 1:3000 y 1:2500. El depósito de caída pliniana presenta espesores entre 1 m a 3 m en estos pueblos, mientras que los depósitos de flujos piroclásticos llegan hasta 6 m. Se utilizaron varios métodos geofísicos para investigar estructuras potenciales e identificar ruinas (muros, andenes, corrales, etc.). Con el uso de la Fotogrametría con drones (Phantom 3 y 4Pro), se obtuvieron Modelos de Elevación Digital (DEM) con resoluciones centimétricas, los cuales sirvieron como base para sobreponer los mapas geológicos y de prospección geofísica. Se pretende continuar trabajando con autoridades con miras a realizar excavaciones arqueológicas y proponer futuros geositios y museos de sitios. Además de realizar el mapa de peligros volcánicos del Huaynaputina en beneficio de la sociedad.



► Fig. 8 Orto-mosaico del sector de Moro Moro. a) Fotografía de los muros de viviendas y corrales; b) Calicata que muestra el depósito de caída y parte de un muro de 0.7 m de piedra de una vivienda. Tomado de Mariño et al., 2021).



► Fig. 9 Depósitos piroclásticos en el sector de Cojraque. a) Fotografía de los depósitos que en total posee alrededor de 3 m de espesor; b) Columna estratigráfica de los depósitos.

## REFERENCIAS

- ▶ Adams N, de Silva S, Self S, Salas G, Schubring S, Permenter J, Arbesman K (2001). The physical volcanology of the 1600 eruption of Huaynaputina, Southern Peru. *Bull Volcanol.* Volumen 62:493–518. <https://doi.org/10.1007/s00444-000-105>.
- ▶ Antoine R, Macedo L, Finizola A, Delcher E, Thouret J-C, Fauchard C et al (2018). The Huayruro Project: mapping the Calicanto Inca area buried by the A.D. 1600 Huaynaputina eruption, with geophysical imaging and remote sensing. *Cities on Volcanoes 10*, 2–7 September 2018. Napoli, Italy.
- ▶ Arias C (2021). Recursos geoturísticos generados a partir del impacto de la erupción del volcán Huaynaputina del año 1600 d.C. como patrimonio geológico. Tesis de ingeniero geólogo. Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú, 225 p
- ▶ Cueva K.; Mariño J.; Japura S.; Sánchez N.; Arias C.; Ramos D.; Lazarte I.; Macedo L.; Carpio J.; Pari W. & Huilca J. (2022). Estudio de la erupción del volcán Huaynaputina del año 1600 d. C.: Características de la erupción e impacto en poblaciones y el clima. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, xx, 173 p.
- ▶ Finizola A, Macedo L, Antoine R, Thouret J-C, Delcher E, Bacri C, Fauchard C, Gusset R, Japura S, Lazarte I, Marino J, Normier A, Ramos D, Saintenoy T, Thouret L, Del Carpio J, Puma N, Macedo O (2018). Physical impacts of the CE 1600 Huaynaputina eruption on the local hábitat: geophysical insights. *Hazard and risk mapping. The Arequipa El Misti case and other threatened cities.* Presses Universitaires Blaise Pascal, Territoires H.S. 1, pp 105–110.
- ▶ Japura S (2018). Estudio estratigráfico y sedimentológico del depósito de caída pliniana de la erupción del volcán Huaynaputina del año 1600 d.C. Tesis de Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, 192 p.
- ▶ Labazuy P, Donnadiou F, Thouret J-C, Ramos D, Marinon J, Sanchez N, Lazarte I, Japura S (2018). Physical impacts of the AD 1600 Huaynaputina VEI 6 eruption on habitat and infrastructure, southern Peru: geophysical insights from the Huayruro project. *Cities on Volcanoes 10*, 2–7 September 2018. Napoli, Italy.
- ▶ Macedo L, Thouret-Pina L, Carrasco B (2016). Implementing an outreach and training program for reducing the volcanic risk at Huaynaputina volcano, Perú. *Cities on Volcanoes 9*, 25 November 2016. Puerto Varas, Chile.
- ▶ Mariño J, Cueva K, Thouret J-C, Arias C, Finizola A, Antoine R, Delcher E, Fauchard C, Donnadiou F, Labazuy P, Japura S, Gusset R, Sanchez P, Ramos D, Macedo L, Lazarte I, Thouret L, Del Carpio J, Jaime L, Saintenoy T (2021). Multidisciplinary study of the impacts of the 1600 CE Huaynaputina eruption and a project for geosites and Geo-Touristic attractions. *The European Association for Conservation of the Geological Heritage.*
- ▶ Prival JM, Thouret J-C, Japura S, Gurioli L, Bonadonna C, Mariño J, Cueva K (2020). New insights into eruption source parameters of the 1600 CE Huaynaputina Plinian eruption. *Peru. Bull Volcanol.* 82:7. <https://doi.org/10.1007/s00445-019-1340-7>.
- ▶ Stoffel M.; Khodri M.; Corona C.; Guillet S.; Poulain V.; Bekki S.; Guiot J.; Luckman B.; Oppenheimer C.; Lebas N.; Beniston M.; Masson-Delmotte V, (2015). Estimates of volcanic-induced cooling in the Northern Hemisphere over the past 1,500 years. *Nature Geoscience.*
- ▶ Thouret J-C, Davila J, Eissen JP (1999). Largest explosive eruption in historical times in the Andes at Huaynaputina volcano 1600 CE, southern Peru. *Geology* 27(5):435–438. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1999\)027%3c0435:LEEIH%3e2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027%3c0435:LEEIH%3e2.3.CO;2).
- ▶ Thouret J-C, Juvigné E, Gourgau A, Boivin P, Dávila J (2002). Reconstruction of the 1600 CE explosive eruption at Huaynaputina volcano, Peru, based on geologic evidence and spanish chronicles. *J.*
- ▶ Thouret-Pina L, Carrasco B, Callo Paye G, Sardón L, Macedo L, Thouret J-C (2018). The educational program of the “Huayruro” project: increasing knowledge and risk perception amongst children living around the Huaynaputina volcano, south Peru. *Hazard and risk mapping. The Arequipa El Misti case and other threatened cities.* Presses Universitaires Blaise Pascal, Territoires H.S. 1, pp 111–116.



# Impactos y gestión de erupciones volcánicas en Argentina: una mirada interdisciplinaria sobre el ciclo eruptivo 2018-2019 del volcán Peteroa

Pablo Forte<sup>1</sup>, Lucía de Abrantes<sup>2</sup> y Amalia Ramírez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (OAVV), SEGEMAR, CONICET, Argentina - fortepablo.gl@gmail.com

<sup>2</sup> Centro Interdisciplinario de Estudios en Territorio, Economía y Sociedad (CIETES), Universidad Nacional de Río Negro, Sede Andina, San Carlos de Bariloche, Argentina.

<sup>3</sup> Centro de Estudios en Relaciones Internacionales y Medio Ambiente (CERIMA), Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina

**Palabras clave:** entrevistas, comunidades rurales, ceniza volcánica.

## INTRODUCCIÓN

Argentina es un extenso país con numerosas evidencias de actividad volcánica. Sin considerar el volcanismo antártico (e.g. Isla Decepción, en las Shetland del Sur), en el país existen 38 volcanes con registro de actividad holocena, 20 enteramente en territorio argentino y 18 en el límite internacional con Chile (García y Badi, 2021). La totalidad de estos sistemas volcánicos activos se encuentran emplazados en el extremo occidental del territorio. Sin embargo, al pensar en las posibles consecuencias de la actividad volcánica en el país, también deben considerarse los más de 70 volcanes activos ubicados íntegramente en territorio chileno (Amigo, 2021).

Más allá de los procesos circunscritos a las inmediaciones de los edificios volcánicos (e.g. corrientes piroclásticas, flujos de lava, lahares), el principal peligro volcánico para el territorio argentino es la caída de tefra. En particular, la fracción tamaño ceniza (diámetro < 2 mm) puede ser dispersada a cientos, e incluso miles de kilómetros, de su centro emisor, cubriendo vastas extensiones del territorio. Asimismo, una vez depositado, este material piroclástico puede ser reinyectado en la atmósfera producto de su removilización por acción del viento, prolongando en el tiempo los problemas de visibilidad y calidad del aire (Forte et al. 2018).

En las últimas décadas, eventos de caída y subsecuente removilización de ceniza han marcado la vida de un gran número de personas y comunidades en Argentina. Erupciones como la Hudson en 1991 o Cordón Caulle en 2011 –con volúmenes emitidos de ceniza > 1 km<sup>3</sup>–, han ocasionado una multiplicidad de

impactos adversos, tanto en el ambiente, como en la economía y la vida cotidiana de las personas (Craig et al., 2016).

Pero además de estas erupciones de moderada a gran magnitud, en los Andes también ocurren erupciones menores. Este tipo de erupciones, por lo general, no adquieren trascendencia mediática ni ocupan un espacio de relevancia en la agenda pública nacional. Esta invisibilización, en parte, puede entenderse al observar la distribución demográfica de Argentina que indica que los principales núcleos urbanos se encuentran mayormente alejados de los sistemas volcánicos activos. En este sentido, resulta sencillo imaginar que estas pequeñas erupciones, de volcanes emplazados en rincones remotos del país no afectan a nadie. Pero, ¿cuánto de cierto hay en esta afirmación? ¿Qué ocurre con los pobladores rurales que habitan estos territorios?

En este trabajo nos adentramos en una de estas áreas remotas de la cordillera de los Andes con el objetivo de dar respuesta a estos interrogantes. Más específicamente, visitamos la cuenca alta del Río Grande en la provincia de Mendoza; zona que fue afectada por la erupción del volcán Peteroa en 2018-2019 (Fig. 1). El interés de nuestra investigación se centra no solo en comprender los efectos de esta erupción en el ambiente y las personas sino también en analizar la gestión de una crisis volcánica en un territorio andino constituido predominantemente por población rural. Para esto conformamos un equipo de trabajo interdisciplinario e implementamos, de manera combinada, herramientas de las ciencias sociales y naturales.

### Caso de estudio: erupción 2018-2019 del volcán Peteroa

El volcán Peteroa ( $35^{\circ}14.5' S - 70^{\circ} 34. 4' O$ ) forma parte del Complejo Volcánico Planchón-Peteroa (CVPP), emplazado en la Zona Volcánica Sur Transicional de los Andes. Peteroa ocupa el segundo lugar en el Ranking de Riesgo Volcánico Relativo para la República Argentina (Elissondo y Farías 2016; García y Baddi 2021) y presenta cuantiosas evidencias de actividad holocena en su registro eruptivo. De acuerdo a Global Volcanism Program (GVP), en los últimos 400 años este volcán ha registrado, al menos, 18 eventos eruptivos, de variable duración y con Índice de Explosividad Volcánica (IEV) entre 1 y 3. Entre la actividad más reciente se destacan los eventos de 1991 y 2010-2011, con la ocurrencia de erupciones de tipo freáticas a freatomagmáticas de baja magnitud ( $IEV \leq 2$ ), desarrollo de columnas eruptivas con alturas inferiores a 3 km sobre el nivel del cráter y la emisión de ceniza volcánica (Naranjo y Haller, 1991; Haller y Risso, 2011).

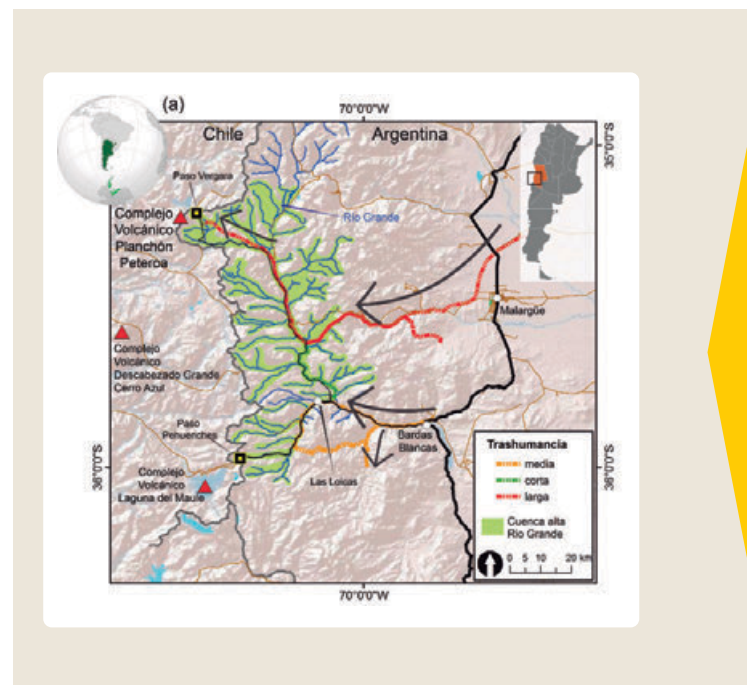
Luego de una década de tranquilidad, signada por emisiones gaseosas esporádicas, el 13 de octubre de 2018 tuvo lugar el inicio de un nuevo ciclo eruptivo. Con una duración aproximada de 6 meses, este período estuvo dominado por explosiones freáticas a freatomagmáticas, con emisión de cenizas y desarrollo de columnas eruptivas con alturas similares a las observadas en las erupciones de 1999 y 2010 (Fig. 2). El material emitido se dispersó predominantemente hacia el SE, alcanzando distancias de hasta 34 km del cráter (Romero et al. 2020).

Dado que el volcán Peteroa se encuentra en una zona cordillerana de difícil acceso, no existen núcleos urbanos en sus inmediaciones (Fig. 1). Los más cercanos son Las Loicas y Malargüe, a 95 y 110 km en línea recta, respectivamente. Durante este último ciclo eruptivo no se reportaron caída de cenizas ni ningún otro fenómeno en estos lugares. Tampoco en ciudades chilenas aledañas. Sin embargo, los productos de la erupción de Peteroa afectaron a un grupo de pobladores rurales que habitan los valles cordilleranos que circunscriben al volcán: los puesteros (Fig. 3a).

Los puesteros o crianceros son pobladores rurales que practican la ganadería extensiva y trashumante, una

actividad económica que se despliega al margen de los circuitos productivos regionales, con una fuerte dependencia del medio natural y escasos usos de la tecnología. Durante los meses de verano, los puesteros se desplazan –mayormente a caballo– con su ganado desde las zonas bajas, donde pasan el invierno (i.e., invernadas) hacia los valles aledaños al volcán en busca de agua y mejores pasturas (Fig. 1). En la zona se practica principalmente la cría de ganado caprino, bovino, y en menor medida, ovino y equino (Ramires, 2018).

En términos generales, el desplazamiento de los puesteros desde las invernadas se inicia con la llegada de la primavera austral y el descenso se produce entre marzo y abril. El tiempo de desplazamiento puede durar entre 1 y 15 días, dependiendo de las distancias, la cantidad de ganado y las condiciones meteorológicas. Durante su estadía en los valles de altura viven en las veranadas: puestos temporarios ubicados en zonas de difícil acceso y construidos con los materiales disponibles en el lugar (piedra, tierra cruda, adobe, etc.) junto con restos de chapa y nylon



► Fig. 1 - Mapa de ubicación de la zona de estudio. Las flechas y líneas punteadas de colores indican las principales rutas de tránsito de los puesteros, entre las zonas de invernada y veranada. Modificado de Forte et al. (2022).

(Fig. 3a). El tiempo de estadía depende de las distancias, la disponibilidad de pasturas y las condiciones meteorológicas. Según Ramires (2018), se estima que existen más de 140 puestos en la Cuenca alta y media del Río Grande.

Como todos los años, entre los meses de octubre y noviembre del 2018 los primeros puesteros de la zona emprendieron el camino trashumante hacia los valles situados en las inmediaciones del volcán Peteroa. Para ese entonces, la erupción ya se encontraba en curso y, de acuerdo a las comunicaciones oficiales, no reportaba grandes riesgos para el desenvolvimiento de esta actividad. Así, los puesteros fueron lentamente poblando las cercanías del volcán en erupción.

Con la intención de analizar este desplazamiento en el marco de una crisis volcánica, así como las acciones desplegadas para proteger a esta población, llevamos adelante una investigación interdisciplinaria que

abarcó diversos momentos temporales. El objetivo fue realizar una evaluación de los impactos y la gestión de la crisis asociada a esta última erupción.

En este proceso, recurrimos a una estrategia metodológica mixta, empleando múltiples fuentes de datos y combinando herramientas de las ciencias naturales con otras propias de las ciencias sociales. Más específicamente, durante el período eruptivo realizamos observaciones de campo y muestreo de aguas y cenizas en la zona afectada. En el invierno subsiguiente a la erupción, entrevistamos a 20 puesteros en las invernadas (Fig. 3b). Para esto, utilizamos el cuestionario presentado en Forte et al. (2022), el cual combina respuestas abiertas y cerradas. Esta información se articuló con datos cualitativos producto de observaciones y entrevistas en profundidad realizadas en la zona afectada antes y luego de la erupción.



► Fig. 2 - Ciclo eruptivo 2018-2019 del volcán Peteroa. (a) Fotografía obtenida desde el borde del cráter, el 23 de marzo de 2019, permite visualizar el centro emisor. Cortesía de Fabricio Carbajal. (b) Ganado y pastizales expuestos a ceniza volcánica en el valle del Peñón, a ~5 km del centro emisor. (c) Fotografía panorámica de la erupción, tomada en febrero de 2019 desde la salida del valle del Peñón, evidencia la dispersión de la pluma eruptiva hacia el SE.

En términos generales, el estudio reveló que los impactos asociados a la erupción fueron reducidos. Si bien la mitad de los puesteros consultados indicó que su veranada se vio afectada –ya sea por presencia de ceniza volcánica en las pasturas y superficies de pastoreo o por alguna afectación observada en el ganado (e.g., problemas respiratorios o ceguera)–, en ninguno de los casos el espesor de ceniza depositada

superó el centímetro. A su vez, se observó una correlación positiva entre las zonas afectadas, la distancia al centro eruptivo y la dirección predominante de la pluma de ceniza.

Otros impactos reportados por los entrevistados incluyeron problemas temporales en la salud, tales como irritación de ojos y tracto respiratorio superior (i.e. nariz y garganta), dificultades en el desarrollo de



las labores diarias en el campo y, también, problemas vinculados al deterioro de su situación financiera a raíz de la dificultad para comercializar sus productos. Por otro lado, los análisis realizados en aguas de los cursos fluviales de la zona mostraron que no existió una transferencia química significativa desde la ceniza emitida por el volcán Peteroa. En algunos casos sí se

identificó un descenso significativo del pH del agua. No obstante, este es un cambio poco perdurable en el tiempo y no significativamente tóxico para el consumo humano o animal. Para un mayor detalle sobre estos resultados, se sugiere la lectura de Forte et al. (2022).

Asimismo, las entrevistas realizadas nos permitieron



► Fig. 3 - (a) Puesto de veranada a ~6 km del volcán Peteroa. (b) Puesteros entrevistados, meses luego de concluida la erupción, en su vivienda de invernada.

entender la gestión de la crisis desde la perspectiva de la comunidad expuesta. Indagamos particularmente sobre dos aspectos centrales durante la erupción: la comunicación y la asistencia.

En promedio, los puesteros evaluaron la asistencia recibida durante el ciclo eruptivo de mala a regular. Más allá de reconocer iniciativas puntuales como la entrega de tapabocas o visitas esporádicas de veterinarios para controlar el estado de salud del ganado, los entrevistados coincidieron en señalar la falta de autoridades en territorio. Ejemplos de esta ausencia son el cierre y abandono temporal del destacamento de las fuerzas de seguridad (i.e., Gendarmería) del paso fronterizo que se encuentra en la zona (i.e., Paso Internacional Vergara) y la falta de mantenimiento de la única ruta de acceso, que, a su vez, conecta a Argentina con Chile.

Además, la ausencia de las autoridades fue percibida por los puesteros a partir de la escasa información que reportan haber recibido. Un dato significativo que se desprende de las entrevistas es que no identificaban como interlocutores activos a ninguna de las

instituciones con responsabilidad en la gestión de la crisis. A su vez, observamos una importante fragmentación de los canales de comunicación a los cuales las personas expuestas recurrieron.

Es importante destacar que la actividad del volcán Peteroa es monitoreada desde el año 2010 por el Observatorio de los Andes del Sur (OVDAS) – institución dependiente del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) de Chile (Amigo, 2021)– y desde 2017, también, por el Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (OAVV). El OAVV es un área especializada dentro del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) encargada del estudio y monitoreo de los volcanes que puedan afectar al territorio nacional (García y Badi, 2021). Además, esta institución es responsable de la generación y emisión de alertas técnicas sobre actividad volcánica. El OAVV envía Reportes de Actividad Volcánica (RAV) y Reportes Especiales de Actividad Volcánica (REAV) a las autoridades nacionales a través del Sistema Nacional para la Gestión Integral del Riesgo (SINAGIR), así como a autoridades provinciales y municipales.



Para el caso del Peteroa, el OAVV elevó la alerta técnica de verde a amarillo en julio de 2018. Se emitieron los reportes pertinentes, caracterizando la actividad y ofreciendo una serie de recomendaciones (e.g., Badi et al., 2018). Dicha información fue transmitida a las autoridades gubernamentales, siguiendo los protocolos establecidos. Por su parte, el Centro de Aviso de Cenizas Volcánicas (VAAC), perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional (SMN), emitió un total de 496 Avisos de Ceniza Volcánica durante todo el ciclo eruptivo, ver:

<http://www3.smn.gob.ar/vaac/buenosaires/productos.phl?lang=es>. En este contexto, adquiere aún mayor relevancia que los puesteros no hayan logrado asociar la información con ninguna institución nacional competente.

Los puesteros indicaron que si bien fueron advertidos sobre "el estado del volcán" y la "evolución de la erupción", no recibieron indicaciones precisas sobre qué hacer, cómo protegerse o de qué manera evacuar la zona ante cambios repentinos en la actividad. Esto expone falencias en la divulgación de un plan de contingencia para comunidad en riesgo.

Otra de las situaciones, narradas por los puesteros, que expone diversos problemas en la transmisión de la información es la incertidumbre en torno a la calidad del agua. En las entrevistas, ellos expresaron su preocupación por la posible contaminación de las fuentes de agua. Indagando meses después de la erupción, nos encontramos con que el Departamento de Irrigación de la provincia de Mendoza había tomado muestras para su análisis. El resultado de los mismos nunca fue comunicado a los puesteros.

### Consideraciones finales

La presente investigación se ha focalizado en comprender algunas de las dinámicas asociadas a las erupciones de baja magnitud. En particular, ha tenido el objetivo de analizar, de forma interdisciplinaria, el último ciclo eruptivo del volcán Peteroa producido en 2018-2019.

Los datos geológicos y los datos cualitativos recogidos en campo, evidenciaron que la caída de ceniza volcánica y su subsecuente removilización eólica se

constituyó en el principal impacto de esta crisis. A su vez, la interpretación interdisciplinaria de estos ha arrojado que los impactos producidos por esta erupción han sido leves y moderados. Si bien esto era un resultado esperable, aplicar estas metodologías en erupciones de baja magnitud permitió identificar falencias en la gestión de la crisis volcánica. La corrección de estos errores podría resultar de gran importancia para mitigar potenciales impactos de eventos de mayor magnitud.

A su vez, al avanzar en el análisis de las representaciones de los puesteros –aquella comunidad trashumante que habita, estacionalmente, en las inmediaciones del volcán– detectamos una serie de problemáticas adicionales que podrían resultar en datos claves al momento del desarrollo de estrategias de gestión del riesgo efectivas para esta zona.

Los puesteros constituyen una comunidad específica atravesada por múltiples vulnerabilidades (sociales, económicas, habitacionales, etc.) que no pueden obviarse al momento de desplegar una estrategia de asistencia y de comunicación durante una crisis eruptiva. Además, las características geográficas de la zona, las distancias recorridas por la comunidad y el acceso a la conectividad imponen condiciones que deben ser ponderadas en el desarrollo de las estrategias de intervención. En definitiva, este estudio nos permitió visibilizar de qué manera las ciencias sociales, en diálogo e interacción sostenida con las exactas y naturales, pueden resultar en un recurso clave para la caracterización de un territorio y una comunidad frecuentemente afectados por erupciones volcánicas.

Cabe destacar, por último, que la práctica trashumante que llevan adelante los puesteros no es exclusiva de esta zona. Se trata de una práctica cultural ancestral que se desarrolla en diversos sectores de los Andes del Sur con actividad volcánica. Lo relevante de la trashumancia desde la perspectiva del riesgo volcánico es que modifica la exposición de manera cíclica y estacional. En este sentido, el caso de estudio aquí presentado iluminó un conjunto de dimensiones claves que podrían ser consideradas al momento de desplegar estrategias de mitigación y gestión del riesgo volcánico en otras zonas del país.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la comunidad de puesteros de la cuenca del río Grande por brindar sus testimonios y hacer posible esta investigación.

## REFERENCIAS

- ▶ Amigo, A. (2021). Volcano monitoring and hazard assessments in Chile. *Volcanica*, 4(S1), 1-20.
- ▶ Badi, G., Carbajal, F., Elissondo, M., García, S., Kaufman, J.F., Olivera Craig, V.H., Sruoga, P., Tejedo, A.G., (2018). Complejo Volcánico Planchón-Peteroa, Erupción Diciembre de 2018. Estado de Actividad, Peligros Asociados y Recomendaciones. 21 p. Buenos Aires, Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales.
- ▶ Craig, H., Wilson, T., Stewart, C., Villarosa, G., Outes, V., Cronin, S. Jenkins, S. (2016). Agricultural impact assessment and management after three widespread tephra falls in Patagonia, South America. *Natural Hazards*, 82(2), 1167-1229.
- ▶ Elissondo, M., Farías, C. (2016). Volcanic risk assessment in Argentina. En *Cities on Volcanoes 9: Understanding Volcanoes and Society - The Key for Risk Mitigation*. Puerto Varas.
- ▶ Forte, P., Domínguez, L., Bonadonna, C., Lamberti, M.C., Gregg, E., Bran, D., Castro, J.M. (2018). Tormentas de ceniza volcánica en Patagonia: un peligro latente y subestimado. En *Libro de resúmenes: VIII Foro Internacional los Volcanes y su impacto*, Arequipa, 26 y 27 de abril del 2018. Ed. por R. Aguilar. Arequipa, 137-141.
- ▶ Forte, P., Ramires, A., De Abrantes, L., Llano, J., Domínguez, L., Carbajal, F., García, S., Sruoga, P., Bonadonna, C. (2022). La erupción no será transmitida: características, impactos y asistencia durante el ciclo eruptivo 2018-2019 del volcán Peteroa, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 79(1), 47-71.
- ▶ García, S. Badi, G. (2021). Towards the development of the first permanent volcano observatory in Argentina. *Volcanica*, 4(S1), 21-48.
- ▶ Haller, M.J. Risso, C. (2011). La erupción del volcán Peteroa (35°15' S, 70°18'O) del 4 de septiembre de 2010. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 68(2), 295-305.
- ▶ Naranjo, J., Haller, M. (2002). Erupciones principalmente explosivas del volcán Planchón, Andes del sur (35°15'S). *Revista Geológica de Chile*, 29: 93-113.
- ▶ Ramires, A. (2018). Riesgo por caída de tefra en la cuenca alta y media del Río Grande y su impacto en el modelo ganadero de la región. *Aportes al Ordenamiento Territorial*. Departamento de Malargüe. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Filosofía y Letras (inédita), 291 p., Mendoza.
- ▶ Romero, J.E., Aguilera, F., Delgado, F., Guzmán, D., Van Eaton, A.R., Luengo, N., Caro, J., Bustillos, J., Guevara, A., Holbik, S. Tormey, D. (2020). Combining ash analyses with remote sensing to identify juvenile magma involvement and fragmentation mechanisms during the 2018/19 small eruption of Peteroa volcano (Southern Andes). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 402, p.106984.

# Impacto de la ceniza volcánica en la salud de la población asentada alrededor del volcán Sabancaya 2015 - 2020

Saida Japura<sup>1</sup>, David Valdivia<sup>1</sup>, Fredy Apaza<sup>1</sup>, Haydee Huamani<sup>2</sup> y Daniel Ramírez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Observatorio Vulcanológico del INGEMMET - saida\_blanca12@hotmail.es

<sup>2</sup> Defensa Nacional de la Red de Salud de Arequipa - Caylloma

**Palabras clave:** ceniza, salud, conjuntivitis, dermatitis, IRAS, EDAS

## INTRODUCCIÓN

El volcán Sabancaya está ubicado en la provincia de Caylloma, región Arequipa a 20 km al sur del valle del Colca. En noviembre del 2016 inicio un nuevo proceso eruptivo que continúa hasta la actualidad. Debido a esto, se realizó la evaluación de los impactos que tiene la ceniza volcánica en la salud en los poblados asentados en un radio de 40 km del volcán Sabancaya con 20,669 habitantes (RSAC, 2020), a través de la correlación de la actividad eruptiva con los casos de Infecciones Respiratorias Agudas (IRAS), Enfermedades Diarreicas Agudas (EDAS), conjuntivitis y dermatitis; información proporcionada por la Defensa Nacional de la Red de Salud de Arequipa Caylloma la cual comprende 28 Microredes, de las cuales se consideró a las Microredes de Salud de Ciudad de Dios, Cabanaconde y Chivay, debido a que comprenden a los centro de salud de los poblados afectados por la ceniza del volcán Sabancaya.

La evaluación consistió en el estudio de la altura de las emisiones, clima de la zona, porcentaje de partículas menores a 32 micras, número y energía de explosiones correlacionando con el número de casos de IRAS, EDAS, conjuntivitis y dermatitis en pobladores mayores y menores a 5 años reportados por las 3 Microredes de Salud entre los años 2015 al 2020.

### I. Efectos de la ceniza en la salud

Las comunidades que residen en áreas urbanas ubicadas cerca de volcanes activos pueden experimentar exposiciones a cenizas volcánicas durante y después de una erupción (Tomasek et al 2018).

Enfermedades respiratorias: enfermedades que se producen en el aparato respiratorio por inhalación de

partículas de ceniza (con alto contenido de sílice) menores a 15 micras las cuales tienen la capacidad de ingresar al sistema respiratorio (Howell and Baxter, 2006), lo que puede causar asma, Infección Respiratoria Aguda (IRAS) y recrudescimiento de enfermedades pulmonares previas e incluso silicosis con una exposición contante y continua a la ceniza (años)(Boischio, 2012).

Enfermedades gastrointestinales: consiste en ingestión de agua contaminada con contenido de ceniza o alimentos con ceniza, que pueden causar malestares gastrointestinales, Enfermedades Diarreicas Agudas (EDAS) e incluso causar la muerte en personas vulnerables con enfermedades crónicas preexistente:

([www.paho.org/spanish/dd/ped/te\\_volc.htm](http://www.paho.org/spanish/dd/ped/te_volc.htm)).

**Conjuntivitis:** presencia de partículas de ceniza en los ojos, que genera molestias o irritación durante y después de la caída de cenizas, debido a que la ceniza volcánica es abrasiva (Boischio, 2012).

**Dermatitis:** se ha observado en algunas personas que las cenizas volcánicas produzcan irritación en la piel, enrojecimiento de la piel, dermatitis con proceso inflamatorio, exantemas, descamación e infecciones secundarias por rascado (Caselli et al., 2010).

### II. Parámetros

#### a) Clima de la Zona

Se analizaron los datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) entre los años 2017 al 2020 de las estaciones de Chivay, Cabanaconde y Huanca, las cuales están ubicadas en el sector noreste, noroeste y sur del volcán Sabancaya respectivamente. Se identificó que la temporada seca

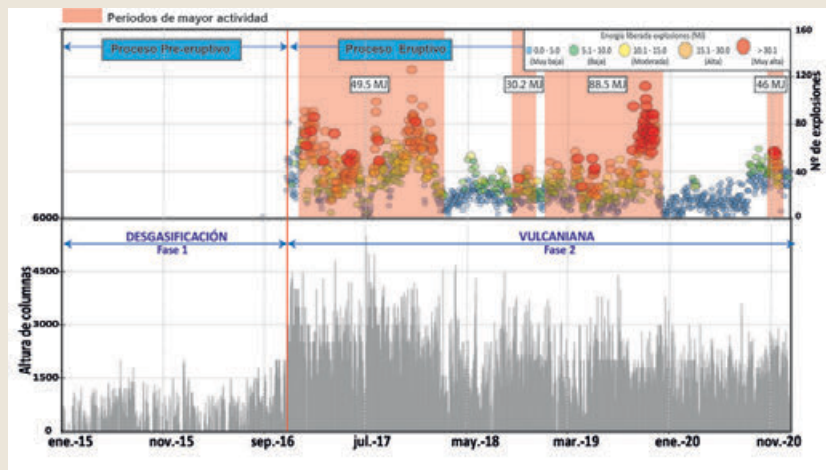
corresponde a los meses de abril a noviembre, las heladas meteorológicas generalmente inician en mayo y terminan en octubre, mientras que los regímenes de lluvias ocurren durante el verano entre en los meses de diciembre a mayo.

### b) Características de las columnas eruptivas 2015-2020

Según el monitoreo volcánico, el episodio eruptivo del 2015-2020 se divide en 2 fases (Figura 1): 1) fase 1 - desgasificación (2013-2015) son principalmente vapor de agua debido al calentamiento del sistema hidrotermal con cantidades de dióxido de azufre de hasta 2000 t/día sobre el cráter. Estas emisiones eventualmente ascienden hasta los 2,000 metros sobre el cráter (msc) en dirección suroeste, noreste y eventualmente hacia el oeste. 2) la fase 2 - vulcaniana a partir del 06 de noviembre de 2016, se aprecian columnas de gases y ceniza densas de color gris, luego de las continuas explosiones volcánicas, con alturas variables entre los 3,600 y 5,500 msc con dirección predominante hacia el este y sur.

### c) Señales sísmicas - explosiones (exp)

La actividad sísmica se divide en dos fases (Fig. 1): 1) fase 1 - proceso pre eruptivo, según el informe anual del 2015, se registró un total de 44,065 eventos sísmicos asociados principalmente al fracturamiento de roca y a la actividad de gases y fluidos en el interior del volcán (Informe anual de actividades SBC 201, 2015). 2) la fase 2 - proceso eruptivo, donde se observaron 4 periodos de incremento en la sismicidad, siendo el más importante, el ocurrido durante el año 2019 donde alcanzó 88.5 MJ (Megajoules) (Informe Técnico A6998, 2019). Durante el 2019 y 2020 predominó los sismos de largo periodo (LP) asociado en ciertos periodos al crecimiento de un domo de lava en la superficie del cráter, también se registraron sismos híbridos asociado a procesos de destrucción de domo y periodos de tremor volcánico de tipo espasmódico asociado a emisiones de gases y ceniza, se pudo determinar que frecuencias altas del tremor indicaban mayor contenido de ceniza (Informe técnico A7136, 2020).



► Fig. 1 - Actividad eruptiva dividida en dos Fases tanto para la actividad sísmica y altura de la columna eruptiva.

### a) Análisis granulométrico de la ceniza

Según el análisis granulométrico, en el año 2016 el promedio de porcentaje de partículas menores de 32 micras alcanzó el 69% con un pico en el mes de noviembre. Durante el año 2017, el promedio de porcentaje de partículas finas disminuyó hasta el 13% con picos en los meses de enero a junio. En el año

2018, el promedio de partículas finas continuó disminuyendo hasta el 6% con un pico en abril. Durante el año 2019, el promedio de porcentaje de partículas finas incrementó hasta el 12% con un pico en diciembre. En el año 2020, el promedio de porcentaje de partículas finas incrementó ligeramente hasta el 15% con un pico en abril.



### I. Casos reportados por la red de salud de Arequipa - Caylloma

Para el estudio se utilizaron datos proporcionado por la Defensa Nacional de la Red de Salud Arequipa Caylloma entre los años 2015 y 2020 sobre el número de casos de IRAS (infecciones respiratorias agudas), EDAS (enfermedades diarreicas agudas), dermatitis y conjuntivitis reportadas por la Red de Salud de Arequipa - Caylloma divida en población mayor y menor a 5 años de edad (Cuadro 1).

**Cuadro 1:** Puestos de salud (P.S.) y centros de salud (C.S.) de las Micro de Salud de Chivay, Cabanaconde y Ciudad de Dios.

MICRORED CHIVAY	MICRORED CABANACONDE	MICRO RED CIUDAD DE DIOS
C.S.Chivay	C.S.Cabanaconde	C.S Huanca
P.S.Canocota		
P.S Coporaque	P.S.Pinchollo	P.S.Lluta
P.S Ichupampa		
P.S. Lari	P.S Huambo	P.S.Taya
P.S Madrigal		
P.S.Yanque	P.S Tapay	P.S.Taya
P.S Achoma		
P.S Maca	P.S Choco	

### IV. Análisis anual de casos de IRAS, EDAS, conjuntivitis y dermatitis según Micro Red de Salud

Para el análisis anual se calculó el promedio de la tasa anual (número de casos/número de habitantes) que significa consultas anuales por habitante (c/h) de casos de IRAS, EDAS, conjuntivitis y dermatitis entre el 2015 al 2020 para correlacionar con los parámetros mencionados anteriormente.

En el 2015 no se registró un proceso eruptivo ni presencia de ceniza volcánica, solo emisiones de gases y vapor de agua de hasta 2,000 msc en dirección noroeste y sureste, por esta razón el promedio de tasa anual de IRAS, EDAS, conjuntivitis, dermatitis no están relacionadas con la actividad volcánica

En el 2016 el 06 de noviembre inicio el proceso eruptivo en el volcán Sabancaya con la ocurrencia de continuas explosiones con energías sísmicas de hasta

17 MJ (Megajoules), con emisiones de gases y vapor de agua de hasta 4,500 msc en dirección predominante al sur-sureste, noreste- norte y 69 % de partículas menores a 32 micras. De acuerdo con los parámetros se identificó el mayor promedio de tasa anual de casos de IRAS en Chivay con 1.98 c/h en personas <5 años, para pobladores > 5 años el mayor promedio de tasa anual fue de 0.50 c/h en Cabanaconde. El mayor promedio de tasa anual de casos de EDAS lo presentó Cabanaconde con 0.42 c/h en personas <5 años, para pobladores >5 años el mayor promedio de tasa anual fue de 0.10 c/h en Cabanaconde. El mayor promedio de tasa anual de casos de Conjuntivitis lo presentó Chivay con 0.04 c/h en personas <5 años, para pobladores >5 años el mayor promedio de tasa anual fue de 0.02 c/h en Chivay. El mayor promedio de tasa anual de casos de dermatitis lo presentó Chivay con 0.02 c/h en personas <5, para pobladores >5 años el mayor promedio de tasa anual fue de 0.01 c/h en Chivay.

En el 2017 el volcán Sabancaya presento un comportamiento moderado, caracterizado por explosiones con energías que alcanzaron los 49 MJ (Megajoules), sin embargo, generaron importantes columnas eruptivas de gases y considerable contenido de ceniza, con columnas que alcanzaron hasta 5,500 msc en dirección predominante al sur, noroeste, oeste y sureste, y 13 % de partículas menores a 32 micras. De acuerdo con los parámetros se identificó el mayor promedio de tasa anual de casos de IRAS en Chivay con 2.72 c/h en personas <5 años, para los pobladores >5 años el mayor promedio de tasa anual fue de 0.41 c/h en Chivay. El mayor promedio de tasa anual de casos de EDAS lo presentó Cabanaconde con 0.61 c/h en personas <5 años, para los pobladores >5 años el mayor promedio de tasa anual fue de 0.08 c/h en Cabanaconde. El mayor promedio de tasa anual de casos de Conjuntivitis lo presentó Chivay con 0.11 c/h en personas <5 años, para los pobladores >5 años el mayor promedio de tasa anual fue de 0.02 c/h en Chivay y Cabanaconde. El mayor promedio de tasa anual de casos de dermatitis lo presentó Chivay con 0.07 c/h en personas <5 años, para los pobladores >5 años el mayor promedio de tasa anual fue de 0.02 c/h en Chivay.

En el 2018 mostraron un comportamiento de moderado con explosiones que alcanzaron hasta 30.2

MJ (Megajoules), dichas explosiones generaron importantes columnas eruptivas de ceniza, gases y vapor de agua, con columnas que alcanzaron hasta 5,300 msc en dirección predominante al noreste, noroeste, sur, suroeste y sureste, y 6 % de partículas <32 micras. De acuerdo con los parámetros se identificó el mayor promedio de tasa anual de casos de IRAS en Chivay con 2.66 c/h en personas <5 años, para los pobladores >5 años el mayor promedio de tasa anual fue de 0.54 c/h en Chivay. El mayor promedio de tasa anual de casos de EDAS lo presentó Chivay con 0.46 c/h en personas <5 años, para los pobladores >5 años el mayor promedio de tasa anual fue de 0.09 c/h en Chivay. El mayor promedio de tasa anual de casos de Conjuntivitis lo presentó Cabanaconde con 0.07 c/h en personas <5 años, para los pobladores >5 años el mayor promedio de tasa anual fue de 0.02 c/h en Chivay. El mayor promedio de tasa anual de casos de dermatitis lo presentó Chivay con 0.03 c/h en personas <5 años, para los pobladores >5 años el mayor promedio de tasa anual fue de 0.01 c/h en Chivay, y Cabanaconde con una tasa anual de 0.01 c/h.

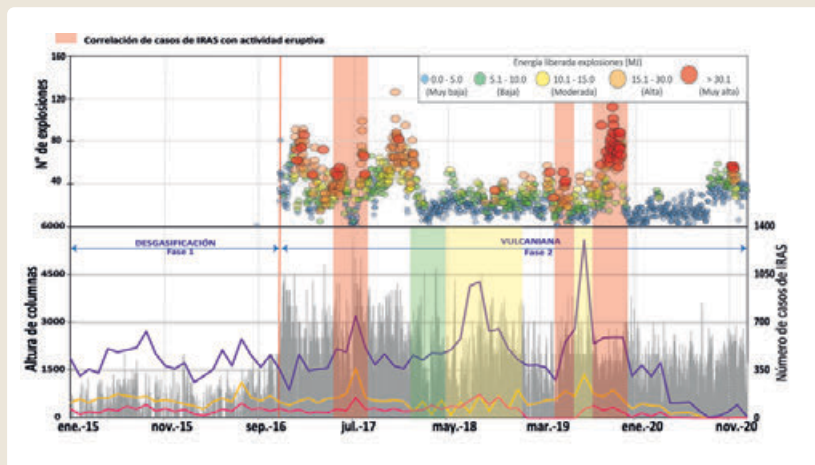
En el 2019 la actividad explosiva mostró un incremento importante comparable con el inicio del proceso eruptivo y significativamente alto, respecto a los años 2017 y 2018, con explosiones que alcanzaron hasta 88.49 MJ (Megajoules) que generaron columnas que alcanzaron hasta 4,400 msc en dirección predominante al noreste, noroeste, suroeste y sureste, y un 12 % de partículas <32 micras. De acuerdo con los parámetros se identificó el mayor promedio de tasa anual de casos de IRAS en Chivay con 1.87 c/h en personas < 5 años, para los pobladores >5 años el mayor promedio de tasa anual fue de 0.48 c/h en Chivay y Cabanaconde. El mayor promedio de tasa anual de casos de EDAS lo presentó Chivay con 0.34 c/h en personas < 5 años, para pobladores >5 años el mayor promedio de tasa anual fue de 0.08 c/h en Cabanaconde. El mayor promedio de tasa anual de casos de Conjuntivitis lo presentaron Chivay y Cabanaconde con 0.03 c/h en personas < 5 años, para los pobladores >5 años el mayor promedio de tasa anual fue de 0.02 c/h en Chivay, Ciudad de Dios y Cabanaconde. El mayor promedio de tasa anual de casos de dermatitis lo presentó Chivay con 0.02 c/h en

< 5 años, para los pobladores >5 años el mayor promedio de tasa anual fue de 0.01 c/h en Chivay.

En el 2020 se registró un total de 7059 explosiones con energía que alcanzaron hasta 46 MJ (Megajoules), con columnas que alcanzaron hasta 3,600 msc en dirección predominante al sureste, noroeste, noreste, suroeste, este y oeste, y 15 % de partículas <32 micras. De acuerdo con los parámetros se identificó el mayor promedio de tasa anual de casos de IRAS lo presentó Chivay con 0.43 c/h en personas <5 años, para los pobladores >5 años el mayor promedio de tasa anual fue de 0.14 c/h en la Chivay. El mayor promedio de tasa anual de casos de EDAS lo presentó Chivay con 0.16 c/h en personas <5 años, para los pobladores >5 años el mayor promedio de tasa anual fue de 0.03 c/h en Chivay. El mayor promedio de tasa anual de casos de Conjuntivitis lo presentó Cabanaconde con 0.06 c/h en personas <5 años, para los pobladores >5 años el mayor promedio de tasa anual fue de 0.01c/h lo presentaron Chivay, Ciudad de Dios y Cabanaconde. El mayor promedio de tasa anual de casos de dermatitis lo presentó Chivay con 0.02 c/h en personas <5 años y Cabanaconde con 0.02 c/h en <5 años, para los pobladores >5 años el mayor promedio de tasa anual fue de 0.01c/h en Chivay y Cabanaconde.

#### V. Análisis mensual de casos de IRAS, EDAS, conjuntivitis y dermatitis según Microred de Salud

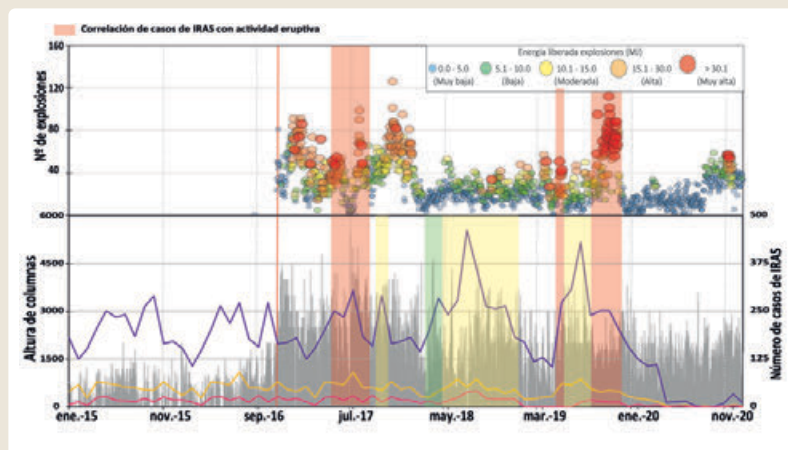
a) Según la Fig. 2 se identificó el aumento de casos de IRAS en personas > 5 años en los meses de mayo a agosto 2017, abril a junio 2019 y agosto a noviembre 2019 la cuales están relacionadas con el incremento de altura de las columnas (> a 3000 m), número (> 40 exp/día) y energía de explosiones (alta a muy alta), lo que indica la afectación de la ceniza en la salud respiratoria (sombreada de color rojo). Así también se identificó aumento de casos en los meses de diciembre 2017 a abril 2018 debido a la temporada de fuertes precipitaciones (sombreado de color verde), durante mayo a diciembre 2018 y junio a agosto 2019 debido a la temporada de heladas (sombreado de color amarillo).



► Fig. 2 - Muestra el número de casos de IRAS en personas > 5 años reportados en las Micro Redes de Salud de Ciudad de Dios (línea rosada), Cabanaconde (línea de color amarillo) y Chivay (línea de color morado), los cuales se correlacionaron con las temporadas de heladas (sombreado de color amarilla), precipitaciones (sombreado de color verde) y actividad volcánica (sombreado de color rojo).

b) Según la Fig. 3 se identificó el aumento de casos de IRAS en personas < 5 años en los meses de abril a agosto 2017, abril a mayo 2019 y agosto a noviembre 2019 la cuales están relacionadas con el incremento de altura de las columnas (> a 3000 m), número (> 40 exp/día) y energía de explosiones (alta a muy alta), lo que indica la afectación de la salud

respiratoria (sombreado de color rojo). Así también se identificó aumento de casos en los meses de marzo a abril 2018 debido a la temporada de fuertes precipitaciones (sombreado de color verde), durante septiembre a noviembre 2017, mayo a diciembre 2018 y mayo a agosto 2019 debido a la temporada de heladas (sombreado de color amarillo).



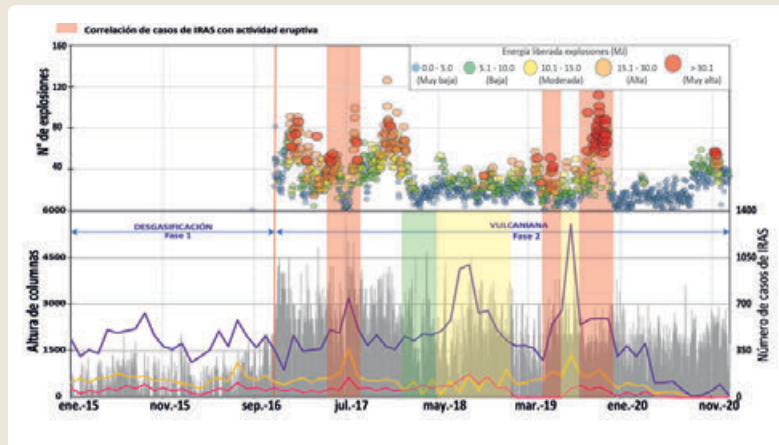
► Fig. 3 - Muestra el número de casos de IRAS en personas < 5 años reportados en las Micro Redes de Salud de Ciudad de Dios (línea rosada), Cabanaconde (línea de color amarillo) y Chivay (línea de color morado), los cuales se correlacionaron con las temporadas de heladas (sombreado de color amarilla), precipitaciones (sombreado de color verde) y actividad volcánica (sombreado de color rojo).

c) Según la Fig. 4 se identificó el aumento de casos de EDAS en personas > 5 años en los meses de diciembre 2016 a febrero 2017, junio a agosto 2017,

noviembre 2017 a enero 2018, diciembre 2018 a mayo 2019 y octubre a noviembre 2019 la cuales están relacionadas con el incremento de altura de las

columnas (> a 3000 m), número (> 40 exp/día) y energía de explosiones (alta a muy alta), lo que indica la afectación de la ceniza en las salud estomacal (sombreada de color rojo). Así también se identificó aumento de casos en los meses de enero a abril 2018 y

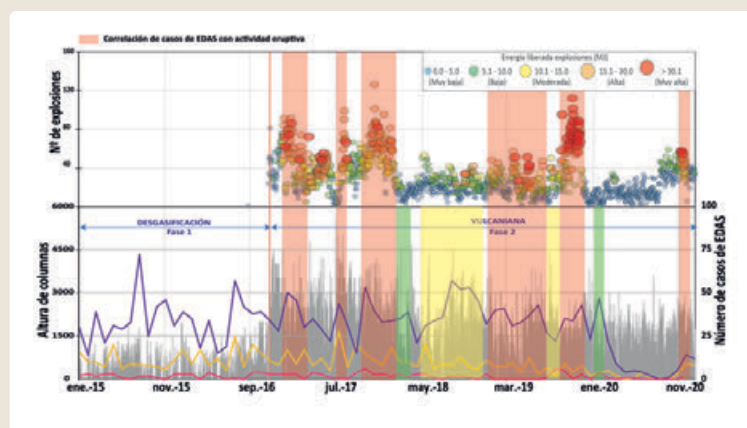
diciembre 2019 febrero 2020 debido a la temporada de fuertes precipitaciones (sombreado de color verde), durante mayo a noviembre 2019 debido a la temporada de heladas (sombreado de color amarillo).



► Fig. 4 - Muestra el número de casos de EDAS en personas > 5 años reportados en las Micro Redes de Salud de Ciudad de Dios (línea rosada), Cabanaconde (línea de color amarillo) y Chivay (línea de color morado), los cuales se correlacionaron con las temporadas de heladas (sombreada de color amarilla), precipitaciones (sombreado de color verde) y actividad volcánica (sombreado de color rojo).

d) Según la Fig. 5 se identificó el aumento de casos de EDAS en personas < 5 años en los meses de enero a marzo 2017, junio a agosto 2017, septiembre 2017 a febrero 2018, diciembre 2018 a julio 2019, agosto a noviembre 2019 y octubre a noviembre 2020 la cuales están relacionadas con el incremento de altura de las columnas (> a 3000 m), número (> 40 exp/día) y energía de explosiones (alta a muy alta), lo que

indica la afectación de la ceniza en las salud estomacal (sombreada de color rojo). Así también se identificó aumento de casos en los meses de enero a marzo 2018 y diciembre 2019 enero 2020 debido a la temporada de fuertes precipitaciones (sombreado de color verde), durante abril a noviembre 2018 y julio a agosto 2019 debido a la temporada de heladas (sombreado de color amarillo).

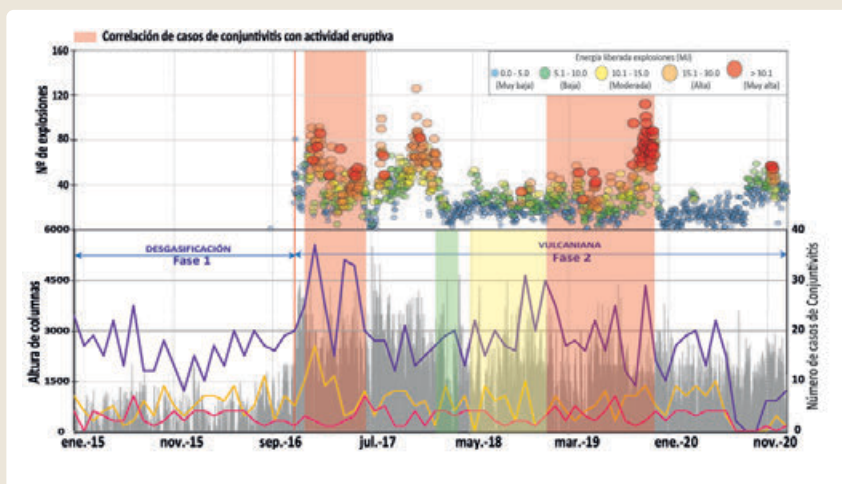


► Fig. 5 - Muestra el número de casos de EDAS en personas < 5 años reportados en las Micro Redes de Salud de Ciudad de Dios (línea rosada), Cabanaconde (línea de color amarillo) y Chivay (línea de color morado), los cuales se correlacionaron con las temporadas de heladas (sombreada de color amarilla), precipitaciones (sombreado de color verde) y actividad volcánica (sombreado de color rojo).



e) Según la Fig. 6 se identificó el aumento de casos de conjuntivitis en personas > 5 años en los meses de diciembre 2016 a junio 2017 y diciembre 2018 a noviembre 2019 las cuales están relacionadas con el incremento de altura de las columnas (> a 3000 m), número (> 40 exp/día) y energía de explosiones (alta

a muy alta), lo que indica la afectación de la ceniza en la salud visual (sombreada de color rojo). Así también se identificó aumento de casos en los meses de enero a marzo 2018 debido a la temporada de fuertes precipitaciones (sombreado de color verde), durante abril a diciembre 2018 debido a la temporada de heladas (sombreado de color amarillo).



► Fig. 6 - Muestra el número de casos de conjuntivitis en personas > 5 años reportados en las Micro Redes de Salud de Ciudad de Dios (línea rosada), Cabanaconde (línea de color amarillo) y Chivay (línea de color morado), los cuales se correlacionaron con las temporadas de heladas (sombreada de color amarilla), precipitaciones (sombreado de color verde) y actividad volcánica (sombreado de color rojo).

f) Según la Fig. 7 se identificó el aumento de casos de conjuntivitis en personas < 5 años en los meses de diciembre 2016 a febrero 2017, abril a junio 2017, septiembre a diciembre 2017, diciembre 2018 a enero 2019, abril a mayo 2019 y agosto a noviembre 2019 las cuales están relacionadas con el incremento de altura de las columnas (> a 3000 m), número (> 40 exp/día) y energía de explosiones (alta a muy alta), lo que indica la afectación de la ceniza en la salud visual (sombreada de color rojo). Así también se identificó aumento de casos en los meses de enero a marzo 2018 y diciembre 2019 a febrero 2020 debido a la temporada de fuertes precipitaciones (sombreado de color verde), durante febrero a julio 2018 y mayo a junio 2020 debido a la temporada de heladas (sombreado de color amarillo).

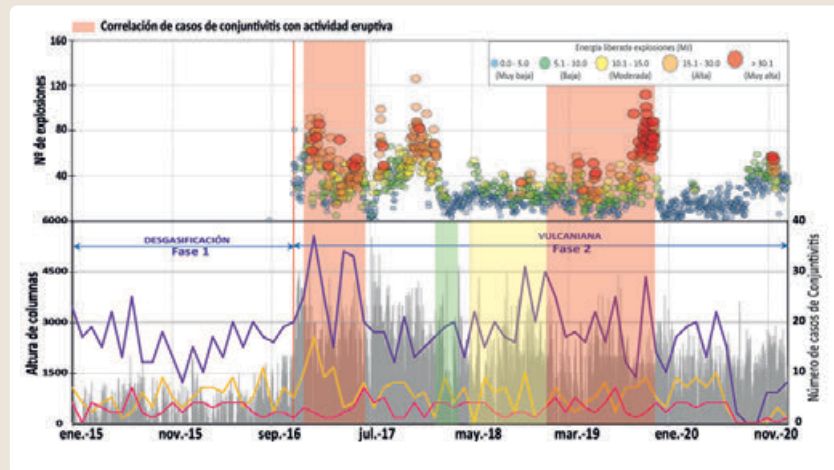
2019 y septiembre a noviembre 2019 las cuales están relacionadas con el incremento de altura de las columnas (> a 3000 m), número (> 40 exp/día) y energía de explosiones (alta a muy alta), lo que indica la afectación de la ceniza en la salud de la piel (sombreada de color rojo). Así también se identificó aumento de casos en los meses de enero a febrero 2018 y diciembre 2019 a febrero 2020 debido a la temporada de fuertes precipitaciones (sombreado de color verde), durante abril a noviembre 2018 debido a la temporada de heladas (sombreado de color amarillo).

g) Según la Fig. 8 se identificó el aumento de casos de dermatitis en personas > 5 años en los meses de diciembre 2016 a junio 2017, octubre 2017 a enero 2018, diciembre 2018 a febrero 2019, abril a agosto

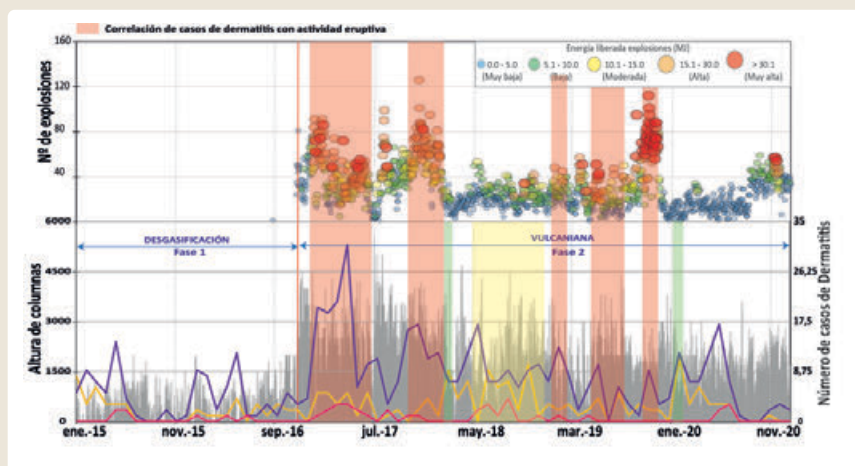
Según la Fig. 9 se identificó el aumento de casos de dermatitis en personas < 5 años en los meses de diciembre 2016 a junio 2017, octubre 2017 a enero 2018, diciembre 2018 a febrero 2019, abril a septiembre 2019 y octubre a noviembre 2020 las cuales están relacionadas con el incremento de altura de las columnas (> a 3000 m), número (> 40 exp/día) y energía de explosiones (alta a muy alta), lo que

indica la afectación de la ceniza en la salud de la piel (sombreada de color rojo). Así también se identificó aumento de casos en los meses de enero a marzo 2018 y diciembre 2019 a marzo 2020 debido a la

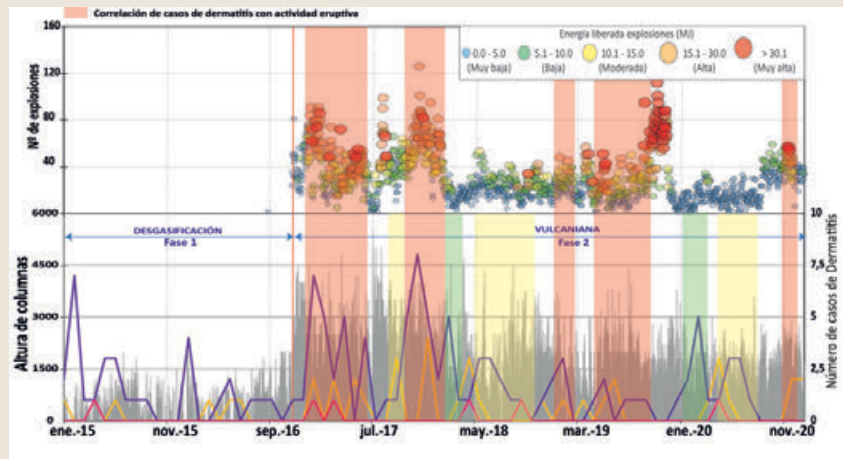
temporada de fuertes precipitaciones (sombreado de color verde), durante agosto a octubre 2017, abril a octubre 2018 y abril a julio 2020 debido a la temporada de heladas (sombreado de color amarillo).



- Fig. 7 - Muestra el número de casos de conjuntivitis en personas < 5 años reportados en las Micro Redes de Salud de Ciudad de Dios (línea rosada), Cabanaconde (línea de color amarillo) y Chivay (línea de color morado), los cuales se correlacionaron con las temporadas de heladas (sombreada de color amarilla), precipitaciones (sombreado de color verde) y actividad volcánica (sombreado de color rojo).



- Fig. 8 - Muestra el número de casos de dermatitis en personas > 5 años reportados en las Micro Redes de Salud de Ciudad de Dios (línea rosada), Cabanaconde (línea de color amarillo) y Chivay (línea de color morado), los cuales se correlacionaron con las temporadas de heladas (sombreada de color amarilla), precipitaciones (sombreado de color verde) y actividad volcánica (sombreado de color rojo).



► Fig. 9 - Muestra el número de casos de dermatitis en personas < 5 años reportados en las Micro Redes de Salud de Ciudad de Dios (línea rosada), Cabanaconde (línea de color amarillo) y Chivay (línea de color morado), los cuales se correlacionaron con las temporadas de heladas (sombreado de color amarilla), precipitaciones (sombreado de color verde) y actividad volcánica (sombreado de color rojo).

## CONCLUSIONES

- Se identificó impacto de la ceniza a través de la correlación de la actividad eruptiva con los casos de IRAS en personas mayores y menores a 5 años: En el año 2017 durante los meses de mayo a agosto afectando al poblado Coporaque. En el 2019 durante los meses de abril a agosto y noviembre a diciembre afectando al poblado de Achoma.
- Se identificó impacto de la ceniza a través de la correlación de la actividad eruptiva con los casos de EDAS en población mayores y menores a 5 años: En diciembre del 2016 afectando al poblado de Tapay. En el 2017 durante los meses de enero a marzo, junio a agosto y septiembre a noviembre afectando al poblado de Tapay. En el 2018 durante los meses de enero a febrero y diciembre afectando a los poblados de Ichupampa y Achoma. En el 2019 durante los meses de julio a noviembre afectando al poblado de Huambo. En el 2020 en los meses de octubre a noviembre en los poblado de Ichupampa y Achoma.
- Se observa una correlación de la actividad volcánica con los casos de conjuntivitis en población mayores y menores a 5 años: En diciembre del 2016 afectando a los poblados Achoma, Ichupampa y Cabanaconde. En el 2017 durante los meses de febrero a junio y septiembre a diciembre afectando a los poblados de Ichupampa y Coporaque. Así también el diciembre del 2018 afectando a los poblados de Cabanaconde, Achoma Ichupampa y Maca. Finalmente en el 2019 en los meses de enero, abril a mayo y agosto a noviembre afectado a los poblados de Cabanaconde, Chivay, Yanque, Lluta, Huambo y Tapay.
- Se observa una correlación de la actividad volcánica con los casos de dermatitis en población mayores y menores a 5 años: En diciembre del 2016 afectando a los poblados de Madrigal e Ichupampa. En el año 2017 durante los meses junio y octubre a diciembre afectando al poblado de Ichupampa. En el 2018 durante los meses de enero y diciembre afectando a los poblados de Ichupampa y Cabanaconde. En el 2019 durante los meses de febrero, abril a noviembre afectando a los poblados de Madrigal e Ichupampa.

## REFERENCIAS

- ▶ Red de Salud Arequipa Caylloma. (2021). Población estimada por edades de la Red de Salud de Arequipa – Caylloma (RSAC). Estadística Población – Red de Salud Arequipa Caylloma (redperifericaaqp.gob.pe)
- ▶ Cronin S-J., Manoharan V, Hedley M-J, P L (2000) Fluoride: a review of its fate, bioavailability, and risks of fluorosis in grazed pasture systems in New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 43:295–321.
- ▶ Howell, C. & Baxter, P. (2006). "The respiratory health hazards of volcanic ash: a review for volcanic risk mitigation. *Bulletin of Volcanology*. Volume 69, pages 1–24. <http://dx.doi.org/10.1007/s00445-006-0052>.
- ▶ Caselli A., Velez M., Agosto M. and Jover M. (2010.) Manual de procedimientos ante caída de cenizas volcánicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales – Universidad de Buenos Aires.
- ▶ Boischio A. (2012). Los impactos a la salud asociados con las cenizas de los volcanes. Organización Panamericana de Salud.  
[https://www3.paho.org/hp/index.php?option=com\\_content&view=article&id=8194:2013-los-impactos-salud-asociados-cenizas-volcanes&Itemid=39797&lang=pt](https://www3.paho.org/hp/index.php?option=com_content&view=article&id=8194:2013-los-impactos-salud-asociados-cenizas-volcanes&Itemid=39797&lang=pt)
- ▶ Organización Panamericana de la Salud. Erupciones volcánicas. (2022).  
<https://www.paho.org/es/temas/erupciones-volcanicas>
- ▶ Tomašek, I., Horwell, C.J., Bisig, C., Damby, D.E., Comte, P., Czerwinski, J., Fink, A., Clift, M., Drasler, B., Rothen-Rutishauser, B. (2018). Respiratory hazard assessment of combined exposure to complete gasoline exhaust and respirable volcanic ash in a multicellular human lung model at the air-liquid interface. *Environ. Pollut.* 238, 977–987.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.115>.



## Estrategias de intervención comunitaria para la reducción del riesgo asociado al volcán Lanín

María Soledad Mele<sup>1</sup>, Sebastián García<sup>2</sup>, Manuela Elissondo<sup>3</sup>, Johanna Kaufman<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Coordinación de Gestión integral del riesgo, Administración de Parques Nacionales, Argentina-smele@apn.gob.ar

<sup>2</sup> Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (OAVV), Servicio Geológico Minero Argentino, Argentina

<sup>3</sup> Dirección de Geología Ambiental y Aplicada, Servicio Geológico Minero Argentino, Argentina

**Palabras clave:** riesgo volcánico, planificación participativa, interculturalidad, desarrollo local sostenible.

El Parque Nacional Lanín ocupa una superficie de 412.000 ha ubicadas al suroeste de la provincia del Neuquén, en la República Argentina (Fig.1). El límite oeste del área protegida sigue la línea de frontera con la República de Chile. Hacia el norte el límite está constituido en su mayor parte por rasgos naturales (costa norte del lago Ñorquinco, río Pulmarí, costa norte del lago Pilhue). Al este del Parque se encuentran las ciudades de Aluminé, Junín de los Andes y San Martín de los Andes. Finalmente, hacia el sur, el Parque Lanín limita con el Parque Nacional Nahuel Huapi, siguiendo en su mayor parte líneas catastrales.

El volcán Lanín, que le da el nombre al Parque, es un estratovolcán de edad pleistocena media a holocena (aprox. entre 200.000 y 600 años) (Lara, 2004), posee una altura de 3.728 m.s.n.m y forma parte de la cadena volcánica de orientación noroeste-sureste que incluye los volcanes Villarrica, Quetupillán y Lanín. La erupción más reciente ocurrió hace menos de mil años (ca. <1.000 años, Lara, 2004).

El Lanín se caracteriza por poseer un estilo eruptivo predominantemente efusivo (Jara et al. 2020). Se encuentra clasificado, dentro del ranking de riesgo relativo para Argentina, en el 4to lugar (Elissondo et al., 2017). Los escenarios eruptivos se asocian a coladas de lava, lahares por fusión de hielo o nieve, y en menor medida, caída de tefras y eyectos balísticos, flujos piroclásticos (Jara et al. 2020).

En el Parque Nacional Lanín, coexisten diversos actores territoriales, que incluyen a Pueblos Originarios Mapuche y pobladores criollos asentados al pie del volcán, propietarios privados, agentes de conservación del área protegida, concesionarios, permisionarios, organismos/fuerzas (Gendarmería, Ejército, Aduana), así como los miles de turistas que realizan actividades recreativas, turísticas y deportivas en el volcán.

Específicamente las comunidades de la cuenca del lago Huechulafquen, que habitan en la cara sur del volcán Lanín, totalizan 167 personas agrupadas en 65 poblaciones, 38 poblaciones pertenecientes a la Comunidad Lafquenche y 27 poblaciones de la Raquithue (INDEC, 2010) (Fig.2).

Las estrategias de intervención comunitaria para la reducción del riesgo asociado al volcán Lanín que se presentarán a continuación, tienen como génesis el cambio en el nivel de alerta volcánica (nivel de alerta



► Fig. 1 - Localización a nivel Nacional y Provincial del Parque Nacional Lanín.

técnico) para este volcán ocurrido en febrero de 2017, sucediendo esto por primera vez en la historia desde que el volcán se encuentra monitoreado, pasando de alerta técnica verde a alerta técnica amarilla, el cual fue emitido por el Servicio Nacional de Minería y Geología (SERNAGEOMIN) de Chile y retransmitido a la población argentina a través del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), tras constatar un incremento en la actividad sísmica del volcán por sobre su línea de base de actividad (SERNAGEOMIN, 2017).

Este evento puso en evidencia que la posibilidad de ocurrencia de procesos eruptivos del volcán Lanín, no estaba contemplada dentro de los escenarios de riesgo posibles a escala territorial, tanto por parte de las autoridades y las comunidades que habitan en el Parque, así como por la población del Municipio de Junín de los Andes, localidad más cercana al volcán (50 km al este).

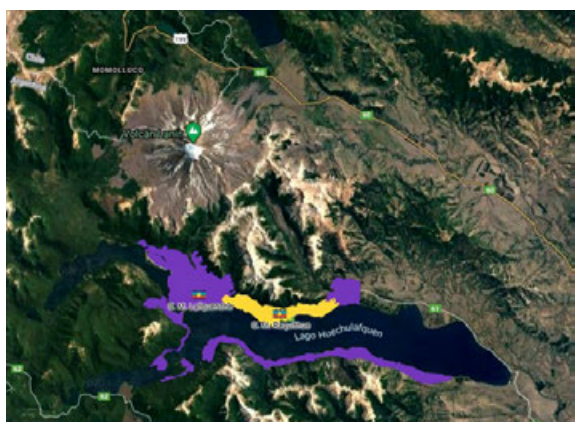
Si bien este fenómeno no derivó en un proceso eruptivo, demostró la urgente necesidad de avanzar con estudios complementarios para determinar la peligrosidad y el riesgo asociado al volcán, así como el desarrollo de estrategias e instancias de planificación participativa a partir de los cuales poder definir mecanismos para la prevención, preparación y respuesta ante una emergencia por procesos eruptivos del volcán Lanín.

Desde el suceso ocurrido en 2017, a lo largo de los años se han dado una serie de hitos que han aportado, a la generación de lazos de confianza en los vínculos, permitiendo la adopción de estrategias tendientes a la construcción colectiva de saberes para la gestión integral del riesgo de desastres, entre la institucionalidad, el ámbito científico tecnológico y las comunidades que habitan en el territorio.

En primera instancia, posteriormente al evento ocurrido por el cambio en el nivel de alerta técnico del volcán, se realizó un taller entre la Administración de Parques Nacionales (APN), el Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), y las Protecciones Civiles de Junín de los Andes y Provincia del Neuquén. El mismo se llevó a cabo en la zona centro del Parque Nacional, en el centro comunitario del Ayo. Raquitue, y contó con la participación de las autoridades (Lonkos) de las comunidades mapuche. En dicha oportunidad, el SEGEMAR presentó y difundió en la comunidad por primera vez los posibles escenarios de peligro volcánico asociados a procesos eruptivos del volcán Lanín. Asimismo, dicho espacio de encuentro permitió la reflexión respecto de las distintas dimensiones de la incertidumbre sobre la gestión del riesgo volcánico del Lanín, permitiendo por un lado, visibilizar las limitaciones en el estado del conocimiento (incertidumbre técnica) y por otro lado, las indeterminaciones en cuanto a competencias institucionales y aspectos normativos (incertidumbre social).

Es importante destacar que producto del intercambio entre los actores se estableció como problema principal que los mecanismos e instrumentos de prevención, preparación y respuesta frente a la amenaza de procesos eruptivos vinculados al volcán Lanín, no se encontraban articulados, y a su vez no contemplaban o incorporaban la plena participación y cosmovisión de las poblaciones que habitan en las proximidades del volcán, así como a la gran cantidad de turistas que acuden a la zona, aumentando las condiciones de vulnerabilidad y la susceptibilidad de la población frente al riesgo de ser afectada por un evento de estas características.

Entre las causas principales, se encontraban además del poco conocimiento del riesgo volcánico y la falta de consenso entre los actores involucrados, la



► Fig. 2 - Localización comunidades Mapuche Raquitue y Lafquenche en la cara sur del volcán Lanín, en la cuenca del lago Huechulafquen.

diferencia entre las cosmovisiones y percepciones frente a la amenaza volcánica y entendimiento del territorio; la desarticulación, falta de diálogo e intercambio fluido entre los actores locales para actuar frente al fenómeno volcánico; la elaboración de un Plan de Contingencia del Volcán Lanín por parte de las instituciones sin la integración y participación de las comunidades desde un principio; la ausencia de acuerdos frente a la respuesta ante una emergencia, así como las fallas en la comunicación efectiva a la población por parte de las protecciones civiles.

En este marco, se desplegaron una serie de acciones y actividades para avanzar estratégicamente tanto en la articulación interinstitucional como en el abordaje técnico de la amenaza (factor físico interno del riesgo).

Por un lado, se procedió a la suscripción de un Convenio marco de Colaboración entre la APN y el SEGEMAR para el estudio de la peligrosidad geológica en el ámbito de las áreas protegidas bajo su jurisdicción.

Por otra parte, en relación al conocimiento técnico de la amenaza, en 2018 en la ciudad de San Martín de los Andes y las inmediaciones del volcán Lanín, se llevó a cabo el primer "Workshop Trinacional de Modelado de Lahares" (Fig. 3), organizado de forma conjunta entre el SEGEMAR por parte de Argentina, el SERNAGEOMIN de la República de Chile y el Programa de Asistencia para Desastres Volcánicos (VDAP) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), e incluyó a profesionales de protección civil de Junín y San Martín de los Andes y profesionales del Parque Nacional Lanín.

Este taller permitió, por primera vez para este volcán, establecer un espacio conjunto de intercambio de conocimientos y de cooperación binacional, que posteriormente dio lugar a la realización de forma conjunta entre ambos países del mapa binacional de peligros del volcán Lanín (Jara et al. 2020). Es así, como durante el período comprendido entre 2019 y 2020, en el marco del Acuerdo de Cooperación y Asistencia Técnica firmado entre el SEGEMAR y el SERNAGEOMIN, que estipula el compromiso de ambos países de realizar de forma conjunta mapas de peligrosidad de volcanes limítrofes (Elissondo et al. 2022), se confeccionó el nuevo mapa de peligros del volcán Lanín (Jara et al. 2020).



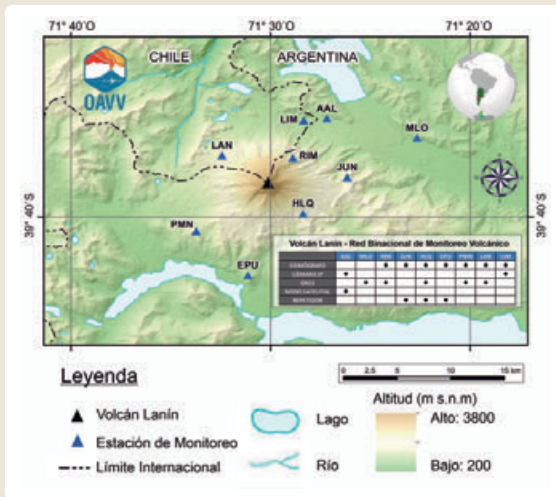
► Fig. 3 - Workshop Trinacional de Modelado de Lahares, San Martín de los Andes, Argentina, 2018.

Otro hito fundamental, fue la instalación de la Red de Monitoreo Volcánico del volcán Lanín sobre territorio argentino por parte del Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (OAVV) del SEGEMAR, en el año 2021 (Fig. 4) (García y Badi, 2021). Esto comprendió la instalación de cinco estaciones sismológicas de banda ancha, tres estaciones GNSS y dos cámaras IP visuales, que se complementaron con las dos estaciones de monitoreo existentes en territorio chileno, conformando una red binacional de monitoreo volcánico, robusteciendo y mejorando de este modo el monitoreo y vigilancia de la actividad de este volcán.

En virtud de los avances alcanzados hasta ese momento, en noviembre del 2021, se llevó a cabo la Primera Jornada de Reducción del Riesgo de Desastre frente a la amenaza por reactivación de la actividad volcánica del Lanín, en el marco del desarrollo local sostenible. En dicha oportunidad, el Departamento de Comanejo del Parque Nacional Lanín, junto a integrantes de las comunidades indígenas (Raquithue y Lafquenche), presentaron un proyecto de propuesta para la incorporación de la figura de Sitio Natural Sagrado (SNS) –figura establecida por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN)– como categoría de manejo dentro del Parque Nacional Lanín, por su significancia espiritual y cultural para los Pueblos Originarios. La declaración del volcán Lanín como SNS tiene por objeto reforzar la conservación de la biodiversidad y, al



mismo tiempo, mantener y conservar la cultura de las comunidades indígenas.



► Fig. 4 Mapa de la red binacional de monitoreo volcánico perteneciente al OAVV del SEGEMAR de Argentina y al OVDAS del SERNAGEOMIN de Chile.

A su vez, tiene como finalidad, entre otras cosas, el reconocimiento del rol histórico que han desempeñado los Pueblos Originarios en el manejo del área y, por ende, sus derechos e intereses en continuar ejerciéndolos. Esta iniciativa que se venía gestando desde el año 2008, cuando las autoridades poéticas y filosóficas Mapuche “acudieron al llamado del volcán Lanín (pijañ mawiza), quién les ordenó que recordaran el rol de ser guardianes de (ixofij mogen) la diversidad de vidas, para reestablecer el equilibrio que necesitaba el volcán”, tuvo el impulso que requería para su implementación en la jornada en cuestión. Desde el punto de vista simbólico, el volcán otorga identidad a las comunidades originarias, rurales y vecinas ubicadas en su alrededor, por lo tanto es un valor intercultural al ser significativo para una diversidad de culturas. Se lo considera como concentrador de valores espirituales, de motivación creativa y desde el punto de vista afectivo, como sitio de homenaje, cómo generador de paz, símbolo de grandeza y conexión con la naturaleza.

Sobre la base de esta iniciativa presentada por las comunidades, desde la APN se presentó el “Plan de

acción para la preparación ante la emergencia y fortalecimiento de capacidades de las poblaciones cercanas al volcán Lanín, orientado a la promoción de la interculturalidad en el marco de la reducción del riesgo de desastres y el desarrollo local sostenible”, el cual forma parte del Plan Nacional de Reducción de Riesgo de Desastres (PNRRD 2018-2023), del Sistema Nacional para la Gestión Integral del Riesgo y la Protección Civil (SINAGIR).

El Plan de acción se enmarcó dentro de las acciones, estrategias y herramientas para promover el proceso de elaboración de un plan de preparativos en el ámbito territorial, desde una perspectiva holística e inclusiva de reducción de riesgo de desastres y en el marco de la planificación estratégica y el desarrollo local sostenible mediante la promoción del empoderamiento de los actores territoriales. El mismo promueve una visión integral que surge de una necesidad concreta de inmediata aplicación práctica (siendo que es una demanda que surge desde el territorio); además, valoriza el aprovechamiento de los recursos endógenos y locales, así como el fortalecimiento y rescate de la cultura y el saber de los pueblos originarios; la inclusión y concertación social, la participación y la igualdad de oportunidades; e integra las cuatro esferas de la sostenibilidad planteando una visión de corto, mediano y largo plazo.

El Plan de Preparación presenta un marco para integrar e incluir a las poblaciones que habitan en las proximidades del volcán Lanín y al turismo, en la formulación de estrategias y mecanismos destinados a la prevención, preparación y respuesta frente a la amenaza de procesos eruptivos vinculados al volcán. Esto se lleva adelante a través de cinco programas y cinco proyectos, con sus respectivas actividades.

Dentro de los programas y proyectos, tres se basan en estrategias de intervención comunitaria:

### 1. Diálogo e intercambio de saberes y cosmovisiones para la reducción del riesgo de desastres

Consiste en generar un espacio de diálogo e intercambio de saberes, cosmovisiones, percepciones, (RAKIZUAM -pensamiento) entre la comunidad (saber ancestral, local) y la



Institucionalidad (saber occidental). Posibilitando de esta manera producir conocimiento (KIMVN) para la gestión integral del riesgo volcánico del Lanín, desde un enfoque multidisciplinario, intercultural, armónico, sistémico e incluyente, con el fin último de salvaguardar la integridad psico-física (así como la cultura e identidad) de las comunidades más expuestas frente al riesgo volcánico.

Los objetivos específicos incluyen: la generación de instancias de planificación participativa; la armonización y establecimiento de puntos de conexión entre el saber local y el saber científico-técnico, en un marco de igualdad, libertad, respeto y confianza, a través del diálogo en torno al riesgo volcánico, para la construcción colectiva del Plan de Contingencia; el fortalecimiento del vínculo de las comunidades con el volcán Lanín, promoviendo la declaración y gestión del Pijan Mawiza como Sitio Sagrado, reconociendo su dimensión espiritual, filosófica y cultural, a través de procesos de gestión integral del riesgo.

En este contexto, se realizó un taller de intercambio de saberes, el cual tuvo lugar el 30 de abril de 2022, en la Escuela EP No. 252 de Huechulafquen (Fig. 5).

Para este intercambio realizado se planteó la utilización de la metodología ROSA (acrónimo de Recuerdo, Observación, Sueño y Algoritmo) (Peralta, 2013), tomada de un intercambio con la República de Colombia, donde se llevó a cabo la estrategia de "Diálogo para la reducción de los riesgos volcánicos en el Municipio de Páez- Cauca entre la Asociación de Cabildos Indígenas Nasa ÇXHÂÇXHA y el OSSO, en el marco de la reactivación del Anciano Canoso- Volcán Nevado del Huila" (Peralta, 2013).

La metodología ROSA consiste en un mecanismo interpretativo para valorar, recuperar, registrar y resignificar los saberes de los actores que interactúan en una experiencia de encuentro entre culturas divergentes. Permite ordenar y entender la relación entre dos mundos y articular saberes que están dispersos para motivar la acción. Se basa en la complementariedad y reciprocidad.

La construcción y consolidación del conocimiento surgido a través de la herramienta ROSA, se verá reforzada a través de otro de los programas planteados



► Fig.5 Taller de Diálogo e intercambio de saberes y cosmovisiones en la EP No. 252 Huechulafquen.

en el Plan de Preparación, la construcción de un Mapa de Riesgo comunitario. La elaboración colectiva de un mapa de riesgo, que conlleva procesos de interacción y de comunicación entre los participantes (los cuales aportan diferentes tipos de saberes) apunta a alcanzar una imagen colectiva del territorio.

Este ejercicio además de reforzar el reconocimiento del territorio, pretende ser una estrategia política y cultural, que contribuya a valorar y resignificar los saberes tradicionales sobre el territorio y, de esta manera, a su legitimación. El desarrollo de la estrategia de elaboración del Mapa de Riesgo comunitario, se ha realizado de manera conjunta con el SEGEMAR, la Comisión Cascos Blancos del Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto y expertos en temáticas de interculturalidad.

## 2. Consolidación de un Sistema de Alerta Temprana mixto

Este programa implica la construcción de un sistema integral y articulado de observación del territorio para la toma de decisiones, a través de un proceso participativo y de autogestión, que permita interpretar sus señales, alertar y anticipar oportunamente a la comunidad, frente a los diversos fenómenos asociados al proceso volcánico del Volcán Lanín.

El SAT mixto está orientado al fortalecimiento de una cultura de observación continua en el territorio por parte del Estado y de las señales espirituales y

naturales por parte de comunidad Mapuche, en el marco del desarrollo local sostenible y la reducción del riesgo de desastre, con la finalidad de contribuir a la pervivencia y la protección de la vida en el territorio del pueblo indígena en todos los niveles (social - cultural, ambiental, económico y político), en el corto, mediano y largo plazo. Este programa tiene su base en la experiencia de desarrollo del "Plan de acción para el fortalecimiento del Sistema de Alerta Temprana - SAT, en el Resguardo indígena de Huila, Municipio de Páez - Cauca, Colombia" (Peralta, 2007).

### 3. Revisión y reelaboración del Plan de Contingencia del Volcán Lanín vigente

Este programa se fundamenta sobre la base de la importancia que tiene el hecho de que los planes de acción sean contruidos en conjunto con los actores que se encuentran en el territorio de manera participativa. Esto debido a que son los principales afectados ante la materialización de una amenaza. La participación es un mecanismo de legitimación,

cohesión social y de garantía de pertenencia y, es también, la piedra angular de la apropiación del proceso de reducción del riesgo volcánico. Por lo cual, el Plan de Preparación contempla la reelaboración del Plan de Contingencia del volcán Lanín, sobre la base de los programas de diálogo e intercambio de saberes y cosmovisiones, el mapa de riesgo comunitario y el desarrollo del SAT mixto, aquí planteados.

Las estrategias de intervención comunitarias aquí descritas representan la primera experiencia nacional de reducción del riesgo volcánico desde un abordaje intercultural, en un territorio complejo que combina un área natura protegida de jurisdicción nacional, una figura de conservación avalada por UICN, donde coexisten una diversidad de miradas, cosmovisiones y percepciones, que se conjugan para la construcción de nuevo conocimiento y formas de interpretar, entender y sentir el territorio. Se espera que las experiencias aquí ganadas puedan servir para futuras experiencias de reducción del riesgo de desastres.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el trabajo continuo y sostenido del equipo de trabajo del Servicio Geológico Minero Argentino, así como de los referentes de comanejo y autoridades del Parque Nacional Lanín.

## REFERENCIAS

- ▶ Elissondo, M., Farías, C., Collini, E. (2017). Evaluación del riesgo volcánico relativo en Argentina. In Congreso Geológico Argentino, No. 20, Actas electrónicas: 36-37. San Miguel de Tucumán.
- ▶ García, S., Badi G. (2021). "Towards the development of the first permanent volcano observatory in Argentina". *Volcanica* 4(S1), págs. 21-48. doi: 10.30909/vol.04.S1.2148.
- ▶ INDEC. (2010). Censo Nacional de Población, Hogares y viviendas 2010. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, República Argentina.

[https://redatam.indec.gob.ar/argbin/RpWebEngine.exe/PortalAction?&MODE=MAIN&BASE=CPV2010A&MAIN=WebServerMain.inl&\\_ga=2.30021503.1353085531.1605787595-1988076881.16056294566](https://redatam.indec.gob.ar/argbin/RpWebEngine.exe/PortalAction?&MODE=MAIN&BASE=CPV2010A&MAIN=WebServerMain.inl&_ga=2.30021503.1353085531.1605787595-1988076881.16056294566)(Últimavisita 16/04/2019).

- ▶ Jara, G., Elissondo, M., Lara, L., Kaufman, J., Sruoga, P. (2020). Peligros del Volcán Lanín, región de la Araucanía y provincia de Neuquén. Servicio Nacional de Geología y Minería-Servicio Geológico Minero Argentino, Publicación Geológica Multinacional 32. En Edición.
- ▶ Lara, L. (2004). Geología del volcán Lanín, Región de La Araucanía. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta de Geología de Chile, Serie Geología Básica 87: 18 p. 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- ▶ Mele, M., S. (2019). "Plan de acción para la preparación ante la emergencia y fortalecimiento de capacidades de las poblaciones cercanas al volcán Lanín, orientado a la promoción de la interculturalidad en el marco de la reducción del riesgo de desastres y desarrollo local sostenible". Especialización en Desarrollo Local Sostenible y Reducción del Riesgo de Desastres, OIT.
- ▶ Peralta Buritica, H., A. (2013). Diálogo para la reducción de los riesgos volcánicos en el Municipio de Páez- Cauca entre la Asociación de Cabildos Indígenas Nasa ÇXHÂÇXHA y el OSSO, en el marco de la reactivación del Anciano Canoso- Volcán Nevado del Huila. Universidad de Valle. Instituto de Educación y Pedagogía. Maestría en Educación con énfasis en educación popular y desarrollo comunitario.
- ▶ Peralta Buritica, H., A. (2007). Plan de acción para el fortalecimiento del Sistema de Alerta Temprana -SAT, en el Resguardo indígena de Huila, Municipio de Páez - Cauca, Colombia". Especialización en Desarrollo Local Sostenible y Reducción del Riesgo de Desastres, OIT.
- ▶ Sernageomin. (2017). Reportes de actividad volcánica de la región de La Araucanía. Servicio Nacional de Geología y Minería. Publicación online: <http://sitiohistorico.sernageomin.cl/lista-region-9.php> (Última visita 30/04/2019).
- ▶ Elissondo, M., Gho, R., Sruoga, P., Toloza, V., Kaufman, J., Lara, L. E., Jara, G., Amigo, A. (2022). Mapas de Peligrosidad Volcánica Binacionales: un paso fundamental para la implementación de estrategias transfronterizas de Reducción de Riesgo. XXI Congreso Geológico Argentino, Actas. Puerto Madryn.

## Afectación por ceniza volcánica distal a grande ciudad: el caso Sangay - Guayaquil (Ecuador)

Daniel Moran-Zuloaga<sup>1,7</sup>, Maurizio Mulas<sup>2</sup>, Wilson Merchan-Merchan<sup>3</sup>, Emilio Rodríguez-Caballero<sup>4,5</sup>, David Walter<sup>6</sup>, Julio Cáceres<sup>7</sup>, Mauricio Cornejo<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Department of Chemistry, Pharmacy and Geoscience. Johannes Gutenberg University Mainz. Saarstrasse 21, 55122 Mainz, Germany.

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias de la Tierra. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil- Ecuador.

<sup>3</sup> School of Aerospace and Mechanical Engineering. University of Oklahoma, Norman, OK 73019 USA.

<sup>4</sup> Agronomy Department, University of Almeria, Almeria, Spain.

<sup>5</sup> Research Centre for Scientific Collections from the University of Almeria (CECOUAL), 04120 Almeria, Spain.

<sup>6</sup> Multiphase Chemistry Department. Max Planck Institute for Chemistry, 55128 Mainz, Germany

<sup>7</sup> Centro de investigación y Desarrollo en Nanotecnología. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil Ecuador.

**Palabras clave:** Sangay, transporte distal, análisis de cluster.

El Ecuador continental está rodeado por ~85 volcanes cuaternarios de los cuales una cuarta parte aún se encuentran activos (Parra et al. 2016). En los últimos veinte años, Tungurahua y Reventador se encontraban entre los volcanes más activos y alertan constantemente a las comunidades circundantes sobre las columnas de ceniza volcánicas que se disipan en la atmósfera y sus emisiones volcánicas suelen precipitarse en poblaciones aledañas (Carn et al. 2011). El Volcán Sangay, es un volcán activo ubicado en la parte suroeste de Ecuador, tiene una altitud de 5286 m snm y ha sido un tema de atención debido a su dinámica eruptiva en los últimos cuatro años.

En el año 2020 el volcán Sangay tuvo una actividad volcánica débil desde desgasificación hasta débil emisiones de ceniza. Eventualmente incrementó la actividad volcánica, con emisiones de ceniza volcánica que alcanzaron Guayaquil, una ciudad de 3 millones de habitantes ubicada en el sur -Sector occidental del Ecuador, y que se vio afectada por caída de ceniza volcánica fina. Durante todos estos eventos, la ciudad estuvo cubierta por una capa de ceniza volcánica de un espesor promedio menor de 1 mm.

El grado de fragmentación de las partículas depende del grado de explosividad. La ceniza volcánica puede alcanzar cientos de kilómetros y convertirse en penachos volcánicos si las condiciones meteorológicas son favorables (Lettino et al. 2012) o dar una vuelta completa al mundo como en el caso de la erupción del Pinatubo en 1991 (McCormick et al. 1995) y Tonga Hunga (Zuo et al. 2022). La inhalación

de cenizas volcánicas puede causar irritación de la piel y los ojos, enfermedades respiratorias como asma y bronquitis (Forbes et al. 2003) hasta silicosis y cáncer de pulmón (Lelieveld et al. 2015). Además, la ceniza volcánica suele tener elementos tóxicos como Cl, S, Na, Ca, K, Mg, F, Pb, Hg, Cu, Zn, Cd y As. La enfermedad respiratoria puede ocurrir sólo si las partículas son lo suficientemente pequeñas como para entrar en el sistema respiratorio hasta los bronquios y llegar a los pulmones (Lelieveld et al. 2015). En general, las partículas de ceniza con un tamaño de entre 10 y 15  $\mu\text{m}$  pueden causar irritación solo en la garganta, mientras que las partículas con diámetros inferiores a 10  $\mu\text{m}$  causan asma y bronquitis (Pohlker et al. 2021). Las partículas finas tienen diámetros inferiores a 2.5  $\mu\text{m}$  y causan enfermedades respiratorias graves y el análisis del tamaño de grano podría ayudar a revelar si la ceniza es un peligro potencial para la salud (Horwell 2007). Además, altas concentraciones de SO<sub>2</sub> pueden producir daño a la vegetación (i.e. Weiser et al. 2022) e inflamación e irritación del sistema respiratorio. La comprensión de la morfología puede ser útil para comprender los peligros que presenta la ceniza a medida que se desplaza hacia áreas más pobladas, como los efectos nocivos para la salud de la población, la seguridad y el daño irreversible de maquinaria. El presente estudio tiene como objetivo el estudio de la relación de parámetros de material particulado PM<sub>2.5</sub> y su relación meteorológica con eventos de largo alcance como las emisiones volcánicas de Sangay. Adicionalmente se busca realizar una descripción de las partículas depositadas, estudiar su tamaño, y morfología de muestras seleccionadas durante trece



meses continuos y determinar el análisis de las trayectorias de la ceniza desde el volcán hacia la ciudad de Guayaquil.

Las muestras de material particulado aerodinámico PM2.5, se recogieron a través de membranas de carbono (disco de 12 mm de diámetro marca Agar Scientific) durante aproximadamente 4-7 días. Las muestras de cenizas volcánicas fueron recolectadas en Guayaquil siguiendo la metodología de Horwell (2007). Las distribuciones de tamaño de grano se determinaron mediante un analizador de distribución de tamaño de partículas por dispersión láser (LA-300 Horiba) analizando las partículas comprendidas entre 4 a 11 (62 a 0.5 micras). Los principales parámetros estadísticos se determinaron de acuerdo con (Folk 1980) utilizando el software SFT. El análisis de datos se realizó con la versión del programa RR 3.5.1 junto con RStudio y los paquetes openair, maps, maptools (Grange et al. 2016). El contador de partículas se midió con el monitor de calidad de aire ambiental para PM2.5 acoplado a una estación climática ambiental modelo WS-2000 ubicada en Guayaquil. El FEI-SEM con espectrometría de energía integrada (EDS) se utilizó para estudiar la composición química de muestras seleccionadas utilizando el software de espectro Génesis (Baron y Willeke 2001).

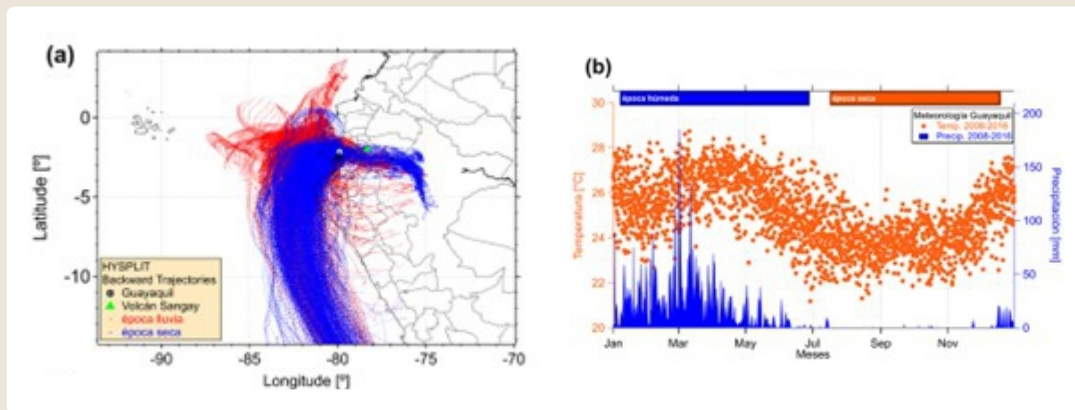
De acuerdo con el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador (IG-EPN), hubo al menos tres llegadas de ceniza volcánica a Guayaquil durante 2020 y 2021 (9 de junio de 2020, 20 de septiembre de 2020, 13 de abril de 2021).

La muestra de junio de 2020 es unimodal y tiene un valor medio de 55.8  $\mu\text{m}$ . Está mal clasificada, con distribución asimétrica (-0.383  $\mu\text{m}$ ) y leptocúrtico (1.293). Las partículas de ceniza de la erupción de junio de 2020 son de dos tipos principales: un vidrio de color oscuro, baja cristalinidad, buena redondez, vesículas bien con vesículas redondeadas de 2 a 4 micrómetros (Fig. 2-a) y vesículas bajas angulares de color claro. forma de amigdaloides y baja redondez, pero con vesículas de 100 micras de tamaño (Fig. 2-b). La muestra de septiembre de 2020 es bimodal con un valor medio de 35.2  $\mu\text{m}$ . Está mal clasificada, asimétrica hacia el muy fino (-0.382  $\mu\text{m}$ ) y mesocúrtico (1.293). Las partículas de ceniza de

septiembre de 2020 son de color claro, angulares a esféricas (Fig. 2-c) a alargadas (Fig. 2-d) de baja redondez con vesículas de unas 10 micras. En el evento de septiembre se alcanzó un pico alto de hasta 100  $\mu\text{g m}^3$  de PM2.5, aunque se registró por un período breve (< 1 h). La muestra caída en Guayaquil en abril de 2021 es unimodal con un valor medio de 41,1  $\mu\text{m}$ . Está mal clasificada, asimétrica hacia el fino (-0.359  $\mu\text{m}$ ) y leptocúrtico (1.439). Las partículas aparecen de color claro, bien angulares (Fig. 2-e), alargadas con vesículas redondeadas de 3-4 micrones de tamaño (Fig. 2-f). Todas las muestras de las tres erupciones no tienen cristales libres y se observaron raros fragmentos líticos.

Usando un análisis de trayectorias de masas de aire con el modelo de trayectorias integrada lagrangiana híbrida HYSPLIT por sus siglas en inglés, y su interface web Real-time Environmental Application and Display System READY, para mayor información referirse al siguiente enlace:

<https://www.ready.noaa.gov/index.php>. En nuestro caso se usó la información del satélite meteorológico de datos de asimilación global GDAS de los datos de Guayaquil en el 2020 evidencia altas precipitaciones húmedas en el primer semestre de cada año (Fig 1 a), lo cual corresponde a la estacionalidad durante la época húmeda con temperaturas de  $27 \pm 2$  °C y humedad relativa de 85%. bajo determinadas condiciones, puede producir esas precipitaciones húmedas ocasionales que se refieren a la figura 1 a-b. Durante la segunda mitad del año, las temperaturas descienden y es frecuente un ambiente nublado, existe ausencia de lluvia, la temperatura es de  $25 \pm 2$  °C y la humedad relativa media 60%, relativamente inferior a la de la época de lluvias (Fig. 1 b). La velocidad y la dirección del viento rondan los 2 m/s y ocurrieron desde las direcciones oeste y norte durante la primera mitad del año, mientras que la velocidad del viento aumentó levemente a 2.5 m/s con vientos dominantes provenientes de las regiones sur y suroeste. Curiosamente, hay una alta incidencia de ráfagas de viento que suelen alcanzar hasta 12 m/s con mayo durante la segunda mitad del año. Estos datos coinciden con los presentados por el análisis de trayectorias de masas de aire usando HYSPLIT (Fig 1 a).



► Fig. 1 Análisis de las direcciones de masas de aire; b) Gráfica de la temperatura y la precipitación anual durante el 2008-2016, proyecto Lab FREE y bomberos de Guayaquil.

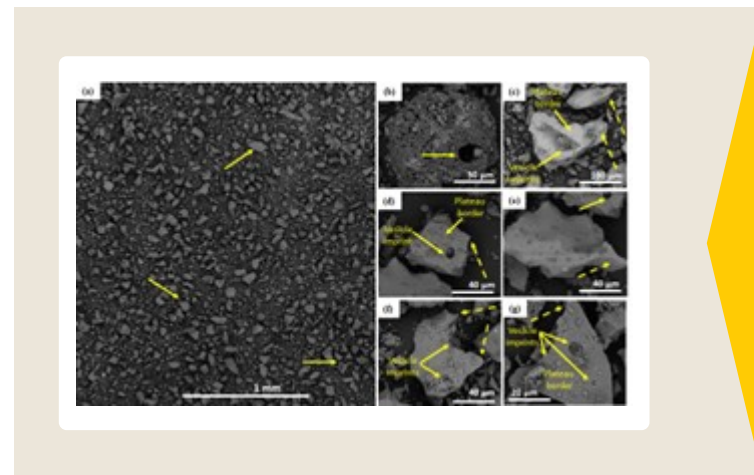
En base a lo anteriormente mencionado, nuestros resultados muestran que existe una relación directa entre la estacionalidad y el alcance de las cenizas volcánicas a larga distancia. Es decir, en la época de lluvia debido a condiciones de alta precipitación y humedad ambiental, la lluvia ayuda a la deposición de ceniza volcánica y previene que se propague a largas distancias. Por otra parte, durante la época seca, se presentan condiciones apropiadas para el desplazamiento de partículas volcánicas, debido a la ausencia de lluvia, condiciones ambientales más secas y el incremento de las corrientes de aire, a manera de depositación seca. Cabe enfatizar, que todo eso anteriormente mencionado, depende de la intensidad de las explosiones volcánicas y la energía expulsada por el volcán.

Por otra parte, la morfología externa de los fragmentos de tamaño superior a  $2 \mu\text{m}$  varía de esférica a angulosa a altamente irregular. Otras partículas tienen aspecto rugoso, curvo y de forma irregular. Otros fragmentos tienen una morfología alargada y su superficie parece ser lisa (fluidal).

Las vesículas aparecen vacías y ocasionalmente llenas de un material de grano más fino. Además, los granos  $>2 \mu\text{m}$  tienen pegado materiales/partículas más pequeños y finos en sus superficies por efecto de aglutinación.

Las partículas más finas no tienen aspecto anguloso y sus superficies no muestran la típica morfología "esponjosa" ni "huellas de vesículas". Las partículas

en el agregado tienen una distribución de tamaño polidispersas.



► Fig. 2 Imágenes SEM de cenizas volcánicas con una amplia gama de tamaños y morfología del transporte de largo alcance erupcionado por el Sangay y recolectado en Guayaquil. 9 de junio de 2020 (b,c), 20 de septiembre de 2020 (d, e) y 13 de abril de 2021 (f,g).

En conclusión, el comportamiento de la columna volcánica del Sangay es de suma importancia debido a sus repercusiones no sólo para poblaciones aledañas sino también para sectores urbanos costeros como la ciudad de Guayaquil. Se recomienda aumentar el uso de monitoreo continuo y por varios años para poder evaluar los eventos de polución de largo alcance ocasionada por el volcán Sangay e indicar propuestas para ayudar a reducir la afectación a la población, al tráfico aéreo y demás.

## REFERENCIAS

- ▶ Cas R.A.F., Wright J.V. (1987). *Volcanic Successions – Modern and Ancient*. Allen & Unwin, London, pp 1–528
- ▶ Baron PA, Willeke K. (2001). *Aerosol measurement: principles, techniques, and applications*. Wiley,
- ▶ Carn S.A., Froyd, K. D., Anderson, B. E., Wennberg, P., Crouse, J., Spencer, K., Dibb J. E., Krotkov N. A., Browell E. V., Hair J. W., Diskin, G. Sachse G., Vay, S. A. (2011). In situ measurements of tropospheric volcanic plumes in Ecuador and Colombia during TC4 *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 116 doi: <https://doi.org/10.1029/2010JD014718>
- ▶ Folk R.L. (1980). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company,
- ▶ Forbes L, Jarvis D, Potts J, Baxter PJ. (2003) Volcanic ash and respiratory symptoms in children on the island of Montserrat, *British West Indies Occupational and Environmental Medicine* 60:207 doi:10.1136/oem.60.3.207
- ▶ Grange SK, Lewis AC, Carslaw DC. (2016). Source apportionment advances using polar plots of bivariate correlation and regression statistics *Atmospheric Environment* 145:128-134 doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.016>
- ▶ Horwell C. (2007). Grain size analysis of volcanic ash for the rapid assessment of respiratory health hazard. *Journal of environmental monitoring: JEM* 9:1107-1115 doi:10.1039/b710583p
- ▶ Lelieveld J, Evans JS, Fnais M, Giannadaki D, Pozzer A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*. 525:367-371 doi:10.1038/nature15371
- ▶ Lettino A, Caggiano R, Fiore S, Macchiato M, Sabia S, Trippetta S. (2012). Eyjafjallajökull volcanic ash in southern Italy. *Atmospheric Environment* 48:97-103 doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.05.037>
- ▶ McCormick MP, Thomason LW, Trepte CR., 1995. Atmospheric effects of the Mt Pinatubo eruption. *Nature* 373:399-404. doi:10.1038/373399a0
- ▶ Parra R, Bernard B, Narváez D, Le Pennec J-L, Hasselle N, Folch A. (2016). Eruption Source Parameters for forecasting ash dispersion and deposition from vulcanian eruptions at Tungurahua volcano: Insights from field data from the July 2013 eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 309:1-13 doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.11.001>
- ▶ Weiser F, Baumann E, Jentsch A, Medina FM, Lu M, Nogales M, Beierkuhnlein C. (2022). Impact of Volcanic Sulfur Emissions on the Pine Forest of La Palma. Spain. *Forest* 13: 299 doi: <https://doi.org/10.3390/f13020299>
- ▶ Zuo M, Zhou T, Man W, Chen X, Liu J, Liu F, Gao C. (2022). Volcanoes and Climate: Sizing up the impact of the recent Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcanic eruption from historic perspective. *Advance in Atmospheric Sciences*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00376-022-2034-1>

# Aportes del IRD para la evaluación de las amenazas volcánicas en Perú y Ecuador

Pablo Samaniego<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Magmas et Volcans, Université Clermont Auvergne, CNRS, IRD, Clermont-Ferrand, France – pablo.samaniego@ird.fr

**Palabras clave:** Amenaza volcánica, volcanes, Andes, Perú, Ecuador

Durante las tres últimas décadas, los investigadores del Laboratorio Magmas y Volcanes (LMV, Clermont-Ferrand, Francia) y del Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD, Francia) han desarrollado sendos programas de investigación vulcanológica en Ecuador y Perú cuyo fin ha sido entender los procesos volcánicos y evaluar las amenazas volcánicas que afectan a las poblaciones andinas en creciente desarrollo. Esta cooperación se ha realizado diseñada y llevada a cabo de manera conjunta con los organismos geocientíficos encargados del estudio y del monitoreo volcánico en cada país, así para el caso del Ecuador, la contraparte principal ha sido el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN); mientras que en Perú, nuestras contrapartes han sido Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) y el Instituto Geofísico del Perú (IGP). Estos programas de cooperación se han articulado a través de cuatro ejes temáticos:

**(1)** Un primer tema consiste en reconstruir la cronología eruptiva de los volcanes más activos y peligrosos, para lo cual se debe describir de forma precisa los depósitos volcánicos dejados por las erupciones pasadas. El resultado de este trabajo es la identificación de los dinamismos eruptivos propios de cada volcán y la determinación de la frecuencia y la magnitud de las erupciones pasadas. A más de un trabajo de campo exhaustivo, este tema incluye una muy importante componente analítica, especialmente en lo referente a la realización de dataciones que permitan determinar la edad absoluta de las erupciones pasadas. Una quincena de edificios volcánicos en Ecuador y una decena de volcanes en Perú han sido estudiados en detalle en este contexto.

**(2)** Un segundo tema consiste en identificar y cuantificar los procesos magmáticos pre-eruptivos que ocurren desde la zona de origen de los magmas en el manto, hasta la zona de acumulación de los mismos en

la corteza continental. En este tema, se intenta también identificar la influencia de la composición química de los magmas en el desarrollo estructural de los edificios volcánicos así como en los dinamismos eruptivos. Este tema se basa en el conocimiento detallado de la cronología eruptiva de los volcanes estudiados, así como del análisis de la composición química, isotópica y mineralógica de las rocas volcánicas, lo que permite identificar patrones de evolución temporal del magmatismo. Adicionalmente, nos interesamos en los estudios petrológicos detallados que permiten constreñir los procesos y las condiciones magmáticas justo antes de las erupciones más importantes que han afectado los Andes.

**(3)** El tercer tema comprende el monitoreo volcánico y el seguimiento científico de las erupciones en curso, con el fin de describir la fenomenología de las mismas, así como caracterizar física y químicamente los productos eruptivos recientemente emitidos. Este trabajo es particularmente útil para comprender el sistema magmático que alimenta las erupciones en curso. Es así que hemos estudiado las principales erupciones ocurridas durante las últimas décadas en Ecuador (Guagua Pichincha, 1999-2001; Tungurahua, 1999-2016; Reventador, 2002-presente; Cotopaxi, 2015; Sangay, 2019-presente); y en Perú (Ubinas, 2006-2009, 2013-2019; Sabancaya, 1988-1998, 2015-presente).

**(4)** Finalmente, en base a los resultados de los temas anteriores, se realiza la evaluación de la amenaza volcánica y en particular la elaboración de los mapas de amenaza para los volcanes más peligrosos de Ecuador y Perú, utilizando para ello los más avanzados modelos numéricos capaces de reproducir los principales fenómenos volcánicos. Gracias a esto se han podido generar mapas de amenaza precisos y fiables para 8 volcanes en Ecuador y 6 volcanes en Perú.



Esta cooperación ha sido particularmente enriquecedora para cada una de las partes, permitiendo por un lado mejorar ostensiblemente el conocimiento sobre la evolución vulcanológica de

algunos volcanes de Ecuador y Perú; y por otro apoyar de manera permanente la formación de los jóvenes vulcanólogos de los países andinos, a través la realización de Tesis de Ingeniería, Master y Doctorado.

## Análisis del contexto geodinámico e hidrometeorológico del centro poblado Arcata, para determinar el nivel de peligro al que está expuesto

Yhon Soncco<sup>1</sup>, Hammer Hojeda<sup>1</sup>

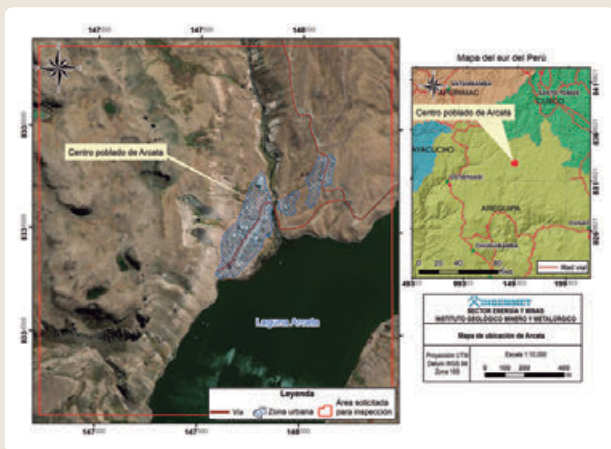
<sup>1</sup> INGEMMET Av. Canadá 1470, San Borja, Lima autonomodgar38@ingemmet.gob.pe; yhon.sc@gmail.com

**Palabras clave:** Flujo, deslizamiento, meteorización.

### Introducción

El área evaluada se ubica en inmediaciones del poblado Arcata, del distrito de Cayarani, provincia de Condesuyos, departamento Arequipa (Fig. 1).

caracterizado como un nivel altamente meteorizado y medianamente fracturado. Al tope, se aprecia un nivel de piroclastos completamente meteorizados.



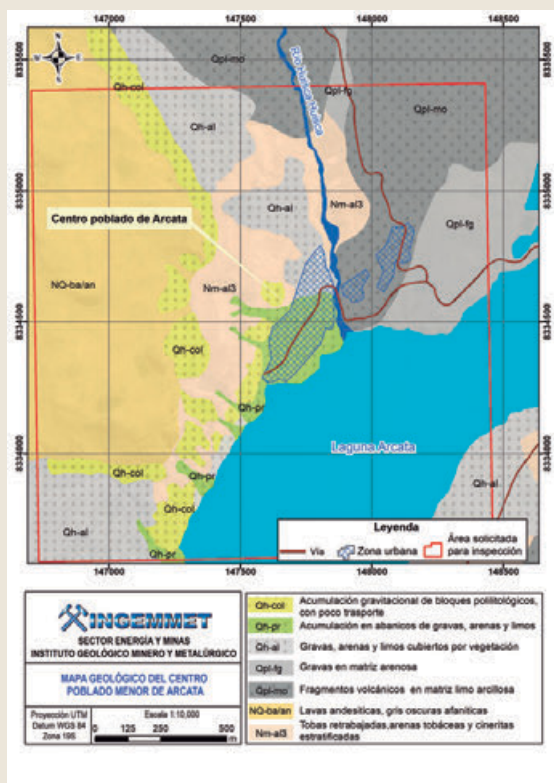
► Fig. 1 Ubicación de Arcata.

Se identificaron rocas de la Formación Alpbamba (Nm-al), conformadas por un nivel inferior de depósitos de corrientes de densidades piroclásticas, con líticos erráticos, se caracterizó como un nivel moderadamente meteorizado y medianamente fracturado (Fig. 2). El nivel intermedio está conformado por una secuencia pseudo estratificada de ceniza volcánica, con facies retrabajadas de corrientes de densidades piroclásticas y lapilli pómez retrabajada,



► Fig. 2 Formación Alpbamba (Nm-al).

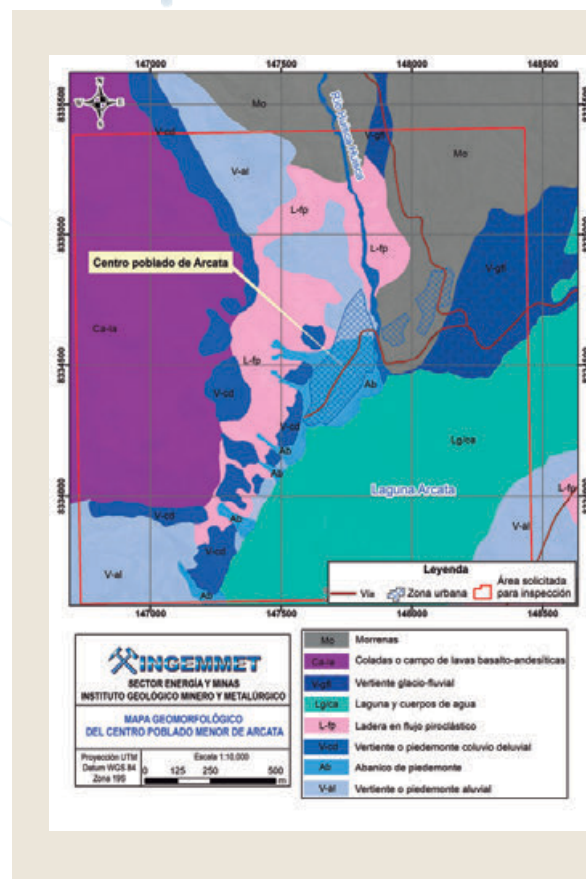
Formación Barroso (NQ-ba/an), se identificaron lavas andesíticas moderadamente meteorizadas y medianamente fracturadas. Además, se reconocieron depósitos morrénicos (Qpl-mo), fluvioglaciares (Qpl-fg) y depósitos aluviales (Qpl-al), conformados por gravas, bloques, arenas y limos, los cuales son de fácil erosión; los depósitos coluviales (Qh-col) están conformados por clastos polilitológicos subangulosos de origen gravitacional, y depósitos proluviales (Qh-pr), constituidos por gravas, arenas y limos, los depósitos cuaternarios se encuentran inconsolidados, (Fig.3).



► Fig.3 Geología de Arcata.

Durante los trabajos de campo se clasificaron las unidades geomorfológicas correspondientes a: vertiente o piedemonte aluvial (V-at), abanico de piedemonte (Ab), vertiente o piedemonte coluvio deluvial (V-cd), ladera en flujo piroclástico (L-fp), laguna y cuerpo de agua (Lg/ca), vertiente glacio-fluvial (V-gfl), coladas o campo de lavas basalto-andesíticas (Ca-la) y morrenas (Mo). Las subunidades con mayor susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa corresponden a vertiente o piedemonte coluvio deluvial (V-cd) y ladera en flujo piroclástico (L-fp), (Fig.4).

Durante los trabajos de campo se identificaron movimientos en masa de tipo: flujo de tierras no canalizado, derrumbes, caída de rocas, avalancha de detritos y deslizamientos; asimismo, se han observado procesos de erosión de ladera, principalmente cárcavas. El centro poblado Arcata se encuentra asentada sobre depósito de flujo de tierra antiguo de recurrencia excepcional y en sectores susceptible de ser afectada por la inundación fluvial.

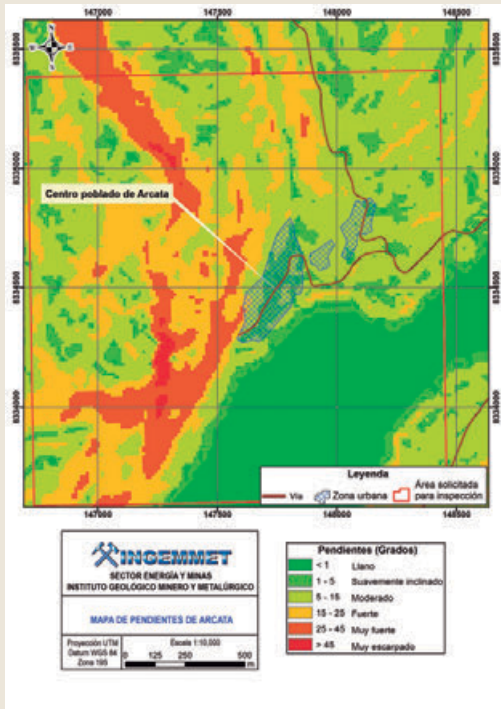


► Fig.4 Geomorfología de Arcata.

Los factores condicionantes que originan la ocurrencia de los movimientos en masa son: rocas altamente meteorizadas y medianamente fracturadas de los niveles superiores de la Formación Alpbamba, rocas la Formación Barroso meteorizadas y moderadamente fracturadas. Además, los movimientos en masa antiguos en la zona han generado depósitos inconsolidados, que permite la infiltración y retención del agua, de esta manera los terrenos son fácilmente saturados. La pendiente de los terrenos varía desde llano a inclinado suavemente (1°-5°) las cuales se encuentran al pie de las laderas; en la parte media de la ladera se presenta un cambio de pendiente a muy fuerte (25°-45°) y pendientes (> 45°) acantilados ubicados en la parte alta de Arcata, (Fig.5).

En base a las condiciones geológicas y geodinámicas detalladas anteriormente, el centro poblado menor de Arcata se considera de Peligro "Muy Alto", puede ser afectado por flujo de tierra, en temporada de lluvias intensas (octubre a marzo) e inundación





► Fig. 5 Pendientes de Arcata.

fluvial; Además, en la zona se pueden generar nuevas activaciones de deslizamientos y caída de rocas.

### Movimientos en masa

En la parte alta de la zona urbana de Arcata, en el sector Cacca Carcel se evidencian dos depresiones con forma de herradura, que corresponden a cicatrices de rotura de flujos de tierra (Fig. 6).

Las cicatrices Ca y Cb, (figuras 6 y 7) poseen longitudes de 360 m y 180 m. El flujo, descendió en dirección de



► Fig. 6 Formación Alpbamba (Nm-al).

la zona urbana del centro poblado menor de Arcata, es decir en dirección sureste, hasta la laguna Arcata, ubicada en la parte baja.

Se observa claramente el abanico formado por los depósitos de los flujos de tierra, los cuales se originaron desde la parte alta de Arcata; desde los 4590 m s.n.m. el flujo presentó un recorrido aproximado de 530 m, hasta los 4470 m. es decir posee un desnivel de 60 m.



► Fig. 7 Flujo de tierra.

El depósito del flujo de tierra posee un espesor de más de 5 m no presenta gradación, es de tipo matriz soportada; se observan componentes volcánicos de lapilli de pómez retrabajada, bloques erráticos de naturaleza ignimbrítica de hasta 40 cm, de color gris blanquecino; los componentes mencionados se encuentran englobados en una matriz de ceniza retrabajada de color gris oscuro y limos. El depósito se encuentra inconsolidado y muy saturado. (Fig. 8)



► Fig. 8 Depósito de flujo de tierra.

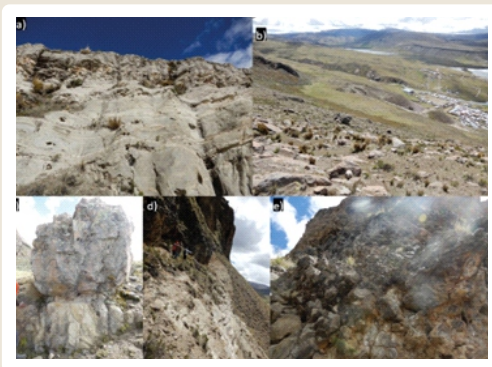
Los derrumbes se presentan a lo largo del río que une las lagunas Huisca Huisca y Arcata. En ambas márgenes, afloran depósitos de corrientes piroclásticas, localmente llamado sillar; los cuales se presentan moderadamente meteorizadas y medianamente fracturadas; la erosión fluvial, socaba las bases de ambas márgenes, dejándolos sin soporte (Fig. 9).



► Fig. 9 Derrumbes en Arcata.

La caída de rocas en Arcata, ocurre en los acantilados ubicados en la parte alta de la zona urbana; donde las pendientes son mayores a  $45^\circ$  (Fig. 10a, 10d y 10e).

También se han encontrado bloques colgados, soportados por la base, los cuales podrían caer, si se les quita el soporte que actualmente tienen (Fig. 10b y 10c).



► Fig. 10 Caída de rocas en Arcata.

A 800 m al suroeste de Arcata, se aprecia una cicatriz, de más de 5 km de longitud. En las observaciones de imágenes satelitales se evidencia una depresión con forma de herradura, que corresponde al deslizamiento Arcata, (Fig. 11). La corona y el salto de escarpe, no se observan nítidamente debido a los procesos de erosión y meteorización que afectó el lugar.



► Fig. 11 Deslizamiento Arcata.

La masa deslizada o removida, generó un dique natural, el cual represó el río de ese tiempo, lo que originó la laguna de Arcata. (Fig. 12).



► Fig. 12 Cuerpo del deslizamiento Arcata y a cicatriz de deslizamiento.

A 2 km al noroeste de Arcata, se aprecia una cicatriz, de 1.5 km de longitud. Según las imágenes satelitales se evidencia una depresión con forma no definida, que corresponde al deslizamiento Huisca Huisca, (Fig. 13). La corona y el salto de escarpe, no se observan nítidamente debido a los procesos de erosión y meteorización que afectó el lugar.



► Fig. 13 Deslizamiento Huisca Huisca.



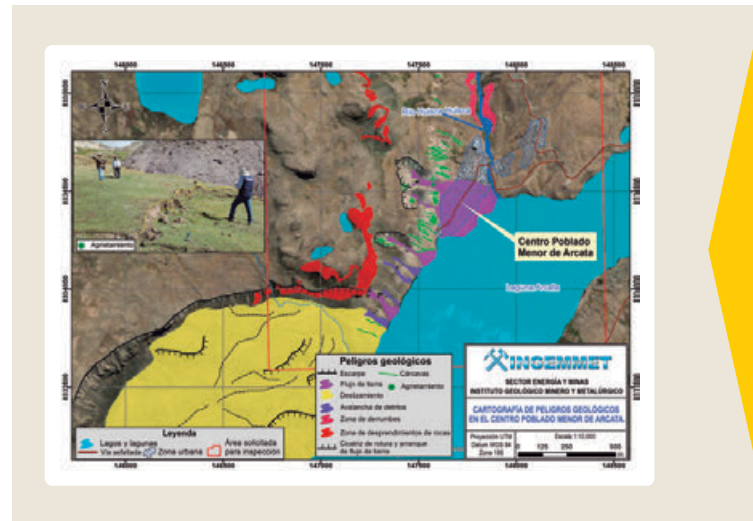
La empresa minera Ares Hochschild Mining, habría construido un dique a base de bloques de roca, para represar las aguas. En el dique se observan bloques fracturados y desprendidos, que están fuera del armazón del dique (Fig. 14).



► Fig. 14 Dique de la represa Huisca Huisca.

Este peligro es latente y recurrente en el centro poblado menor de Arcata, a causa del desborde de las aguas de las represas Arcata y Huisca Huisca, en temporada de lluvias. En base a lo mencionado anteriormente la represa Huisca Huisca ubicado aguas arriba de Arcata, podría colapsar, inundar y destruir todo lo que encuentre a su paso, en este caso viviendas del poblado Arcata.

Los movimientos en masa identificados en el área evaluada comprenden: flujo de tierras, derrumbes, caída de rocas; avalancha de detritos, y deslizamientos, asimismo, se han observado procesos de erosión de ladera, tipo cárcavas, y peligro por inundación, (Fig. 15).



► Fig. 15 Cartografía de procesos de movimientos en masa en Arcata, modificado de Caldas, J. (1993).

Arcata, es considerada zona crítica y de Peligro Muy Alto, el sector puede ser afectados por flujo de tierra, que pueden ocurrir en la temporada de lluvias. Además, en el sector se pueden genera nuevas reactivaciones de los deslizamientos, caída de rocas y peligros por inundación, debido a las represas ubicadas próximos al centro poblado.

Se recomienda reubicar las viviendas del Centro Poblado Menor de Arcata, a un lugar en el que no se observe perturbaciones geológicas e hidrometeorológicas.

## REFERENCIAS

- Caldas, J. (1993) - Geología de los cuadrángulos de Huambo y Orcopampa. INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geol. Nac., 46, 62 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2056>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2021). Evaluación de peligros geológicos por flujo de tierra e inundación fluvial en el centro poblado menor de Arcata. Distrito de Cayarani, provincia de Condesuyos, región Arequipa. Ingemmet, Informe Técnico N° A7152, 31p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3130>

# Trabajos del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET para reducir los riesgos volcánicos en el Perú

Edu Taipe Maquerhua<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, Arequipa - edtaipe@ingemmet.gob.pe

**Palabras clave:** GRD, Volcanes Activos, Peligro volcánico.

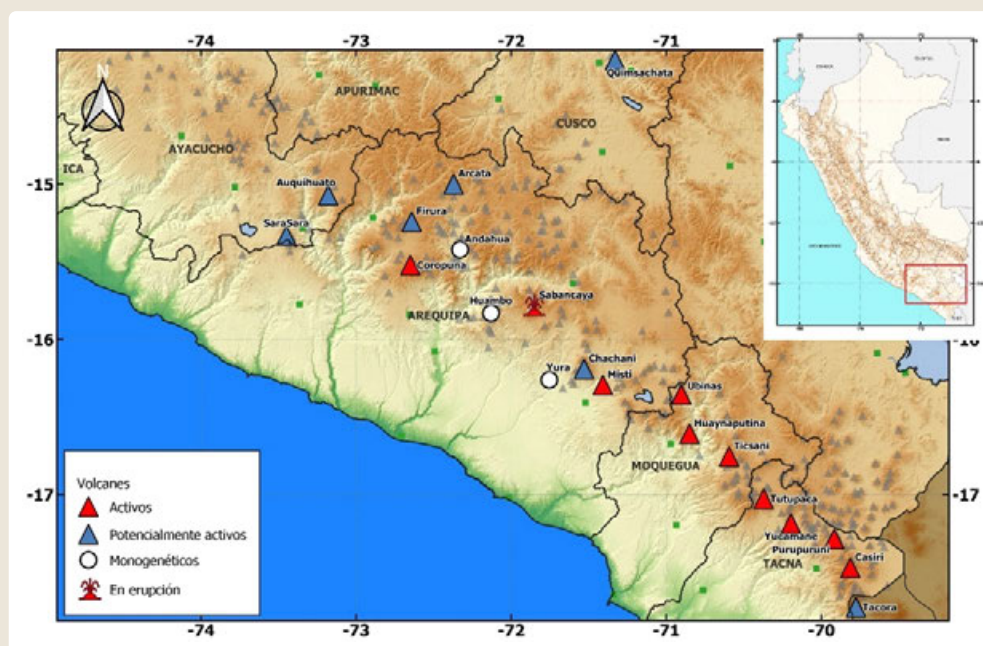
## INTRODUCCIÓN

La actividad volcánica es un proceso geológico majestuoso que ha despertado la admiración de muchas culturas en el mundo, convirtiendo a los volcanes en actores principales de historias míticas. Sin embargo, la historia también nos ha demostrado que la majestuosidad viene acompañada de efectos devastadores para el hombre y el medio ambiente. Entender estos procesos es una tarea imprescindible para un desarrollo sostenible, ya que conociendo mejor los volcanes sabremos prepararnos para enfrentar una erupción.

En el Perú se han identificado hasta 10 volcanes activos y 10 volcanes potencialmente activos que incluyen 3

campos monogenéticos (Bromley et al., 2019; Rivera et al., 2020), de un total de 402 estructuras volcánicas (Fidel et al. 1997), todas ubicadas en la región sur del Perú en las regiones de Arequipa, Moquegua, Tacna, Ayacucho, Cusco y Puno (Fig. 1), alrededor de estos volcanes vive una población de cerca de 2 millones de habitantes y se localiza infraestructura pública y privada expuestas ante una erupción volcánica. Estas características geológicas ponen al Perú en condición de riesgo volcánico.

Conscientes de esta situación, el INGEMMET como servicio geológico del Perú, desarrolla actividades de monitoreo volcánico y proyectos de investigación con el objetivo de contribuir en la reducción del riesgo volcánico.



► Fig. 1 La afiliación de los autores tiene que estar escrito en Fuente Arial, 8 puntos en itálica. Se requiere el correo del autor que realizará la presentación, y él/ella será considerado como el autor para la comunicación.

## METODOLOGÍA

La política del estado peruano en relación a la Gestión del Riesgo de Desastres (GRD), contiene principios, objetivos prioritarios, lineamientos estratégicos, que orientan la actuación de todos los involucrados de manera articulada y participativa, con la finalidad de proteger la integridad de la vida de las personas, sus medios de vida y propender hacia el desarrollo sostenible del país. Estos lineamientos de GRD se establecieron con la creación del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD) mediante ley N° 29664 y su reglamento aprobado mediante Decreto Supremo N° 048-2011-PCM. En uno de sus artículos esta normativa establece que: "(...) La gestión del riesgo de desastres está basada en la investigación científica y de registro de informaciones, y orienta las políticas, estrategias y acciones en todos los niveles de gobierno y de la sociedad con la finalidad de proteger la vida de la población y el patrimonio de las personas y el Estado" (Ley N° 29664). Se establece así mismo que la GRD tiene 3 componentes: (1) Gestión Prospectiva, (2) Gestión Correctiva y (3) Gestión Reactiva; y se desarrollan mediante los procesos de Estimación del Riesgo, Prevención, Reducción del Riesgo, Preparación, Respuesta y Rehabilitación/Reconstrucción. Uno de los pilares de esta estructura es el conocimiento del peligro y se menciona en el título I, artículo 3 "La gestión del riesgo de desastres está basada en la investigación científica y de registro de información...", por tanto, se

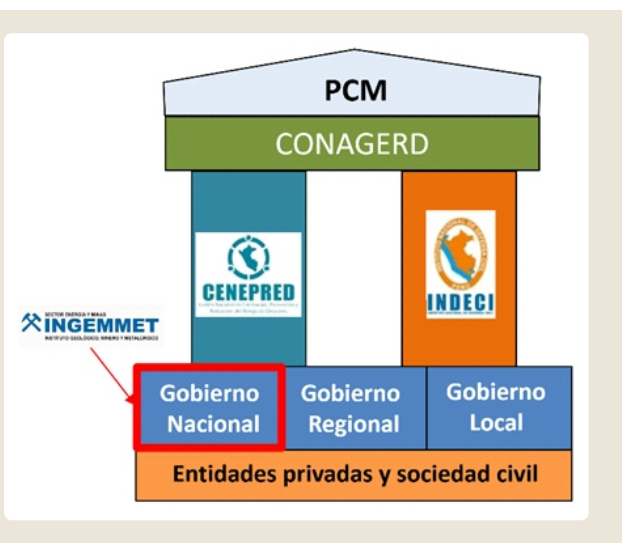
necesita conocer las características del peligro para definir y establecer las estrategias para ejecutar el sistema de gestión de riesgo de desastres.

En cumplimiento de esta normativa, el INGEMMET como parte del SINAGERD (Fig. 2) y en el marco de sus funciones y competencias ejecuta proyectos y actividades orientadas a fortalecer la capacidad de la GRD en la componente de conocimiento del peligro, basada en la investigación de los procesos geológicos y monitoreo científico de los peligros geológicos.

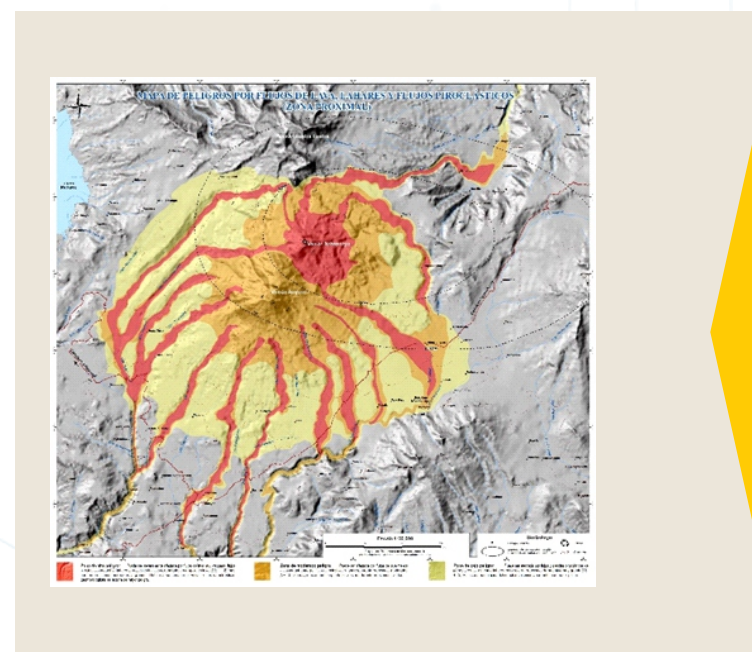
En esa línea técnica, científica y legal, en el 2013, después de un sostenido avance en el estudio y monitoreo de peligros volcánicos, el INGEMMET crea su Observatorio Vulcanológico - OVI (Resolución de Presidencia N° 037-2013-INGEMMET/PCD), con el objetivo claro y sustentable de "(...) efectuarán trabajos en las distintas áreas de la vulcanología y cuyo fin es la investigación, monitoreo volcánico, la prevención y mitigación de desastres de origen volcánico, (...)". La creación del OVI fue ratificada el 2021 (Resolución de Gerencia General N° 0054-2021-INGEMMET/GG).

### Avances en la reducción de riesgo volcánico

La gestión de riesgo volcánico es estar preparados ante una erupción volcánica, para estar preparados es



► Fig. 2 Conformación del SINAGERD, el INGEMMET integra este sistema como parte del gobierno nacional al estar adscrito al MINEM.



► Fig. 3 Mapa de peligros por flujos de lava, Lahares y flujos piroclásticos (Zona proximal), volcán Sabancaya (Rivera et al. 2015).



necesario tener información confiable y oportuna sobre el peligro volcánico. Para lograr ello, en el OVI los trabajos se distribuyen en tres áreas:

### Geología y evaluación de peligros

Consiste contar con estudios detallados de la geología de los volcanes, con el objetivo de elaborar los mapas de peligros volcánico (Fig. 3), documentos base para el manejo de una crisis volcánica, en los programas de educación, sensibilización y sobre todo en el plan de ordenamiento territorial.

Los mapas de peligro se construyen evaluando cada uno de los peligros volcánicos y se basa en el conocimiento de la historia eruptiva; los tipos de productos emplazados en erupciones pasadas; los alcances máximos y; en la magnitud y frecuencia de estos eventos, principalmente en los últimos 50 mil años. Para ello se efectúa una recopilación, interpretación y síntesis de la información geológica, volcanológica, geoquímica y estratigráfica. Toda la información se sistematiza en sistemas de información geográfica (SIG).

En la evaluación de los peligros y la elaboración del mapa, el OVI desarrolla proyectos liderados por investigadores, peruanos en cooperación con investigadores extranjeros de amplia experiencia en la preparación de este tipo de información cartográfica. Es así que se ha elaborado y publicado 6 mapas de peligros volcánicos: Sabancaya (Rivera et al. 2015), Ubinas (Rivera et al. 2011), Misti (Mariño et al. 2016), Tutupaca (Mariño et al. 2019), Sara Sara (Rivera et al. 2020) y Yucamane (Rivera et al. 2018). Se encuentran en proceso de elaboración los mapas de los volcanes Coropuna, Chachani, Huaynaputina, Ticsani y Casiri.

Así mismo, los constantes avances tecnológicos (hardware y software) ha hecho posible mejorar la calidad de simulaciones de los diferentes escenarios de erupción volcánica. Los resultados permiten establecer de forma más precisa las áreas que podrían resultar afectadas por cada uno de los peligros volcánicos (Delgado et al., 2018). Considerando estas circunstancias es que se viene trabajando en la actualización del mapa de peligros del volcán Misti, cuya primera versión fue publicada el año 2007.

### Monitoreo de volcanes activos

El monitoreo del peligro es una tarea muy importante en la GRD, para ello es necesario la implementación de redes de monitoreo instrumental que permitan identificar parámetros precursores de erupciones volcánicas.

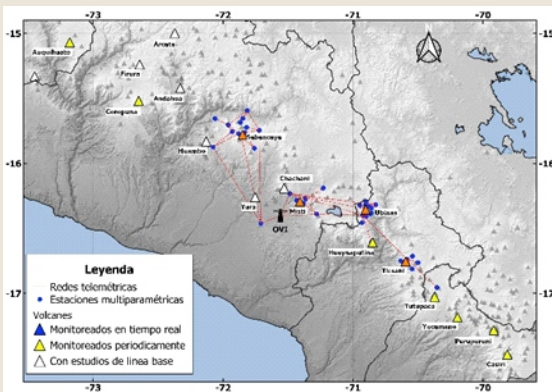
El OVI realiza el monitoreo de volcanes activos desde el 2005, se inició en los volcanes Ubinas y Misti y se amplió progresivamente a todos los volcanes activos, este monitoreo consistió en el muestreo periódico de fuentes termales, fumarolas, estudios de caracterización sismovolcánica y mediciones geodésicas para establecer líneas base de deformación cortical en ambientes volcánicos. Con la información obtenida se diseñaron las redes de monitoreo multiparamétricas permanentes, los que se vienen implementando progresivamente desde el año 2013, de acuerdo al ranking de amenaza volcánica relativa se inició la implementación de las redes en los volcanes Misti, Ubinas, Sabancaya y Ticsani; con más de 8 millones de soles de inversión pública. Las redes de monitoreo están compuestas de estaciones multiparamétricas (Fig. 4), con estructuras adaptadas para proteger a los sensores de medición y equipos de telecomunicación de la intemperie y vandalismo. El soporte energético es mediante paneles solares y baterías de litio, mientras que la transmisión de datos se realiza a través de radioenlaces VHF, UHF y redes WLAN.



► Fig. 4 Estación multiparamétrica para monitoreo volcánico.



Actualmente el OVI mantiene una red de monitoreo en tiempo real en los volcanes Sabancaya, Ubinas, Misti y Ticsani; monitoreo periódico en los volcanes Casiri, Purupuruni, Yucamani, Tutupaca, Huaynaputina, Coropunay Ahuquihuato; mientras que en los volcanes considerados potencialmente activos se desarrollan estudios base para caracterizar los parámetros de actividad volcánica (Fig. 5).



► Fig. 5 Mapa de las redes de monitoreo volcánico.

El monitoreo en el OVI tiene un enfoque multidisciplinario e integral, usando todas las herramientas disponibles para un completo seguimiento de los parámetros de actividad volcánica, los que están agrupados en:

- Actividad Sísmica volcánica
- Deformación de la superficie volcánica
- Parámetros de gases
- Estado térmico del edificio volcánico
- Columna de Gases y/o Ceniza

- Parámetros físico-químicos en fuentes de agua.
- Ondas Acústicas Volcánicas
- Productos Volcánicos Emitidos y Procesos Asociados

Los productos del monitoreo volcánico para la GRD son informes técnicos publicados anualmente; reportes vulcanológicos publicados con frecuencia diaria, semanal o mensual dependiendo del nivel de actividad volcánica (Fig. 6) y; avisos de ocurrencia de peligro volcánico. Esta información es remitida los integrantes del SINAGERD.

Fig. 6 – Ejemplo de un reporte vulcanológico del estado de actividad del Sabancaya.



► Fig. 6





► Fig. 7 Diferentes actividades de difusión realizadas en el OVI.

### Educación y Difusión

El objetivo de esta área es difundir el conocimiento que se genera en el OVI sobre la geología, los peligros y el monitoreo volcánico, una tarea muy importante dentro de la GRD. Entre las actividades más resaltantes tenemos:

- Difusión de los reportes vulcanológicos y avisos de ocurrencia de peligros volcánicos.
- Participación en los Comités Técnico-Científico Regionales en Arequipa, Moquegua y Tacna para atención de las crisis volcánicas y asesoramiento técnico-científico en ordenamiento territorial y reducción del riesgo volcánico (Fig. 7A).
- Edición y distribución de material de difusión: trípticos, infografía, videos educativos, cuadernillos, etc. (Fig. 7B).
- Difusión de los mapas de peligros volcánicos a las municipalidades, instituciones privadas y públicas de las zonas de influencia de cada uno de los volcanes (Fig. 7C).
- Habilitación de espacios físicos para la sensibilización sobre riesgo volcánico. En el Observatorio Vulcanológico se recibe constantemente la visita de estudiantes, instituciones públicas, privadas y público en general (Fig. 7D). En el "Centro de Sensibilización Para la Gestión de Riesgos", ubicada en el local de INDECI, DDI Arequipa; se tiene habilitada la Sala Temática de Riesgo Volcánico.
- Organización de eventos de difusión, entre los que se encuentran los foros internacionales sobre peligro volcánicos.
- Organización de cursos y talleres sobre vulcanología básica y cartografiado de campos volcánicos para estudiantes universitarios y profesionales.
- Participación activa en la organización de simulacros de evacuación por erupción volcánica (Fig. 7E).
- Organización de charlas, talleres de sensibilización para escolares y público en general sobre volcanes y peligros volcánicos en zonas expuestas a riesgo volcánico (Fig. 7F).
- Brindar información mediante plataformas digitales. Se tiene operativa la página web del OVI, que contiene información sobre los volcanes activos y potencialmente activos del Perú, reportes y redes de monitoreo volcánico, mapas geológicos y mapas de peligros volcánico. Se puso en funcionamiento el panel de visualización del monitoreo volcánico ([ovi.ingemmet.gob.pe/panelview/index.html](http://ovi.ingemmet.gob.pe/panelview/index.html)) en tiempo real.

De esta manera el OVI promueve activamente una cultura de difusión de la información generada en los proyectos de investigación y actividades de monitoreo volcánico. El objetivo es propiciar una cultura de prevención basada en el conocimiento del peligro.

## CONCLUSIONES

Hay un importante y sostenido aporte del INGEMMET mediante el OVI a la reducción del riesgo volcánico mediante la generación de conocimiento del peligro, monitoreo del peligro y su oportuna difusión en los diferentes niveles del SINAGERD.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial al INGEMMET por la oportunidad de participar en la incansable labor de contribuir en la gestión de riesgo de desastres volcánicos mediante su observatorio vulcanológico -OVI.

## REFERENCIAS

- ▶ Bromley, G.R.M., Thouret, J., Schimmelpfennig, I., Mariño, S., Valdivia, D., Rademaker, K., Vivanco, S., Aster Team, Aumaître, G., Bourlès, D., Keddadouche, K. (2019). In situ cosmogenic  $^3\text{He}$  and  $^{36}\text{Cl}$  and radiocarbon dating of volcanic deposits refine the Pleistocene and Holocene eruption chronology of SW Peru. *Bulletin of Volcanology*, 81(11), 64.
- ▶ Delgado, H., Alatorre-Ibarguengoitia, M., Pozzo, A., Arana-Salinas, L., Bonasia, R., Capra, R., Cassata, W., Cordoba, G., Cortés-Ramos, J., Ferrés, D., Fonseca, R., Garcia, A., Pinto, G., Guerrero, D., Jaoimes, M.C., Macías, J.L., Nieto, J., Nieto, A., Portocarrero, J., Rodriguez, D., ...Tellez, E. (2018). Estudios geológicos y actualización del mapa de peligros del volcán Popocatepetl.
- ▶ Fidel, L., Morche, W. & Núñez, S. (1997). Inventario de volcanes del Perú. Proyecto: Álbum de mapas de riesgos volcánicos de las principales ciudades del Suroeste del Perú. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica 15, 80 p.
- ▶ Decreto Supremo. N° 048-2011-PCM. Ley N° 29664, Ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. (19 de febrero de 2011). Normas Legales N° 436456. Diario Oficial El Peruano
- ▶ Mariño, J., Rivera, M., Thouret, J.C. & Macedo, L. (2016) - Geología y mapa de peligros del volcán Misti. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 60, 170 p.
- ▶ Mariño, J., Samaniego, P., Manrique, N., Valderrama, P., Macedo, L. (2019) - Geología y mapa de peligros del Complejo Volcánico Tutupaca. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 66, 165 p., 2 mapas.
- ▶ Rivera, M., Mariño, J. & Thouret, J-C. (2011) - Geología y evaluación de peligros del volcán Ubinas. INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 46, 88 p.
- ▶ Rivera, M., Mariño, J., Samaniego, P., Delgado, R., Manrique, N. (2015) - Geología y evaluación de peligros del complejo volcánico Ampato - Sabancaya (Arequipa). INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 61, 122 p.
- ▶ Rivera, M., Samaniego, P., Vela, J. & Le Pennec, J-L. (2018) - Geología y evaluación de peligros del Complejo Volcánico Yucamane - Calientes (Candarave - Tacna). INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 65, 128 p., 2 mapas.
- ▶ Rivera, M., Cueva, K., Le Pennec, J.L., Vela, J., Samaniego, P., et al. (2020). Geología y evaluación de peligros del volcán Sara Sara (Ayacucho). INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 78, 154 p., 2 mapas.



# Peligros geológicos asociados a depósitos volcánicos en el sector de Tonohaya

David Valdivia<sup>1</sup>, Yhon Soncco<sup>1</sup>, Segundo Nuñez<sup>1</sup>, Magdie Ochoa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Actividad 11 – Peligros Geológicos a Nivel Nacional – Instituto Geológico, Minería y Metalúrgico – dvaldiviah@gmail.com

**Palabras clave:** Movimientos en masa, Tonohaya, lahares, derrumbe

## INTRODUCCIÓN

El relieve topográfico de los andes peruanos es abrupto, y es afectado continuamente por la actividad sísmica, el intenso vulcanismo y la actividad del ser humano. Estos factores combinados con los procesos denudativos que van modelando el relieve, conlleva a una alta probabilidad de generar peligros por movimientos en masa en toda la zona andina. En el Perú, los movimientos en masa son muy comunes y altamente destructivos, es así que uno de los peores desastres asociados a movimientos en masa en el Perú sucedió en 1970 con la avalancha de roca y hielo que terminó en un flujo de detritos generado en el Nevado Huascarán, enterrando a los habitantes pueblo de Yungay, teniendo 18.000 víctimas mortales (Evans et al., 2007). Es así que este trabajo busca generar conocimiento sobre los peligros geológicos que actualmente afectan el sector de Tonohaya, ubicado en el distrito de Ubinas, provincia de General Sánchez Cerro, en la región de Moquegua. Este sector está a 7 km del cráter del volcán Ubinas (Fig. 1).

**Geología.** -La geología de la zona comprende depósitos de avalanchas de escombros provenientes del colapso del flanco sureste del volcán Ubinas que han rellenado el valle de Ubinas, constituidos por bloques lávicos subangulosos de tamaños heterométricos, la mayoría están alterados hidrotermalmente (Rivera et al., 2011). Por otro lado, en el río Ubina se han reconocido el emplazamiento de depósitos de lahares antiguos provenientes del volcán Ubinas, en los cuales actualmente se encuentra asentado la comunidad campesina de Tonohaya, además de sus medios de vida (Fig. 2).

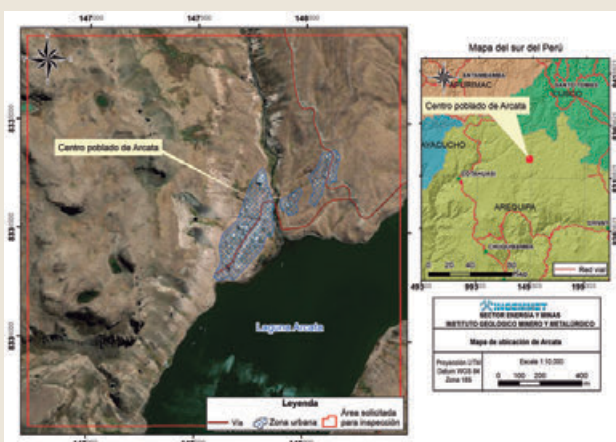


► Fig. 2 Unidades geológicas del sector de Tonohaya.

**Actividad sísmica en el Perú.** – Los sismos en el Perú pueden generar desprendimientos de rocas desde las partes altas. Según Alva et al. (1984), el departamento de Moquegua se ubica en las zonas de sismicidad alta a muy alta (Figura 3); situando al distrito de Ubinas regionalmente, en una zona de sismicidad muy alta donde podrían generarse sismos de gran magnitud.

## METODOLOGÍA

Se han realizado Trabajos de campo generando un cartografiado de los peligros geológicos a escala



► Fig. 1 Ubicación del centro poblado de Tonohaya.





► Fig. 3 Zonificación Sísmica del Perú. (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2016).

1:5000, y el uso de imágenes satelitales Google earth y CBERS4.

Peligros geológicos por movimientos en masa en el sector de Tonohaya deslizamientos:

Fig. 4- Mapa de peligros geológicos en el sector de la comunidad campesina de Tonohaya, tomando como base la imagen pancromática de 2m de resolución del 02/02/2022 del satélite CBERS4.-Deslizamiento antiguo en el sector de Tonohaya (DA). - Se presenta como una depresión con forma irregular que corresponde a un deslizamiento antiguo (DA) (Fig. 4), donde la corona y el salto de escarpe, no se observan claramente debido a la vegetación, procesos de erosión y meteorización, que afectó el lugar. La masa deslizada o removida, va de oeste a este con dirección hacia el cauce del río Ubinas, en cuya parte baja se han observados depósitos de lahares antiguos adosados a este deslizamiento. Este depósito presenta ondulaciones en el cuerpo del deslizamiento, además de sectores donde se han reactivado el deslizamiento. Uno de los factores para que un deslizamiento se vuelva reactivar es el uso indiscriminado del agua utilizada para la agricultura en la zona andina, es por ello que en la parte alta de del deslizamiento antiguo de Tonohaya, se encuentra edificado el reservorio de agua de

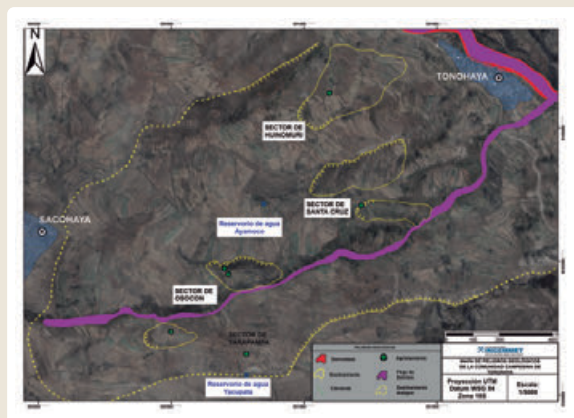
Yacupata, con canales que derivan el agua hacia la zona agrícola del sector de la comunidad campesina de Tonohaya, los cuales en su gran mayoría no cuentan con revestimiento impermeable filtrando en el agua al cuerpo del deslizamiento (Fig. 5).

► **Sector de Yarapampa (RCT-1).** - En este sector se presenta una reactivación rotacional del DA, cuya corona principal es de forma regular y mide 90 m; la altura del salto del escarpe principal posee un desnivel de 10 m. La masa se desplazó en dirección noreste (Fig. 4), además se han identificado agrietamientos en las coordenadas UTM E: 300783, N: 8185153 y E: 300499, N: 8185236, se de hasta 4 m de largo, con 30 a 60 cm de desnivel (Fig. 4), estos no están definidos claramente por la presencia de vegetación arbustiva.

► **Sector de- Osocon (RCT-1).** - Este deslizamiento es de tipo rotacional; su corona es irregular y mide 290 m, la altura del salto del escarpe tiene un desnivel de 12 m; la masa se desplazó hacia el sur. Por otro lado, en las coordenadas UTM E: 300701, N: 8185473 y E: 300715, N: 8185452, se han observado agrietamientos con longitudes de hasta 35 m, con aperturas de 14 a 26 cm y un desnivel entre 50 -64 cm cortando las zonas de cultivo en este sector (Fig. 4). Las grietas se desarrollan en depósitos de avalancha de rocas, los cuales se encuentran poco consolidados.

► **Sector de Santa Cruz (RCT2).** - En este sector se ha observado en la coordenada UTM E: 301205, N: 8185717, un deslizamiento con corona irregular, con longitud de 20 m y un desnivel de 1.6 m. La masa se desplazó en dirección sureste. (Fig. 4). Además, en las coordenadas UTM E: 300849, N: 8185734, se tiene el reservorio de agua de Ayamoco (Figura 4), con un caudal de entrada aproximadamente de 90 L/min y 40 L/min de caudal de salida; siendo el caudal faltante absorbido por el cuerpo del deslizamiento según declaraciones de la población.

► **Sector de Huinomuri (RCT3).** - En la coordenada UTM E: 301096, N: 8186132, se ha identificado un deslizamiento con una corona regular con una longitud de 30 m, y un desnivel de 2.5 m. De igual forma en este sector se ha observado saturación del terreno por filtraciones de los canales de regadío sin revestimiento (Fig. 4).



► Fig. 4 Mapa de peligros geológicos en el sector de la comunidad campesina de Tonohaya, tomando como base la imagen pancromática de 2m de resolución del 02/02/2022 del satélite CBERS4.

## Derrumbes

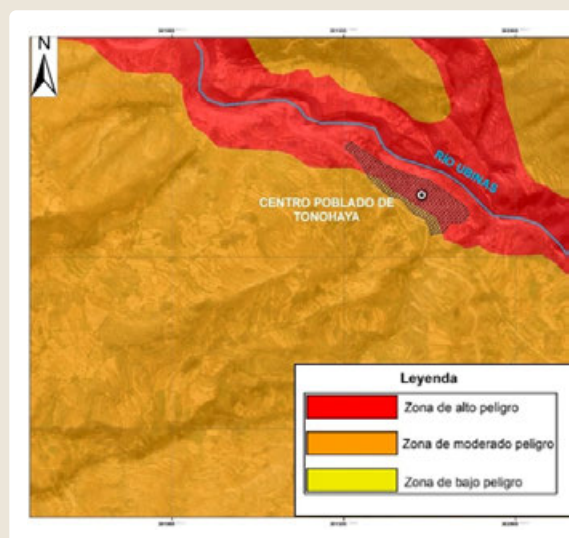
Los derrumbes se presentan en ambas márgenes a lo largo del río Ubina, sobre afloramientos de secuencias de depósitos de lahares. Debido a que las viviendas de la comunidad campesina de Tonohaya se sitúan sobre este tipo de depósito, los cuales están sujetos a erosión fluvial y socavamiento por parte del río Ubina, afectando la estabilidad de la ladera y produciendo derrumbes hacia el río (Fig. 4 y 5). La zona más afectada,



► Fig. 5 Derrumbe en el sector del centro poblado de Tonohaya

es el sector del centro poblado de Tonohaya (Fig. 5), en donde el pasado 15 de febrero del 2022, ocurrió un derrumbe que dañó la infraestructura del local comunitario del centro poblado.

► **Lahares.** - Las viviendas del centro poblado de Tonohaya se encuentran a 7.2 km de distancia del cráter del volcán Ubina, además están asentadas sobre depósitos de antiguos lahares, por otro lado, se encuentran a escasos metros del río Ubina. Es por ello que de acuerdo al mapa de peligros volcánicos del volcán Ubina (Rivera et al., 2011) (Fig. 6), las viviendas de la comunidad campesina de Tonohaya se ubican en la zona de alto peligro (color rojo), siendo el principal peligro los lahares secundarios que podrían generarse en la temporada de lluvias, entre los meses de diciembre a marzo. También este fenómeno se ha presentado en años anteriores siendo así que en febrero del 2016 en el valle de Ubina en los ríos Volcán Mayo - Ubina y en el río Phara se produjeron lahares secundarios producto de la acumulación de ceniza en los alrededores del volcán Ubina el cual tuvo una erupción con un índice de explosividad volcánica 2, durante el periodo 2014-2017, estas condiciones con las intensas lluvias de la zona desencadenaron lahares que llegaron hasta la desembocadura con el río Tambo (Mariño et al., 2017).



► Fig. 6 Mapa de peligros del volcán Ubina (IEV 1 a 3), en el sector de Tonohaya (Rivera et al., 2011).

## CONCLUSIONES

- ▶ Los peligros geológicos identificados en el área de estudio comprenden movimientos en masa de tipo: deslizamientos, derrumbes y lahares; además de peligros volcánicos que se podrían desencadenar ante una posible reactivación del volcán Ubinas.
- ▶ Los peligros geológicos identificados en el área de estudio comprenden movimientos en masa de tipo: deslizamientos, derrumbes y lahares; además de peligros volcánicos que se podrían desencadenar ante una posible reactivación del volcán Ubinas.
- ▶ Los movimientos en masa que podrían originarse en el sector de Tonohaya, están condicionados por la litología de depósitos no consolidados de avalancha de escombros y lahares antiguos.
- ▶ Se identificó un deslizamiento antiguo, denominado Tonohaya (DA), en el cual se han identificado cuatro reactivaciones en los sectores de Yrapampa (RCT1), Osocon (RCT1), Santa cruz (RCT2) y Huinomuri (RCT3); los cuales poseen un movimiento lento y progresivo.
- ▶ La zona de derrumbe más afectada es el sector donde están asentadas las viviendas del centro poblado de Tonohaya, y están condicionadas por la erosión y socavación fluvial del río Ubinas que afecta a las terrazas conformadas por depósitos de lahares antiguos.
- ▶ Los depósitos volcánicos emplazados por erupciones pasadas y antiguas son susceptibles a movimientos en masa, que podrían generarse por la actividad sísmica, las intensas lluvias y la actividad antrópica.
- ▶ De acuerdo con la zonificación de peligros volcánicos del volcán Ubinas, para una erupción de magnitud baja a moderada (IEV 1 a 3), el centro poblado de Tonohaya puede ser afectado por diferentes peligros volcánicos siendo uno de los principales los lahares que podrían generarse ante una posible reactivación del volcán Ubinas, además de los lahares que podrían generarse en la temporada de lluvia. Los movimientos en masa que podrían originarse en el sector de Tonohaya, están condicionados por la litología de depósitos no consolidados de avalancha de escombros y lahares antiguos.
- ▶ Se identificó un deslizamiento antiguo, denominado Tonohaya (DA), en el cual se han identificado cuatro reactivaciones en los sectores de Yrapampa (RCT1), Osocon (RCT1), Santa cruz (RCT2) y Huinomuri (RCT3); los cuales poseen un movimiento lento y progresivo.
- ▶ La zona de derrumbe más afectada es el sector donde están asentadas las viviendas del centro poblado de Tonohaya, y están condicionadas por la erosión y socavación fluvial del río Ubinas que afecta a las terrazas conformadas por depósitos de lahares antiguos.
- ▶ Los depósitos volcánicos emplazados por erupciones pasadas y antiguas son susceptibles a movimientos en masa, que podrían generarse por la actividad sísmica, las intensas lluvias y la actividad antrópica.
- ▶ De acuerdo con la zonificación de peligros volcánicos del volcán Ubinas, para una erupción de magnitud baja a moderada (IEV 1 a 3), el centro poblado de Tonohaya puede ser afectado por diferentes peligros volcánicos siendo uno de los principales los lahares que podrían generarse ante una posible reactivación del volcán Ubinas, además de los lahares que podrían generarse en la temporada de lluvia.

## RECOMENDACIÓN

Reubicar progresivamente las viviendas del sector del centro poblado de Tonohaya, a un sector que en el futuro no se vea afectado por peligros geológicos e hidrometeorológicos.

## REFERENCIAS

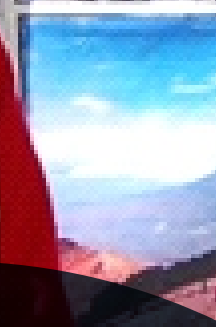
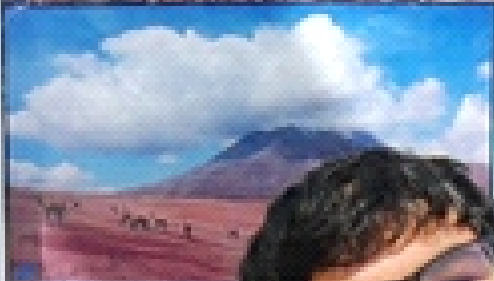
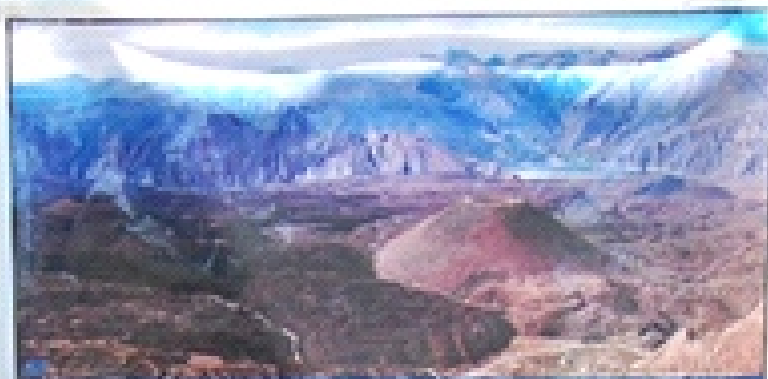
- ▶ Alva, J., Meneses J. y Guzman V. (1984). "Distribución de Máximas Intensidades Sísmicas Observadas en el Perú." V Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Tacna, Perú.
- ▶ Evans, S.; Fídel, L. y Zegarra, J. (2007). Los movimientos en masa de 1962 y 1970 en el nevado de Huascarán, valle del río Santa, Cordillera Blanca, Perú. En: Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Publicación Geológica Multinacional, n.4. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, pp. 386-404.
- ▶ Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2022). Evaluación de peligros geológicos en la comunidad campesina de Tonohaya, distrito Ubinas, provincia General Sánchez Cerro, departamento Moquegua. Lima: INGEMMET, Informe Técnico A7285, 37 p.
- ▶ Mariño, J., Valdivia, D., Soncco, Y., Miranda, R., Machacca, R. (2017). Lahares emplazados en el valle de Ubinas en febrero del 2016: Geología, impacto, modelamiento y evaluación de peligros, región Moquegua. Informe Técnico; N° A6745 INGEMMET. 29p.
- ▶ Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. (2007). Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 4, 432 p., 1 CD-ROM.
- ▶ Rivera M., Mariño J., Thouret J-C. (2011) – Geología y evaluación de peligros del volcán Ubinas. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 46, 83 p., 2 mapas.



MET



Geológica y Monitoreo  
en el sur



# SESIÓN 3

**EXPERIENCIAS DE EDUCACIÓN  
Y DIFUSIÓN PARA LA MITIGACIÓN  
DEL RIESGO VOLCÁNICO**

## Volcán Ubinas: Evolución de la percepción local del riesgo

Roxana Amache Cutipa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Estudios y Prevención de Desastres

**Palabras clave:** Percepción del riesgo, convivir con el riesgo

El volcán Ubinas es considerado como el volcán más activo y de muy alto peligro en el Perú tras haber presentado alrededor de 25 erupciones desde el año 1550. Solo en el presente siglo ya se han observado tres nuevos procesos eruptivos (2006-2009, 2013-2017, 2019). El volcán Ubinas se ubica a 70 km al este de la ciudad de Arequipa, dentro del territorio de la región Moquegua en la provincia General Sánchez Cerro. El valle Ubinas es un espacio geográfico estrecho, con laderas de pendientes pronunciadas, atractivo para los habitantes que radican en el lugar porque presenta gran cantidad de recursos hídricos y de tierras fértiles. (Fig. 1) Allí, a través del tiempo, se establecieron centros poblados como: Ubinas (capital distrital), Querapi, Phara, San Carlos de Tite, Sacohaya, Tonohaya, San Miguel, Huatagua, Anascapay y Escacha.



► **Fig. 1** El volcán Ubinas y sus áreas agrícolas

La población de Ubinas según los Censos Nacionales de Población y Vivienda del 2017 es de 1,741 habitantes, de los cuales 890 son varones y 851 son mujeres.

Como se ve en la tabla 1, aproximadamente un 26.54% de la población se encuentra entre los 65 años a más siendo la población predominante. El número de jóvenes entre los 15 a 29 años solo llega a un 15.45% y es esta población la que mayormente migra a la ciudad de Arequipa por temas de estudio, trabajo.

Población por grupos de edad	Cifras absolutas	%
0 a 14 años	339	19.47
15 a 29 años	269	15.45
30 a 44 años	290	16.66
45 a 64 años	381	21.88
65 años a más	462	26.54
<b>Total</b>	<b>1741</b>	

► **Tabla 1:** Características de la población

Al ser una zona rural, las comunidades están dispersas con agrupamientos familiares de diverso tamaño, siendo el de mayor cantidad de población la capital del distrito con unas 300 familias aproximadamente. Existen comunidades donde habitan entre 25 a 30 familias. La actividad principal es la agrícola y ganadera. La agricultura se desarrolla debajo de los 3600 m.s.n.m., con el cultivo de maíz, papa, trigo, cebada, hortalizas, entre otros. La actividad ganadera está relacionada a la crianza de ganado ovino, bovino y caprino; sin embargo, por encima de los 4000 m.s.n.m., la crianza de camélidos es muy extendida.

Históricamente, la erupción volcánica en sus varios episodios, ocasionó daños significativos en diversos centros poblados dentro del perímetro de influencia del volcán, afectando terrenos de cultivo y pastizales, fuentes de agua, mortalidad o daños a la fauna y flora diversa, actividades económicas, entre otros.

El primer periodo eruptivo reciente se dio entre los años 2006 al 2009. En ese momento el conocimiento científico sobre los procesos eruptivos del volcán era escaso. INGEMMET durante los últimos años continuó realizando varios estudios geológicos, vulcanológicos y geofísicos del volcán Ubinas, destinados a mejorar el conocimiento acerca de la actividad volcánica pasada de dicho volcán. Resultado de ellos actualmente se

cuenta con varias publicaciones, entre ellas: Geología y evaluación de Peligros del volcán Ubinas (Boletín N°46, Serie C), publicado en el año 2011; en donde se presentan los resultados del estudio geológico-volcanológico efectuado sobre dicho volcán, y se presenta el mapa de peligro volcánico oficial. Rivera et al. (2011), donde se establecen zonas de alto, moderado y bajo peligro. Con el mapa de peligros elaborado y con la participación de autoridades locales se construyó el mapa de rutas de evacuación sitios de refugio, así mismo con la participación del Sistema Regional de Defensa Civil SIREDECI Moquegua se formuló el plan de contingencia y de evacuación. Rivera y Mariño (2012)

Frente al incremento de la erupción del volcán Ubinas en el año 2006 e comunicaron las medidas de emergencia como la evacuación forzada de 154 personas del centro poblado de Querapi hacia el albergue de Anascapa. Seguidamente se evacuaron 1,356 personas de los poblados de Tonohaya, Sacohaya, San Miguel, Huatagua y Ubinas hacia el albergue de Chachagen. Tanto las instituciones como la Policía Nacional, Ejército del Perú, Cuerpo General de Bomberos, Defensoría del Pueblo entre otros y los gobiernos locales tenían poca información y carecían de experiencia en el manejo de este tipo de fenómenos. Para la población fue una situación sorpresiva y adversa, debido a la ausencia de planificación. Las autoridades y la población en general no estaban adecuadamente informadas, sensibilizadas y preparadas sobre la toma de acciones de respuesta que se implementaron.

Durante el periodo comprendido entre los años 2013 al 2017, los habitantes perciben una mayor incertidumbre acerca del periodo de reactivación del volcán Ubinas. Ellos tenían la percepción desarrollada en base a las experiencias vividas por sus antepasados que indicaban que cada 50 años se reiniciaba la actividad volcánica (año 1956 sucedió un episodio similar al de 2006). Esta percepción se mantuvo en la memoria colectiva. Esta última erupción hizo que los habitantes cambiaran esas percepciones debido a sus propias experiencias, desarrollando nuevos esquemas orientativos con cierta incertidumbre. Consideran que el retorno de una erupción se da en periodos cortos y que un proceso eruptivo puede durar

entre 1 a 3 años continuos. Los habitantes, al tener un nuevo esquema orientativo sobre el periodo de retorno y la duración del proceso eruptivo del volcán, señalan que no pueden tomar decisiones con seguridad, ya sea de continuar habitando su territorio y desarrollar proyecciones en sus actividades económicas hacia adelante. Los pobladores de Querapi ante dicho escenario y al ser declarada zona de muy alto riesgo no mitigable, exigieron el reasentamiento hacia las Pampas de Jahuay iniciándose un proceso lento y con varios matices de complejidades en el proceso (Arana, 2017).

En julio del 2019, en horas de la noche, se registraron expulsiones de fragmentos de roca desde el cráter del volcán con una columna eruptiva que superó los 7 km sobre la base del cráter. Las cenizas y gases emitidos fueron dispersados hacia el Este y Sur Este del volcán, a una distancia mayor a los 200 km (límite internacional). Este episodio marca una nueva percepción a nivel incluso técnico-científico por las complejidades e incertidumbres del comportamiento del volcán pues es evidente que cambia el escenario, comportamiento y efectos por la manera en que se presentó esta erupción y el corto tiempo de duración (de julio a setiembre periodo activo y de setiembre a diciembre periodo de decaimiento). En este escenario se proyecta tener definido un albergue con condiciones apropiadas para una evacuación futura, ubicado en Sirahuaya cerca al poblado de Anascapa.



► Fig.2 Reunión con los pobladores de Ubinas para conocer sus percepciones.

La percepción del riesgo de la población mantiene cierta aceptación y adaptación a vivir con el riesgo frente a la amenaza volcánica. Esto implica una forma de resignación del riesgo de los habitantes, "algunos de nosotros convivimos, que vamos a hacer, de donde vamos a comer, esta es nuestra tierra aunque mal o bien estamos aquí sembrando siquiera para comer, sino sembramos qué vamos a comer, quién nos va a dar, nosotros somos agricultores" (Fig.2).

Ante esta situación de aceptación del riesgo con actividades económicas funcionando, la población se plantea algunas propuestas que podrían ayudar a mejorar sus condiciones de vida, tales como:

- ▶ Crear un modelo de gestión participativa que nazca desde los intereses y prioridades que tiene la población y romper ciertos parámetros de desarrollo tradicionales. Por ejemplo, un plan de desarrollo hecho por consultores puede ser valioso y bueno, pero son elaborados desde un escritorio sin participación de la gente (Clark, 2015). El tamaño de las propiedades de terreno, en promedio son pequeñas, de una a dos hectáreas, por lo tanto, se debe utilizar al máximo el espacio de tierra para una mejor productividad en base a una agricultura intensiva, así como diversificar las actividades económicas de los agricultores.
- ▶ Se debe impulsar la asociatividad en base a intereses comunes incluyendo a las mujeres y a los jóvenes con una clara representatividad.
- ▶ Trabajar en una producción limpia basada en una producción agroecológica desarrollando para ello cadenas productivas con varios productos donde el propio agricultor pueda comercializar directamente y trabajar con el marketing de tierras "fértiles" justamente por la existencia del volcán y la ceniza en un momento actúa como controlador de plagas.
- ▶ La existencia de planes de negocio como Procompite fondo concursable para cofinanciar propuestas productivas necesitan un acompañamiento para enseñar al interno el manejo de conflictos, para lograr experiencias exitosas. Estos planes de negocios deben considerar a su vez el factor riesgo por la recurrencia de las erupciones volcánicas de la zona.
- ▶ Buscar el proceso de mejora del valor agregado como la producción de miel, yogurt entre otros. Para ello se deberá acompañar con capacitaciones, cursos.
- ▶ El Instituto Superior Tecnológico podría implementar carreras técnicas orientadas a fortalecer el proceso de priorización que tienen los pobladores como el de tener servicios veterinarios, inseminación pecuaria, atención de enfermedades propias de la afectación por una erupción volcánica, carreras técnicas de operadores de turismo, entre otros.
- ▶ Cambiar el sistema de riego para mitigar los deslizamientos que se están produciendo en la mayoría de las comunidades.
- ▶ Impulsar rutas agro-ecoturísticas en base a la asociatividad que teniendo una carretera en condiciones apropiadas puedan ir surgiendo pequeños negocios de comidas típicas, turismo vivencial entre otros.
- ▶ El fortalecimiento de las acciones de preparación de la población y autoridades, así como la implementación y sostenibilidad de un Sistema de Alerta Temprana teniendo conocimiento muy claro del riesgo, sabiendo qué hacer en cada nivel de alerta, tener rutas de evacuación adecuadas y señalizadas para una rápida y segura evacuación, aunado a capacitación permanente en la adopción de tareas que deben ser ejecutadas en cada proceso, permitirá accionar de manera oportuna para salvar la integridad de la población y si la situación se complica se podrán establecer en los albergues teniendo que esperar hasta que las cosas vuelvan a la normalidad y puedan retornar luego a sus comunidades.
- ▶ Continuar con el equipamiento del albergue de Sirahuaya considerando que aún falta cubrir la cantidad necesaria para la población a evacuar, así como crear las condiciones adecuadas para un óptimo funcionamiento.
- ▶ Cuando se tenga a la población albergada se tendrá que implementar acciones concretas para propiciar la generación de recursos acorde a los diferentes grupos, incluyendo a las personas adultas mayores con métodos que ayuden a manejar mejor sus emociones y sentirse útiles aún en momentos de adversidad.



## REFERENCIAS

- ▶ Rivera M, Mariño, J. & Jean-Claude, T. (2011)- Geología y evaluación de peligros del volcán Ubinas. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 48, 63 p., 2 mapas.
- ▶ Rivera M, Mariño J. (2012) Evaluación de la seguridad física de los Centros Poblados del Valle del río Ubinas frente a peligros volcánicos del volcán Ubinas.
- ▶ Clark P, (2015) Tungurahua: un caso ejemplar del desarrollo económico territorial.
- ▶ Arana M, ( 2017) Tesis percepción y gestión del riesgo de desastres de los habitantes del Centro Poblado de Querapi ante la reactivación del volcán Ubinas en la Provincia General Sánchez Cerro, Región Moquegua del 2014-2016

# Difusión y sensibilización del INGEMMET para un mejor entendimiento de los peligros del volcán Misti

Marilyn Bautista<sup>1</sup>, David Valdivia<sup>1</sup> y Verónica Tito<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Observatorio Vulcanológico del INGEMMET-OVI

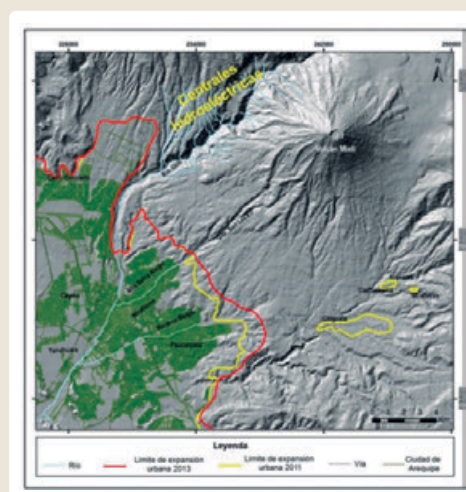
**Palabras clave:** Población, volcán Misti, Sensibilización, Erupción, Mapa de peligros, Caída de ceniza, Lahar

## INTRODUCCIÓN

El Misti es uno de los 10 volcanes activos del Perú. Limita por el sureste con el extinto estratovolcán Pichu Pichu y por el noroeste con el complejo volcánico Chachani, su cima alcanza una altura de 5822 msnm. Durante los últimos 2 mil años, el Misti ha presentado por lo menos cuatro erupciones. La última erupción se registró a mediados del Siglo XV, las cenizas emitidas en esta erupción poseen espesores de hasta 6 cm en el área de Arequipa (Chávez 1992). La mayoría de la población no se encuentra concientizada con respecto de los peligros que conlleva tenerlo a pocos kilómetros de distancia, en caso inicie un nuevo proceso eruptivo.

Desconocimiento y necesidad. Se tiene la errónea creencia que uno de sus principales peligros asociados a la actividad volcánica son los flujos de lava, sin embargo, el volcán se caracteriza por emitir caídas de ceniza, el peligro que más afectaría a la salud de las personas y animales, los recursos hídricos, la agricultura, la ganadería, la minería y el comercio, generando la contaminación en cada uno de estos, todo ello en relación al tiempo de exposición y proximidad al centro eruptivo. Cada vez se nota un mayor incremento de construcción de casas hacia el volcán y las razones son diversas ya sea por desconocimiento al habitar en zonas de alto peligro volcánico hasta la necesidad de tener un lugar donde podervivir (Fig. 1 y 2).

El Ingemmet se encarga de realizar el estudio de la geología, monitoreo y evaluación de peligros volcánicos, otorgando a la población y autoridades el mapa de peligros del volcán Misti con el propósito de contribuir con una adecuada gestión del territorio. Por esta premisa, nace la pregunta ¿Cómo evitar que continúe creciendo el catastro sin previa planificación e incrementar el conocimiento geo-científico con la ayuda de los mapas de peligros volcánicos proporcionados por el Ingemmet?



► Fig. 1 Mapa de límites de expansión urbana hacia el volcán Misti. Como se puede apreciar el crecimiento poblacional sigue manteniendo la tendencia de crecer hacia el volcán Misti, especialmente en la zona del distrito de Cayma, así como también en los distritos de Miraflores, Mariano Melgar, Paucarpata y Chiguata (Tomado de Macedo & Vela 2014).



► Fig. 2 Fotografía que muestra el crecimiento poblacional cada vez más cerca al volcán Misti en la parte alta del distrito de Paucarpata. Foto tomada en el 2021.

Es por ello que el rol que cumplen los difusores del conocimiento científico es fundamental para brindar herramientas edu-comunicativas de manera permanente a las autoridades, líderes y comunidades mediante estrategias de reducción del riesgo volcánico, las cuáles tomen en cuenta la cosmovisión de la población, con el fin de mejorar la comunicación y visibilizar los riesgos a los que está expuesta la población de manera conjunta con las autoridades, para una oportuna toma de decisiones y evitar grandes desastres.



► Fig. 3 Charlas de sensibilización realizadas en Paucarpata en 2022 como parte del proyecto “Preparados Ante Volcanes y Sismos”.

### El Misti; uno de los volcanes más riesgosos del mundo

El Misti es uno de los volcanes con mayor puntuación en el ranking de riesgo volcánico de Latinoamérica (Freitas et al. 2021), entre los factores más influyentes destaca la cantidad de personas que viven cerca de él. Su cumbre está localizado a 18 km del centro histórico de Arequipa. Siendo esta ciudad la segunda más poblada en el Perú, con 1 millón 316 mil habitantes (INEI 2017), de igual manera, en sus alrededores se asientan importantes infraestructuras y proyectos de inversión, que se verían seriamente afectados en caso este volcán entrase en erupción.

Mapa de peligros del volcán Misti. Los mapas de peligro volcánico son documentos cartográficos que muestran el grado de peligrosidad volcánica de las áreas adyacentes a un determinado volcán. El mapa de

peligros está basado en el estudio de erupciones pasadas, estratigrafía y evolución geológica del volcán (Mariño et al. 2016). Es una herramienta que permite el ordenamiento territorial y el desarrollo de mejores planes de prevención y reducción del riesgo de desastre. En el año 2010, en el marco del ordenamiento territorial y planificación de desarrollo, se emitió la ordenanza municipal Nro. 658-MPA, oficializando al mapa de peligros del volcán Misti (Ingemmet 2021).

### Principales peligros volcánicos en Arequipa

Uno de los principales peligros reconocidos, además de la ceniza y pómez son los lahares (flujos de detritos), flujos piroclásticos, flujos de lava y avalanchas de escombros (Mariño et al. 2016).

Según los escenarios eruptivos definidos para el volcán Misti, las erupciones pueden ser subplinianas (moderadas a grandes) y vulcanianas (pequeñas). La recurrencia del primer tipo de erupciones es de 2 mil años y en caso de las vulcanianas existe la posibilidad que se produzcan cada 500 años (Ingemmet 2020). Lo que resulta preocupante ya que la última gran erupción se presentó hace 2050 años y la de menor escala se reportó entre los años 1440 y 1470. Por lo tanto, actualmente el volcán Misti podría presentar cualquiera de estos dos escenarios.

Ceniza volcánica: Corresponde al magma pulverizado que es expulsado hacia la atmosfera formando una columna eruptiva alta, posteriormente los fragmentos caen sobre la superficie cubriendo las áreas en la dirección de los vientos predominantes. (Ingemmet 2021). En el mapa de peligros por caída de ceniza del volcán Misti se consideran tres zonas: alto peligro (rojo) con un radio de afectación de 15 km desde el centro emisor, zona de moderado peligro (naranja) entre 15 a 30 km y zona de bajo peligro (amarillo) de >30 km (Mariño et al. 2016).

La ceniza volcánica afectaría la salud de las personas y animales. Contaminaría las principales reservas de agua al no contar con una adecuada protección de este servicio elemental, como el caso de Aguada Blanca, lo que agravaría los problemas de salud en miles de familias arequipeñas. Otro punto a considerar es establecer un lugar dónde realizar la evacuación de más de 1 millón de personas.

Por ejemplo, el volcán Sabancaya localizado en la provincia de Caylloma de la región Arequipa, actualmente se encuentra en proceso eruptivo desde el año 2016, está asentada en un diámetro de 30 kilómetros de distancia del cráter. Pese a estar en el rango de magnitud pequeña (vulcaniana) lejana al cráter a comparación del Misti, se hacen visibles sus efectos a causa de la caída de ceniza. Se pudo identificar periodos donde la actividad eruptiva se correlaciona con el mayor número de casos de enfermedades de IRAS (infecciones respiratorias agudas), EDAS (enfermedades diarreicas agudas), conjuntivitis y dermatitis en diciembre del 2016, en los años 2017 y 2019 (Japura et al. 2022). Este escenario podría repetirse en la Ciudad Blanca, en caso de una erupción de pequeña magnitud del volcán Misti.

Por otro lado, dependiendo de la cantidad de ceniza, genera problemas en la infraestructura como en los reservorios de agua, canales de riego, centrales hidroeléctricas, generando a su vez, corte de suministro de energía eléctrica a la población. (Valdivia et al. 2020).

Lahares (huaycos): es la mezcla del agua con material volcánico, son los eventos más recurrentes que se dan en los volcanes del sur del Perú, son un peligro debido a su recurrencia, pudiendo ser primarios (ligados a una erupción volcánica), o secundarios (ligados a lluvias intensas en áreas volcánicas). Los lahares ocasionan, muerte por enterramiento o ahogo, obstrucción de drenajes generando aguas estancadas que ocasionan la proliferación de insectos y roedores, también pueden arrasar zonas de cultivo e impactar a infraestructuras (puentes, muros, viviendas cerca de los cauces de las quebradas).

### **Arequipa en el 2013**

En la ciudad de Arequipa, el 8 de febrero de 2013, aproximadamente a las 16:00 horas, ocurrió una lluvia inusual de 124.5 mm, generando lahares (flujos de lodo) en las quebradas San Lázaro, Av. Venezuela y Los Incas, que dieron lugar a desbordes e inundaciones. Estos eventos causaron la muerte de 6 personas y se reportaron severas afectaciones: 50 km de vías soterradas, el sistema de agua potable y desagüe impactados, la destrucción de 280 viviendas y daños en otras 10 mil, además, dañó centros comerciales, (Ettinger et al., 2015).

Dentro de los factores que amplificaron los efectos de los lahares fue la falta de limpieza de los cursos naturales (quebradas/torrenteras), falta de mantenimiento de los sistemas de drenaje y alcantarillado, y ocupación urbana de los espacios naturales (Cacya et al. 2013).

### **Trabajos de difusión realizados por Ingemmet en la ciudad de Arequipa - 2022**

Las partes altas donde se ubican los seis distritos de: Chiguata, Paucarpata, Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar y Cayma son los más expuestos a la actividad volcánica por su proximidad, ya que se han identificado viviendas asentadas a menos de 10 kilómetros de distancia al cráter, por lo que es necesario incrementar una adecuada cultura de prevención ante los peligros volcánicos.

Gracias a la alianza estratégica entre Ingemmet con el proyecto "Preparados Ante Volcanes y Sismos" que ejecutaron la Agencia Adventista para el Desarrollo y Recursos Asistenciales (ADRA) y el Centro de Estudios y Prevención de Desastres (PREDES) con financiamiento de USAID, sirvió para trabajar de forma conjunta diferentes actividades de sensibilización a la población sobre peligros volcánicos, entre las cuales destacan: ferias de sensibilización con el nombre de Riesgo Landia dirigidas a todos los miembros de familia, charlas virtuales para estudiantes, docentes y padres de familia, encuentros de estudiantes de secundaria y capacitaciones para maestros pertenecientes a la Brigada de Educación Ambiental y Gestión del Riesgo de Desastres de las Instituciones Educativas, con el lema: "Mi Cole y yo Preparados ante Volcanes y Sismos"; también se colaboró con la redacción del contenido sobre peligros Volcánicos en la: Guía del Maestro Brigadista, que será distribuida a 500 docentes de la región Arequipa (Fig. 3).

**Reuniones multisectoriales:** Para mejorar las relaciones interinstitucionales se visitó a la nueva jefa del Centro de Operaciones de Emergencia Regional (COER) de Arequipa Arq. Barbara Cuadros Quihue (Figura 4). Para lo cual se llevó material de difusión y explicó sobre los peligros geológicos existentes en la región, que son estudiados y monitoreados por investigadores del Observatorio Vulcanológico del Ingemmet (OVI). Además, se invitó a su equipo técnico,



para que conozca las instalaciones del Ingemmet, por lo que se realizó una visita guiada para profundizar la función del "panel view", en qué consiste el monitoreo multidisciplinario y la función del mapa de peligros volcánico geológico.



► Fig. 4 Ingemmet informa sobre los peligros geológicos existentes en la región Arequipa a la nueva jefa del COER.

Por otro lado, se instaló la plataforma de visualización de monitoreo volcánico en tiempo real "panel view" en los distritos de Miraflores, Mariano Melgar y Paucarpata; así como en el COER- Arequipa y en la Municipalidad Provincial de Arequipa. En estos paneles se puede observar lo que sucede en el volcán las 24 horas del día. Esta actividad se pudo ejecutar gracias a la implementación de las salas de gestión de riesgo en cada municipalidad como parte del proyecto "Preparados Ante Volcanes y Sismos" (Fig. 5).



► Fig. 5 Ingemmet pone a disposición plataforma de monitoreo volcánico en tiempo real para el COER Arequipa y distritos más próximos al volcán Misti.

El fin de estas reuniones multisectoriales es dar a conocer las labores que realiza el Ingemmet como servicio geológico del país, así como informar que el OVI es un centro de investigación y monitoreo de los volcanes activos del sur del Perú.

Ferias de sensibilización y visitas guiadas: El equipo de educación y difusión del OVI participó de 16 ferias de sensibilización los domingos en los distritos de Chiguata, Paucarpata, Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar, Cayma y cercado de Arequipa entre los meses de febrero a agosto. Estos eventos de sensibilización se realizaron en parques, estadios, locales sociales y en la misma Plaza de Armas de Arequipa. Se tuvo la participación de cerca de 3500 personas.

Asimismo, se realizaron 27 visitas guiadas al observatorio por parte del COER - Arequipa, Comités comunitarios de emergencias de los diferentes distritos de Arequipa, Colegio de Periodistas, estudiantes de Geografía de la universidad de San Marcos, estudiantes de geofísica de la UNSA, a los miembros del grupo Recuperando Valores Perú y a los miembros de Red Universitaria Ambiental.

#### Otras actividades de difusión:

Ceremonia por aniversario del OVI, 18 de abril

Taller "Sistemas de Gestión de Riesgo de Desastre en zonas volcánicas - Arequipa"

Seminario "Nina y el Origen del Sillar"

Ciclo de Conferencias "Geopatrimonio en zonas volcánicas, para promover el Geoturismo y la sensibilización ante peligros volcánicos"

Salida de campo realizada a la Ruta del Sillar a las autoridades participantes por le mes de la vulcanología.

Salida de campo realizada a la Ruta del Sillar a los miembros de los 31 comités comunitarios de emergencia.

Charla de sensibilización con títeres a la E.I.E. Horacio Zeballos Gómez.

Charla de sensibilización a la institución educativa Leónidas Bernedo Málaga en Yarabamba.

También se realizó un video animado titulado, "Nina y el origen del Sillar" el cual busca educar y sensibilizar a la población frente a los peligros volcánicos. El corto fue

realizado por los especialistas del OVI, en cooperación con la Universidad Clermont Auvergne (UCA) de Francia. Se estrenó en conmemoración del Mes de la Vulcanología (abril) en la región Arequipa.



► Fig. 6 El corto "Nina y origen del sillar" tuvo gran acogida por los diferentes medios de comunicación de Arequipa.

Otra destacada actividad es la realización del IX Foro Internacional de Peligros Volcánicos-FIPVO: "Volcanes y Sociedad: Riesgo y Prevención", tendrá lugar el 2, 3 y 4 de noviembre el cual será en dos modalidades virtual y presencial después del período de contingencia por la pandemia de COVID-19.

Dicha actividad goza de gran expectativa ya que desde el 2005 al 2018 se desarrollaron 8 ediciones. Y este año se va exponer los últimos estudios y avances de mapas de peligros, monitoreo volcánico, impacto y gestión de las erupciones volcánicas, experiencias de educación y difusión, geopatrimonio en áreas volcánicas y resiliencia ante los peligros. Además, congrega a la sociedad vulcanológica en la región de Arequipa.

## CONCLUSIONES

Como se ha podido identificar la población de Arequipa continúa creciendo más cerca al volcán Misti. El hacer hincapié sobre los peligros volcánicos que podrían afectar la ciudad no busca fomentar miedo, sino, sensibilizar a la población, así como a autoridades y a organizaciones arequipeñas a tomar acciones de prevención y mitigación de desastres para afrontar de la mejor manera eventos que van a ocurrir por la misma naturaleza de los volcanes activos. Por lo cual las actividades de difusión que realiza el INGEMMET son primordiales para tener una mejor comunicación y entendimiento de los temas técnicos y convertirlos en un lenguaje más sencillo que sea comprensible para la población.

## RECOMENDACIONES

Generar un plan de comunicación integral, realizado por especialistas en difusión de las entidades técnico científicas y autoridades del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD), con el fin de generar acciones de mayor impacto que ayuden aminorar los riesgos ante una eventual erupción del volcán Misti de manera conjunta e interinstitucional, considerando los temas de: planificación territorial, protección de las principales reservas de agua y concientización sobre los peligros volcánicos.

Utilizar el mapa de peligros del volcán Misti para elaborar planes de contingencia, establecer zonas de refugio y rutas de evacuación en Arequipa, así como respetar los límites territoriales para la construcción de viviendas en zonas de alto peligro volcánico. El mapa de peligros del volcán Misti debe constituir un primordial instrumento de planificación territorial en la ciudad de Arequipa.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todo el personal del Observatorio Vulcanológico del Ingemmet por su labor incansable de investigación y monitoreo volcánico; de manera especial al área de Difusión geocientífica y comunicación con comunidades; y a las instituciones: ADRA PERÚ, PREDES Y USAID que generaron nuevas propuestas comunicativas respecto a la Gestión del Riesgo de Desastres en la ciudad de Arequipa.

## REFERENCIAS

- ▶ Alfaro, G. (2010). La comunicación de la información geocientífica como estrategia para la planificación del territorio. XV Congreso Peruano de Geología. Lima, pp. 89-97.
- ▶ Chávez, J. (1992). La erupción del Volcán Misti. Pasado Presente y Futuro. Imprenta Zenit
- ▶ Ettinger, S., Mounaud, L., Magill C., Françoise, A., Lafourcade, Y., Thouret, J., Manville, Negulescu, Zuccaro, G., Luque, J., Arguedas, A., Macedo, L., Manrique, N. (2016). Building vulnerability to hydro-geomorphic hazards: Estimating damage probability from qualitative vulnerability assessment using logistic regression. Journal of Hydrology. Volume 541, Part A, Pp 563-581. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.017>
- ▶ Freitas, L., Nieto, A., Bonadonna, C. & Frischknecht, C. (2021). A New Inclusive Volcanic Risk Ranking, Part 2: Application to Latin America. Frontiers in Earth Science. Sec. Geohazards and Georisks. Pp. 24. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.757742>
- ▶ INEI, (2021). Arequipa alberga a 1 millón 316 mil habitantes. <https://m.inei.gob.pe/prensa/noticias/arequipa-alberga-a-1-millon-316-mil-habitantes-9903>
- ▶ Ingemmet. (2020). Evaluación de peligros geológicos en el distrito de Paucarpata. INGEMMET. Pp. 22. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2584>
- ▶ Ingemmet. (2021). ¿Estas preparado para una probable erupción del volcán Misti?. INGEMMET. Pp. 18. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3608>
- ▶ Ingemmet Perú (08 de julio del 2022). Impacto de la ceniza volcánica en la salud de la población asentada alrededores del volcán Sabancaya. Facebook GEOMIN. <https://web.facebook.com/INGEMMET/videos/364795472412034>
- ▶ Macedo, L. & Vela, J. (2014). Límites de expansión urbana hacia los volcanes Misti y Chachani, Informe Técnico N° A6658. INGEMMET. Lima pp. 12. [https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/1741/3/A6658-Limites\\_expansion\\_urbana\\_volcan\\_Misti\\_Chachani-Arequipa.pdf](https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/1741/3/A6658-Limites_expansion_urbana_volcan_Misti_Chachani-Arequipa.pdf)
- ▶ Mariño, J., Rivera, M., Thouret J.C. & Macedo, L. (2014). Geología y mapa de peligros del volcán Misti - Boletín, [Serie C], Lima, pp 81-149
- ▶ Valdivia, D., Japura, S., Paxi, R., Aguilar, R. & Taipe, E. (2020). Evaluación de caída de ceniza del volcán Sabancaya en el Valle del Colca y alrededores. Informe técnico N ° 7104. Lima. Pp 23-38. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3027>

# La Volcanoteca: una propuesta desde la volcanología, las ciencias sociales y las artes para el fortalecimiento del conocimiento sobre peligros volcánicos en torno al Complejo Volcánico Nevados de Chillán, Chile

Matías Clunes<sup>1</sup>, Valentina Acuña<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile – mclunes@uc.cl

<sup>2</sup> Instituto de Sociología, Pontificia Universidad Católica de Chile

**Palabras clave:** riesgo de desastres, peligros volcánicos, divulgación, artes, transdisciplina

## El peligro volcánico en Chile y en el Complejo Volcánico Nevados de Chillán

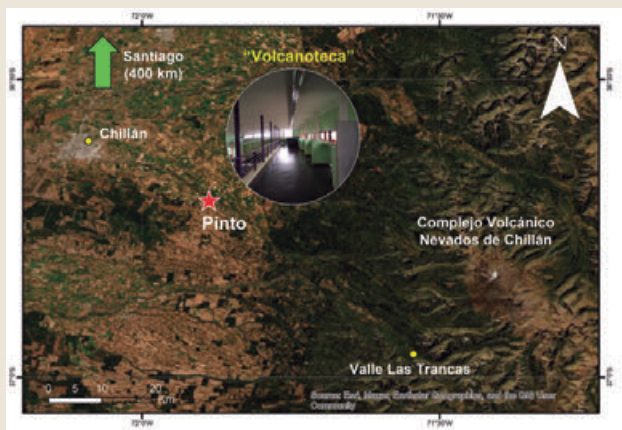
El territorio chileno está ubicado en la zona de subducción entre las placas oceánicas de Nazca y Antártica bajo el continente Sudamericano. Este proceso desencadena una serie de eventos geológicos, como la frecuente ocurrencia de terremotos asociados al levantamiento de la Cordillera de Los Andes, tsunamis relacionados a dichos terremotos, erupciones volcánicas y formación de yacimientos minerales metálicos, algunos de ellos, dentro de los más grandes del planeta. Estas características geológicas reunidas a lo largo de Los Andes, convierten a este territorio en un laboratorio natural excepcional para estudiar una gran diversidad de procesos terrestres, sin embargo, también hacen que las comunidades que lo habitan estén muchas veces expuestas a peligros geológicos relacionados a los procesos anteriormente mencionados.

Según la Red Nacional de Vigilancia Volcánica (RNVV) del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), existen 90 volcanes considerados geológicamente activos en Chile, de los cuales 45 son vigilados en tiempo real a través del Observatorio Volcanológico de Los Andes del Sur (OVDAS). Esta numerosa cantidad de volcanes activos hace que los peligros asociados a los procesos volcánicos sean uno de los más comunes en el país, lo que convierte al riesgo de desastres volcánicos en un área de especial interés para distintos organismos gubernamentales y grupos de investigación enfocados en la disminución del riesgo ante desastres socio-naturales.

Si bien los peligros relacionados a los procesos volcánicos son inevitables, es posible reducir el riesgo de desastres ante estos a través de la educación y así avanzar hacia una de las tareas esenciales en esta materia: reducir la vulnerabilidad de las comunidades que habitan zonas volcánicamente activas a través de la divulgación, socialización y co-construcción del conocimiento.

En este contexto, el Complejo Volcánico Nevados de Chillán (CVNC), ubicado en las comunas de Pinto y Coihueco en la Región de Ñuble, en la zona centro-sur de Chile (Fig. 1), se posiciona como un área de intervención educativa-ciudadana, pues se encuentra en el 4º lugar del ranking de riesgo específico elaborado por profesionales de la RNVV en 2019. Su último proceso eruptivo comenzó el año 2016 y continúa hasta la actualidad. Según la Carta de Peligros del CVNC (Orozco et al., 2016), las localidades de la comuna de Pinto, situadas en los cauces del río Diguillín y el estero Renegado, están ubicadas en zonas de muy alto a moderado peligro volcánico, es decir, corresponden a áreas susceptibles de ser afectadas por procesos como flujos de lava, flujos piroclásticos, ocurrencia de lahares y caída de cenizas. Sin embargo, la historia de actividad del CVNC comenzó mucho antes, hace más de 600 mil años, con erupciones que han generado el colapso del edificio volcánico, construido nuevos volcanes y rellenado los valles aledaños con cenizas producto de una intensa actividad explosiva. Actualmente el CVNC posee alrededor de 20 centros eruptivos, algunos de ellos cubiertos durante todo el año por glaciares y otros con gran acumulación nival, en cuyo registro histórico es posible encontrar evidencias de al menos 20 eventos eruptivos (Orozco et al., 2016).





► Fig.1 Mapa de ubicación del proyecto y del Complejo Volcánico Nevados de Chillán.

Hacia una educación ciudadana para la reducción del riesgo de desastres

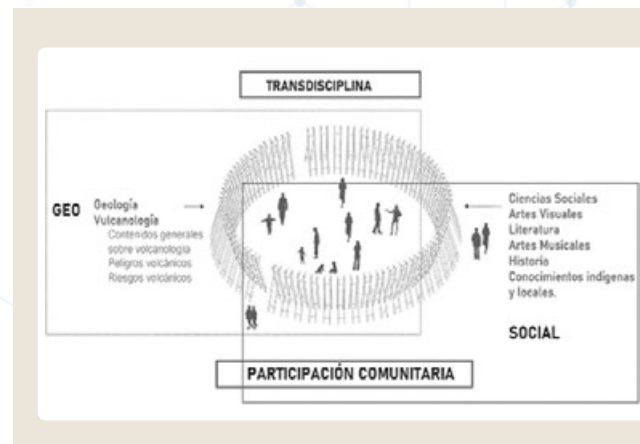
El Marco de Acción de Hyogo (ONU, 2005) enfatizó cinco prioridades de desempeño para Reducir el Riesgo de Desastres en el mundo; la prioridad de la tercera función fue aplicar el conocimiento, la innovación y la educación para crear una cultura de seguridad y resiliencia en todos los niveles. Del compromiso de Chile con el Marco de Acción de Hyogo emerge la Política Nacional de Reducción de Riesgo de Desastres 2020-2030 (ONEMI, 2020), que estableció que una de las oportunidades de mejora en la Gestión del Riesgo en el país, es la educación a nivel ciudadano.

El primer eje prioritario de dicha política consiste, en efecto, en “recoger e impulsar aquellos aspectos necesarios para propiciar una cabal comprensión y entendimiento del riesgo de desastres en todos los niveles, y de manera transversal en el Estado, sector privado, sociedad civil, academia y comunidad en general. De la mano de la investigación, el conocimiento, el diálogo, la recuperación de la memoria histórica, la ciencia, innovación y tecnología, todos los actores de la sociedad deben ir fortaleciendo una fundada percepción del riesgo para fomentar con ello una cultura de prevención y autoaseguramiento” (ONEMI, 2020). En ese sentido, uno de los objetivos estratégicos es promover la concientización y educación sobre la Reducción del Riesgo de Desastres en los distintos actores del territorio nacional.

La Educación para la Reducción del Riesgo de Desastre es central a estos propósitos, pues tiene como objetivo proporcionar conocimiento entre individuos y grupos para tomar acciones para reducir su vulnerabilidad ante los desastres, y, de hecho, se ha transformado en una herramienta funcional, operativa y rentable para la Gestión de Riesgos (Torani et al., 2019). Se ha evidenciado que los desastres se reducen cuando las personas son conscientes, y en ese sentido, la motivación de la Educación sobre Desastres es crear una cultura de prevención y resiliencia ante su ocurrencia. El objetivo en esta senda, entonces, es priorizar la recolección y difusión de conocimientos e información sobre peligros, vulnerabilidades y capacidades, especialmente para las personas vulnerables.

La “Volcanoteca”: Espacio de interpretación Geo-Social del Complejo Volcánico Nevados de Chillán

En este proyecto, que busca financiamiento a través de su postulación al fondo Ciencia Pública del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación de Chile, entendemos las amenazas geológicas -en este caso volcánicas- como formaciones geo-sociales, es decir, reconociendo la co-determinación que existe entre variables geológicas y sociales en el desencadenamiento de desastres (Acuña et al, 2021). En este sentido, tanto para la comprensión, como para la prevención de los riesgos asociados, es imperativo avanzar hacia el desarrollo de una mirada transdisciplinaria en la Educación Ciudadana de Desastres. Esto quiere decir que los peligros volcánicos no pueden ser comprendidos ni enseñados exclusivamente desde una mirada disciplinaria si no que,



► Fig.2 Esquema que integra las distintas perspectivas que busca abordar la “Volcanoteca”.

requieren de un abordaje múltiple e integral en el que se integren con igual validez los conocimientos de actores disciplinares y sociales heterogéneos (Fig. 2).

En la estrategia, que busca implementar una exhibición sobre peligros y riesgos volcánicos en la Biblioteca Municipal de Pinto y ha sido diseñada por especialistas en las áreas de la volcanología, las ciencias sociales, artes, arquitectura e innovación, cobran especial relevancia las artes y la participación comunitaria. Por un lado, existe evidencia de la capacidad de las artes para dar forma a la información técnica en formatos que resuenen con las emociones de las personas, para así transformar actitudes e inspirar la acción (e.g., Cosgrave y Kelman, 2017). La "Volcanoteca", entonces, por medio de la inclusión de las artes visuales y literarias, buscará avanzar en la integración entre las artes y los desastres socio-naturales. Por otro lado, la participación comunitaria será fundamental en el co-diseño, manejo del espacio y levantamiento de datos para la ejecución del proyecto. Lo anterior se funda en el desarrollo de responsabilidades y capacidades de agentes de establecimientos educacionales, organizaciones comunitarias, operadores turísticos y del apoyo del Municipio, como también, en una mirada intercultural del conocimiento, donde la valoración de conocimientos locales e indígenas sobre peligros volcánicos se lleve a cabo mediante la implementación de metodologías participativas (e.g., mapeos colaborativos, focus group y entrevistas cualitativas).

Por lo tanto, para el desarrollo de nuestra estrategia es esencial el fortalecimiento del ecosistema científico-cultural-comunitario, dado que las fases iniciales del diseño e implementación del proyecto requerirán la participación activa de la comunidad local, permitiendo así que la experiencia en torno a la propuesta se lleve a cabo a lo largo de toda la ejecución del proyecto. Además, nuestra propuesta busca establecer redes de asociatividad entre instituciones del mundo privado, público y académico, a través de la colaboración entre Andina SpA, la I. Municipalidad de Pinto, organizaciones comunitarias locales, la Pontificia Universidad Católica de Chile, University College of London y el Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN).

El objetivo de este proyecto corresponde a fomentar la socialización y el aprendizaje de los conocimientos

relacionados al riesgo de desastres volcánicos del CVNC, a través de la implementación de la "Volcanoteca". El público objetivo de esta iniciativa son las y los habitantes de la comuna de Pinto y sus visitantes. Cabe destacar que los turistas representan un grupo humano que comúnmente carece de conocimientos sobre los peligros geológicos que pueden ocurrir en el territorio que visitan (Bird et al., 2010). Público que se vuelve más relevante al considerar que en el año 2021 el sector Valle de Las Trancas-Termas de Chillán duplicó la cantidad de viajes turísticos nacionales, tanto en la temporada de verano, como en la de invierno, lo que representa aproximadamente 10 veces el crecimiento registrado en otras comunas de la Región de Ñuble (Data Turismo Chile, 2021). Por medio de la "Volcanoteca" buscamos además potenciar el desarrollo turístico local y enfatizar la oportunidad del desarrollo energético a través del aprovechamiento de la energía geotérmica.

### Guión de contenidos y propuesta creativa

El diseño de la forma de comunicación de los contenidos será levantado en conjunto con representantes de distintos públicos de la comuna a quienes nuestra propuesta está dirigida a través de la realización de talleres y encuestas. No obstante, lo anterior, la propuesta cuenta con un pre-guión de contenidos que constituyen el eje a través del cual se llevará a cabo la participación comunitaria en materia de diseño de la experiencia y la experiencia en sí misma. Dichos contenidos serán contrastados con el conocimiento local existente, para así identificar fortalezas y debilidades en distintas materias a transmitir, incorporar el conocimiento local en el diseño y garantizar una comunicación efectiva de los contenidos.

Los contenidos a transmitir en la muestra serán divididos en dos ejes paralelos: Volcanología y Sociedad.

El primero buscará transmitir conocimientos científicos en un lenguaje apto para todo público sobre los siguientes tópicos:

a) Origen del volcanismo en Chile: la experiencia en el espacio didáctico permitirá a las y los visitantes comprender por qué la actividad volcánica es un rasgo principal del paisaje a lo largo y ancho de nuestro país.

Este tópico buscará explicar procesos que ocurren en el interior de la Tierra, a través de la relación entre la tectónica de placas y la actividad volcánica.

**b) Peligros volcánicos:** dado que la comuna está ubicada en el entorno del CVNC, nuestra propuesta buscará explicar de forma didáctica distintos fenómenos geológicos asociados a la actividad volcánica que, de ocurrir, pueden representar un riesgo para las y los habitantes y visitantes del territorio. Los peligros volcánicos por abordar serán aquellos que es probable que ocurran en la zona, como los lahares, caída de ceniza, avalanchas volcánicas, flujos de lava y flujos piroclásticos.

c) Energía geotérmica: las rocas fundidas que se mueven a través de la corteza terrestre y que alimentan los volcanes, como el CVNC, aumentan considerablemente la temperatura de las rocas, razón por la cual, las zonas con volcanismo activo presentan un enorme potencial para el desarrollo de la energía geotérmica. La muestra buscará comunicar de qué manera el calor generado en torno a los volcanes puede ser aprovechado para el desarrollo sustentable de las actividades humanas llevadas a cabo en zonas volcánicamente activas.

El segundo eje considerará una aproximación social a través de la comunicación y generación de los siguientes contenidos:

a) Cosmovisiones volcanológicas: este contenido refiere a las distintas formas en que las sociedades se relacionan, comprenden y conviven con los volcanes en el espacio y tiempo. Se destacan las diversas ontologías y epistemologías que poseen los volcanes en complejos volcánicos del mundo y Chile.

b) Memoria de desastres volcánicos: la memoria y el conocimiento local respecto a desastres pasados se constituye como un elemento fundamental para comprender los factores antropogénicos que interactúan con fuerzas volcánicas y los modos de gestión comunitaria del riesgo existentes en el territorio. En ese sentido, la recopilación e investigación de fuentes históricas y memoria oral se constituirán como la base del desarrollo de este contenido.

c) Gobernanza del riesgo volcánico: este contenido se relaciona con las características y el análisis de la planificación territorial comunal y su relación con la exposición a peligros volcánicos, la socialización de planes de emergencia y medidas de prevención existentes en la comuna como también la generación de grupos focales que ayuden a identificar los distintos tipos de riesgos geológicos del territorio mediante cartografías.

La exhibición, entonces, será diseñada desde una visión que integre la volcanología con las ciencias sociales, en un recorrido que, a través de las ciencias y las artes, permitirá exponer los contenidos de ambos ejes en forma paralela, para así despertar la curiosidad, generar emociones y sentido de pertenencia en las y los visitantes. Para este efecto, el recorrido propuesto será dividido en 4 etapas, cada una con una estación de contenidos abordados desde las ciencias de la Tierra y desde las ciencias sociales y las artes. En forma paralela al desarrollo de la exhibición, nuestro diseño buscará realizar actividades en la Biblioteca Municipal de Pinto, en las que se capacitarán a docentes y operadores turísticos para enriquecer los currículos educacionales de los establecimientos locales y enfatizar en la valorización del patrimonio geológico del sector. Finalmente, nuestro diseño busca crear una instancia de conversación y discusión en torno a temáticas afines al riesgo de desastres relacionados al Complejo Volcánico Nevados de Chillán. En estas jornadas contaremos con el apoyo de investigadores, profesionales del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), autoridades locales y representantes de la comunidad. Todos los antecedentes levantados durante la ejecución del proyecto, tanto durante el co-diseño de productos de la muestra, el desarrollo de la muestra en sí misma y en las actividades a realizarse en la Biblioteca Municipal, serán alojados en un archivo documental que quedará a disposición para el trabajo conjunto de especialistas en peligros y riesgos volcánicos y autoridades locales para la gestión de situaciones de emergencia y futuras instancias de educación ciudadana en materia de peligros y riesgos volcánicos.

## REFERENCIAS

- ▶ Acuña, V., Roldán, F., Tironi, M., & Juzam, L. (2021). El modelo geosocial: un enfoque transdisciplinario para el análisis y la prevención de deslizamientos de tipo flujo. *Sostenibilidad*, 13(5), 2501.
- ▶ Bird, DK, Gisladdottir, G. y Dominey-Howes, D. (2010). Riesgo volcánico y turismo en el sur de Islandia: Implicaciones para la educación y la formación en respuesta a peligros, riesgos y emergencias. *Revista de vulcanología e investigación geotérmica*, 189(1-2), 33-48.
- ▶ Cosgrave, E., & Kelman, I. (2017). Performing arts for disaster risk reduction including climate change adaptation. In *The Routledge Handbook of Disaster Risk Reduction Including Climate Change Adaptation* (pp. 214-226). Routledge.
- ▶ DataTurismo Chile. (2021). Big Data para el Turismo Interno. Servicio Nacional de Turismo (SERNATUR), Chile.
- ▶ Desastres, C. M. (2005). Marco de acción de Hyogo para 2005-2015. CM Desastres, Marco de Acción de Hyogo para, 2015.
- ▶ ONEMI. (2020). Política Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres, Plan Estratégico Nacional 2020-2030.
- ▶ Orozco, G., Jara, G., & Bertin, D. (2016). Peligros del Complejo Volcánico Nevados de Chillán, Región del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta
- ▶ Torani, S., Majd, PM, Maroufi, SS, Dowlati, M. y Sheikhi, RA (2019). La importancia de la educación sobre desastres y emergencias: un artículo de revisión. *Revista de educación y promoción de la salud*, 8.



## Comunicación del riesgo volcánico a través de la estrategia Volcán, Riesgo y Territorio

Lina Dorado<sup>1</sup>, Sandra Mendoza<sup>1</sup> & Luisa Cadena<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres UNGRD –lina.dorado@gestiondelriesgo.gov.co

**Palabras clave:** Comunicación del riesgo volcánico, edu-comunicativo, Colombia

Volcán, Riesgo y Territorio (VRT) es una estrategia de comunicación del riesgo volcánico que desarrolla la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) y el Servicio Geológico Colombiano (SGC) con el apoyo del Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología (OCyT). La estrategia tiene el propósito de brindar herramientas edu-comunicativas a autoridades, líderes y comunidades que les permitan generar procesos continuos y contextualizados de prevención y comunicación del riesgo volcánico en el territorio colombiano.

El desarrollo de la estrategia Volcán, Riesgo y Territorio, se realizó en tres etapas y contó con la participación de líderes, comunidades, docentes y funcionarios de las alcaldías, gobernaciones y cuerpos operativos de los municipios piloto, expuestos a amenaza alta de los Volcanes Nevado del Ruiz, Puracé, Chiles y Cumbal pertenecientes a los departamentos de Caldas, Tolima, Cauca y Nariño. Las etapas son las siguientes:

**Etapas 1.** Se realizó un diagnóstico de las percepciones y saberes comunitarios del riesgo volcánico a través de encuestas y de intercambio de conocimiento donde se identificaron población participante, características sociodemográficas, actitudes y valores en torno al riesgo volcánico, hábitos informativos y culturales, necesidades de información de actores clave, medios y formatos preferidos y barreras estructurales para la comunicación.

**Etapas 2.** Priorización de material edu-comunicativo. De acuerdo a los resultados del diagnóstico se priorizaron piezas que tuvieran un alcance local, regional y nacional para diferentes públicos. Las piezas responden de manera eficaz y suficiente a los retos comunicativos, conjuntos temáticos y articulación entre comunidades y entidades cooperantes del proceso de la gestión del riesgo de desastres.

**Etapas 3.** Diseño y producción de material edu-comunicativo. En esta fase, las instituciones trabajaron con las comunidades y actores heterogéneos en torno a los intereses y necesidades de los docentes. Aquí se destacan los líderes comunitarios, autoridades indígenas, municipales, y departamentales, y se desarrolló a través de escenarios de encuentro y traducción de intereses de cada actor en torno a la gestión del riesgo volcánico.

Las piezas de comunicación fueron el resultado de un ejercicio de participación y negociación entre las comunidades y las instituciones. Cada pieza de la estrategia nacional de comunicación del riesgo volcánico se desarrolló a través de talleres de coproducción, siguiendo una metodología que promovió el diálogo de saberes.

En el proceso de construcción del conocimiento del riesgo volcánico se generan diferentes tipos de reacciones acorde a las ideas y percepciones que tienen los habitantes sobre la actividad de un volcán. Así, se reconstruyeron los conceptos del riesgo volcánico desde las comunidades que habitan en territorio al ser los mejores conocedores de las zonas expuestas y como los primeros respondientes ante una emergencia.

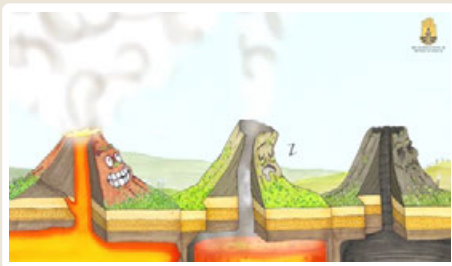
De acuerdo con los resultados del diagnóstico se construyó un conjunto de piezas edu-comunicativas que tuvieran un alcance local, regional y nacional para diferentes públicos, que logren sinergias entre el lenguaje científico, el lenguaje gráfico, y el lenguaje de uso común proveniente de la ciencia de los volcanes y la gestión del riesgo de desastres.

Sin embargo, una estrategia de comunicación es más que la suma de las piezas comunicativas que la componen. Todas las piezas se articulan en torno a un propósito de comunicar los aspectos más importantes a los habitantes de las zonas de influencia de los volcanes

activos de Colombia. Es así como cada pieza tiene una asignación temática que responde a ventajas tanto técnicas como expresivas y comunicativas que responde a un objetivo particular frente a lo que se quiere comunicar, así como las consideraciones para la facilidad de divulgación, acceso libre y utilidad para diversos actores.

A continuación, se describen cada una de las piezas comunicativas y su articulación:

Video explicativo: producto audiovisual con aspectos generales de la gestión del riesgo volcánico, definición, beneficios y peligros de la actividad volcánica en el contexto socio cultural y económico que genera interés y curiosidad sobre los volcanes.



► Fig. 1 Video Volcán, Riesgo y Territorio Fuente: UNGRD, SGC y OCyT.

Página Web Volcán, Riesgo y Territorio: herramienta que divulga y comunica conceptos científicos, culturales y normativos sobre volcanes en Colombia. Puede consultarse libremente, y contiene diversos contenidos sobre los volcanes que se exponen en dos bloques: Conociendo mi volcán y Viviendo con mi Volcán. Los contenidos pueden descargarse, contiene enlaces para ampliar la información, y se dispone de una caja de herramientas con las piezas educativas de esta estrategia.



► Fig. 2 Página Web de la Estrategia Volcán, Riesgo y Territorio. [www.volcanriesgoytterritorio.gov.co](http://www.volcanriesgoytterritorio.gov.co) Fuente: UNGRD, SGC y OCyT.

Cartilla para líderes comunitarios Volcanes más que montañas: es una herramienta pensada para trabajar con comunidades. No requiere equipos de cómputo o acceso a internet, y se diseñó para utilizarse en ejercicios de comunicación y formación en América Latina, particularmente con Ecuador, Chile y Colombia. Las temáticas se abordan desde una perspectiva de las comunidades y es el resultado de diálogos de saberes y experiencias en torno a la gestión del riesgo volcánico entre las comunidades que habitan cerca a los volcanes.

La cartilla se dirige principalmente a líderes comunitarios y funcionarios públicos de las diferentes organizaciones que busquen adelantar procesos de formación, acompañamiento y divulgación de conocimientos y prácticas para la gestión del riesgo volcánico con las comunidades o colegas de sus instituciones en el territorio.



► Fig. 3 Cartilla para líderes comunitarios Volcanes más que montañas. Fuente: UNGRD, SGC y OCyT.

Objeto virtual de aprendizaje (OVA) Vivir en tierra de volcanes: el OVA responde a la necesidad de suministrar material a los docentes y estudiantes identificados como actores claves para la gestión del riesgo y como agentes multiplicadores de conocimientos con sus familias y personas cercanas. El OVA se diseñó con los estándares básicos de competencias que demanda el Ministerio de Educación Nacional. También promueve el desarrollo de habilidades de indagación y de competencias centradas en el aprendizaje en los problemas del entorno a través de actividades apropiación de conocimientos y de aproximación al conocimiento científico, social e investigación.



► Fig.4 Objeto virtual de aprendizaje Vivir en tierra de volcanes. Fuente: UNGRD, SGCyOCyT.

El OVA se conforma por una aplicación multimedia que no requiere uso de internet y por una cartilla para el docente o estudiante mediador. Contiene ejercicios interactivos y actividades para trabajar en el aula para los grados 8° a 11° de cualquier institución educativa del país. También puede consultarse y utilizarse por padres interesados, jóvenes autodidactas o profesionales de las ciencias de la tierra, ciencias sociales y personas que trabajen para las corporaciones autónomas regionales, parques nacionales y otras instituciones públicas o privadas con incidencia en las zonas volcánicas, y personas interesadas en espacios de educación no formal con los jóvenes.

**Piezas radiales:** La radio como medio de comunicación masivo ofrece amplias posibilidades para la

comunicación de ideas y mensajes. Es un medio que llega a los habitantes de las zonas más remotas de la geografía del país y es el medio más consumido por la comunidad. Las piezas radiales de la estrategia VRT son radioteatros y cuñas radiales, en donde participan las voces del territorio así mismo, se comparten saberes de los habitantes. A través de estas piezas se amplía la comprensión sobre fenómenos volcánicos y la adopción de medidas de prevención del riesgo por actividad volcánica entre los habitantes de los departamentos de Tolima, Nariño y Cauca.



► Fig.6 Objeto virtual de aprendizaje Vivir en tierra de volcanes. Fuente: UNGRD, SGCyOCyT.



► Fig.5 Objeto Virtual de Aprendizaje Vivir en Tierra de Volcanes.

Afiches representaciones sociales del paisaje: Las comunidades dibujaron el paisaje de sus territorios, favoreciendo procesos de reconocimiento e identificación de los participantes. Su objetivo es generar identificación y reconocimiento con el territorio, así como con las percepciones que tienen las comunidades en torno al riesgo volcánico, mediante ilustraciones basadas en los bocetos de las comunidades y el uso de frases aportadas por los actores sociales que habitan las zonas de influencia volcánica.

**Mapas participativos frente al riesgo volcánico:** las representaciones cartográficas colectivas de los territorios fueron co-producidas a partir de las representaciones sociales del paisaje elaborados por los participantes de las diferentes comunidades. El proceso se complementó con plenarias para ilustrar los





► Fig. 7 Afiche representación social del paisaje Volcán Puracé, Cauca. Fuente: UNGRD, SGC y OCyT.

fenómenos volcánicos que podrían ocurrir en los territorios. El resultado es un mapa que parte de una ilustración científica que incluye la estética cultural y paisajística de los dibujantes locales, como también incluye la representación cartográfica de los fenómenos volcánicos a partir del mapa de amenaza volcánica con los atributos científicos necesarios que se desarrolló bajo la orientación técnica del Servicio Geológico Colombiano.

Estos mapas no constituyen mapas de amenaza pues éstos últimos son representaciones técnicas que elaboran expertos del SGC.

Para garantizar el impacto de la Estrategia Nacional de Comunicación del Riesgo Volcánico, se propone un plan de seguimiento con el fin de que los actores de la



► Fig. 8 Mapa Participativo Cumbal, Nariño. Fuente: UNGRD, SGC y OCyT.

comunicación del riesgo en los territorios puedan dar a conocer las piezas, se logre la integración en sus procesos y acompañen el seguimiento y evaluación en función de la utilidad de las mismas para el conocimiento y prevención frente a los fenómenos de la actividad volcánica.

Los mapas participativos, las representaciones sociales, video y piezas de audio como cuñas y radio-teatros, son un modo de comunicación eficaz para transmitir mensajes de reducción del riesgo volcánico de las comunidades multiculturales de Colombia y se promueven a escala local y regional en todo el país para aumentar su eficacia.

Las piezas co-producidas promueven la participación de las comunidades en cuanto a la gestión del riesgo, así como el interés por replicar y ser actores relevantes dentro de los escenarios para la difusión de información.

La estrategia nacional de comunicación del riesgo volcánico es propicia para la generación de espacios de diálogo donde se permite la concertación de acuerdos para el desarrollo de actividades que dirijan la implementación entre las entidades y la comunidad.

## AGRADECIMIENTOS

La Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres agradece a el Servicio Geológico Colombiano, el Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología, a todas los participantes de los municipios de Cumbal, Puracé, Villamaría, Manizales, Palestina, Chinchiná, Murillo, Líbano, Villahermosa, Herveo, Fresno, Casabianca, Falan, Palocabildo, Armero-Guayabal, Ambalema, Lérida, Venadillo, Honda y Mariquita por su valiosos aportes en la construcción de la Estrategia Nacional de Comunicación del Riesgo Volcánico y por compartir sus conocimientos, dudas e inquietudes que orientaron la conceptualización de esta estrategia.



También agradecemos a los productores de las piezas edu-comunicativas de esta Estrategia de Comunicación del Riesgo Volcánico así: piezas radiales y cartilla para líderes a la Corporación Memoria y Saber Popular; Objeto Virtual de Aprendizaje a Estratégica Comunicaciones Ltda; video explicativo a Magic Markers; página web a Faber Ramírez; mapas participativos frente al riesgo volcánico y afiches a Marie Joelle Giraud, Camila Contreras, Angélica González y Felipe Salcedo. A todos ellos agradecemos su invaluable participación en la construcción de esta Estrategia.er enviado un resumen adaptado de acuerdo a esta plantilla

## REFERENCIAS

- ▶ Colciencias (Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación). (2010). Estrategia Nacional de Apropiación Social de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación. Bogotá, Colombia.
- ▶ Corantioquia, Ministerio de Educación Nacional, Universidad de Antioquia. (2010). La cultura del riesgo: conflictos de participación y prevención. Caso del Volcán Galeras -Pasto, Nariño. En: Investigación y Educación Ambiental: Apuestas investigativas pertinentes a los campos de reflexión e intervención en educación ambiental (pp.141- 159). Bogotá, Colombia.
- ▶ Corporación Autónoma Regional del Tolima. (2012, 5 de diciembre). Panorama de la actividad volcánica en el departamento del Tolima. <https://www.cortolima.gov.co/panorama-actividad-volcánica-departamentotolima>
- ▶ Erazo-Benavides, F. (2017). El Cabildo Estudiantil, una escuela de líderes para la construcción democrática. Cumbal, Nariño: Institución Educativa Los Andes de Cuaical. <http://www.premiosantillana.com.co/pdf/2017-7Ricyt>
- ▶ Gobernación del Tolima. (2017, 5 de diciembre). Avanza primera fase del parque Omaira Sánchez. <http://www.tolima.gov.co/publicaciones/7675/avanza-primera-fase-del-parque-omairasanchez>
- ▶ Ley 1523 de 2012. Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. Congreso de Colombia. Abril 24 de 2012. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141>
- ▶ RICYT (Red Iberoamericana de Indicadores de Ciencia y Tecnología). 2015. Manual de Antigua: indicadores de percepción pública de la ciencia y la tecnología. Primera edición. Red Iberoamericana de Indicadores de Ciencia y Tecnología. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
- ▶ OCyT (Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología). (2015). Plan de Acción para la Apropiación Social del Conocimiento producido en el Servicio Geológico Colombiano. Documento institucional. Bogotá, Colombia.
- ▶ OCyT. (2015). Lineamientos para la Apropiación Social del Conocimiento Geocientífico y Científico-Tecnológico según Escenario de Encuentro. Documento institucional. Bogotá Colombia.
- ▶ Servicio Geológico Colombiano. (2022, enero). Volcanes de Colombia. <https://www2.sgc.gov.co/volcanes/index.html>
- ▶ Cas, R.A.F., Wright J.V. (1987). Volcanic Successions – Modern and Ancient. Allen & Unwin, London, pp 1-528
- ▶ Rivera, M., Martin, H., Le Pennec, J-L., & Thouret, J-C. (2017). Petro-geochemical constraints on the source and evolution of magmas at El Misti volcano (Peru). *Lithos*, 268-271, 240-259. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.11.009>
- ▶ Samaniego, P., Rivera, M., Mariño, J., Guillou, H., Liorzou, C., Zerathe, S., Delgado, R., Valderrama, P., & Scao, V. (2016). The eruptive chronology of the Ampato-Sabancaya volcanic complex (Southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 323, 110-128. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.04.038>
- ▶ Thouret, J.-C., Rivera, M., Worner, G., Gerbe, M., Finizola, A., Fornari, M., & Gonzales, K. (2005). Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 67, 557-589. <https://doi.org/10.1007/s00445-004-0396-0>

## LA ALVO: Un camino de cooperación

Mariana Patricia Jácome Paz<sup>1</sup>, Pablo Forte<sup>2</sup>, Jorge Romero<sup>3</sup>, Rosario Vázquez<sup>4</sup>, Julián Ceballos<sup>5</sup>, Daniel Bertín<sup>6</sup>, Carla Chun<sup>7</sup>, Camila Zúñiga<sup>8</sup>, Yemerith Alpizar<sup>9</sup> y Mariano Augusto<sup>10</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México. UNAM – jacome@igeofisica.unam.mx

<sup>2</sup> Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (OAVV), SEGEMAR, CONICET, Argentina.

<sup>3</sup> Department of Earth and Environmental Sciences, The University of Manchester, Manchester, United Kingdom.

<sup>4</sup> ENES, Juriquilla. Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM.

<sup>5</sup> Servicio Geológico Colombiano-Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales SGC-OVSM.

<sup>6</sup> School of Environment, University of Auckland, Auckland, New Zealand.

<sup>7</sup> Universidad Mariano Galvéz, Guatemala.

<sup>8</sup> Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

<sup>9</sup> Universidad Técnica Nacional, Costa Rica.

<sup>10</sup> Instituto de Estudios Andinos "Don Pablo Groeber", CONICET, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

**Palabras clave:** ALVO, volcanología, Latinoamérica, volcanes, sociedad.

La Asociación Latinoamericana de Volcanología (ALVO) fue fundada el día 7 de noviembre del año 2010 en Manizales, Departamento de Caldas, Colombia (Granados et al., 2015a, b; Rodríguez et al., 2019). Con un grupo reducido de miembros fundadores, la ALVO quedó establecida e inició operaciones con un primer Consejo Directivo que sentó las bases para un camino de colaboración, reflexión y oportunidades en la región latinoamericana. Hoy en día la asociación cuenta con más de 1500 miembros, repartidos en toda la región Latinoamericana.

En números aproximados, se registran 540 miembros para la región de Sudamérica Sur (Argentina, Brasil, Bolivia, Chile, Paraguay y Uruguay), 460 para la región de Sudamérica Norte (Colombia, Ecuador, Guyana, Perú, Surinam y Venezuela), 310 para la región de Centroamérica y el Caribe (Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica, Puerto Rico, Cuba, República Dominicana y demás Antillas), y 260 para la región Norteamérica (México). De los cuales, cerca de un 50% está representado por miembros estudiantes, un 45% por miembros ordinarios y un porcentaje menor por miembros extraordinarios, fundadores y honorarios. No obstante, es importante destacar que se reciben solicitudes de membresía de forma regular, por lo que las características del padrón descritas arriba varían regularmente.

Por su parte, la gestión y organización interna de la ALVO se rige por miembros activos que forman parte de un

Consejo Directivo conformado por: presidente, vicepresidente, un representante regional por cada una de las regiones, representante estudiantil, secretario general, presidente ex officio y tesorero. Los puestos de representantes regionales, estudiantil y vicepresidente son cargos de elección. El vicepresidente inmediato anterior asume el cargo de presidente en la gestión subsecuente. Los cargos de tesorero y secretario general son asignados por el presidente.

Al momento de su fundación, la ALVO planteó dentro de sus principales objetivos:

1. Estrechar y promover los vínculos entre los volcanólogos latinoamericanos.
2. Promover el estudio científico de los Volcanes, su relación con el territorio en el espacio- tiempo, y la publicación de los resultados de dichos estudios.
3. Promover la cooperación entre organizaciones, observatorios e instituciones científicas cuyos objetivos incluyan el fomento del conocimiento en cualquier disciplina de la Volcanología.
4. Iniciar y coordinar programas de investigación científica, principalmente aquellos que den en el marco de la cooperación internacional.
5. Promover, asesorar y apoyar programas de monitoreo volcánico en países de los miembros de la ALVO que soliciten estas actividades en un ambiente de colaboración.

6. Apoyar a las organizaciones e instituciones encargadas de la observación y monitoreo volcánico, así como a tomadores de decisiones en los países de la región en casos de crisis volcánica, que soliciten el apoyo en un ambiente de colaboración.

7. Promover labores y actividades relacionadas con la enseñanza, difusión y divulgación de la Volcanología y sus aplicaciones, así como la realización de otras actividades consecuentes con los propósitos anteriores.

8. Constituir un centro común de referencia y reunión para la comunidad Volcanológica Latinoamericana.

Desde la asociación se trabaja arduamente para el cumplimiento de cada uno de estos objetivos. Asimismo, se maximizan esfuerzos en dar cabida a las diferentes necesidades y oportunidades de formación y colaboración para la comunidad volcanológica latinoamericana, mediante una amplia diversidad de actividades. Ejemplos de lo anterior se listan a continuación.

#### Actividades de Formación

► Pasantías en observatorios volcanológicos de la región. Este programa se ejecuta en colaboración con el grupo Jóvenes Volcanólogos Latinoamericanos, JVLA y IAVCEI. y Tiene como objetivo ofrecer oportunidades de formación a las nuevas generaciones de volcanólogos con el fin último de generar un puente entre estudiantes universitarios, grupos dedicados a la investigación y observatorios volcánicos (Forte et al., 2019). A la fecha se han becado a tres estudiantes (2 de Chile, 1 de Ecuador) para realizar la pasantía de formación en instituciones relacionadas con el monitoreo y el riesgo volcánico en México, Costa Rica y Chile.

► Alianza CERG-C-ALVO. En 2018 la asociación firmó un acuerdo de cooperación con el grupo de Volcanología Física y Riesgo del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Ginebra (Suiza) con el objetivo de contribuir al desarrollo de líneas de acción estratégica para la reducción del riesgo volcánico en Latinoamérica. Como parte de este acuerdo, se facilita la participación de miembros de la asociación en el curso de riesgos geológicos, climáticos e hidrometeorológicos, CERG-C, realizado anualmente. A la fecha este acuerdo ha beneficiado a tres miembros

ordinarios de la ALVO pertenecientes a Ecuador, México y Brasil. Dentro de sus principales desafíos, está el sentar las bases metodológicas para la clasificación del riesgo volcánico en Latinoamérica. Esto, a la fecha, se ha capitalizado mediante dos publicaciones científicas en revistas indexadas y un proyecto en curso:

A New Inclusive Volcanic Risk Ranking, **Part 1: Methodology**

<http://doi.org/10.3389/feart.2021697451>

A New Inclusive Volcanic Risk Ranking, **Part 2: Application to Latin America**

<https://doi.org/10.3389/feart.2021.757742>

► Curso ALVO – UNAM. Se gestó como una iniciativa innovadora de educación continua desde el año 2011 con el objetivo de dar espacio a la diseminación del conocimiento de esta materia a todos los interesados de la región Latinoamericana. Para poder llegar a todos los rincones de la región, este curso se imparte anualmente de manera virtual. El curso es de nivel de posgrado y exige que los participantes cumplan con los requisitos y obligaciones del curso a pesar de la distancia, con el fin de mantener un nivel académico elevado. El curso es impartido en forma presencial desde las instalaciones del Posgrado de Ciencias de la Tierra en el Instituto de Geofísica de la UNAM y es apoyado por la ALVO.

#### Actividades Regionales

► Encuentro de Observatorios Volcanológicos. Estos eventos buscan constituir una instancia oficial de reunión para todas las instituciones a cargo del monitoreo volcánico en Latinoamérica (Rodríguez et al. 2018). Al momento se han realizado dos encuentros, en 2015 y 2018. Ambos tuvieron lugar en Arequipa, Perú, y se organizaron de manera conjunta con OVI-INGEMMET y USGS. Estos eventos hacen patente la importancia de la formación continua, el intercambio de experiencias y la colaboración inter-observatorios.

► Primer Congreso ALVO: Volcanología en y para Latinoamérica, realizado virtualmente en marzo del 2020. Contó con 5 sesiones temáticas, divididas en 30 secciones científicas, con más de 200 presentaciones, además de una exposición fotográfica y un foro de reflexión sobre las expectativas de la ALVO (Rodríguez et al. 2022a).

## Publicaciones

► **Volumen especial "Observatorios volcánicos en Latinoamérica"** publicado en la revista *Volcanica*. Este número especial nace de un esfuerzo de colaboración sin precedentes entre los observatorios volcánicos, ALVO y la revista científica *Volcanica* (Chevrel et al., 2021; Forte et al., 2021). El mismo está constituido por 11 artículos que resumen el trabajo que realizan las diferentes instituciones a cargo del monitoreo volcánico en América Latina. Por primera vez, todos los observatorios volcánicos de la región –desde México hasta el Cono Sur– convergieron en un solo proyecto. Otro punto significativo de este número especial es el formato bilingüe de las publicaciones, con versiones en inglés y español. Para acceder a los artículos:

<https://www.jvolcanica.org/ojs/index.php/volcanica/issue/view/9>

► **Volumen especial del Primer Congreso ALVO en *Journal of South American Earth Sciences* "Volcanism in Latin American"**. Los artículos que constituyen este volumen especial cubren un amplio espectro de temas estudiados por muchos grupos de investigación e instituciones que trabajan en vulcanología en la región. Dichos temas incluyen disciplinas como la vulcanología física, la geoquímica, la sismología, la teledetección, los observatorios de volcanes, la instrumentación y los peligros y riesgos volcánicos, entre otros. Estos documentos representan buenos ejemplos del estado del arte de la investigación en vulcanología en América Latina (Agusto et al., 2022).

### El volumen está publicado en:

<https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-south-american-earth-sciences/special-issue/10BFVNLVOS6>

► Volumen especial "Sociedad y Volcanología", SOVOL, en *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres*, REDER.

La ALVO reconoce la necesidad de aunar esfuerzos para favorecer el desarrollo de estrategias de reducción de riesgos en América Latina. Uno de los grandes desafíos de ALVO es minimizar la brecha entre las ciencias físicas,

naturales y sociales, que, con diferentes metodologías, intentan comprender el espacio geográfico en el que se desarrollan los procesos eruptivos y sociales. A tal efecto, ALVO juntamente con el equipo de REDER, gestiona y propone este volumen especial.

Los objetivos se centran en visibilizar estrategias y metodologías multidisciplinares o transdisciplinares que se centren en:

- Comprender y ampliar conocimientos sobre percepción de riesgo, vulnerabilidad social sistémica.
- Los diferentes aspectos culturales e históricos que configuran los territorios volcánicos como espacios geográficos, con procesos tangibles e intangibles que condicionan las acciones de la sociedad para enfrentar un evento volcánico.
- El marco conceptual para la gestión del riesgo y la transversalidad entre actores e instituciones, así como la comunicación de la incertidumbre volcánica.

El volumen está actualmente en proceso y los detalles pueden ser consultados aquí:

<https://www.revistareder.com/ojs/index.php/reder/pages/view/especial>

### Actividades de Difusión

► Publicación periódica (trimestral) de la gaceta ALVO. Esta incluye temas como la actividad volcánica reciente de la región, eventos regionales e internacionales de interés. Recientemente se ha dado cabida a otras miradas como los aspectos socioculturales alrededor de los volcanes y experiencias en terreno de la membresía.

► Visibilidad y difusión en redes de trabajos de investigación actuales en volcanes latinoamericanos realizados por miembros ALVO. Para esto la ALVO cuenta con una base de datos que se alimenta a través de una encuesta abierta y activa.

<https://bit.ly/3qcg2Jw>

Difusión de investigación actual a través de diversas charlas y seminarios especializados. Todos los seminarios realizados virtualmente se pueden encontrar en el canal de Youtube de la asociación (ver abajo).



## REFLEXIONES FINALES

La ALVO es una instancia y un camino de encuentro, representación y participación, realizada por volcanólogos latinoamericanos para volcanólogos latinoamericanos.

A ustedes que buscan dar una mayor visibilidad a sus investigaciones y/o que trabajan en aspectos relacionados a la vulcanología latinoamericana, que promueven la cooperación entre universidades, laboratorios, centros de investigación y monitoreo volcánico, así como la constante capacitación y apoyo en las actividades de gestión y manejo del riesgo volcánico en América Latina. Sin el apoyo y colaboración de todos y todas las que han aportado su granito de arena durante la formación y evolución de la ALVO, todos los objetivos, productos y eventos que se han alcanzado hasta ahora, no habrían sido posibles.

Por su parte, La ALVO desde sus inicios ha aspirado a ser un referente vulcanológico. Actualmente tiene como reto continuar con los procesos de fortalecimiento y consolidación de iniciativas que la constituyan en un centro común para la comunidad vulcanológica en Latinoamérica y en el mundo.



Formas de contacto de la ALVO

Correo Oficial de ALVO

alvo.comunicaciones@gmail.com

Para asuntos específicos, contamos con tres secretarías enfocadas en las principales áreas de desarrollo

**Secretaría de Educación:**

educacion.alvo@gmail.com

**Secretaría de Investigación:**

investigacion.alvo@gmail.com

**Secretaría de Difusión:**

difusion.alvo@gmail.com

**Redes Sociales**

<https://es-la.facebook.com/oficialalvo/>

<https://www.youtube.com/c/oficialalvo>

<https://www.instagram.com/oficialalvo>

<https://twitter.com/oficialalvo>

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece cordialmente a toda la membresía. ALVO se debe a su membresía. Así mismo la ALVO agradece a las diversas instituciones tanto regionales como internacionales que han entregado apoyo colaborativo, logístico y/o financiero a lo largo de su historia.

## REFERENCIAS

- ▶ Agosto, M., Forte, P., Aguilera, F., & Ceballos, M. A. A. (2022). Volcanism in Latin America: Advances in the region from the First ALVO Congress. *Journal of South American Earth Sciences*, 118, 103936.
- ▶ Chevrel, O., Wadsworth, F., Farquharson, J., Kushnir, A., Heap, M., Williams, R., ... & Kennedy, B. (2021). Publishing a Special Issue of Reports from the volcano observatories in Latin America: Editorial to Special Issue on Volcano Observatories in Latin America. *Volcanica*, 4(S1), i-vi. <https://doi.org/10.30909/vol.04.S1.ivi>
- ▶ Forte, P., Jácome Paz, M.P., Rodríguez, L., Bustos, E., Amigo, A., Ort, M., Caballero García, L., Agosto, M. (2019). Programa de pasantías para Jóvenes Volcanólogos Latinoamericanos: conectando observatorios vulcanológicos y universidades. 1er Congreso ALVO, Antofagasta, Chile.

- ▶ Forte, P., Rodríguez, L., Jácome Paz, M. P., García, L. C., Segura, Y. A., Bustos, E., ... & Agosto, M. (2021). Volcano monitoring in Latin America: taking a step forward: Preface to Special Issue on Volcano Observatories in Latin America. *Volcanica*, 4(S1), vii-xxxiii. <https://doi.org/10.30909/vol.04.S1.viixxxiii>
- ▶ Granados, H. D., Viramonte, J. G., y Palma, J. L. (2015a). Integrating Efforts in Latin America: Asociación Latinoamericana de Volcanología (ALVO). En *Volcanic Hazards, Risks and Disasters* (pp. 461-494). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396453-3.00019-8>
- ▶ Delgado-Granados, H., Viramonte, J. G., & Alvarado, G. E. (2015b). La volcanología Latinoamericana: estado de la situación regional en el 2008 a partir del análisis de sus debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades. *Revista Geológica de América Central*, (52), 57-66.
- ▶ Rodríguez, L. A., Forte, P., Rivera, M., Agosto, M., Delgado, H., Palma, J. L., Mariño, J., Samaniego, P., Macedo, L., Wright, H. (2018). The first two Meetings of Latin American Volcano Observatories (Encuentro de Observatorios Vulcanológicos de Latinoamérica). *Millenia of Stratification between Human Life and Volcanoes: strategies for coexistence Cities on Volcanoes 10* (Napoli, Italy).
- ▶ Rodríguez, L. A., Agosto, M., Jácome Paz, M. P., Forte, P., Bustos, E. (2019). ALVO as a Tool for Strengthening the Capacity of the Different Groups Responsible for Volcanic Risk Reduction in Latin America 27th IUGG General Assembly, Montreal, Canada. oka
- ▶ Rodríguez, L.A., Jácome-Paz, M.P., Caballero, L., Agosto, M., Forte, P., Bustos, E., Vallejo, S., Espinoza, E., Perales, C., Córdoba, G., (2022a), "The First ALVO Congress and volcanology in the current Latin American situation", *Cities on Volcanoes 11*, 12-17 July, Heraklion, Crete.
- ▶ Rodríguez, L.A., Jácome-Paz, M.P., Forte, P., Agosto, M., Romero, J., Vázquez, R., Chun, C., Bertín, D., Ceballos, J., Zúñiga, C., Alpízar, Y., (2022b) "The ALVO Network", 1st EPOS International Conference - EPOS Meets Africa and Latin America, Sal Island, Cape Verde, July 11-13.

# Comunicación del peligro volcánico en erupciones de larga data: caso de Complejo Volcánico Nevados de Chillán

Gabriela Jara<sup>1</sup>, Laura Bono<sup>1</sup>, Gabriela Pedreros<sup>2</sup>, Lizette Bertin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Unidad de Geología y Peligros de Sistemas Volcánicos, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile - gabriela.jara@sernageomin.cl

<sup>2</sup> Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Servicio Nacional de Geología y Minería, Temuco, Chile

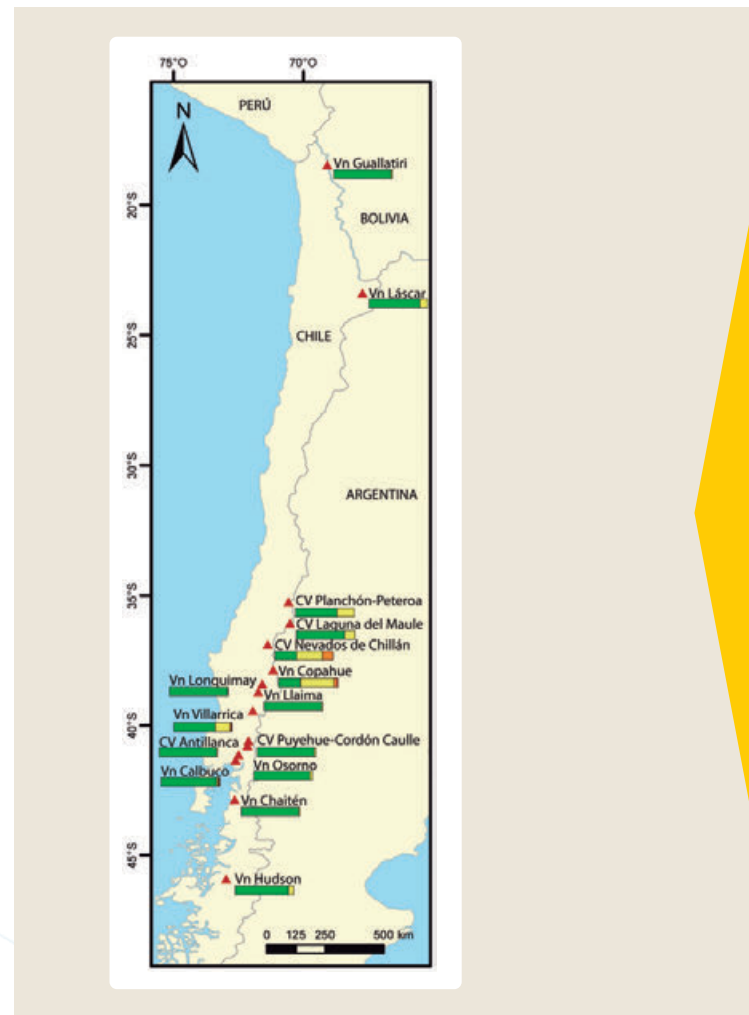
**Palabras clave:** Divulgación, Comunicación, Peligro volcánico, Nevados de Chillán.

La Red Nacional de Vigilancia Volcánica (RNVV) del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), es el organismo técnico del Estado de Chile, responsable de monitorear y evaluar el comportamiento de los 45 volcanes más peligrosos dentro del territorio nacional. Para representar la actividad volcánica se utiliza un sistema de alertas técnicas, mediante una escala de colores compuesta por verde (nivel base), amarilla (incremento en parámetros de monitoreo), naranja (posible incremento de actividad) y roja (erupción inminente o en curso), donde cada nivel está asociado a recomendaciones y posibles manifestaciones esperables dentro del nivel de actividad. Los mecanismos formales para comunicar cambios en la actividad son los Reportes Especiales de Actividad Volcánica (REAV), emitidos cada vez que registra un evento instrumentalmente anómalo y Reportes de Actividad Volcánica (RAV) que se emiten mensualmente en alerta verde, cada quince días en caso de alerta amarilla o de forma diaria en caso de alertanaranja roja (SERNAGEOMIN, 2022).

Durante la última década, 15 de los 45 volcanes monitoreados han registrado un aumento significativo en su línea base, implicando un cambio en su nivel de alerta. Estos niveles, usualmente amarillo, han tenido duraciones promedio en torno a un par de meses, sin embargo, sistemas volcánicos más complejos, especialmente aquellos con conducto abierto o sistemas hidrotermales muy activos, pueden mantenerse sobre su línea base por varios meses e incluso años de manera (semi) continua. Dentro de estos últimos destacan los volcanes Villarrica, Copahue y Nevados de Chillán, los cuales han estado en alerta continua por periodos superiores a un año (Figura 1).

## Complejo Volcánico Nevados de Chillán

En el caso particular del complejo volcánico Nevados de Chillán (CVNCh), ubicado en la cordillera de la región del Ñuble (36° 52' S), corresponde a un centro eruptivo



► Fig. 1 Alertas técnicas desde 2012. Las barras de colores indican el porcentaje total del estado del volcán en cada centro eruptivo, considerando el rango entre enero 2012 a junio 2022.

con registro de varios ciclos eruptivos durante tiempos históricos, usualmente de larga duración, con la generación de nuevos centros de emisión: Volcán Santa Gertrudis (1861-1865), Volcán Nuevo (1906-1948), Volcán Arrau (1973-1985), Cráter Chudcún (2003-2004), Lavas Sebastián (2008) y Cráter Nicanor (desde 2015) (Figura 2).

Cabe destacar que el ciclo eruptivo actual (desde 2015 a la fecha) ha sido el único monitoreado instrumentalmente por OVDAS, por lo que no es posible comparar la dinámica interna con procesos anteriores. Durante este proceso eruptivo se han registrado explosiones vulcanianas de baja a mediana intensidad, emisión de lavas con tasas de extrusión entre 0,008 - 0,04 m<sup>3</sup>/s, y ocurrencia de flujos piroclásticos mayoritariamente en la parte norte y noreste del cráter Nicanor (Figura 2; Cardona et al., 2021).

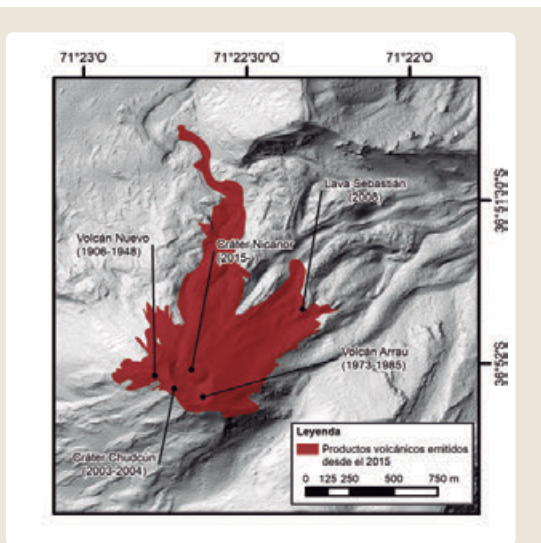
columnas de hasta 3.200 m y formación de cráteres de explosión, que lentamente se fueron fusionando en un cráter mayor, denominado Nicanor, el cual incorporó también los formados durante el ciclo eruptivo de 2003. En los años 2018 y 2019 la actividad estuvo marcada por el crecimiento de domos en el interior del cráter Nicanor, explosiones de mayor energía y destrucciones parciales o totales de estos que generaron flujos piroclásticos de corto alcance (<2 km), intercalados con emisiones de coladas de lava de hasta 1,4 km de extensión. Debido al aumento de la energía registrada y mayor alcance de los productos, se subió el nivel de alerta a Naranja en abril 2018, la cual se extendió hasta febrero 2020. En los últimos años la actividad se ha mantenido en niveles menores, pero aun sobre la línea base, por lo que se encuentra en nivel de alerta amarilla, alcanzando 6,5 años en alerta técnica distinta al nivel base (Sernageomin 2022; Benet et al., 2021).

### Respuesta de la comunidad

La actividad económica principal de la zona más próxima del complejo volcánico corresponde principalmente al turismo, ligada a los centros de esquí ubicados en sus laderas, termas y montañismo, siendo los Nevados de Chillán la mayor fuente de ingreso de los habitantes del sector sur y suroeste del volcán. Por otra parte, hacia el sector norte y noreste, la ganadería es una actividad mayoritaria, siendo los faldeos del volcán una zona de pastoreo en temporada estival.

Dada la estrecha relación de la comunidad con el CVNCh, se han generado situaciones complejas de preocupación de los pobladores, debido a que la actividad volcánica limita sus actividades económicas de manera directa o indirecta. Una de las principales dificultades que ha enfrentado la comunidad es la gran incertidumbre que conlleva un ciclo eruptivo extenso, pues no se puede asegurar cuándo será su término.

En este sentido, se reconocen dos escenarios del comportamiento de la comunidad: (1) periodos de alta actividad superficial, en donde las personas demandan mayores medidas de seguridad e información, y (2) periodos de menor actividad o reposo, en donde las personas no perciben la actividad



► Fig. 2 Centros de emisión generados durante el siglo XX y XXI. Alcances de productos volcánicos durante el ciclo eruptivo actual (bermellón). DEM corresponde a Pleiades de 1 m de resolución capturada el día 06/12/2020.

El ciclo eruptivo actual inició a finales del año 2015, con un aumento significativo en la actividad sísmica y posteriormente, durante los primeros días del 2016, comenzaron manifestaciones superficiales, como explosiones, eyección de piroclastos, y la generación de un nuevo cráter. Hasta el año 2017, el proceso se caracterizó por actividad explosiva, con generación de



volcánica y demandan que se eliminen medidas de seguridad o desconfían de los criterios técnicos.

El primer escenario, requiere mayor acompañamiento, pues crea un ambiente de ansiedad, exigiendo respuestas rápidas y frecuentes. Esta situación se vivió en las etapas de mayor explosividad, inicialmente durante la emisión del domo Gil-Cruz (Cardona et al., 2021) durante el año 2018. Si bien, se asistió a la zona para realizar talleres y charlas presenciales con la comunidad y primeros respondedores, no fue suficiente, pues se generó especulación y difusión de información falsa en ausencia de la institución técnica. El "silencio" por parte de la institución potenciaba la búsqueda de respuestas que no se ajustaban a la realidad local. Por este motivo, se decidió cambiar la estrategia, realizando un trabajo de acompañamiento y fortaleciendo las relaciones con los líderes locales, transmitiendo que el manejo de una crisis es dinámico y las vías oficiales de información de los cambios son los reportes REAV y RAV. El trabajo del equipo de la RNVV en ese momento fue otorgar herramientas que permitieran comprender su contenido y estar dispuestos a responder preguntas que surgieran de los colaboradores estratégicos de mayor impacto en la comunidad. Esta medida tuvo resultados positivos, no obstante, no resulta suficiente para abordar a la población flotante, debido al constante recambio de los visitantes.

Por otra parte, el segundo escenario, en donde la actividad volcánica no es perceptible por los pobladores, pero sigue siendo superior a los umbrales instrumentales, genera ansiedad en la población por "volver a la normalidad". La necesidad de bajar el estado de alerta es latente y se requiere justificar y explicar los argumentos técnicos para mantener la confianza. En este sentido es fundamental transmitir las distintas escalas de tiempo y naturaleza de los procesos volcánicos. A su vez, requiere destacar las diferencias y cambios plasmados en los escenarios de peligros, con el fin de demostrar que existe un esfuerzo de la institución por acotar las "limitaciones" para mantener la vida cotidiana de la población aledaña.

Con certeza, la mayor dificultad está en el manejo del tránsito de un escenario a otro, pues implica captar la

atención de las personas e incorporar un cambio. Según la experiencia vivida con el CVNCh y lo manifestado por sus pobladores, resulta positivo presentar las diferencias entre uno y otro escenario, para no ser percibido como una exageración, pues "ya estuvieron en esa situación antes y no pasó nada" o una falta de cuidado. Es importante considerar que en la medida que se extiende un proceso eruptivo en el tiempo, las personas que conviven con este adquieren más conocimiento, consolidan su percepción, independiente de su coherencia con el proceso volcánico interno, y, por ende, requieren de información más específica para comprender y aceptar un nuevo cambio.

### Divulgación de los peligros

Para informar a la comunidad sobre los peligros que genera la actividad volcánica del CVNCh, y crear conciencia sobre los riesgos de acercarse a la zona del cráter activo, la RNVV ha confeccionado distintos productos y actividades de divulgación durante todo el ciclo eruptivo. Entre ellas, en el año 2018, en el contexto de alerta naranja, se ejecutó la VI Feria de Divulgación Volcánica en la localidad de San Fabián de Alico, ubicada a 35 km al noroeste del volcán. Esta actividad consistió en una exposición, durante 2 días, sobre los procesos volcánicos y el monitoreo de su actividad eruptiva, mediante actividades didácticas y audiovisuales enfocadas en distintos públicos objetivos de la comunidad (Figura 3). Esta actividad tuvo una asistencia de 882 personas, con edades entre preescolares y adultos mayores, y fue muy bien evaluada por los asistentes.

Además, se realizaron talleres de gestión de emergencia con los integrantes de los organismos de protección civil de la localidad durante gran parte del ciclo eruptivo. Considerando instancias específicas para primeros respondedores, operadores turísticos, comunidad en general y autoridades. Incluso, en el periodo de mayores restricciones por la pandemia del COVID-19, se integraron talleres online para el personal de Socorro Andino. En general, estos talleres se realizaron como acompañamiento de algún cambio en el nivel de alerta, o bien, durante cambios en la dinámica eruptiva dentro de un mismo nivel de alerta.



► Fig. 3 Fotografía de la VI Feria de Divulgación Volcánica de San Fabián de Alico organizada por SERNAGEOMIN.

Ante la demanda de información sobre el estado del volcán, desde el año 2018 a la actualidad, se emite de forma regular en las redes sociales de SERNAGEOMIN, un resumen breve y simple sobre el estado actualizado del volcán acompañado del registro de las cámaras de monitoreo de la actividad superficial representativa.

En todas las actividades realizadas se difundió y explicó el mapa de peligros del complejo volcánico, así como la zonificación asociada específicamente al ciclo eruptivo en curso, mapa dinámico, publicado en cada reporte de actividad volcánica.

El descenso del nivel de alerta volcánica desde naranja a amarilla en 2020 provocó en la comunidad una disminución de la preocupación sobre los peligros del volcán, donde incluso se efectuaron varios ascensos turísticos a la zona del cráter activo. Esto motivó a SERNAGEOMIN y ONEMI a realizar una campaña comunicacional, denominada "Conoce y Prepárate", mediante las redes sociales institucionales (Twitter, Facebook e Instagram) para concientizar sobre los riesgos de la actividad del volcán (Figura 4). En el marco de esta campaña se realizaron publicaciones diarias durante 2 semanas con infografías y videos, que generaron un impacto de hasta 38.000 impresiones en Twitter, el cual fue mayor que el alcance en Facebook e Instagram.



► Fig. 4 Publicación en Twitter de la Campaña "Conoce y prepárate" de SERNAGEOMIN.

De manera complementaria, para registrar la percepción de la actividad volcánica de parte de los pobladores que habitan las zonas aledañas al volcán, se establecieron lazos de colaboración con informantes que reportan manifestaciones volcánicas de forma complementaria al monitoreo instrumental, por ejemplo, ruidos, explosiones, olor a gas, caída de ceniza, etc. Posteriormente, en el marco del Proyecto CitiApps de la Universidad de Santiago de Chile (USACH) se creó una aplicación móvil denominada "Yo informo volcanes" que permite recopilar los reportes de la comunidad de forma georreferenciada y sistematizada para su posterior análisis por los profesionales del OVDAS.

De manera complementaria, para registrar la percepción de la actividad volcánica de parte de los pobladores que habitan las zonas aledañas al volcán, se establecieron lazos de colaboración con informantes que reportan manifestaciones volcánicas de forma complementaria al monitoreo instrumental, por ejemplo, ruidos, explosiones, olor a gas, caída de ceniza, etc. Posteriormente, en el marco del Proyecto CitiApps de la Universidad de Santiago de Chile (USACH) se creó una aplicación móvil denominada "Yo informo volcanes" que permite recopilar los reportes de la comunidad de forma georreferenciada y sistematizada para su posterior análisis por los profesionales del OVDAS.

## DISCUSIÓN

El CVNCh en su registro histórico cuenta con erupciones explosivas, que en su mayoría han sido estrombolianas y vulcanianas (Orozco et al., 2016). Si bien en el corto plazo no se espera que se genere una erupción intempestiva de gran magnitud ( $\geq$  IEV 3), es probable que se repitan eventos similares a los catastrados en el año 2018, razón fundamental para alertar a la población aledaña al cráter activo.

El monitoreo de la actividad del CVNCh y la emisión de reportes oportunos ha sido un desafío para la RNVV, dadas las características del ciclo eruptivo actual, iniciado el 2015. Por estas razones se han implementado sistemas de comunicación de distinta índole entre los científicos, la población y sus autoridades, pero a pesar de los esfuerzos se percibe una relajación de los estados de preparación antes los eventuales cambios de alerta en el volcán. Adicionalmente, los radios sugeridos en los mapas de peligro del ciclo eruptivo actual no han sido respetadas, observándose grupos turísticos realizando ascensos a zonas cercanas al cráter activo, que están muy expuestas a flujos piroclásticos y caída de balísticos. Esto crea una disyuntiva para sistemas volcánicos que experimentan ciclos eruptivos de larga duración, que poseen alta exposición de la población y actividades económicas principalmente asociadas al turismo: ¿cómo podrían convivir las actividades económicas con sistemas de alertas que ayuden a la población a tomar las medidas necesarias para resguardar su integridad e infraestructura?

Por esta razón, SERNAGEOMIN ha trabajado arduamente en fortalecer la comunicación con las comunidades, con el objetivo de mantener el interés de la población y confianza en el sistema de alertas técnicas. Se ha visto que ciertas metodologías, tales como la interacción directa con la comunidad, por medio de simulacros, ferias de divulgación, colaboración con líderes locales, tienen un mayor impacto y complementa los mecanismos indirectos como reportes técnicos o publicaciones en medios oficiales institucionales (página web y redes sociales), lo cual ha constituido una oportunidad de mejora constante durante el manejo de crisis volcánicas. Ejemplo de ello es la gestión realizada por el Ministerio de Salud en la erupción del volcán Calbuco en 2015, sobre las medidas de mitigación de los efectos respiratorios de ceniza, donde se determinó que la comunicación presencial durante períodos de crisis genera gran impacto en la comunidad. Además, el uso de redes sociales constituye un gran aliado en la administración de una crisis ambiental, observándose mayor número de consultas a centros asistenciales de salud durante campañas comunicacionales (Díaz, 2019).

Uno de los principales objetivos de la gestión del riesgo en zonas volcánicas de volcanes de ciclos eruptivos largos, es lograr una equilibrada convivencia de las comunidades con la actividad volcánica. La clave radica en la comunicación efectiva y la correcta implementación de planes de emergencia, involucrando a todos los actores de la comunidad, lo cual constituye un gran desafío que han logrado mejoras sustanciales en los últimos años en comunidades aledañas a volcanes a lo largo del país. Además, durante la implementación de planes de emergencia se entregan herramientas de autogestión a la comunidad, para que puedan tomar decisiones y acciones de mitigación de forma autónoma durante aumentos de actividad volcánica.

Metodologías de divulgación más cercanas a la comunidad han dado buenos resultados en otros casos similares, siendo un buen ejemplo la implementación de planes de evacuación ante remociones en masa. Esto ha generado sistemas más eficientes de mitigación del riesgo y desastres asociados a eventos naturales (Domínguez & Lozano, 2014), obteniendo un resultado deseable e inspiradores en casos como Complejo volcánico Nevados de Chillán.

## AGRADECIMIENTOS

Las autoras de este trabajo agradecen a todos los y las profesionales de la RNVV, cuyo trabajo, directo o indirecto ha sido un aporte para el manejo de la crisis volcánica en curso. Además, a todas las personas con las cuales fue posible realizar la feria de divulgación volcánica en 2018 y campañas de divulgación por redes sociales a lo largo de estos años. Finalmente, pero no menos importante, a la comunidad local quienes nos han aportado datos valiosos y ayudado a la divulgación de información correcta y oportuna en el entorno próximo al Complejo Volcánico Nevados de Chillán.

## REFERENCIAS

- ▶ Benet, D., Costa, F., Pedreros, G. & Cardona, C. (2021, septiembre). The volcanic ash record of shallow magma intrusion and dome emplacement at Nevados de Chillán Volcanic complex, Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 417, 107308. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107308>
- ▶ Cardona, C., Gil-Cruz, F., Franco-Marín, L., San Martín, J., Valderrama, O., Lazo, J., Cartes, C., Morales, S., Hernández, E., Quijada, J., Pinto, C., Vidal, M., Bravo, C., Pedreros, G., Contreras, M., Figueroa, M., Córdova, L., Mardones, C., Alarcón, A., ... Bucarey, C. (2021, diciembre). Volcanic activity accompanying the emplacement of dacitic lava domes and effusion of lava flows at Nevados de Chillán Volcanic Complex – Chilean Andes (2012 to 2020). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 420, 107409.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107409>
- ▶ Díaz Bouquillard, L. J. (2019, 26 junio). Administrando la Comunicación de Riesgos en una Emergencia Sanitaria, “El caso de la erupción del Volcán Calbuco”, Chile 2015 = Managing the Risk Communication in a Health Emergency, «The case of the eruption of the Calbuco Volcano», Chile 2015. *REVISTA ESPAÑOLA DE COMUNICACIÓN EN SALUD*, 10(1), 94. <https://doi.org/10.20318/recs.2019.4443>
- ▶ Domínguez-Calle, E., & Lozano-Báez, S. (2014). Estado del arte de los sistemas de alerta temprana en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 38(148), 321-332.
- ▶ Orozco, G., Jara, G., & Bertin, D. (2016). Peligros del Complejo Volcánico Nevados de Chillán, Región del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería, *Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental*, 28, 34p.
- ▶ Servicio Nacional de Geología y Minería. (s.f.). Monitoreo volcánico. Complejo volcánico Nevados de Chillán.  
<https://rnvv.sernageomin.cl/complejo-volcanico-nevados-de-chillan/>



# Difusión de la información volcánica generada por el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI) en el Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (COEN)

Julio Lara<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, INGEMMET - jlara@ingemmet.gob.pe

**Palabras clave:** monitoreo volcánico, gestión del riesgo de desastres, peligro volcánico.

## INTRODUCCIÓN

Los desastres generados por erupciones volcánicas no son indiferentes al Perú, en el año 1600, la erupción del volcán Huaynaputina en Moquegua ocasionó el deceso de 1500 personas aproximadamente, así como la destrucción de 15 poblados ubicados a menos de 20 km del cráter del volcán en mención (Thouret et al., 1999). Cabe mencionar, que hasta el año 2006, ninguno de los volcanes activos del sur del país contaba con sistemas de monitoreo, que permitiera identificar con anticipación el inicio de una erupción, por ello las erupciones de los volcanes Sabancaya (1988-1998) y Ubinas (2006-2009) se produjeron de manera sorpresiva para la población.

Es importante precisar, que dentro del radio de influencia de los volcanes activos y potencialmente activos habitan cerca de 3 millones de personas, en los departamentos de Arequipa, Moquegua, Tacna y Puno, también se encuentran importantes obras hidráulicas y energéticas, así como proyectos y operaciones mineras que se encuentran en riesgo. La ciudad de Arequipa con alrededor de 1 millón de habitantes se ubica a 17 km del volcán Misti y es vital sensibilizar a las autoridades y población sobre el riesgo al que se encuentran expuestos.

En la Cordillera Occidental de los Andes (departamentos de Ayacucho, Arequipa, Moquegua y Tacna), de acuerdo con Aguilar et al. (2021), existen 10 volcanes activos y 4 potencialmente activos (Fig. 1). Los volcanes activos son: Coropuna (Bromley et al., 2019; Mariño et al., 2020), Sabancaya (Samaniego et al., 2015), Misti (Thouret et al., 2001; Harpel et al., 2011; Cobeñas et al., 2014; Rivera et al., 2017), Ubinas (Thouret et al., 2005; Rivera et al., 2017),

Huaynaputina (Thouret et al., 1999; Prival et al., 2019), Ticsani, Tutupaca (Samaniego et al., 2015; Manrique et al., 2019), Yucamane (Rivera et al., 2020), Purupuruni (Bromley et al., 2019), y Casiri (Bromley et al., 2019).

Además, dentro de esta cadena volcánica existen aproximadamente 40 conos pequeños de ceniza y escorias, por ejemplo, en los valles de Huambo-Orcopampa-Andahua-Yura (Delacour et al., 2006). Los grandes volcanes, principalmente los estratovolcanes iniciaron su actividad hace menos de 500 000 años.

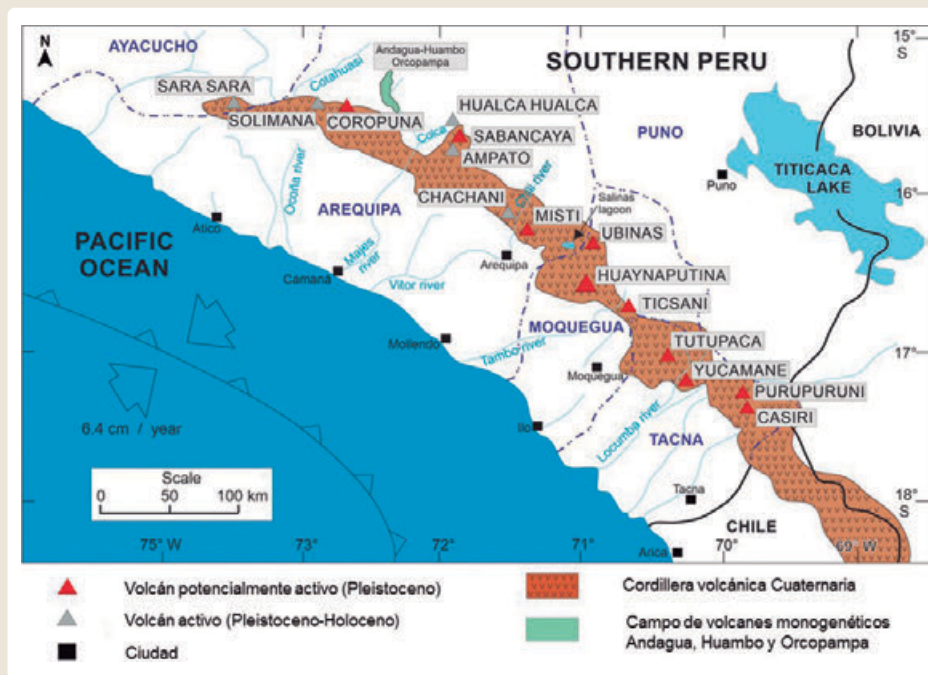
El Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (Ingemmet), a través de su Observatorio Vulcanológico (OVI) realiza el estudio y vigilancia multidisciplinaria de los volcanes activos del sur del Perú, con el propósito de determinar la naturaleza y probabilidad de ocurrencia de una erupción volcánica; evaluar los tipos de peligros volcánicos en base a estudios geológicos y análisis especializados; y proporcionar alertas oportunas a la sociedad sobre actividad volcánica inminente, a fin de reducir el riesgo de desastres en el sur del país.

En el marco del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD), el INGEMMET como parte de la asistencia técnico-científica que realiza en el Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (COEN), coordina y brinda rutinariamente información sobre geología volcánica, evaluación de peligros volcánicos y monitoreo volcánico.

La información volcánica (reportes vulcanológicos, alertas, informes técnicos, estudios volcánicos, mapas de peligros volcánicos, boletines, comunicados, materiales de divulgación, etc.), generada por el OVI,

es difundida en el COEN, a través del INGEMMET, y utilizada en la elaboración de productos como: informes de emergencias, reportes complementarios, reportes preliminares, notas de prensa. Estos productos son difundidos a: clientes internos, órganos de alta dirección, órganos y unidades orgánicas, órganos desconcentrados, clientes externos, autoridades que conforman el SINAGERD.

De esta manera, el INGEMMET como institución técnico-científica, a través de su Observatorio Vulcanológico, como miembro del SINAGERD, contribuye en la gestión del riesgo de desastres, brindando información técnico-científica, la cual es difundida en los tres niveles de gobierno, así como en el COEN, con la finalidad de reducir el riesgo de desastre volcánico en el sur del país.



► Fig. 1 Mapa del sur del Perú con la ubicación de volcanes activos y potencialmente activos. Fuente: Aguilar et al. (2021).

### Estudios Geológicos y Monitoreo Volcánico

El Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (Ingemmet) inició el monitoreo interdisciplinario de los volcanes activos del sur del país, en el año 2006, el cual ha mejorado con el tiempo, en tecnología, profesionales, así como la difusión de la información volcánica.

En el año 2013, se crea el Observatorio Vulcanológico del Ingemmet (OVI), como un centro de investigación y monitoreo de volcanes activos del sur del Perú, de carácter interdisciplinario, ubicado en la ciudad de Arequipa, cuyo fin es estudiar los volcanes activos, determinar la naturaleza y probabilidad de ocurrencia de una erupción volcánica a través del monitoreo sistemático y constante; evaluar los tipos de peligros

volcánicos en base a estudios geológicos; y proporcionar alertas oportunas a la sociedad sobre actividad volcánica inminente, a fin de reducir el riesgo de desastre en el sur del país.

El Observatorio Vulcanológico del Ingemmet (OVI) está conformado por un equipo de especialistas, entre geólogos, vulcanólogos, geoquímicos, geodestas, electrónicos y especialistas en educación y difusión. Este equipo realiza trabajos de campo y laboratorio para conocer y reconstruir la historia eruptiva de los volcanes, para ello utiliza herramientas como: cartografía, estratigrafía, petrografía, geoquímica y geocronología, con la finalidad de entender los procesos relacionados a las erupciones y determinar futuros escenarios eruptivos. Con esta información, el

OVI, desarrolla mapas geológicos y evaluaciones de amenazas volcánicas.

El monitoreo volcánico realizado por el OVI tiene un carácter multidisciplinario que incluye tecnología de última generación, como: sismómetros, GPS, inclinómetros, sensores de gases volcánicos, sensores ópticos y cámaras térmicas, termómetros, estaciones meteorológicas, sensores geoeléctricos, cenizómetros, así como la fotointerpretación de imágenes satelitales y el análisis petrológico del material emitido.

El OVI realiza el monitoreo en tiempo real de los volcanes activos: Sabancaya, Ubinas, Misti y Ticsani, cuya información es emitida a través de reportes vulcanológicos, informes técnicos y boletines.

Productos generados por el Observatorio Vulcanológico del Ingemmet (OVI)

El OVI se encarga de emitir información técnico-científica como contribución a la gestión del riesgo de desastres, estas se detallan a continuación:

- ▶ Mapas geológicos (escala 1/25,000) de los volcanes Misti, Ubinas, Ticsani, Sabancaya-Ampato y del campo de volcanes monogenéticos de Andahua-Orcopampa.
- ▶ Mapas de peligros de los volcanes Misti, Ubinas y Ampato-Sabancaya.
- ▶ Boletines de peligro volcánico.
- ▶ Informes técnicos.
- ▶ Publicaciones científicas en revistas especializadas del Perú y del extranjero.
- ▶ Mapas geológicos y de peligros de los volcanes Tutupaca y Yucamane (en elaboración).
- ▶ Reportes vulcanológicos de los volcanes Sabancaya, Misti, Ubinas y Ticsani.
- ▶ Alertas de lahares y caída de cenizas.
- ▶ Comunicados sobre actividad volcánica.
- ▶ Folletos y volantes dirigidos a las autoridades y el público.

## Reportes Vulcanológicos e Informes Técnicos

La información sobre el monitoreo volcánico, generada por el Observatorio Vulcanológico del Ingemmet (OVI), se emite a través de reportes vulcanológicos e informes técnicos. Estos productos se caracterizan por el público objetivo al cual va dirigido y la frecuencia de su emisión.

Los reportes vulcanológicos son precisos y comprensibles. Están dirigidos a las autoridades locales, a los miembros del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD), y a la población en general. La frecuencia de su emisión dependerá del nivel de actividad volcánica, esta puede ser diaria, semanal, mensual o anual (Fig. 2).



▶ Fig. 2 Reporte vulcanológico sobre actividad del volcán Sabancaya.



Los informes técnicos son documentos con información técnico-científica, que tienen la finalidad de informar objetivamente a las autoridades locales e instituciones técnicas que forman parte del sistema nacional de gestión de desastres (SINAGERD) sobre amenazas volcánicas.

Cabe precisar, que el monitoreo volcánico, es de libre acceso a través del Centro de Investigación Nacional de Riesgo Geológico, mediante una plataforma online que contiene información en tiempo real sobre la actividad volcánica (Sabancaya, Ubinas, Misti y Ticsani) y el monitoreo de deslizamientos. En este sitio web, el público en general puede acceder al monitoreo multidisciplinario realizado por el OVI: ver imágenes de las cámaras (ópticas y térmicas), acceder a los registros vulcanológicos, ver los sismogramas y flujogramas de gases volcánicos y el monitoreo de caída de cenizas (Fig. 3).

La información volcánica generada por el OVI, en específico los reportes vulcanológicos, que son emitidos de manera diaria (Sabancaya) y semanal (Ubinas, Misti y Ticsani), por el nivel de alerta en el que se encuentran, naranja y verde, respectivamente, así como los informes técnicos, estudios y mapas de peligros volcánicos, son emitidos con la finalidad de contribuir a la gestión del riesgo volcánico en el sur del país.

Esta información es utilizada por los tomadores de decisiones en los tres niveles de gobierno y autoridades que conforman el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD), con el propósito de priorizar esfuerzos, tomar decisiones y dar recomendaciones a las autoridades locales. Teniendo en cuenta que la gestión del riesgo de desastres es un proceso complejo, el uso de diferentes herramientas y la participación coordinada



► Fig. 3 Monitoreo en tiempo real del volcán Sabancaya a través del Centro de Investigación Nacional de Riesgo Geológico.

Difusión de información en el Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (COEN)

El Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (COEN) es un órgano del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD), que monitorea, valida y proporciona información oficial sobre peligros, emergencias y desastres para la oportuna

toma de decisiones y funciona las 24 horas del día durante todo el año, coordinando con los centros de operaciones de emergencia regional, local y sectorial, así como instituciones técnico-científicas.

En el marco del SINAGERD, el INGEMMET como parte de la asistencia técnico-científica en el COEN, coordina y brinda rutinariamente información sobre geología



volcánica, evaluación de peligros volcánicos y monitoreo volcánico.

El COEN cuenta con equipos de última generación para el monitoreo de peligros, emergencias y desastres, es así que el INGEMMET coordina y articula con el COEN, brindando información sobre el monitoreo volcánico diario, realizado por el OVI, esta información se visualiza en tiempo real en las instalaciones del COEN, con la finalidad de optimizar el monitoreo volcánico (Fig. 4).

El soporte técnico-científico brindado por el INGEMMET garantiza información sobre peligros

volcánicos, como contribución a la gestión del riesgo de desastres y en el marco del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD).

Cabe precisar, que el OVI trabaja en coordinación con entidades gubernamentales en los tres niveles de gobierno e instituciones nacionales tales como Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED), Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA), Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

The image shows the cover of an emergency report. At the top left is the INDECI logo. At the top right is the COEN logo, which includes the text 'CENTRO DE OPERACIONES DE EMERGENCIA NACIONAL'. Below the logos, the text reads 'INFORME DE EMERGENCIA N° 015 - 6/1/2021 / COEN - INDECI / 23:10 HORAS' and '(Informe N° 85)'. A green box on the right says 'ATENDIDA'. The main title is 'ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL VOLCÁN UBINAS - MOQUEGUA'. Below the title is section 'I. HECHOS:' followed by several paragraphs of text detailing volcanic events from 2019 to 2020. At the bottom, there is a distribution note and contact information for COEN.

**INFORME DE EMERGENCIA N° 015 - 6/1/2021 / COEN - INDECI / 23:10 HORAS**  
(Informe N° 85) **ATENDIDA**

## ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL VOLCÁN UBINAS - MOQUEGUA

**I. HECHOS:**

El 18 de octubre de 2019, a las 16:00 horas, aproximadamente a consecuencia de las fuertes precipitaciones pluviales, se produjo la inundación del albergue provisional de Anascapa afectando a las carpas instaladas en dicho albergue.

El 22 de julio de 2019, a las 07:18 y 23:25 horas, se produjeron 2 explosiones en el volcán Ubinas, dispersando cenizas hacia el Sur y Sureste de la región, causando daños a la vida y la salud, así como a instituciones educativas y establecimientos de salud, en los departamentos de Moquegua, Arequipa, Tacna y Puno.

El 19 de julio de 2019, a las 02:30 horas, se produjeron 3 explosiones en el volcán Ubinas, dispersando cenizas hacia el Sur y Sureste de la región, causando daños a la vida y la salud, así como a instituciones educativas y establecimientos de salud en los departamentos de Moquegua, Arequipa, Tacna y Puno.

El Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico INGEMMET del sector de Energía y Minas en su Informe Técnico N° A6923, de Julio 2019, Evaluación de Peligros Geológicos del Sector de Sirahuaya, informa que se observaron depósitos de lahares, que se deslizaron por una de las quebradas que descienden del sector norte de la zona.

El 26 de diciembre de 2019, a las 15:00 horas, se registraron lahares (flujos volcánicos) de poco volumen, por la quebrada Volcanmayo.

El 4 de enero de 2020, a las 16:20 horas, se registró una señal sísmica asociada al descenso de un lahar (flujos volcánicos) por el flanco sureste del Volcán Ubinas, por la quebrada Volcanmayo, a una distancia aproximada de 2 km del pueblo de Ubinas.

El 10 de enero de 2020, a las 14:22 horas, se registró una señal sísmica asociada al descenso de un lahar (flujos volcánicos) de pequeño a moderado volumen, por el flanco sureste del Volcán Ubinas, por la quebrada Volcanmayo, a una distancia aproximada de 2 km del pueblo de Ubinas.

El 11 de febrero de 2020, a las 17:56 horas, se registró una señal sísmica asociada al descenso de un lahar (flujos volcánicos) de pequeño volumen, por la quebrada Volcanmayo.

El 12 de febrero de 2020, a las 15:52 horas, el sistema de alerta temprana de lahares en el volcán Ubinas registró el descenso de un lahar de moderado volumen (flujos volcánicos) por el flanco sureste del macizo volcánico, por la quebrada Volcanmayo, a una distancia de 2 km del pueblo de Ubinas.

El 13 de febrero de 2020, el Observatorio Vulcanológico del Ingemmet (OVI) informó que el monitoreo multiparamétrico de la actividad volcánica registró la presencia de un lahar pequeño en las quebradas Volcanmayo, Chiflón y río Ubinas.

El 29 de febrero de 2020, a las 15:25 y 17:00 horas, el sistema de alerta temprana de lahares en el volcán Ubinas registró el descenso de dos lahares, el primero de moderado a alto volumen y el

Distribución: A los tres niveles de Gobierno (Nacional, Regional y Local).  
CENTRO DE OPERACIONES DE EMERGENCIA NACIONAL  
Av. El Sol S/N - Chornillos, Lima - Perú.  
Tel. +511 224-1685 • www.indeci.gob.pe  
Facebook: <https://www.facebook.com/COENPeru> • Twitter: <https://twitter.com/COENPeru>

El INGEMMET se encarga de la difusión de información generada por el OVI, en el COEN, con la finalidad de comunicar sobre los estudios y el monitoreo multidisciplinario y en tiempo real de los procesos internos y externos de los volcanes activos del sur del país, para conocer su comportamiento geológico en el pasado y su estado actual, con la finalidad de reducir el riesgo ante peligros volcánicos y de esta manera contribuir con los planes de Gestión del Riesgo de Desastres en el marco del Sistema Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres.

La información volcánica, generada por el OVI, es recibida en el COEN y utilizada en la elaboración de productos como: informes de emergencias (Fig. 5), reportes complementarios, reportes preliminares, notas de prensa.

Estos productos son difundidos a los usuarios internos y externos del COEN, los cuales son: usuarios internos, órganos de alta dirección, órganos y unidades orgánicas, órganos desconcentrados, clientes externos, autoridades que conforman el SINAGERD, medios de comunicación (prensa, televisión, radio, web); a través de los siguientes medios de comunicación: vía teléfono (llamada), vía correo electrónico, vía redes sociales (Facebook, Twitter), vía página web y vía aplicativo de WhatsApp.

De esta manera, el INGEMMET, a través del OVI, como servicio geológico del país, realiza estudios de geología y evaluación de peligros, monitoreo volcánico, así como la educación y difusión de la información volcánica, a través del COEN, en el marco del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastre.

#### AGRADECIMIENTOS

Se agradece amablemente a los profesionales del Observatorio Vulcanológico del Ingemmet (OVI) por su continuo apoyo y discusiones.

#### REFERENCIAS

- ▶ IX Foro Internacional de Peligros Volcánicos "Volcanes y Sociedad: Riesgo y Prevención" Arequipa, Perú, 2022
- ▶ Bromley, GR, Thouret, JC, Schimmelpfennig, I., Mariño, J., Valdivia, D., Rademaker, K., ... & Keddadouche, K. (2019). El  $^3\text{He}$  y el  $^{36}\text{Cl}$  cosmogénicos in situ y la datación por radiocarbono de depósitos volcánicos refinan la cronología de las erupciones del Pleistoceno y el Holoceno del suroeste de Perú. *Boletín de Vulcanología*, 81 (11), 1-16.
- ▶ Contreras, RA, Maquerhua, ET, Vera, YA, Gonzáles, MO, Choquehuayta, FA, & Mamani, LC (2021). Estudios de evaluación de amenazas y monitoreo multiparamétrico de volcanes desarrollados por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico de Perú. *Volcánica*, 4 (S1), 73-92.
- ▶ Delacour, A., Gerbe, M. C., Thouret, J. C., Wörner, G. & Paquereau-Lebti, P. (2006, 17 noviembre). Magma evolution of Quaternary minor volcanic centres in southern Peru, Central Andes. *Bulletin of Volcanology*, 69(6), 581-608. <https://doi.org/10.1007/s00445-006-0096-z>
- ▶ Rivera, M., Samaniego, P., Vela, J., Le Pennec, J. L., Guillou, H., Paquette, J. L. & Liorzou, C. (2020, marzo). The eruptive chronology of the Yucamane-Calientes compound volcano: A potentially active edifice of the Central Andes (southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 393, 106787. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106787>
- ▶ Thouret, JC, Dávila, J. y Eissen, JP (1999). La erupción explosiva más grande en tiempos históricos en los Andes en el volcán Huaynaputina, AD 1600, sur de Perú. *Geología*, 27 (5), 435-438.

## Evolución de las prácticas de gestión del riesgo volcánico entre la vulnerabilidad y la resiliencia: el caso arequipeño

Mérour, Eléonore<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université Clermont Auvergne, France, CleRMA, F-63000 Clermont-Ferrand, France.

**Palabras clave:** evento extremo, vulnerabilidad, resiliencia, dispositivo de gestión, narración

El objetivo de esta comunicación es presentar los resultados de un estudio realizado entre los principales actores de la gestión de riesgos volcánicos en Arequipa entre enero y marzo 2020. En primer lugar, presentaremos un análisis comparativo centrado en tres grandes eventos extremos vividos por los arequipeños (lluvias torrenciales, actividades eruptivas y terremotos) para poner de manifiesto la relación que la población tiene con cada uno de ellos (Mérour, 2020). Este preludeo nos permite comprender mejor las cuestiones relativas a la preparación para una posible erupción volcánica.

Nuestros hallazgos nos invitan a hacer un recorrido por la historia del monitoreo y la gestión del riesgo volcánico en Arequipa, a partir de las actividades realizadas por todos los actores a lo largo de 30 años (1990-2020). A través de esta historia, demostramos que podemos ordenar todos los logros en torno a la gestión de riesgos (estudios científicos, proyectos, eventos, herramientas, lugares...) en un dispositivo de gestión. El dispositivo de gestión puede ayudar a los actores a organizarse y a mejorar la práctica de la gestión de riesgos en un largo período de tiempo entre la vulnerabilidad y la resiliencia. En efecto, mostramos que el dispositivo de gestión se inscribe en un paradigma (de vulnerabilidad o de resiliencia), que permite arrojar luz sobre todas las iniciativas llevadas a cabo en relación con la gestión de los riesgos volcánicos. Nuestro modelo permite especificar las prácticas vinculadas al paradigma de la vulnerabilidad y las vinculadas al paradigma de la resiliencia, mejorando la legibilidad de todas las actividades realizadas por los actores a nivel local e internacional. Aclararemos qué entendemos por vulnerabilidad y resiliencia, temas ampliamente discutidos en la literatura científica y poco aclarados (Miller et al. 2010; Fekete et al., 2014), lo que implica

la dificultad de desarrollar prácticas resilientes. Extraeremos las consecuencias para la preparación en torno a una posible erupción volcánica en Arequipa, proporcionando vías de intervención.

Un análisis comparativo por tipos de eventos extremos en Arequipa.

La ciudad de Arequipa y su región se enfrentan a múltiples eventos extremos que afectan a la población. Proponemos observarlos mediante un análisis comparativo que combine diferentes criterios (recurrencia del suceso, cobertura mediática, conocimiento del riesgo y experiencia del riesgo) para señalar las similitudes y diferencias de cada uno de ellos (ver figura 1). Todos los años, las lluvias torrenciales afectan a los arequipeños y a las infraestructuras, causando importantes daños y una aflicción particular, entre el "hartazgo" y la fatalidad. Los terremotos se experimentan con regularidad, pero son una experiencia diferente, significativa, que sea positiva o negativa. Por otro lado, en comparación, las actividades eruptivas son raras y casi inexistentes en Arequipa. A pesar del contexto volcánico activo en el sur de Perú, El Misti es considerado como una figura tutelar, un orgullo, y no un peligro. Nos pareció importante comprender mejor lo que estos eventos extremos implican para las poblaciones, cómo se perciben y experimentan. El objetivo de esta partición es comprender mejor los problemas ligados a cada uno, lo que implica la necesidad de adoptar estrategias diferenciadas en la gestión del riesgo. De hecho, la comprensión y las reacciones ante estos eventos extremos se superponen en cuanto a la importancia que les otorga la población. Como se desprende de las diferentes encuestas de percepción de riesgo ya realizadas en Arequipa (Jacquez et al., 2019; Macedo et al., 2020),

se concluye que el volcán no es considerado un peligro para la población, lo que nos invitará a proponer un análisis centrado en la historia de la gestión del riesgo en Arequipa durante 30 años por todos los actores.

	Lluvias torrenciales	Actividades eruptivas	Sismos
<b>Manifestación</b>	Cíclico/ previsible	Raro/ inexistente	Frecuente/ incierto
<b>Cobertura mediática</b>	Importante	Baja	Importante
<b>Conocimiento del riesgo</b>	Heterogéneo	Heterogéneo	Importante
<b>Experiencia del riesgo</b>	"Hartazgo" Fatalidad	El orgullo del volcán	Experiencia notable

► Fig. 1 Análisis comparativo por tipo de eventos extremos en Arequipa.

Historia de la vigilancia del volcán Misti y de la gestión del riesgo volcánico en Arequipa (1990-2020).

Aunque la mayoría de la población no considera que el Misti sea un peligro, desde hace 30 años varios actores han alertado sobre su potencial eruptivo. Nos proponemos recorrer esta historia a partir de las actividades realizadas por los actores de la vulcanología y de la gestión de riesgos en Arequipa (1990-2020). Se trata de una narración co-construida a partir de entrevistas en profundidad sobre las trayectorias y experiencias de los actores en el desarrollo del monitoreo y la gestión de riesgos volcánicos durante 30 años de actividades profesionales en Arequipa. Entrevistamos a actores de instituciones involucradas en la gestión del riesgo (IGP, INGEMMET, INDECI, COER, Subgerencia de Gestión de Riesgo de Desastres de la Municipalidad Provincial de Arequipa, alcaldes distritales, periodistas, científicos del laboratorio de Magma y Volcans en Francia). Este relato es un primer borrador que invitará a todos los actores implicados en la gestión del riesgo volcánico a añadir sus propias huellas a esta historia para enriquecerla. Podemos hacer una recomendación práctica en forma de taller que podría organizarse para continuar la co-construcción de esta historia entre instituciones. Esta historia es la huella y

el elemento fáctico de este trabajo común que se lleva a cabo desde hace 30 años, y que ha dado como resultado el aumento de los vínculos interinstitucionales y la formación de muchos ingenieros y personal de servicio público.

Los cambios políticos en Perú provocan periódicamente trastornos en la organización de la sociedad (con repercusiones nacionales, regionales, provinciales y locales), incluido el funcionamiento de las instituciones. En efecto, el cambio recurrente de personal cualificado empleado en puestos estratégicos provoca pérdidas de conocimientos y competencias que van en detrimento de la necesidad de continuidad en los esfuerzos realizados para la gestión de los riesgos volcánicos. Así, este tipo de narración podría servir de memoria y orientación para las actividades de todos los actores heterogéneos en torno al volcán en Arequipa, pero también como ayuda para la aculturación de los recién llegados a sus puestos tras los cambios políticos. En una segunda fase, una vez que la narración co-construida haya sido validada por todas las instituciones, podría transformarse en un documento popularizado y difundido a todos los arequipeños, especialmente en las escuelas, para crear una primera base histórica común.

Diseñar y gestionar un dispositivo para organizar las actividades en torno a la gestión de riesgos entre vulnerabilidad y resiliencia

(Lièvre, P., Mérour, E., Morin, J., Macedo Franco, L., Ramos Palomino, D., Rivera Porras, M., Masías Alvarez, P., Van Wyk de Vries, B., en prensa)

La narración propuesta anteriormente nos ha permitido destacar una serie de actividades realizadas a lo largo de 30 años. Pero, ¿cómo pueden organizarse en un conjunto coherente? Proponemos movilizar la noción de dispositivo que permite situar las diferentes actividades realizadas (estudios, proyectos, herramientas, eventos) para comprender su relación y su evolución en el tiempo. La fuerza de un dispositivo reside en su capacidad para documentar los vínculos entre los actores y su papel en el dispositivo a través de sus actividades. Mostramos cómo, a partir de una idea propuesta (Thouret y d'Ercole, 1996), como un cierto número de actores orientaron sus actividades en este



marco (estudios sobre el potencial activo del Misti, diseño de un mapa de peligros, y luego de un mapa de riesgos), dando lugar al desarrollo de otras actividades en su estela, con una progresión de temas y cuestionamientos en torno a la gestión de riesgos. Este modelo también permite dar cuenta de la trayectoria histórica de los distintos actores del dispositivo y de su filiación a una idea original que organiza su actividad profesional, así como de los vínculos que puede haber con otras ideas emergentes. Nuestros resultados muestran que gran parte de las actividades realizadas en Arequipa se han llevado a cabo en torno al paradigma de la vulnerabilidad, y documentamos la aparición de prácticas resilientes. Explicamos qué implican los paradigmas de vulnerabilidad y resiliencia para la gestión del riesgo volcánico en Arequipa y cómo se relacionan con el diseño de un dispositivo de gestión del riesgo.

Por otro lado, consideramos que el dispositivo de gestión puede ser una herramienta para fortalecer la capacidad de la población en torno al tema de la gestión de riesgos. Para reforzarla, recomendamos la organización de eventos populares sobre la gestión

del riesgo volcánico que podrían adoptar otra forma que los simulacros. Evidentemente, se fomentan los proyectos científicos u operativos realizados por todo tipo de actores (incluidas las ONG), ya que permiten el desarrollo de herramientas, pero también el establecimiento de conocimientos y competencias comunes para los profesionales de la gestión de riesgos. Por último, los lugares de socialización en los que pueden reunirse actores y ciudadanos atentos permiten crear vínculos duraderos y proseguir el trabajo de co-construcción. Recomendamos intensificar la colaboración con los alcaldes de distrito mediante la creación de juntas locales para continuar la labor de sensibilización de la población.

Los aportes propuestos en este trabajo no hubieran sido posibles sin la participación de todos los actores involucrados en la gestión del riesgo volcánico en Arequipa (IGP, INGEMMET, INDECI, COER, Subgerencia de Gestión de Riesgo de Desastres de la Municipalidad Provincial de Arequipa, alcaldes distritales, científicos del laboratorio de Magma y Volcanes). Aceptaron responder a nuestras preguntas, recibimos durante varias semanas en sus instituciones, participar en sus actividades y abrimos sus archivos.

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece el apoyo recibido de la Agence Nationale de la Recherche del gobierno francés a través del programa Investissements d'Avenir (16-IDEX-0001 CAP 20-25), especialmente del CIR, Centre International de Recherche de la Université Clermont Auvergne.

## REFERENCIAS

- ▶ Fekete, A., Hufschmidt, G., and Kruse, S. (2014). Benefits and challenges of resilience and vulnerability for disaster risk management. *International journal of disaster risk*.
- ▶ Jacquez, L., and Rouquette, S. (2021). Le risque volcanique au Pérou : perception des habitants et campagne de communication. in *Maison des Sciences de l'Homme Alpes*.
- ▶ Lièvre P., Mérour E. (2021). Les obstacles à la construction du sens en situation extrême : le cas des éruptions volcaniques à Arequipa au Pérou. Colloque International de Recherche 4 « Risques naturels et vulnérabilités socio-économiques », Clermont-Ferrand, 25-26 novembre 2021.
- ▶ Lièvre, P., Mérour, E., Morin, J., Macedo Franco, L., Ramos Palomino, D., Rivera Porras, M., Masías Alvarez, P., and van Wyk de Vries, B. (en prensa). Volcanic risk management practice evolution between vulnerability and resilience: the case of Arequipa in Peru. *Integrated Disaster Risk Management: From Earth Sciences to Policy Making*. *Frontiers in Earth Science*.
- ▶ Miller, F., Osbahr, H., Boyd, E., Thomalla, F., Bharwani, S., Ziervogel, G., et al. (2010). Resilience and Vulnerability: Complementary or Conflicting Concepts? *E&S* 15, art11. doi: 10.5751/ES-03378-150311.
- ▶ Thouret, J.-C., and D'Ercole, R. (1996). Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain: effets, facteurs et réponses sociales. *Cahier des Sciences Humaines*, 18.

# Conviviendo con el Ruka Pillán: "Clubes de vulcanología y gestión del Riesgo"

Manuel Morales Camaño

Campus Pucón, Universidad de La Frontera

**Palabras clave:** Clubes, Vulcanología, Difusión científica

## INTRODUCCIÓN

Situada en la Región de La Araucanía, provincia de Cautín, la comuna de Pucón ocupa un importante sitio en la zona sur de Chile por su reconocida tradición turística, convirtiendo esta ciudad en uno de los principales destinos dentro de circuitos nacionales como internacionales.

La comuna de Pucón está ubicada a 27 km de la ciudad de Villarrica y a 116 km de la ciudad de Temuco, capital de la región. Posee una población de 28.253 habitantes, de la cual la mayor parte (64%) está concentrada en un área urbana y semi-urbana y el resto (36%) está dispersa en comunidades más pequeñas en el área rural (Censo 2017).

Su territorio comprende 1.356 km<sup>2</sup> y representa el 4,4% del total regional (Plan de Salud Municipal 2022).

Su ubicación es muy segura en términos climáticos, aunque geológicamente presenta peligros volcánicos por la presencia del volcán Villarrica, que en lengua Mapuche recibe el nombre de Ruka Pillán, que se alza como uno de los volcanes con mayor registro históricos de erupciones de Sudamérica. Este cono volcánico se alinea con otros como el Quetrupillán y Lanín. Pucón está ubicada a solo 15 km de su cima.

El volcán Villarrica comenzó su actividad hace unos 650.000 años. Las erupciones históricas (últimos 500 años) han variado desde efusivas a moderadamente explosivas (IEV=0-3), cuyos peligros más recurrentes han sido la formación de lahares de largo alcance y altamente destructivos, al punto de causar más de 100 fatalidades durante el siglo XX (1908, 1948-49, 1963-64, 1971). Lo anterior, hace que el territorio que rodea el volcán sea peligroso para su hábitat.

Como bien lo señala el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) en su mapa de Riesgo

Volcánico del año 2000, estos lahares están vinculados a la actividad volcánica del año 1971 (proceso post-eruptivo) y conlleva un alto nivel de riesgo a los poblados que lo rodean.

En los grupos de trabajo con docentes y grupos focales con representantes de organizaciones sociales de la comuna, (enero 2022) se percibe escasa información acerca la temática de vulcanología y de los planes de emergencia ante posibles peligros volcánicos a pesar de convivir con uno de los volcanes más activos de Latinoamérica.

Por lo anterior es que el Campus Universitario en alianza con el Departamento de Educación Municipal de la comuna, han iniciado el desafío de educar y formar a los niños y jóvenes de los establecimientos municipales, cruzada que comenzó el año 2021, pero que los efectos de la pandemia COVID-19, no permitió concretar en toda su dimensión.

## Educación Municipal

La comuna de Pucón posee 11 establecimientos educacionales de dependencia municipal, que atienden un total de 2.700 estudiantes, de los cuales, 4 son de carácter urbanos y 7 de carácter rural. Además, posee 1 establecimiento de modalidad técnico profesional y 1 científico humanista.

Los establecimientos educacionales de mayor matrícula son: Complejo Educacional Carlos Holzapfel: 800 estudiantes, Liceo Bicentenario de Hotelería y Turismo: 370 estudiantes.

## Objetivo General de la iniciativa:

► Contribuir a la formación de los y las estudiantes de los establecimientos educacionales de la comuna de Pucón en lo referente a la vulcanología y la gestión del riesgo a través del diseño, implementación y operación de clubes de Vulcanología.

### Objetivos específicos:

- ▶ Promover y difundir la Vulcanología y la investigación científica en la comunidad escolar de la comuna de Pucón a través de la labor de los clubes de cada establecimiento educacional.
- ▶ Generar espacios para dialogar y compartir experiencias, inquietudes y actividades de vulcanología fomentando así una actitud activa y crítica frente al conocimiento e información en esta área.
- ▶ Sensibilizar y formar a los y las estudiantes y a la comunidad educativa en general, para que estén preparados frente a posibles peligros de carácter volcánico.

### Destinatarios:

La iniciativa se implementa en los establecimientos educacionales municipales de la comuna de Pucón, en una alianza estratégica con el Departamento de Educación Municipal. Cada club está configurado por grupos de 12 a 15 estudiantes de los siguientes establecimientos educacionales de la comuna:

- a) Escuela Candelaria (Escuela Básica – Multigrado)
- b) Escuela Arrayanes (Escuela básica – Urbana)
- c) Complejo Educacional Carlos Holzapfel (Escuela Básica y Media – Científico Humanista)
- d) Liceo Bicentenario Hotelería y Turismo (Liceo de Educación Media Técnico Profesional)

Los establecimientos fueron seleccionados a partir del compromiso expresado por sus directivos y siguiendo el principio de inclusión territorial que anima la gestión del Campus Pucón de la Universidad de La Frontera, lo cual se ve reflejado en la selección de establecimientos rurales y urbanos.

Los cuatro clubes de vulcanología, que están funcionando actualmente, están constituidos por un grupo de entre 12 y 15 estudiantes que por voluntad propia y de acuerdo a una oferta variada de talleres que ofrece cada establecimiento educacional, deciden participar de estos.

Las edades de los estudiantes que participan de los clubes varían según la unidad educativa, en la Escuela Candelaria que es un establecimiento educacional Multigrado se trabaja con niños y niñas de segundo y

tercero básico con edades entre 7 y 9 años. En el Liceo Bicentenario Hotelería y Turismo, las edades fluctúan entre los 13 y los 15 años, en el Complejo Educacional Carlos Holzapfel las edades van de los 12 a los 15 años y en la Escuela Los Arrayanes entre 10 y los 13 años.

Los talleres de los clubes se realizan semanalmente en cada establecimiento educacional y se abordan en ellos diversas temáticas de acuerdo a un programa de trabajo elaborado, por la Universidad, recogiendo los aportes de un conjunto de docentes del área científica de cada unidad educativa, en reuniones sostenidas con ellos al inicio del año académico.

Los talleres semanales son complementados con actividades de profundización como salidas a terreno, charlas y visitas guiadas a centros de interés.

Las principales temáticas que se abordan en los clubes se dividen en dos áreas:

**Vulcanología:** Capas de la tierra, Tectónica de placas, Genesis de los distintos tipos de magmas, Ciclo de las rocas, Volcanes en el mundo, Tipos de volcanes, Tipos de erupciones y sus productos volcánicos, El Volcán Villarrica – Ruka Pillán.

**Gestión del Riesgo:** Los peligros asociados a los volcanes, los planes de emergencia volcánicos, Niveles de alerta volcánicos, Tipos de monitoreo volcánico, Kit de seguridad frente a una posible erupción etc.

Es importante destacar que los clubes de Vulcanología se proponen como una actividad extracurricular, por lo tanto, no afecta ninguna de las estructuras curriculares, planes o programas de estudio, sino por el contrario se espera fortalezcan el hacer pedagógico en los establecimientos.

Al mismo tiempo, es muy relevante el papel que cumple el docente del establecimiento educacional que cumple la función de ser el intermediario entre el establecimiento educacional y la Universidad. A él le corresponde convocar a los y las estudiantes, destinar una sala o espacio físico donde funcionar y recibir a los facilitadores científicos.

### Estructura de trabajo:

Para la implementación y operación de la iniciativa se empleó una estructura de trabajo que contempla las siguientes unidades:

**Coordinación General:** Ejercida por profesionales del Campus Pucón, del Departamento de Educación Municipal de Pucón, directores de los establecimientos educacionales participantes de la iniciativa de modo de divulgar los beneficios de los clubes en la comunidad local, regional y nacional.

Una función complementaria será mantener un vínculo permanente con los docentes coordinadores de los clubes de vulcanología y los facilitadores científicos.



► Fig. 1 Capacitación de Facilitadores científicos por parte del equipo técnico de la Universidad previo a la implementación del programa de trabajo.

**Equipo Técnico:** Conformado por una Geóloga, un docente de la Universidad y los Facilitadores científicos, que son estudiantes de Turismo del Campus universitario. La función de este equipo es asesorar en el desarrollo e implementación de los clubes en lo relativo a la formación de los facilitadores científicos y el seguimiento y monitoreo del diseño e implementación del plan de trabajo de cada uno de los clubes de vulcanología

**Docente Coordinador:** Docente de aula de cada unidad educativa, cuya función es facilitar los aspectos logísticos en su establecimiento y colaborar en la ejecución del plan de trabajo apoyando a los facilitadores científicos.

Hasta ahora el docente coordinador cumple un rol más bien logístico, no obstante, es de interés de la coordinación general de la iniciativa, que este docente cumpla un rol más activo y se involucre directamente en el diseño e implementación del programa de trabajo.

## METODOLOGÍA

Para la implementación de la iniciativa se utiliza una metodología de divulgación científica basada en el "aprender haciendo" donde él o la estudiante es el centro de su aprendizaje, es decir, que sean ellos mismos los que, con ayuda del facilitador científico, vayan construyendo y descubriendo el conocimiento de la vulcanología y la gestión del riesgo, donde lo que se aprende proviene de las inquietudes de los propios estudiantes, con lo cual los y las estudiantes adquieren un rol activo. Lo anterior se ve facilitado por el hecho que los estudiantes eligen participar en estos clubes y además porque trabajan en grupos más pequeños de personas verdaderamente interesadas en la temática y en un horario distinto o alterno, por lo cual la primera tarea del facilitador científico es crear el ambiente necesario para el aprendizaje. Un ambiente distendido, amable y cercano, donde todos y todas se atreven a participar y trabajar.

La metodología se sustenta en dos estructuras relevantes: una de carácter interna, conformada por un equipo técnico, en el cual participan geólogos, pedagogos y divulgadores científicos, quienes diseñan la metodología de divulgación y ejecutan la capacitación de los facilitadores científicos que son estudiantes del Campus Pucón - UFRO, previamente seleccionados en base a un perfil diseñado con ese fin.

La estructura externa la conforman los facilitadores científicos ya capacitados, tanto en los contenidos como en la metodología de trabajo, el docente encargado, que es nominado por el establecimiento educacional, cuya función es ser intermediario entre la Universidad y la unidad educativa. Él recepciona a los facilitadores, proporciona el lugar de trabajo y coordina que los integrantes del Club de Vulcanología asistan a la sala proporcionada.

Los facilitadores científicos tienen a su cargo generar el ambiente pedagógico pertinente, basado en el desarrollo de actividades que se ciñen a la rutina pedagógica que se explica más adelante.

### Rutina pedagógica:

La rutina pedagógica está compuesta de las siguientes etapas:



Bienvenida inicial. Se ordena el lugar colocando las sillas en círculo y se recibe a los participantes.

Se inicia la sesión de trabajo con una dinámica de grupos donde se invita a los asistentes a concentrarse en la actividad que se va a iniciar.

Bienvenida inicial. Se ordena el lugar colocando las sillas en círculo y se recibe a los participantes.

Se inicia la sesión de trabajo con una dinámica de grupos donde se invita a los asistentes a concentrarse en la actividad que se va a iniciar.



► Fig. 2 Dinámica grupal inicial para prepararse para comenzar el trabajo de taller del Club de Vulcanología.

A continuación, se plantea una pregunta inicial, que será la que guíe toda la sesión de trabajo y que entregará los fundamentos para dar una respuesta, por ej: ¿Es lo mismo magma que lava? ¿La tierra está viva? ¿Qué es la subducción? etc.

Posteriormente se realiza una exposición de 10 minutos sobre la temática planteada al inicio de la sesión, que tiene por objetivo entregar las herramientas y los conocimientos para dar respuesta a la pregunta planteada. Lo anterior es complementado por un breve video de 5 minutos que refuerza lo planteado en la exposición.

Basados en la exposición y video, se forman grupos de trabajo y utilizando la plataforma <https://kahoot.com/> se realizan una serie de preguntas y los grupos responden en un tiempo determinado, transformándose la instancia en una especie de competencia grupal de conocimientos, incorporando el celular.



► Fig. 3 Finalmente, con base en el tema planteado los participantes elaboran un trabajo de carácter manual o el diseño de una actividad práctica, con el uso de distintos elementos o materiales. Por ej: Cartulina, papel, cartón, botellas etc.

Durante el primer semestre de 2022 se han realizado 6 talleres en cada unidad educativa y se espera que el segundo semestre se realice una cantidad similar de ellos, de acuerdo al plan de trabajo.

Finalmente, con base en el tema planteado los participantes elaboran un trabajo de carácter manual o el diseño de una actividad práctica, con el uso de distintos elementos o materiales. Por ej: Cartulina, papel, cartón, botellas etc.

Durante el primer semestre de 2022 se han realizado 6 talleres en cada unidad educativa y se espera que el segundo semestre se realice una cantidad similar de ellos, de acuerdo al plan de trabajo.



► Fig. 4 Actividad práctica desarrollada como parte de los talleres de los Clubes de Vulcanología

**Resultados:**

Como resultados de la experiencia se pueden destacar la conformación de 4 clubes de Vulcanología y Gestión del Riesgo, con grupos de trabajo de 12 a 15 estudiantes cada uno, de edades entre 8 a 17 años, pertenecientes a 4 establecimientos educacionales de la comuna, todos ellos de carácter municipal.

Además de ello se diseñó una metodología de divulgación que permitió abordar algunas unidades de aprendizaje utilizando para ellos una rutina pedagógica innovadora y que apunta a la divulgación de la ciencia vulcanológica y a crear conciencia en torno a enfrentar con mayor preparación los posibles peligros derivados de la actividad volcánica.

Junto a los talleres que semanalmente se realizan en los establecimientos educacionales de la comuna, se combinan con las salidas a terreno o excursiones a sitios de interés geológico y volcánico, como se aprecian en las imágenes, que son guiadas por la geóloga que participa de la iniciativa.



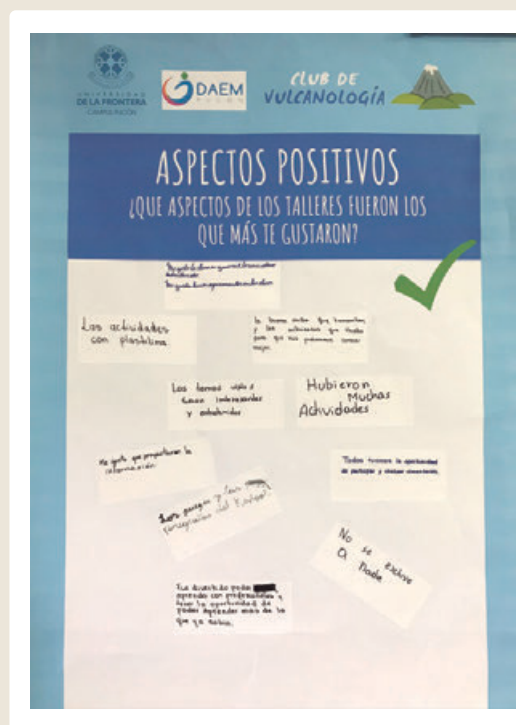
► Fig. 5 Salida a terreno o excursión al Ruka Pillán guiada por una Geóloga. Actividad que complementa la formación de los Clubes de Vulcanología y Gestión del Riesgo.

Junto con ello, se realizan charlas, conversatorios y talleres guiados por vulcanólogos, geólogos y técnicos que complementan las actividades de los Clubes.

Al término del primer semestre de trabajo, se generó un proceso de evaluación de la iniciativa en distintos niveles:

- a) Nivel de Coordinación general
- b) Nivel de equipo técnico
- c) Y en cada Club de vulcanología, para esto último se implementó una actividad de evaluación, donde los estudiantes dieron a conocer sus impresiones sobre lo vivido. La evaluación se abordó en 4 ámbitos: Los aspectos positivos de la iniciativa, los aspectos a mejorar, sugerencias y ¿Qué aprendí?

Los resultados permitirán incorporar diversos aspectos para mejorar la iniciativa.



► Fig. 6 Evaluación Club de Vulcanología Complejo Educacional Carlos Holzapel, al término del primer semestre académico.

**Desafíos:**

El principal desafío para el año 2023 es expandir la existencia de Clubes en todos los establecimientos educacionales municipales de la comuna, con el propósito de formar a los estudiantes de los diversos niveles en el conocimiento de los volcanes y aprender de los riesgos asociados a su convivencia permanente con ellos.

Es de interés del Campus Pucón y del Departamento de Educación Municipal de la comuna, mantener y proyectar la iniciativa, por la incidencia que tiene en el ámbito local la formación y educación de la población en estas temáticas y por la influencia que tienen en la

familia los estudiantes que participan de su proceso educativo.

Adicionalmente a los clubes de vulcanología es de interés de este centro universitario crear otras iniciativas que aporten a la temática de vulcanología y gestión del riesgo en el territorio.

## REFERENCIAS

- ▶ Censo 2017 Instituto Nacional de Estadísticas (Pucón) <http://resultados.censo2017.cl/Region?R=R09>
- ▶ **PADEM:** Plan Anual de Desarrollo de la Educación Municipal 2021  
<https://municipalidadpucon.cl/oldweb/web2010/transparencia/LetraC/2021/PADEM2021.pdf>
- ▶ **PLADECO:** Plan de Desarrollo Comunal 2016 - 2020 <https://www.municipalidadpucon.cl/wp-content/uploads/2016/08/Pladeco2016-2020.pdf>
- ▶ SERNAGEOMI (Servicio Nacional de Geología y Minería) <https://rnvv.sernageomin.cl/volcan-villarrica>

# Estrategia de Divulgación y Comunicación para la Gestión del Riesgo Cuenca del Río Páez: fortaleciendo la resiliencia en la casa del Anciano Canoso (Íisx Thume) - volcán Nevado del Huila

Andrés Narvaez<sup>1,2</sup>, Adriana Agudelo<sup>1,2</sup> y Yolanda Ramírez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Servicio Geológico Colombiano, [anarvaez@sgc.gov.co](mailto:anarvaez@sgc.gov.co)

<sup>2</sup> Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán.

<sup>3</sup> Corporación Nasa Kiwe

**Palabras clave:** Gestión del Riesgo, fortalecimiento comunitario, volcán Nevado del Huila.

## RESUMEN

Desde el alcance misional del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y de su presencia en el territorio Nasa (Tierradentro - Cauca) a través del Proyecto de investigación y Monitoreo de la actividad volcánica, ha concebido acompañar, desde lo técnico, procesos dirigidos hacia la Gestión del Riesgo para la toma de decisiones y propiciar escenarios de participación para la Apropiación Social del Conocimiento Geocientífico que se genera.

Ante la necesidad de poder avanzar en el conocimiento del fenómeno volcánico tras los eventos ocurridos en la Cuenca del Río Páez (erupciones y avalanchas 2007 y 2008), en el 2012 se inició un proceso de articulación interinstitucional entre la Corporación Nasa Kiwe (CNK) y el SGC-Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán (OVSPo), a través del diseño e implementación de una Estrategia de Divulgación y Comunicación para la Gestión del Riesgo, dando respuesta a los lineamientos propuestos por el Documento Conpes 3667 del 2010 (Consejo Nacional de Política Económica y Social (2010), en los cuales se encuentra el mejoramiento del conocimiento del Riesgo ante nuevas avalanchas y el mejorar la capacidad de respuesta.

Todo un trabajo dirigido hacia el manejo de información y fortalecimiento de capacidades locales, que contribuya en la adopción de una cultura de la Gestión del Riesgo para la pervivencia, con comunidades mejor informadas y preparadas que conviven con "anciano canoso" íisx tuhme (volcán Nevado del Huila (VNH), en Nasa Yuwe, lengua propia

de la cultura Nasa de este territorio) dentro de la Cuenca del Río Páez.

## INTRODUCCIÓN

Esta experiencia se cimienta a partir de lecciones aprendidas de la comunidad indígena Nasa (Cauca-Colombia) y su empoderamiento durante los últimos 28 años, de pervivir y recuperarse después de los impactos devastadores del sismo que dio lugar a la avalancha sismogénica del 6 de junio 1994 y posteriormente con la reactivación y procesos eruptivos del volcán Nevado del Huila: dos erupciones freáticas en el 2007 y una erupción freato-magmática en noviembre de 2008 y el emplazamientos de domos en 2008, 2009 (Pulgarín et al., 2009), lo que conllevó a pensar en un trabajo de articulación interinstitucional entre la CNK, en asocio con el SGC-

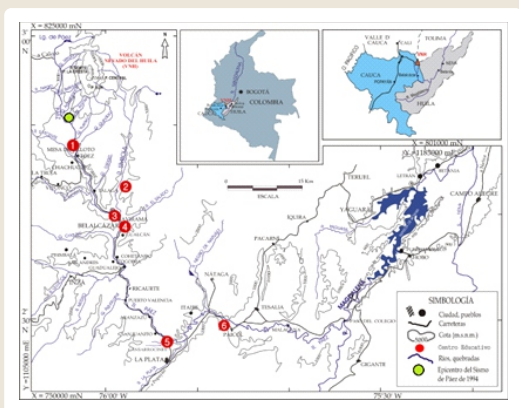


► Fig. 1 Impactos en la Cuenca del Río Páez generados por la erupción y avalancha del 20 de noviembre de 2008 del volcán Nevado del Huila.



OVSPo, con el apoyo de autoridades locales y tradicionales, dándole vida a los lineamientos trazados, para el beneficio de las comunidades, propuestos en el documento CONPES 3667 del 2010, "Lineamientos de política para la reducción del Riesgo ante la amenaza de flujo de lodo (avalancha) en el volcán Nevado del Huila".

Por lo anterior se inició a mediados de 2012 el proceso de diseño y construcción de una "Estrategia de Divulgación y Comunicación para la Gestión del Riesgo - EDCGR", la cual se soporta en tres dimensiones fundamentales: la pedagógica, la social y la comunicativa (CNK, 2012), la cual inició bajo un pilotaje con seis centros educativos asentados geográficamente a lo largo de la Cuenca del Río Páez (área de influencia volcán Nevado del Huila): 1- La Institución Educativa Benjamín Dindicué (Mesa de Caloto, Resguardo de Huila - Cauca), 2- Institución Educativa ACESI (Resguardo Indígena de Guapio - Páez - Cauca), 3- Institución Educativa San Miguel (Resguardo Indígena de Avirama - Páez - Cauca), 4- Normal Superior de Belalcázar, (Cabecera municipal de Páez - Cauca), 5- Institución Educativa Cansarrocines (Municipio de La Plata - Huila), 6- Institución Educativa Las Mercedes (Municipio de Paicol - Huila)(Figura 2).



► Fig. 2 Localización de los Comunidades educativas en la cuenca del Río Páez (piloto), que hacen parte de la Estrategia de Divulgación y Comunicación para la Gestión del Riesgo (EDCGR).

El desarrollo de este trabajo ha propiciado escenarios de encuentro a partir del diálogo de saberes para acercar el conocimiento técnico-científico y tradicional (Agudelo y Narváez, 2016), además de analizar las

diversas formas de percibir el Riesgo volcánico, a través de la aplicación de metodologías de investigación social y la construcción de materiales edu-comunicativos, lo que han permitido la apropiación de los conceptos de la Gestión del Riesgo, además de impulsar la promoción de líderes o gestores (estudiantes, docentes, padres de familia entre otros), la elaboración de planes de acción articulados a los modelos de Educación propia tradicional - PEI (Planes Educativos Institucionales), todo dirigido hacia la interiorización y fortalecimiento de la capacidad local, que contribuya en la adopción y promoción de la Gestión del Riesgo de Desastres, para la salvaguarda de la comunidades en el territorio y así mismo para reafirmar las corresponsabilidades que cada comunidad tiene en la construcción de sus condiciones de riesgo, entendiendo al tiempo el carácter social que tienen los desastres, y la posibilidad que existe de generar cambios culturales en lo cotidiano, que podrían evitarlos o reducirlos.

## METODOLOGÍA

Haciendo uso de instrumentos metodológicos participativos propios de la investigación Social como el Método Altair de Planificación Popular (Maltus, 2007), la Cartografía Social (Restrepo, 1996), ejercicios lúdico-pedagógicos como el "Póker Jurídico" para la apropiación de la normatividad que rige la Gestión del Riesgo en Colombia (Ley 1523/2012), el Rompecabezas y la escalera del ABC de la gestión del Riesgo para el manejo conceptual e identificación de Amenazas, Vulnerabilidad y Riesgo en el territorio, lo que permitió reconocer la confluencia de las visiones, percepciones, indígena-occidental para el conocimiento y el manejo del riesgo volcánico, todo como un proceso de construcción de conocimiento y recuperación de la memoria individual y colectiva dentro de un territorio diverso (Ver Figura 3). Es de resaltar que, dentro de la planificación de estos encuentros o talleres de coproducción, siempre fue importante primero concertar "armonizar" los temas con las autoridades locales y tradicionales que permitieran fortalecer la confianza y el buen desarrollo de la EDCGR y al mismo tiempo poder avanzar en los procesos de Apropiación Social del Conocimiento Geocientífico (SGC-OCCyT, 2013) del fenómeno volcánico y de la Gestión del Riesgo de desastres.



► **Fig. 3 Talleres y encuentros para la apropiación social del conocimiento de la GRV desarrollados por el SGC-OVSPo**

Desde el alcance técnico, los contenidos temáticos abordados en los encuentros o talleres con grupos focales fueron: 1- Describir el contexto geológico del territorio e historia eruptiva del VNH; 2- Reconocer la amenaza volcánica y sus peligros asociados (interpretación del mapa de amenaza volcánica); 3- Comprender ¿cómo? y ¿para qué? se monitorea un volcán; 4- Cómo manejar las incertidumbres a través de los niveles de actividad volcánica, que comunica el OVSPo; 5- Mejorar la comunicación y manejo de la información (cadena de llamados, boletines, comunicados - reportes, informes técnico- científicos sobre la actividad volcánica). Estos espacios se complementan con ejercicios de cartografía social y entrevistas, lo cual permitió reconocer y abordar las percepciones y perspectivas culturales de la amenaza volcánica en el territorio.

Toda esta apropiación social del conocimiento fue y es posible, porque se forja a partir de un gran tejido de confianza y de respeto por la palabra del conocedor del territorio "el experto local", que permite a todos reconocerse dentro de un espacio físico (la tulpa, el aula, el resguardo, el municipio, la cuenca, el territorio), consolidando así esta estrategia, a través de los encuentros con la palabra, el diálogo de saberes, salidas de campo, ejercicios creativos de coproducción, que combinan la oralidad, la narrativa, la fotografía, la ilustración; en las que se hacen apreciaciones (lecturas) conjuntas para describir el contexto del territorio e historia eruptiva del VNH.

Diez años después, la Estrategia, inicialmente abordada como experiencia piloto en seis centros educativos, se ha podido sostener en el tiempo bajo un acuerdo de voluntades institucional y comunitaria, lo que ha permitido ser replicada en 27 nuevas comunidades educativas de la zona de influencia del VNH - Cañón del Río Páez (Departamentos de Cauca y Huila), mejorando el conocimiento y reducción del riesgo y contribuyendo a su mejor gestión por parte de las mismas, teniendo como marco de acción el quehacer misional los proyectos ejecutados en pro del desarrollo local por parte de la Corporación Nasa Kiwe en la Cuenca y dentro de las actividades de apropiación social del conocimiento geocientífico desarrolladas por el Servicio Geológico Colombiano a través del proyecto de investigación y monitoreo de la actividad de los volcanes del segmento central en Colombia.

### Resultados

Gracias a los encuentros facilitados por la EDCGR entre las comunidades, el SGC/OVSPo y la CNK a través del diálogo de saberes se pudo reconocer:

Que existe un conocimiento del volcán Nevado del Huila previo a la ocurrencia de las erupciones, fundamentado a partir de la experiencia vivida y del conocimiento ganado con el sismo del 6 de junio de 1994, el cual detonó una gran avalancha a lo largo del Río Páez, lo que permitió a las comunidades responder a nuevos eventos de origen geológico, en este caso los volcánicos ocurridos en el 2007 y 2008.

En cuanto al manejo de la información técnica emitida por parte del SGC-OVSPo, las comunidades indígenas resaltan la importancia de contar con información científica, que aporta y complementa la información interpretada por el Médico Tradicional o The Wala (en lengua Nasa Yuwe) dentro de los territorios.

Desde la cartografía social se evidencian que las representaciones sociales frente al volcán Nevado del Huila dan cuenta de una perspectiva psico-sociocultural del fenómeno, propia de la lectura y de la confluencia entre el saber popular y el conocimiento científico; se interpretaron también las funciones que cumplen en la relación con el volcán Nevado del Huila: de mediación, de resistencia, de pervivencia y de resiliencia.

Las instituciones educativas y autoridades locales y tradicionales participaron activamente en la elaboración de planes de acción dirigidos a fortalecer los contenidos definidos en los planes educativos de Gestión del Riesgo.

La perspectiva intercultural de los talleres evidencia la necesidad de habilitar espacios de diálogos, que

permitan acercar el conocimiento tradicional y el conocimiento técnico.

Desde la participación lograda durante el proceso se promovió, entre las comunidades, la comprensión de la Ley 1523 de 2012, sobre los deberes y corresponsabilidades dentro de la Gestión del Riesgo.

## CONCLUSIONES

Se reconoce el avance y empoderamiento de la Gestión del Riesgo de actores locales dentro de las comunidades en el territorio Páez, gracias a todo un proceso esmerado de trabajo, acompañamiento y presencia de varias Instituciones del Estado en los territorios; en el 2009 fue reconocido por el Comité Andino para la Prevención y Atención de Desastres – CAPRADE, en el marco de la implementación de la Estrategia Andina para la Prevención y Atención de Desastres – EAPAD, para identificar iniciativas y experiencias sobre la gestión del riesgo de desastres y el desarrollo sostenible local desarrolladas en Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú. En el 2015, las Naciones Unidas, a través de la Oficina para la Reducción del Riesgo y Desastres (UNISDR), reconoció el esfuerzo del pueblo Nasa como un ejemplo mundial en Resiliencia, junto con otras 7 comunidades en el mundo, ganadoras del concurso denominado “Conocimiento para la Vida”, valorando la aplicación de los conocimientos tradicionales de los pueblos, en las estrategias de prevención y disminución de factores de riesgo de Desastres.

La diversidad étnica y cultural que se evidencia en el territorio en el cual se viene implementando la Estrategia, brinda la oportunidad de establecer siempre un diálogo de saberes que permite acercar el conocimiento científico, a los saberes ancestrales y a aquellos ganados a partir de la experiencia y vivencias; lo que ha permitido visibilizar y reconocer la incidencia de la acción u omisión humana en la ocurrencia de desastres dentro del territorio, además del poder sensibilizar y concientizar a la población acerca del ejercicio de corresponsabilidad frente a los deberes y derechos con el entorno, propiciando la articulación y participación de las comunidades en la promoción de la Gestión y Reducción del Riesgo de Desastres; ha definido bases y argumentos para el diseño, desarrollo o adaptación de herramientas pedagógicas y comunicativas que respondan a la realidad y contexto que se vive en cada una de las regiones en donde se asientan las comunidades educativas; se promueve el fortalecimiento de las capacidades para la construcción de planes de acción y para la elaboración u/o actualización de planes escolares de Gestión del Riesgo, así como su incorporación en los planes de vida e instrumentos de planificación territorial. Además, se conforman grupos de trabajo dentro de las instituciones educativas que se autodenominan Gestores Sociales del Riesgo, asumiendo un rol de multiplicadores del conocimiento y de la práctica en sus comunidades.

El Servicio Geológico Colombiano (SGC), está comprometido con el desarrollo y acompañamiento de las actividades de apropiación y difusión del conocimiento de los fenómenos de origen geológico que permiten fortalecer las capacidades de respuesta y toma de decisiones de las comunidades en sus territorios, promoviendo la corresponsabilidad y confianza con las instituciones y autoridades tradicionales-locales.

Los resultados de la CNK con las comunidades dentro de un modelo de desarrollo local se hacen evidentes a través de proyectos en áreas funcionales del territorio: vías de comunicación e infraestructuras, salud, adquisición de tierras, educación, electrificación, proyectos agro-productivos, medio ambiente. Pretendiendo hacia futuro que las comunidades se empoderen y puedan seguir afrontando la sostenibilidad de lo construido hasta ahora y que puedan seguir fortaleciendo la resiliencia territorial.

## REFERENCIAS

- ▶ Agudelo, A. y Narváez, A. (2016). Divulgation and Communication Strategy for Social Risk Management, facilitating scenarios between the Nevado del Huila volcano and the Nasa educative community. Abstracts Cities on Volcanoes 9, Puerto Varas, Chile, 2016.
- ▶ Consejo Nacional de Política Económica y Social (2010). Departamento Nacional de Planeación, República de Colombia. Documento Conpes 3667 - 2010 "Lineamientos de política para la reducción del Riesgo ante la amenaza de flujo de lodo (avalancha) en el volcán Nevado del Huila", 77 p. Bogotá, Colombia.
- ▶ Corporación Nasa Kiwe. (2012). Estrategia de Divulgación y Comunicación para la Gestión Social del Riesgo. Informe Interno, 12 p. Popayán, Colombia.
- ▶ Ley 1523. Adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones (24 de abril de 2014). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141>
- ▶ Maltus. C. (2007). MAPP Método Altair de Planificación Popular. (1ª ed). Editorial S.A. <http://beu.extension.unicen.edu.ar/xmlui/bitstream/handle/123456789/247/MAPP-Metodo-Altadir-de-Planificacion-Popular.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- ▶ Pulgarín, B., Cardona, C., Agudelo, A., Santacoloma, C., Monsalve, M. L., Calvache, M., Murcia, H., Ibáñez, D., García, J., Murcia, C., Cuellar, M., Ordoñez, M., Medina, E., Balanta, R., Calderón, Y., & Leiva, O. (2009). Erupciones Históricas Recientes del Volcán Nevado del Huila, cambios morfológicos y lahares asociados. Memorias XII Congreso Colombiano de Geología, 7-11 de septiembre de 2009, Paipa.
- ▶ Restrepo, G., Velasco, A. Y Preciado, J.C., (1996) Cartografía Social: Metodología y Experiencias. En: Revista SIG-PAFCAño 3 No. 12. Páginas 113-135, diciembre de 1996. IGAC Santa Fé de Bogotá.
- ▶ Servicio Geológico Colombiano - Observatorio de Ciencia y Tecnología. (2013). Plan de Acción para la Apropiación Social del Conocimiento producido en el Servicio Geológico Colombiano. Convenio de Cooperación No. 033-2013, Primera versión, 45 p. Bogotá, Colombia.



# Peligros volcánicos: Evidencias de conocimiento posterior a ferias informativas, Volcán Misti-Perú

Nely Sullca<sup>1,2</sup>, Nérida Manrique<sup>1</sup>, Kevin Cueva<sup>1</sup>, Evert Apaza<sup>2</sup>, Jackeline Choque<sup>3</sup> y Veronica Tito<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geológico Minero y Metalúrgico-INGEMMET, Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (nsullca@unsa.edu.pe)

<sup>2</sup> Escuela profesional de Psicología- Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (UNSA), Perú

<sup>3</sup> Centro de Estudios y Prevención de Desastres-PREDES

**Palabras clave:** Conocimiento, peligros volcánicos, volcán Misti

El volcán Misti ubicado a 17 km del centro de la ciudad de Arequipa, representa un riesgo para más de un millón de personas que viven a inmediaciones del macizo, debido a que, a lo largo de su historia eruptiva, presentó erupciones pequeñas, moderadas y grandes. Producto de estas erupciones se ha formado el relieve que hoy se ve en Arequipa, donde se han asentado más de un millón de habitantes y se han construido obras de infraestructura importantes de la región sur del Perú.

Es así que la difusión de información sobre monitoreo volcánico, peligros volcánicos y el mapa de peligros volcánicos, es sumamente importante para la población arequipeña; ya que al no tener una memoria colectiva de una erupción del Misti en los últimos 500 años aproximadamente, existe disparidad en cuanto al conocimiento y las secuelas de una erupción volcánica, en contraste con pobladores que sí han experimentado un evento de este tipo; por ejemplo, los habitantes próximos al volcán Ubinas-Moquegua, el cual frecuentemente entra en proceso eruptivo, afectando a la población con caídas de cenizas.

El Observatorio Vulcanológico del Ingemmet (OVI) junto con la Agencia Adventista de Desarrollo y Recursos Asistenciales - ADRA Perú, y el Centro de Estudios y Prevención de Desastres - PREDES, han organizado ferias informativas, donde se aplicó un instrumento para recopilar información en relación al conocimiento adquirido de forma posterior a las ferias informativas.

Para el presente trabajo, se aplicó un cuestionario a 114 pobladores de Alto Selva Alegre, Cayma, Chiguata, Mariano Melgar, Miraflores y Paucarpata,

quienes se encuentran en una zona de alto peligro. Los resultados muestran que un 62.3% desconocían que el OVI, monitoreaba los volcanes activos en el Perú. Un 73.7% no conocía el mapa de peligros volcánicos y un 82.5%, posterior a la feria informativa donde se aplicó el cuestionario, percibe que vive en una zona que puede ser afectada por peligros volcánicos. Es así que la información difundida por los vulcanólogos del OVI, permitió reducir las brechas de conocimiento entre los pobladores que contaban con algún tipo de información (relacionado al monitoreo volcánico, peligros volcánicos y mapa de peligros volcánicos del Misti), frente a los que no; poniendo en evidencia la efectividad de la difusión de la información por parte de los especialistas en vulcanología.

## INTRODUCCIÓN

La ciudad de Arequipa está rodeada por tres volcanes, uno extinto (Pichu Pichu), uno potencialmente activo (Complejo volcánico Chachani) y uno activo (Misti) (Fig. 2). Respecto a este último, hay una distancia de tan solo 17 km del centro de la ciudad hasta el cráter del volcán, por lo que, debido a la cercanía de la población al volcán activo, Arequipa está considerada como una de las ciudades con mayor riesgo volcánico en el mundo (Macedo et al., 2016; Macedo et al., 2017).

El Misti ha mostrado una variedad de estilos eruptivos, incluyendo erupciones vulcanianas y plinianas. Respecto a la segunda mencionada, el último evento de este tipo ocurrió hace 2070 años y tuvo un índice de explosividad volcánica IEV=4 (Charbonnier et al., 2020). Además, tuvo varias erupciones explosivas, donde se han contabilizado por lo menos 22 en los últimos 40 mil años (Mariño et al., 2016).

De acuerdo al mapa de peligros del volcán Misti, elaborado en 2007 por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), a través de su Observatorio vulcanológico (OVI), donde se contemplan los niveles (alto, moderado y bajo peligro), los distritos de mayor riesgo, debido a que se encuentran asentados en zonas de alto peligro volcánico, son: Alto Selva Alegre, Miraflores, Paucarpata, Mariano Melgar, Cayma y Chiguata; así como los ubicados en la cuenca del río Chili, como Yanahuara, Cercado, Hunter, Uchumayo, Tiabaya y Sachaca, respectivamente (Mariño et al., 2016).

El acelerado y desordenado crecimiento de la población arequipeña en los últimos años, dan como resultado que más viviendas se construyan cerca al volcán. A esto se suma la ausencia de una erupción volcánica en los últimos años, por lo cual no existe una memoria colectiva de un evento de ese tipo y las consecuencias que podría generar. En este sentido, la complacencia de autoridades y ciudadanos, ha dado pie a que, en dichas zonas de alto peligro, se hayan desarrollado medios de vida como infraestructura de gran envergadura, tales como: centrales hidroeléctricas (Charcani I, II, III, IV, V), represas (El Fraile, Aguada Blanca), centros mineros, aeropuerto, entre otros; todos expuestos a un alto riesgo ante una eventual erupción (Antayhua et al., 2022).

Por los antecedentes mencionados, organizaciones como ADRA Perú y PREDES, mediante el financiamiento de USAID, trabajaron en el proyecto "Preparados ante volcanes y sismos". En el marco de sus actividades de información y sensibilización frente a los peligros volcánicos, organizaron ferias informativas en las cuales las instituciones técnico-científicas, las entidades técnicas asesoras y los ejecutores del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres - SINAGERD, difundieron las acciones que vienen desarrollando en el marco de la gestión del riesgo de desastres.

En el presente trabajo se analizaron 114 cuestionarios aplicados a los asistentes de las ferias informativas, los participantes pertenecen a los distritos ubicados en la zona de alto peligro del volcán Misti. El objetivo del cuestionario es recoger información del conocimiento adquirido por los asistentes, posterior a la feria informativa, ya que es fundamental saber si las

estrategias de difusión cumplieron con las metas propuestas. Los resultados del trabajo, además contribuirán a evidenciar la efectividad de las ferias informativas.

## DATOS

Entre los meses de abril y mayo de 2022, se aplicó un instrumento a 114 personas asistentes a las ferias informativas, de las cuales el 56.1% fueron hombres y el 43.9% mujeres, con edades comprendidas entre 10 a 55 años. Los participantes fueron informados del objetivo del cuestionario y se les indicó que sus respuestas serían anónimas. Las personas pertenecen a los distritos de: Alto Selva Alegre, Cayma, Chiguata, Mariano Melgar, Miraflores y Paucarpata, los cuales, de acuerdo con el mapa de peligros, se encuentran en la zona de alto peligro volcánico del Misti. Cabe resaltar que la población de estos distritos, presenta características demográficas similares (edad, sexo, nivel socioeconómico y sociocultural) lo cual favoreció la aplicación del cuestionario.

El instrumento aplicado en el presente trabajo es de tipo cuestionario, consta de nueve reactivos de respuesta dicotómica (Jiménez et al., 2006) y uno con escala tipo Likert (Likert, 1932). Las primeras preguntas están orientadas a recoger información respecto a la información brindada por los especialistas en vulcanología, y la última recoge una valoración de la satisfacción con la información brindada.

Entre las definiciones descritas en el instrumento se encuentran:

**(i) Instituciones técnico científicas que monitorean los volcanes:** Son centros de investigación y monitoreo de volcanes activos del sur del Perú, de carácter interdisciplinario, cuyo fin es estudiar los volcanes activos, determinar la naturaleza y probabilidad de ocurrencia de una erupción volcánica a través del monitoreo sistemático y constante (Mariño et al., 2013).

**(ii) Mapas de peligro volcánico:** Los mapas de peligros volcánicos son documentos cartográficos que muestran el grado de peligrosidad volcánica de las áreas adyacentes a un determinado volcán. (Mariño et al., 2016).



► Fig. 1 Imagen 3D del volcán Misti. Vista de la ciudad de Arequipa desde el flanco suroeste den (extraída de Google

**(iii) Peligros asociados al volcán Misti:** En el volcán Misti, en orden de importancia, se han identificado peligros por caída de piroclastos y proyectiles balísticos, flujos y oleadas piroclásticas, flujos de escombros (lahares), flujos de lava, avalanchas de escombros y gases volcánicos (Mariño et al, 2016).

**(iv) Satisfacción:** es la percepción individual de sus expectativas como resultado de la información brindada por los especialistas.

Del total de cuestionarios aplicados, su totalidad fueron cubiertos al 100%, lo que indica una tasa de respuesta total; asimismo, el tiempo promedio de administración por cuestionario fue de 4 minutos aproximadamente.

## METODOLOGÍA

Fig. 2 - Resultados del instrumento aplicado (preguntas del 1 al 9). En el gráfico las barras de color azul significan respuestas afirmativas y las rojas respuestas negativas, frente al cuestionario aplicado.

Para la elaboración y aplicación del instrumento, se siguieron los siguientes pasos: (i) capacitación sobre monitoreo volcánico, mapa de peligros y peligros volcánicos. (ii) observación en campo orientado a la dinámica del desarrollo de las charlas (presentación de la institución, explicación sobre las actividades del OVI, entrega de material, entre otros). (iii) formulación

de preguntas del instrumento. (iv) presentación del cuestionario al personal especializado en vulcanología del OVI. (v) prueba piloto del instrumento y finalmente (vi) aplicación en campo.

Así mismo, se revisaron investigaciones sobre instrumentos de tipo cuestionarios aplicados a pobladores que habitan en ambientes volcánicos. Dentro de ellos, se toma como referencia el estudio realizado por De Alba (2003), quien realiza la construcción y validación de los instrumentos de percepción de riesgo y sesgos cognitivos relacionados con el riesgo volcánico.

## Resultados e interpretación

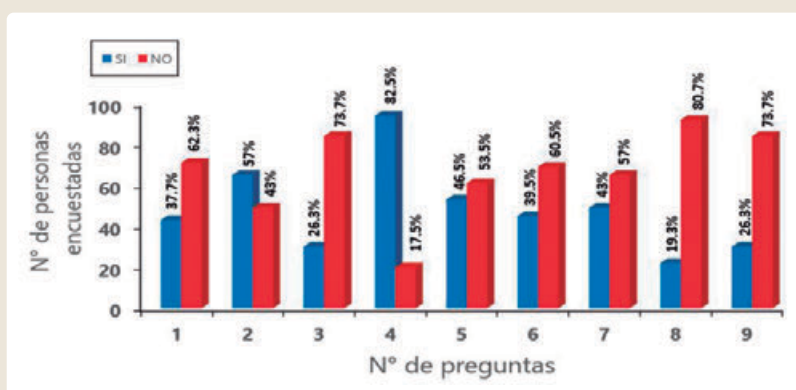
De los 114 cuestionarios aplicados se obtuvieron los siguientes resultados (Fig. 2).

Frente a la pregunta N.º 1, antes de asistir a la feria ¿Sabía que los volcanes del Perú son monitoreados por el Observatorio Vulcanológico del Ingemmet-OVI?, los resultados muestran que un 37.7 % de la población afirma que antes de asistir a la feria informativa si sabía que los volcanes del Perú son monitoreados por el OVI, mientras que un 62.3% refiere que no lo sabía. En función a los datos obtenidos, podemos interpretar que más de la mitad de la población desconocía de la existencia del OVI, lo que nos indica que la información proporcionada

servió para que más población se entere de las actividades que realiza la institución.

En relación a la pregunta N.º 2, antes de asistir a la feria ¿Sabía cuáles son los peligros volcánicos?, El 57% afirma que sí sabía cuáles son los peligros volcánicos y

un 43% afirma que no. Lo cual indica que se consiguió informar a un número importante de los entrevistados, logrando así reducir la brecha entre los que sí habían recibido esta información con aquellos que previo a la feria, no pudieron acceder a la misma.



► Fig. 2 Resultados del instrumento aplicado (preguntas del 1 al 9). En el gráfico las barras de color azul significan respuestas afirmativas y las rojas respuestas negativas, frente al cuestionario aplicado.

Con respecto a la pregunta N.º 3, antes de asistir a la feria ¿Conocía los mapas de peligros volcánicos?, El 26.3% indicó que sí, frente a un 73.7% que no conocía. De acuerdo a ello, podemos decir que la gran mayoría no conocía el mapa de peligros pese a estar en una zona de alto riesgo, y que gracias a la feria informativa a la actualidad sí lo conocen.

En relación a la pregunta N.º 4, ¿Considera que vive en una zona que puede ser afectada por los peligros volcánicos? El 82.5% considera que sí, contrastando con un 17.5% que opina que no. Esto indica que una cantidad significativa de los participantes del cuestionario tienen una clara percepción frente al peligro volcánico y que, pese a la información brindada, aún hay pobladores que no consideran que se encuentren habitando en una zona de riesgo.

Referente a la pregunta N.º 5, ¿Considera que el material de construcción de su vivienda es seguro frente a los peligros volcánicos?, el 46.5% indicó que sí y un 53.5% que no. Estos datos nos muestran que más de la mitad de personas percibe que, frente a una probable erupción volcánica, su vivienda no sería un buen lugar para mantenerse a salvo frente a los peligros volcánicos.

En cuanto a la pregunta N.º 6, de ocurrir una erupción volcánica ¿Sabría usted cómo actuar?, un 39.5% afirma que sí sabía, en contraste con un 60.5% que indica que no. Los resultados muestran que existe un desconocimiento de la población respecto a las acciones a tomar frente a una erupción volcánica.

Respecto a la pregunta N.º 7, de ocurrir una erupción volcánica ¿Sabría usted por dónde evacuar?, El 43% indica que de ocurrir una erupción volcánica sí sabría por dónde evacuar mientras que un 57% refiere que no. La información obtenida, refleja un desconocimiento por más de la mitad, de los que respondieron el cuestionario sobre cómo evacuar. Esto indica que falta trabajar en los planes de evacuación y difusión de su información.

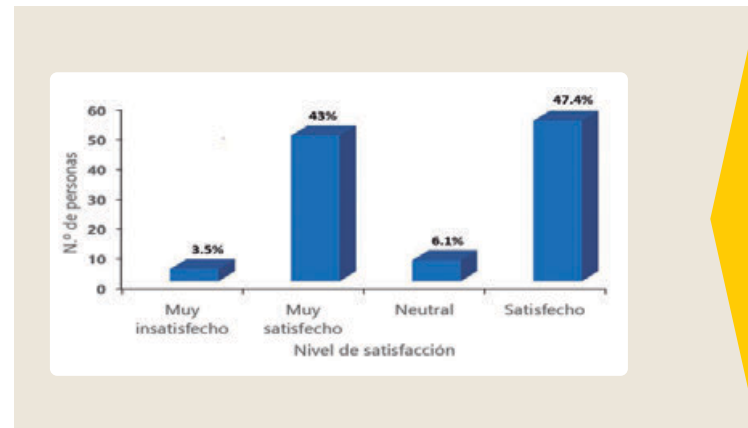
De acuerdo a la pregunta N.º 8, ¿Sabe si en su distrito existen planes de emergencia en caso de una erupción volcánica?, el 19.3% indica que sí sabe y un 80.7% afirma que no. Lo que demuestra que la gran mayoría de la población asistente desconoce de la existencia de planes de emergencia.

Frente a la pregunta N.º 9, ¿Ha participado antes de una feria de difusión/ capacitación/ simulacro frente a



los peligros volcánicos?, un 26.3% indica que sí, mientras que un 73.7% refiere que no. Esto indica que gracias a las ferias informativas se logró llevar información a personas que antes no habían tenido la oportunidad de ser informadas frente a los temas tratados.

Finalmente, frente a la pregunta N.º 10, nivel de satisfacción, el 43% quedó muy satisfecho con la información brindada, un 47.4% satisfecho, un 6.1% indicó que su respuesta era neutra y un 3.5 % muy insatisfecho, respectivamente. Esta valoración evidencia que se logró difundir la información de tal manera que la gran mayoría de la población lo calificó como satisfecho y muy satisfecho (Fig. 3).



► Fig. 3 Resultados del instrumento aplicado (pregunta 10). Las barras de color azul significan el grado de satisfacción.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las ferias informativas organizadas por ADRA Perú y PREDES, en las cuales el OVI participó como aliado estratégico, permitió reducir las brechas de conocimiento entre los pobladores que contaban con algún tipo de conocimiento (relacionado al monitoreo volcánico, peligros volcánicos y mapa de peligros volcánicos del Misti) frente a los que no, poniendo de manifiesto la efectividad de la difusión de la información por parte de los especialistas en vulcanología.

La información difundida respecto al monitoreo volcánico era desconocida por el 62.3% de participantes de la feria; los cuales, gracias a la información proporcionada por los especialistas vulcanólogos, en la actualidad conocen la existencia del Observatorio Vulcanológico de INGEMMET y las actividades que realizan.

El 73.7% desconocía del mapa de peligros del volcán Misti, lo cual es un indicador de que antes de habitar el lugar en el que viven, los pobladores no sabían que se encontraban en una zona de alto peligro. Adicionalmente a ello, el volcán no presentó una erupción en los últimos tiempos, lo que contribuye que las zonas próximas al Misti sean percibidas como seguras para habitar. Tampoco se observa un trabajo eficaz por parte de las autoridades para impedir que zonas de alto peligro volcánico sigan siendo habitadas.

Posterior a la feria informativa, casi el total de participantes (82.5%) percibe que habita en una zona que puede ser afectada por los peligros volcánicos, en relación a lo mencionado, se espera que estas personas sean más conscientes de los peligros volcánicos y sus consecuencias.

Los pobladores participantes de las ferias informativas mostraron niveles predominantes de satisfacción (muy satisfecho 43% y satisfecho 47.4%) con la información brindada por los vulcanólogos del OVI.

La labor de difusión del conocimiento sobre peligros volcánicos por parte de los profesionales del OVI, ha logrado alcanzar a un número significativo de población vulnerable asentada en zonas de alto peligro volcánico en la ciudad de Arequipa. Sin embargo, es necesario continuar reforzando la percepción de riesgo en la población. Por lo que se recomienda fortalecer las estrategias de difusión en el OVI; asimismo, continuar con los lazos de cooperación con entidades extranjeras y ONGs. Finalmente, continuar con trabajos e investigaciones en ciencias sociales respecto a poblaciones que se encuentran asentadas en zonas volcánicas.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado gracias al Observatorio Vulcanológico del INGEMMET y al proyecto "Preparados ante volcanes y sismos" (ADRA Perú -PREDES), por ello, se hace extensivo el agradecimiento a todos los miembros de las instituciones. Así como también al Dr. Evert Apaza, docente de la escuela profesional de Psicología, UNSA.

## REFERENCIAS

- ▶ Antayhua Vera, Y. T., Velarde Quispe, L., Tavera, H., Rivera, M., & Centeno Quico, R. (2022). Evaluación de la deformación estructural y distribución de esfuerzos en el volcán Misti (Arequipa).
- ▶ Charbonnier, S. J., Thouret, J. C., Gueugneau, V., & Constantinescu, R. (2020). New insights into the 2070 calyr BP pyroclastic currents at El Misti volcano (Peru) from field investigations, satellite imagery and probabilistic modeling. *Frontiers in Earth Science*, 398.
- ▶ De Alba, M. E. N. (2003). Contrucción y Validación de los Instrumentos de Percepcion de Riesgo y Sesgos Cognitivos relacionados con el Riesgo Volcanico.
- ▶ Jiménez, J. C., Sánchez, J. G., & Aguilar, F. G. (2006). Guía técnica para la construcción de cuestionarios. *Odisea Revista electrónica de pedagogia*, 3(6).
- ▶ Likert, R. (1932). A technique for the measurement of attitudes. *Archives of psychology*.
- ▶ Macedo Franco, L. D. (2017). Evaluación del Programa de Evacuación por Erupción Volcánica del Misti en la Capacidad de Respuesta de la Población del Distrito de Alto Selva Alegre. Arequipa 2009-2015.
- ▶ Macedo Franco, L. D., & Vela Valdez, J. C. (2014). Límites de expansión urbana hacia los volcanes Misti y Chachani.
- ▶ Macedo Sánchez, O., Taipe Maquerhua, E. L., Del Carpio, J. A., Ticona Paucara, J., Ramos Palomino, D. A., Puma, N., ... & Vela Valdez, J. C. (2016). Evaluación del riesgo volcánico en el sur del Perú, situación de la vigilancia actual y requerimientos de monitoreo en el futuro. Informe técnico.
- ▶ Mariño Salazar, J., Cacya Dueñas, L., & Macedo Franco, L. D. (2006). La ciudad de Arequipa y los peligros volcánicos asociados al volcán.
- ▶ Mariño Salazar, J., Rivera Porras, M. A., Macedo Franco, L. D., Ramos Palomino, D. A., Antayhua Vera, Y., Taipe Maquerhua, E. L., ... & Lazarte Zerpa, I. A. (2013). Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI): herramienta para la reducción del riesgo volcánico en el sur del Perú.
- ▶ Mariño Salazar, J., Rivera Porras, M. A., Thouret, J. C., & Macedo Franco, L. D. (2016). Geología y mapa de peligros del volcán Misti-[Boletín C 60].
- ▶ Nemoto, T., & Beglar, D. (2014). Likert-scale questionnaires. In *JALT 2013 conference proceedings* (pp. 1-8).

# Experiencias de divulgación de la volcanología en Chile: propuestas innovadoras y desafíos

Virginia Toloza<sup>1</sup>, Gabriela Jara<sup>1</sup>, Lizette Bertin<sup>2</sup>, Loreto Córdova<sup>2</sup> y Cristian Mardones<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Unidad de Geología y Peligros de Sistemas Volcánicos, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. virginia.toloza@sernageomin.cl

<sup>2</sup> Observatorio Vulcanológico de los Andes del Sur, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Servicio Nacional de Geología y Minería, Temuco

**Palabras clave:** Divulgación, riesgo volcánico, comunidad resiliente

La Red Nacional de Vigilancia Volcánica (RNVV) del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) de Chile, inició el año 2008 tras la erupción del volcán Chaitén. Con ello se fortalece el Observatorio Vulcanológico de los Andes del Sur (OVDAS) y la confección de mapas de peligro de los 45 volcanes más activos del país. Parte de su misión es divulgar el conocimiento científico de los volcanes activos, a las comunidades expuestas a los peligros volcánicos a lo largo de todo el territorio nacional.

En sus inicios, el objetivo fue dar a conocer la RNVV, informando a la comunidad la importancia del monitoreo volcánico a través del OVDAS, mapas de peligro, campañas de terreno, campañas radiales, entre otras. Sin embargo, estas actividades no contaban con una programación sistemática ni replicabilidad en el tiempo, muchas de ellas se generaban como respuesta a alguna inquietud puntual de la comunidad.

En el año 2013, se abordó la construcción de productos de divulgación dirigidos a público infantil de comunidades expuestas a peligros volcánicos, mediante la confección de material didáctico de alta calidad, como maquetas armables del volcán Osorno, memorice y rompecabezas de 24 piezas, con imágenes y conceptos volcánicos. Posteriormente también se realizó la reedición de una historieta del año 2004 llamada: "Rayén y el volcán", con el apoyo del dibujante Guillo, donde a través de las preguntas que Rayén hace al volcán se cuenta de forma amigable para todo público qué es el volcanismo y cómo se hace el monitoreo.

A inicios del 2015, el volcán Villarrica, ubicado en el puesto N° 1 del ranking de riesgo de volcanes de Chile, entró en erupción generando gran expectación,

tanto local como nacional. Esto ocasionó que la comunidad expuesta, manifestara gran interés en la actividad del volcán y sus posibles impactos. Por otro lado, debido a que las alertas técnicas volcánicas que emite OVDAS, difieren del sistema nacional de protección civil (ONEMI), existe gran confusión en la población. Ante esto, se realizó una campaña comunicacional denominada "ABC de los volcanes" que consistió en mensajes radiales con explicación de conceptos volcánicos e infografías que explicaban de forma simple y gráfica, cada nivel de alerta volcánica (Fig. 1).



► Fig. 1 Infografía de campana ABC de los volcanes, realizada el año 2015, que describe los niveles de alerta técnica volcánica

En este contexto, se organizaron las primeras ferias de divulgación volcánica en las comunidades aledañas al volcán Villarrica, Coñaripe y Pucón, las más afectadas por la actividad del volcán. Éstas consisten en exposiciones interactivas, gratuitas y abiertas a toda la comunidad, donde es posible aprender de forma lúdica sobre los volcanes, sus procesos y peligros. Se ofrecieron distintos formatos, como charlas expositivas de expertos, posters, muestras de rocas y minerales, actividades manuales para niños y niñas y experimentos con una maqueta de un volcán, emulando erupciones mediante reacciones químicas controladas. Además, se realizaron talleres de capacitación a docentes de escuelas, guías turísticos y comités de emergencia de las localidades expuestas, con el fin de mejorar la gestión de emergencias y dejar capacidades instaladas en la comunidad para su transmisión en el tiempo. Estos eventos fueron apoyados por distintos organismos locales del Estado, así como universidades cercanas. De esta manera, las ferias fueron las primeras actividades de divulgación institucionales gestadas con la colaboración de actores locales.

Con el paso de los años, las ferias de divulgación volcánica y talleres de capacitación han constituido un compromiso estratégico institucional, lo que ha permitido una mayor disposición de recursos y profesionales para ofrecer propuestas innovadoras a distintas comunidades expuestas a peligros volcánicos.

La pandemia de COVID-19 planteó el desafío de adaptar las actividades de divulgación de la RNVV, hacia alternativas digitales, realizando así la primera feria de divulgación completamente online, lo cual permitió dar mayor cobertura territorial, y no sólo a la población próxima al evento. Para esta se creó material audiovisual, tales como videos de experimentos de procesos volcánicos, y de visita al Observatorio, que muestra el funcionamiento del OVDAS y las técnicas de monitoreo. Además, se realizó un "matinal de los volcanes" simulando un programa de televisión de conversación, orientado a escolares. También, se creó un sitio web, <https://rnvv.sernageomin.cl/divulgacion/> donde es posible consultar material interactivo, como videos, posters, cuentos, transmisiones en vivo de ferias, e inclusive descargar algunos de los productos para infantes (SERNAGEOMIN, 2022).

Las ferias han generado espacios para reinventar, con distintos formatos, productos de divulgación permitiendo comunicar de manera interactiva y entretenida el riesgo volcánico a los distintos públicos que conforman las comunidades. Se han rescatado elementos tradicionales de la cultura local como leyendas de volcanes y relatos ancestrales, dándoles un vuelco creativo adaptándolas a cuentos para niños, en formato audiocuentos, difundidos en radios locales, sitio web, Spotify y próximamente como libro impreso. Además, se han mezclado elementos cotidianos y atractivos (como la comida) para realizar analogías con conceptos volcánicos, mediante una receta del postre volcán de chocolate que va acompañada de una explicación de procesos como viscosidad, lahar y dispersión de piroclastos. También, se han aprovechado las tecnologías digitales, de realidad aumentada y virtual, en actividades de divulgación que han permitido encantar a diferentes audiencias. Entre ellas destaca una "caja de arena" que permite proyectar las curvas de nivel sobre un relieve hecho con arena, que cambia mediante su manipulación y permite comprender el relieve y su proyección hacia un mapa.



► Fig.2 Maqueta del volcán Villarrica con proyección animada, dispuesta al público en evento "Paseo por la ciencia - Antofagasta".



Uno de los productos innovadores consiste en una maqueta 3D a escala del volcán Villarrica (Fig. 2), sobre la cual se proyectan animaciones de los principales procesos volcánicos, acompañado de un relato descriptivo, que permite a los usuarios entender cada uno de los procesos y las zonas de mayor peligro, para posteriormente tomar medidas de prevención en terreno.

Otro producto de divulgación innovador es el "Viaje al centro del volcán", donado a la RNVV en el año 2018, por el Centro de Excelencia en geotermia de los Andes (CEGA) de la Universidad de Chile. Éste consiste de una estructura que simula una nave, que, junto a unos lentes de realidad virtual, permiten al usuario tener una experiencia inmersiva, donde es posible "entrar" al interior del volcán Villarrica minutos antes de una erupción y conocer la dinámica interna del volcán (Figura 3).

Tanto la maqueta de animación como el "Viaje al centro del volcán" están disponibles para el público en el OVDAS, ubicado en la ciudad de Temuco, donde los visitantes (estudiantes y/o adultos) pueden disfrutar de una visita guiada por profesionales y conocer las técnicas de monitoreo y aprender sobre peligros volcánicos.

También se han utilizado recursos atractivos de otros autores como, por ejemplo, el videojuego sobre gestión de una emergencia volcánica "Niña Tierra", creado en el Observatorio de Singapur, que en el año 2020 se tradujo al español, y al cual se puede acceder de forma gratuita desde el blog: <https://ninatierra.blogspot.com/>.

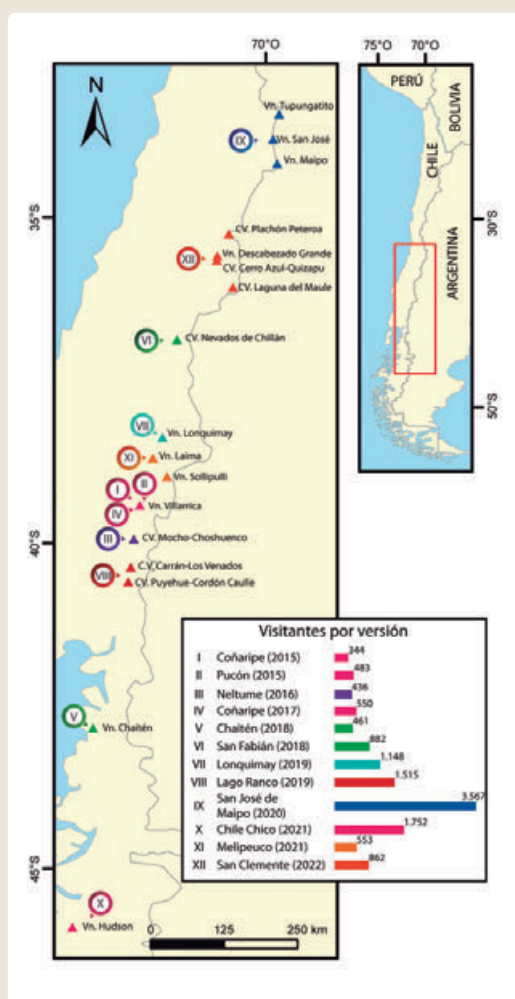


► Fig. 3 Nave "viaje al centro del volcán" exposición en XII Feria de Divulgación en San Clemente (2022).

### Resultados y desafíos

Las ferias de divulgación son el mayor evento de divulgación que realizan los equipos de la RNVV y han alcanzado más de 12.000 asistentes en sus doce versiones (Fig. 4), que hasta la fecha se han concentrado en la zona volcánica centro y sur de Chile. La vinculación con la comunidad, coordinación con las autoridades locales y el apoyo de los establecimientos educacionales son clave para que estos eventos tengan éxito, principalmente direccionado a la difusión, que permita una amplia convocatoria.

Uno de los aprendizajes adquiridos, después de siete años de actividades de divulgación, ha sido comprender que las actividades que tienen mayor impacto en las comunidades, independiente de la edad del público, son las que permiten la interacción y que conllevan una experiencia sensorial, permitiendo un aprendizaje significativo. Es por ello, que se ha incluido una actividad donde el público puede tocar material piroclástico ubicado en cajas (Fig. 5). Esto complementa el módulo de geología, que además exhibe rocas volcánicas en muestras de mano y láminas delgadas en microscopio, ceniza en lupa binocular e imágenes aéreas en estereoscopio.



► Fig. 4 Ubicación y visitantes por versión de cada Feria realizada hasta 2022.



► Fig. 5 Ubicación y visitantes por versión de cada Feria realizada hasta 2022.

Si bien muchas de las actividades desarrolladas en las ferias de divulgación están dirigidas a estudiantes, los adultos también interactúan y participan activamente de todas las actividades, por ello es muy importante incluir a todos los rangos etarios de la comunidad en las actividades. Es muy importante conocer las necesidades, intereses de cada público objetivo, así como las características culturales y relación con el entorno de cada comunidad a abordar. Esto permite planificar de mejor manera la comunicación de los volcanes y sus procesos, ajustada a la medida de cada grupo objetivo, y garantizar la buena recepción de los mensajes transmitidos.

Uno de los ejes fundamentales en la comunicación de la ciencia, es escuchar y aprender de las personas que habitan los volcanes, para juntos construir un conocimiento integral. Para ello, en muchas de las ferias se han realizado conversatorios donde los testigos de erupciones volcánicas, que en su mayoría son adultos mayores, nos cuentan cómo vivieron la erupción, lo que observaron y lo que sintieron. En estas instancias son los profesionales en volcanología quienes escuchan con humildad y aprenden de las comunidades, y se pone en valor el conocimiento local. Así mismo, los cuentos adaptados de las leyendas locales también rescatan, valorizan y difunden el saber local. Actualmente se está implementando una aplicación móvil denominada "Yo informo volcanes" que permite recopilar los reportes de los pobladores que habitan las zonas aledañas al volcán sobre manifestaciones volcánicas, por ejemplo, ruidos, explosiones, olor a gas, caída de ceniza, etc., de forma ordenada y georreferenciada. Posteriormente esta información es analizada por los profesionales del OVDAS, de forma complementaria al monitoreo instrumental.

Uno de los mayores obstáculos en la divulgación de los volcanes son los recursos limitados, tanto humanos como de financiamiento. La incorporación de las actividades de divulgación como compromisos estratégicos institucionales ha facilitado la incorporación de estas a los planes de trabajo anuales y la asignación de tiempo de profesionales de volcanología para la organización, ejecución y confección de nuevos productos. Sin embargo, sigue siendo necesario el apoyo de profesionales del área de las comunicaciones, artes visuales y ciencias sociales para abordar la

comunicación de la ciencia de forma efectiva y perdurable en el tiempo, para aportar a reducir la vulnerabilidad de las personas. Afortunadamente, gracias a los fondos remanentes de la novena versión de la conferencia Cities on volcanoes (CoV9) realizado en Puerto Varas (Chile), ha sido posible financiar productos de divulgación como la maqueta 3D de animación, la impresión de material didáctico infantil, folletería y los cuentos sobre volcanes (en curso).

La experiencia en la diversidad de estrategias de divulgación de la volcanología en Chile ha permitido comprender que no existe una forma única y correcta para el intercambio y compartir de saberes, es importante vincularse con las comunidades para abordar de manera integral y conjunta el difícil desafío de disminuir la vulnerabilidad y contribuir así en la preparación de una comunidad resiliente, tanto científica – técnica, como local.

## AGRADECIMIENTOS

A los y las profesionales de SERNAGEOMIN que han contribuido en la organización y ejecución de las actividades de divulgación de la volcanología y ciencias de la tierra, y a quienes han puesto su creatividad y habilidades más allá de la volcanología, en diseñar o confeccionar nuevos productos de divulgación.

Así también, agradecemos a colaboradores externos que han hecho posible la realización de diversas actividades a lo largo de los años: universidades (Universidad Católica de Temuco, Universidad Austral de Chile, Universidad de Chile, Universidad Católica del Maule), funcionarios de organizaciones gubernamentales (municipalidades, gobiernos regionales), proyectos PAR Explora (de la Araucanía y Los Ríos), actores locales, entre otros.

Agradecemos al Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) de la Universidad de Chile, por la formulación del proyecto "Viaje al centro del volcán" financiado por fondos Explora de divulgación científica, y su posterior donación a SERNAGEOMIN.

Finalmente, agradecemos al comité organizador del CoV9 por aprobar el financiamiento para muchos de los productos de divulgación.

## REFERENCIAS

- ▶ Servicio Nacional de Geología y Minería. (2022). Red Nacional de Vigilancia Volcánica-Divulgación. <https://rnvv.sernageomin.cl/divulgacion/>

# Contra el mal del olvido: relatos de convivencia con un volcán en erupción

Liliana Paulina Troncoso<sup>1</sup>, Andrés Ordóñez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Carrera de Geología, FIGEMPA, Universidad Central del Ecuador - ltroncoso@uce.edu.ec

<sup>2</sup> Maestría de Comunicación Estratégica Digital, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador - aordonezo@est.ups.edu.ec

**Palabras clave:** Audiovisual, relatos, volcán Tungurahua

## INTRODUCCIÓN

Durante el proceso de reactivación del volcán Cotopaxi en el año 2015 la intervención de la academia, mediante proyectos de vinculación con la sociedad, permitió determinar que más de una década de capacitaciones sobre el volcán y sus fenómenos, sin procesos de retroalimentación e incorporación de saberes locales, generaron confusión y rechazo a nuevas intervenciones en el campo de la educación. En base a lo mencionado se determinó que los procesos relacionados con la Gestión de Riesgos de Desastres, como son la prevención y mitigación, requieren del conocimiento generado y adquirido por las comunidades a lo largo del tiempo y producto de su interrelación con el territorio. El incorporar saberes, experiencias y la memoria de las comunidades afectadas por procesos eruptivos permitirá dar identidad y enriquecer los procesos de sensibilización y capacitación.

Con el apoyo y financiamiento de la Agencia Internacional de Japón (JICA Ecuador), la Asociación de exbecarios del Japón en Ecuador (BJE), la carrera de Geología de la Facultad de Ingeniería en Geología, Minas y Ambiental de la Universidad Central del Ecuador se ejecutaron dos mini proyectos (financiamiento menor a 1500 dólares) en los períodos 2019 - 2020 y 2020 - 2021 con el objetivo de generar material educativo sobre volcanes del Ecuador rescatando elementos de la cultura local y respondiendo a la necesidad de conocimiento de las comunidades. Estos mini proyectos tienen como finalidad que los exbecarios mantengan el interés de compartir el conocimiento adquirido en su estancia en Japón y lo difundan hacia la comunidad en general.

Debido a que en el mes de marzo de 2020 se declaró la cuarentena obligatoria en todo el Ecuador por

declaración de la pandemia y la presencia de la COVID-19 en el territorio, el levantamiento de información se realizó exclusivamente en el volcán Tungurahua entre diciembre de 2019 a marzo de 2020. Un factor adicional y relevante para seleccionar el Tungurahua para la ejecución del presente proyecto fue que en el año 2010 se propuso declarar al territorio relacionado con el volcán como potencial geoparque (Hart-Robertson, 2016) y desde esa fecha se mantienen los procesos para obtener el aval por parte de UNESCO.

El punto de partida del proyecto fue la generación de material audiovisual de divulgación científica con la incorporación de elementos de identidad cultural para permitir que las comunidades puedan aprovecharlo para difundir la riqueza de su territorio (cultural y geológica) al mundo, mediante canales virtuales (redes sociales, página web, YouTube) y de esta manera promover la preservación de estos como elementos base para la generación de proyectos de desarrollo comunitario como el turismo científico y geoturismo. Considerando además que el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo (2015 - 2030) señala en su prioridad 1, comprender el riesgo de desastre, como estrategia local y nacional "velar por que se aprovechen como corresponda los conocimientos y las prácticas tradicionales, indígenas y locales, para complementar los conocimientos científicos en la evaluación del riesgo de desastres y en la elaboración y aplicación de políticas, estrategias, planes y programas para sectores específicos, con un enfoque intersectorial, que deberían adaptarse a las localidades y al contexto" (UNISDR, 2015).

La falta de procesos y metodologías que incorporen a la comunidad y su conocimiento, sobre la dinámica del territorio, puede generar la pérdida de saberes. El promover procesos de capacitación y entrega de productos (impresos y digitales) generados únicamente



con la visión técnica-científica promueve la pérdida de elementos culturales. Un ejemplo, es denominar con nombres extranjeros a fenómenos conocidos e identificados por la comunidad, como es el caso del término lahar (de origen indonés) que en comunidades del Ecuador se denomina aluvión.

El aprovechamiento sostenible y con visión de valorar los elementos materiales e inmateriales, geológicos y culturales de un territorio genera oportunidades de desarrollo comunitario y potencia la creación de medios de vida que se incorporen a las políticas planteadas por UNESCO para la creación y permanencia de un geoparque (UNESCO, 2021).

Además, la creación de una metodología participativa con la comunidad para la generación de material educativo sobre volcanes permitirá establecer canales de intercambio de datos e información que enriquezcan procesos vinculados a la Gestión del Riesgo de Desastres, y específicamente en el campo de la prevención y la preparación, resaltando la incorporación de la identidad local como son las lenguas indígenas, locales y sus saberes tradicionales.

### Características del proyecto

En la fase I (2019-2020) del proyecto se pudo recopilar un total de 464 minutos de grabación relacionada a información compartida por ocho de los miembros del grupo de vigías del volcán Tungurahua. Los vigías son líderes de las comunidades localizadas en el radio de afectación cercano (menos de 10 km) del volcán y que formaron parte del sistema de monitoreo y vigilancia (Stone et al., 2014) en el período eruptivo (2000-2016). Por su participación como observadores directos del volcán fueron constituyendo un grupo humano con conocimiento y entendimiento (por las múltiples capacitaciones en que estuvieron involucrados) del origen y características de los distintos fenómenos volcánicos. Además, frente a la generación de determinados fenómenos (flujos de lodo y piroclásticos) se constituyeron en tomadores de decisión para promover acciones que protegieran la vida del resto de habitantes de su comunidad, sus medios de vida y población en tránsito en la zona. En el año 2016 y debido a la disminución significativa de la actividad del volcán, el cese del proceso eruptivo y declaración de alerta blanca para la zona por las autoridades

pertinentes, el grupo de vigías fue perdiendo relevancia como actores claves por conocimiento y experiencia sobre la actividad eruptiva del volcán Tungurahua, llegando en la actualidad (2020) a no tener participación activa.

En el mes de noviembre de 2019 previo a la ejecución del proyecto, la señora Esthela Pallo, vigía de la comunidad de Chacauco (comunidad ubicada a menos de 8 km al este del cráter del volcán) identificó que la falta de interés por parte de las autoridades de mantener activo el grupo de vigías significaba la pérdida del conocimiento adquirido por más de una década de convivencia con un volcán en erupción. Además, que la salida de los antiguos pobladores y el ingreso de colonos a las comunidades significaba volver a construir vulnerabilidades en el territorio.

En diciembre de 2019 y con la participación de 8 vigías se realizó una reunión, como actividad prospectiva del proyecto, para conocer y determinar si la preocupación e interés era compartido por el resto de vigías (Fig. 1).



► Fig. 1 Reunión prospectiva para establecer preocupaciones e intereses sobre preservar la memoria del grupo de vigías del volcán Tungurahua ejecutada en diciembre 2019.

Como resultado se pudo establecer que los vigías estaban conscientes de que la época de convivencia con el volcán Tungurahua en erupción (1999 - 2016) fue una oportunidad única para conocer y entender los diferentes fenómenos volcánicos y el grado de influencia en el modo de vida de las poblaciones que habitan en la zona. De manera adicional se identificó la

necesidad de preservar el conocimiento relacionado a los cambios de comportamiento social producto de las evacuaciones, las experiencias particulares de las comunidades, de sus familias e individuos y los cambios de medios de vida para adaptarse a las exigencias de la actividad del volcán.

La información compilada se relaciona a testimonios sobre vivencias, experiencias y aprendizajes logrados por los vigías en el antes, durante y después del proceso eruptivo del volcán (1999-2016). Como resultado final se elaboraron ocho productos comunicacionales (videos) con menos de siete (7) minutos de duración y traducción al inglés, que fueron publicados en las redes sociales (YouTube y Facebook) de la Universidad Central del Ecuador (UCE) y la Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental (FIGEMPA) de la UCE. Además, han sido compartidos en diversas charlas, talleres y exposiciones virtuales para resaltar el conocimiento local sobre volcanes, preservar la memoria y estimular el debate sobre la importancia de los saberes de la comunidad y su conservación.

La metodología propuesta para ejecutar el proyecto se dividió en dos momentos; cabe mencionar que se utilizaron herramientas de investigación cualitativa para trabajo con la comunidad:

**1.** Focus group para compartir experiencias comunes, establecer detalles de diferencia en la afectación o el accionar de las comunidades y generar un proceso de camaradería e interés común en el grupo. Estas reuniones tenían como eje central el compartir alimentos y no intervenir el proceso con entrevistas personales.

**2.** Entrevista a profundidad semiestructurada con preguntas abiertas (Fig. 2) establecidas como temas de interés por el grupo de vigías y de acuerdo a las características de experiencia de cada una de las comunidades. De manera general, se pudo establecer como guión base para las entrevistas las siguientes preguntas:

- ▶ ¿Qué significa ser vigía del volcán Tungurahua?
- ▶ ¿Cómo afectó el proceso eruptivo del volcán Tungurahua a su comunidad?
- ▶ ¿Cómo cambió el proceso eruptivo su vida y la de su familia?

- ▶ ¿Qué significa vivir cerca de un volcán?
- ▶ ¿Cuáles son los aprendizajes obtenidos en los 17 años de actividad eruptiva del volcán Tungurahua?
- ▶ ¿Cuál es su mensaje para las nuevas generaciones?

Los links de los videos y su detalle se describen a continuación:

Entrevista a Esthela Pallo, vigía de la comunidad de Chacauco.

<https://www.youtube.com/watch?v=zHQUrGzMjkY>

"¿Por qué insistir vivir junto a un volcán? Porque esta es nuestra tierra y ya estamos acostumbrados y gracias a Dios, no pasó a mayores cosas y mejor él, le extrañamos mucho y él es nuestro vecino"

Entrevista a Jorge Chávez, vigía de la comunidad de Juive Grande.

<https://www.youtube.com/watch?v=3z9M7BY1RPU&t=5s>

"¿Cómo cambió el volcán su vida? Muchísimo, al inicio parecía que no iba a cambiar, pero totalmente como persona y a mi familia ha cambiado bastante, hemos, diría directamente hemos progresado bastante, con los mismos conocimientos que nos ha dado el volcán, hemos hecho también un poquito de economía en nuestros bolsillos y así..."

Entrevista a Iván Rojas, vigía de la comunidad de Santa Rosa de Runtún

<https://www.youtube.com/watch?v=qEmH2nAWozg&t=8s>

"... Mi abuelita me contaba cómo era la erupción en aquel entonces, entonces me hacía solamente una idea, pero en esta vez, viví en carne propia como fue una actividad volcánica..."

Entrevista a Manuel Rosero, vigía de la comunidad de Bilbao

<https://www.youtube.com/watch?v=ec2M3haxbwE&list=PLquJuXv8BBxOTRQ1xUATtZcH7RNxKNXpw&index=1>

"¿Extraña al volcán? Bueno, extrañarle si le extraño, porque antes era muy bonito en las noches ver como emanaba los flujos piroclásticos o las piedras

incandescentes que botaba el volcán, pero ahora ya es, prácticamente no hace nada, no, entonces eso se extraña un poco al volcán”

Entrevista a Luis Chávez, vigía de la comunidad de Juive Grande

<https://www.youtube.com/watch?v=wumj8LdrMVO&list=PLquJuXv8BBxOTRQ1xUATtZcH7RNxKNXpw&index=2>

“Actualmente con la ceniza expulsada, la actitud tranquila del volcán y en el transcurso del tiempo la ceniza se ha convertido en una especie de abono, y hoy en día los terrenos son más productivos, el tiempo es favorable para todos los cultivos y esto es lo que nos da motivación para seguir viviendo, porque hay una mejor estabilidad de vida”

Entrevista a Pedro Medina, vigía de la comunidad de Cusúa

<https://www.youtube.com/watch?v=cOnEo7iMicE&list=PLquJuXv8BBxOTRQ1xUATtZcH7RNxKNXpw&index=3>

“Llegue a ser vigía por la necesidad que surgían en la comunidad, para cuidar a los adultos mayores, los niños, mujeres embarazadas, de evacuarlos a un lugar seguro, estar en comunicación con el resto de la comunidad, con la base de monitoreo”

Entrevista a Gustavo Padilla, vigía de la comunidad de Pondo

<https://www.youtube.com/watch?v=pe2xE9yh4f4&list=PLquJuXv8BBxOTRQ1xUATtZcH7RNxKNXpw&index=4>

“... también a raíz de eso se han creado varios obstáculos institucionales, que nos han limitado el acceso a obras públicas, el acceso a recursos, el acceso a préstamos de las instituciones financieras, ese ha sido también parte del retroceso económico que hemos tenido como moradores de ese sector, declarado como zona de riesgo...”

Entrevista a Franciso Morales, vigía de la comunidad de Illuchi

<https://www.youtube.com/watch?v=IGKLwdyNnY&list=PLquJuXv8BBxOTRQ1xUATtZcH7RNxKNXpw&index=5>

La localización de las comunidades a la cual pertenecen los vigías que participaron en el proyecto se detalla en la figura 3.

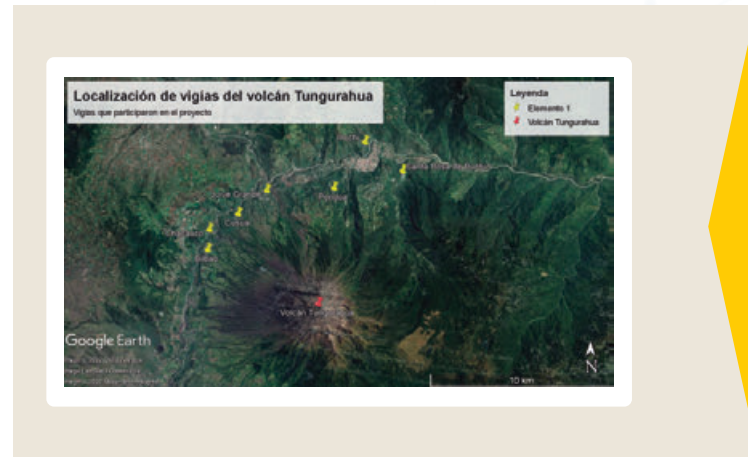
## Amanera de cierre

La Geoeducación tiene como objetivo difundir los conocimientos relacionados a la dinámica del planeta



► Fig. 2 Entrevista individual a la señora Esthela Pallo, vigía de la comunidad de Chacauco

para que los humanos entiendan y comprendan su situación frente a determinados fenómenos naturales. El enriquecer el conocimiento técnico y científico con



► Fig. 3 Ubicación de las comunidades de los vigías que participaron en el proyecto. Imagen base tomada de Google Earth, 2021.

saberes y memorias locales generados por los 17 años (1999 - 2016) de actividad del volcán Tungurahua, permite dar identidad y valor a la cultura local vinculada al conocimiento de los fenómenos volcánicos.

La información obtenida en las entrevistas grupales permitió identificar que el grupo de vigías tienen conocimientos particulares que responde a la localización de su comunidad con respecto al volcán

Tungurahua. A pesar de los 17 años de creación del grupo hay información que no ha sido compartida entre los miembros y esto hace que tengan una visión particular de la actividad del volcán Tungurahua.

Las entrevistas grupales permitieron romper esquemas establecidos por anteriores procesos de entrevistas, donde los vigías responden a las preguntas del investigador o medio de comunicación. No se han creado espacios o mecanismos para que los vigías compartan la información y experiencias que ellos

consideran importante e incluso increíble. El medio a la crítica, el sometimiento a la autoridad científica y la creencia que son procesos normales ha impedido obtener valiosos conocimientos sobre su relación con el territorio y en específico con el volcán Tungurahua.

La información obtenida de las entrevistas con los vigías permitió ratificar que existe conocimiento con identidad y cultura que debe ser difundida en procesos de capacitación y sensibilización.

### AGRADECIMIENTOS

Al grupo de vigías del volcán Tungurahua por compartir sus conocimientos, experiencias y vivencias con el único interés de salvaguardar su sabiduría para las futuras generaciones.

### REFERENCIAS

- ▶ Hart Robertson, M. (2016). Proyecto Geoparque del volcán Tungurahua. Dossier español. [https://www.academia.edu/27599955/Tungurahua\\_Dossier\\_espa%C3%B1ol\\_pdf](https://www.academia.edu/27599955/Tungurahua_Dossier_espa%C3%B1ol_pdf)
- ▶ Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR). (2015). Marco de Sendai para la reducción del riesgo de desastres 2015-2030.
- ▶ Universidad Central del Ecuador (2000). Informes de Vinculación con la Sociedad de la carrera de Geología. Sin publicar
- ▶ Universidad Central del Ecuador (2021). Informes de Vinculación con la sociedad de la carrera de Geología. Sin publicar.
- ▶ Stone et al. 2014. Risk reduction through community-based monitoring: the vigías of Tungurahua, Ecuador. London. *Journal of Applied Volcanology*. 3:11.
- ▶ UNESCO (2021). Geoparques mundiales de la UNESCO: territorios de resiliencia. <https://es.unesco.org/fieldoffice/montevideo/GeoparquesLACResiliencia>.
- ▶ Val Cubero, A. (2017). La diversidad cultural: ¿es posible su aplicación al sector audiovisual?. *Comunicación y sociedad*, (28), 111-130.



# Evaluación Geológica de Puntos de Encuentro Transitorio (PET) como un insumo base para la Gestión del Riesgo Volcánico en Chile

Franco Vera<sup>1</sup>, Constanza Perales<sup>1</sup>, Virginia Toloza<sup>1</sup>, Felipe Flores<sup>1</sup>, Gabriela Jara<sup>1</sup> y Laura Bono<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Unidad de Geología y Peligros de Sistemas Volcánicos, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile. franco.vera@sernageomin.cl

**Palabras clave:** Emergencia volcánica, Gestión del Riesgo, Planes de Emergencia.

En el territorio chileno existen 92 sistemas volcánicos activos (SERNAGEOMIN, 2019) y cerca del 20% de la población vive en zonas de impacto por sus peligros (Lara et al., 2011). Adicionalmente, estos representan importantes áreas de desarrollo económico para el país, debido a su potencial turístico y a la relevancia político-administrativa de las localidades que los rodean. Así, el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), a través de su Red Nacional de Vigilancia Volcánica, es el organismo técnico que tiene la misión de generar información relativa a peligros volcánicos con el objetivo de reducir el impacto de futuras erupciones en el territorio nacional.

En este contexto, el trabajo coordinado entre el organismo técnico y la comunidad es clave para la correcta gestión del riesgo, por lo que, en un trabajo en conjunto entre SERNAGEOMIN, la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI) y las municipalidades de comunas en cuyos territorios existen volcanes, se ha comenzado a trabajar en la elaboración de productos enfocados en la confección de planes de emergencia, con el objetivo de facilitar la evacuación en caso de una crisis volcánica.

De esta forma, desde el año 2018, SERNAGEOMIN elabora propuestas de Puntos de Encuentro Transitorio (PET) que se consideran como un insumo base para la coordinación local y regional de emergencias volcánicas. Los PET consisten en lugares de reunión, dentro de las zonas de peligro, para las personas que se encuentran en proceso de evacuación, al ver imposibilitada la llegada directa a puntos seguros. Estos puntos implican la asistencia de los organismos de respuesta para la salida del área de peligro, ayudando a la optimización de los tiempos de evacuación.

En el presente trabajo se describe la estructura general

que se utiliza para la evaluación geológica de PET, revisando los casos de estudio de las localidades de Villarrica y Pucón, asociadas al volcán Villarrica, y a las localidades de Curacautín, Melipeuco, Cunco y Cherquenco, asociadas al volcán Llaima. Adicionalmente, se describen las recomendaciones generales que se entregan a la comunidad y a los organismos de respuesta para la elaboración de los planes de emergencia, considerando el carácter técnico de estos productos.

La estructura de proyecto de la propuesta de PET consiste en cuatro etapas, las que siguen lineamientos generales utilizados en la evaluación de peligro volcánico. En primer lugar, se realiza un análisis de productos anteriores y caracterización de la actividad eruptiva histórica del volcán, considerando las publicaciones relacionadas a peligros volcánicos, por ejemplo, mapas de peligro a escala 1:50.000-75.000, (e.g. Moreno, 2000; Moreno y Naranjo, 2003), y de geología volcánica (e.g. Moreno y Clavero, 2006; Naranjo y Moreno, 2005).

Una vez establecida esta línea de base, se realiza un diagnóstico territorial, a través de reuniones y entrevistas semi estructuradas a actores claves de la comunidad (e.g. representantes de bomberos, policía, escuelas y juntas de vecinos), coordinadas por ONEMI y los municipios. De esta manera, se identifican redes organizacionales y de participación local, y se recopila información sobre impactos de erupciones históricas y de lugares que la comunidad considera menos expuestos de acuerdo con sus vivencias.

Posteriormente, se lleva a cabo una caracterización geológica y geomorfológica del terreno, la que consiste en el levantamiento de nueva información volcanológica. En este contexto, se han llevado a cabo vuelos aerofotogramétricos con vehículos aéreos no

tripulados (drones), que permiten confeccionar modelos de elevación digital y ortomosaicos de alta resolución (cm/píxel) en sectores puntuales, y así evaluar las diferencias de cotas entre zonas pobladas y áreas susceptibles a ser afectadas por procesos volcánicos. Además, se evalúa la pertinencia de proponer un PET en los sectores, de acuerdo a la presencia de comunidades cerca de zonas susceptibles de ser afectadas por un proceso volcánico.

La última etapa metodológica es el trabajo de gabinete. Aquí se analiza la información levantada en las etapas anteriores, cruzando la información obtenida por el diagnóstico territorial, levantamiento geológico, caracterización geomorfológica y mapas de peligros y geológicos pre-existentes, y se determina si el punto evaluado cumple con las condiciones de: diferencia de altura entre el punto con respecto a los sectores susceptibles a ser afectados por procesos volcánicos, que no haya tenido impacto de erupciones históricas, que no se identifiquen depósitos volcánicos relacionados a erupciones recientes y que presente condiciones de acceso mínimas.

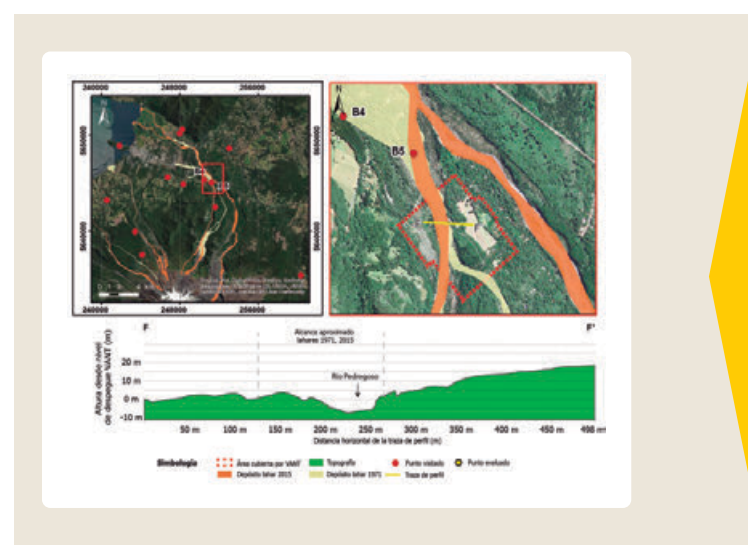
Desde el año 2018 hasta la fecha, se han elaborado 12 informes de evaluación geológica de PET, los que han incluido a 17 localidades expuestas, 10 volcanes y más de 90 puntos propuestos (Tabla 1).

**Tabla 1.** Resumen de localidades con propuesta de PET.

Localidad	Sistema volcánico	Año Pub.	N° de PET propuestos
Trancas	Nevados de Chillán	2018	En act.
Chaitén	Chaitén	2019	2
Alto Biobío	Copahue	2019	7
Choshuenco	Mocho - Choshuenco	2020	5
Pucura - Traitraico	Villarrica	2021	6
Coñaripe	Villarrica	2020	4
Antuco	Antuco	2021	9
Villarrica - Pucón	Villarrica	2021	28
Curacautín Melipeuco Cherquenco Cunco	Llaima	2021	20
Las Cascadas	Osorno	2022	3
Malalcahuello	Complejo Volcánico Lonquimay	2022	8
Putre	Complejo Volcánico Taapaca	2022	En prep.

Dentro de los volcanes considerados para la evaluación geológica de PET se encuentran el volcán Villarrica y el volcán Llaima, primero y segundo en el ranking de riesgo específico de SERNAGEOMIN (2019), respectivamente. Estos sistemas volcánicos se ubican en el sur del país, y son los dos volcanes con mayor registro de erupciones en tiempos históricos en Chile (Petit-Breuilh, 2004). Sumado a su frecuencia eruptiva, ambos presentan una cubierta de hielo/nieve en sus laderas, por lo que habitualmente desencadenan lahares durante sus erupciones, lo que junto al hecho que estos volcanes tienen en sus alrededores importantes polos de desarrollo turístico, implica que ambos sistemas volcánicos sean los de mayor riesgo en Chile.

El volcán Villarrica es un estratovolcán de conducto abierto, el que presenta un lago de lava activo en su cráter. Durante sus erupciones, suele desencadenar lahares de volúmenes superiores a 106 m<sup>3</sup>, flujos de lava de hasta 17 km de extensión, caída y dispersión piroclástica y, en menor medida, corrientes de densidad piroclásticas. En sus alrededores se encuentran diversas localidades, siendo Pucón y Villarrica las que, debido a su alta exposición, fueron consideradas para la evaluación de PET durante el año 2021. En este sentido, se visitaron 44 puntos de interés, seleccionados según el diagnóstico territorial y al análisis del mapa de peligros a escala 1:75.000 (Moreno, 2000) y del mapa geológico a escala 1:50.000 (Moreno y Clavero, 2006). Además, se



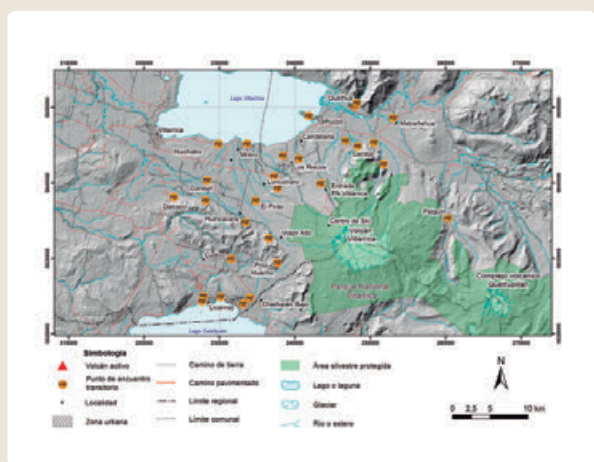
► **Fig. 1** Ejemplo de perfil topográfico realizado en un modelo de elevación digital de alta resolución. A) Ubicación del perfil. B) Acercamiento a la zona de interés. C) Perfil topográfico.

efectuaron levantamientos de fotografías aéreas en 8 puntos críticos, las que fueron capturadas con un vehículo aéreo no tripulado (o dron) marca DJI modelo Mavic 2 Pro y la aplicación DroneDeploy para la programación de los vuelos. A partir del vuelo del VANT, se obtuvieron fotografías traslapadas al 80%. Posteriormente, se confeccionaron ortomosaicos de alta resolución (cm/píxel) y modelos de elevación digital que permitieron realizar perfiles topográficos de detalle y así apoyar la observación de terreno (Fig. 1).

Como resultado de la evaluación, se obtuvo que 17 sitios ubicados en la comuna de Villarrica sí cumplen con las condiciones técnicas para ser considerados como puntos de encuentro transitorio, mientras que en la comuna de Pucón se consideraron 11 puntos (Fig. 2). En particular, este caso de estudio presentó el desafío que la mayoría de la población expuesta corresponde a personas nuevas en el área y/o población flotante, lo que se evidencia en el poco conocimiento que tienen sobre la actividad y peligrosidad del volcán.

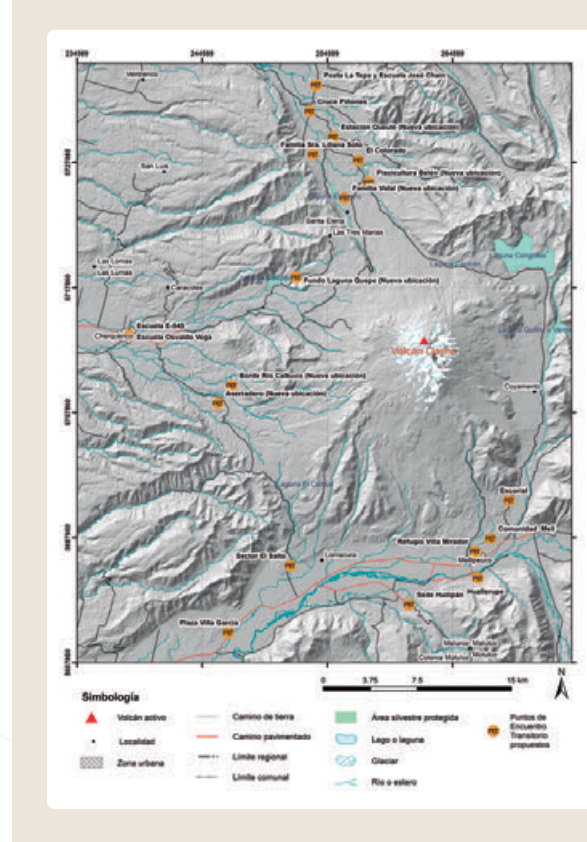
Cunco y Vilcún (localidad de Cherquenco), y es parte del Parque Nacional Conguillío. La complejidad de sus erupciones, hacen que algunos PET propuestos tengan condiciones en relación con la evolución de la erupción, lo que representa un desafío para la comunicación y coordinación de la emergencia.

En este caso de estudio, el trabajo se basó en la caracterización de depósitos volcánicos en terreno, análisis de publicaciones anteriores, mapa de peligro volcánico (Moreno y Naranjo, 2003) y mapa geológico (Naranjo y Moreno, 2005), junto con el procesamiento de un modelo de elevación digital de alta resolución (2,5 m/píxel), mediante el cual se elaboraron perfiles topográficos transversales y longitudinales a los principales cauces de la zona. Como resultado se obtuvo que 5 sitios ubicados en Melipeuco, 7 ubicados en Curacautín, 5 ubicados en Vilcún y 2 ubicados en Cunco, sí cumplen con las condiciones para ser considerados PET (Fig. 3). Particularmente, cabe destacar que la mayoría de los cauces que se evaluaron en este trabajo,



► Fig. 2 Puntos de Encuentro Transitorio propuestos en las comunas de Pucón y Villarrica.

El volcán Llaima, por otra parte, es un estratovolcán compuesto que presenta dos cimas principales (Llaima y Pichillaima), además de decenas de conos piroclásticos adventicios y fisuras con actividad histórica. Sus erupciones suelen tener diferentes centros de emisión simultáneos, desarrollando flujos de lavas, lahares, corrientes de densidad piroclásticas y caída y dispersión de piroclastos (Naranjo y Moreno, 2005). Su territorio lo comparten las comunas de Curacautín, Melipeuco,



► Fig. 3 Puntos de Encuentro Transitorio propuestos en las comunas de Curacautín, Melipeuco, Cunco y Vilcún

tenían evidencia de emplazamiento de lahares, por lo que fue el principal peligro que se consideró para la determinación de PET.

A modo de conclusión, la evaluación geológica de PET ha permitido avanzar en la elaboración de planes de emergencia en caso de erupción volcánica que consideren escalas temporales y espaciales de mayor detalle a las que son consideradas en los mapas de peligros volcánicos publicados a la fecha (escalas 1:50.000 – 75.000). Esto ha permitido actualizar los procedimientos de los municipios en caso de crisis volcánica, favoreciendo la interacción bidireccional entre la comunidad y los organismos estatales.

Estos trabajos a su vez habitualmente son acompañados de otras actividades, como por ejemplo simulaciones o simulacros volcánicos realizados por ONEMI (<http://chile-preparado.onemi.gov.cl/noticias->

simulacros/), gestión de señaléticas y mejoramiento vial, instancias educativas y de sociabilización de los resultados, y formación de mesas de trabajo continuas, por lo que tienen un impacto directo sobre la población expuesta.

Dentro de los desafíos futuros para la evaluación geológica de PET, está el mantener la comunicación continua con las comunidades luego de la presentación de los resultados. La heterogeneidad en las comunidades es marcada en cuanto a culturalidad, vulnerabilidades e interés, por lo que las vías de comunicación masivas suelen ser poco efectivas. Algunos intentos con buen resultado se han realizado mediante utilización de plataformas digitales (e.g. Twitter, Instagram), pero aún es necesario un trabajo multidisciplinario y continuo para mantener la relación bidireccional entre los organismos gubernamentales y la población.

## AGRADECIMIENTOS

El equipo agradece a la coordinación realizada por los funcionarios de ONEMI y de las municipalidades involucradas en la evaluación de Puntos de Encuentro Transitorio.

## REFERENCIAS

- ▶ Lara, L.E.; Orozco, G.; Amigo, A.; Silva, C. (2011). Peligros Volcánicos de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental 13: 34 p., 1 mapa escala 1:2.000.000. Santiago.
- ▶ Moreno, H., (2000). Mapa de peligros del volcán Villarrica, Regiones de la Araucanía y de Los Lagos. Servicio Nacional de geología y Minería, Documento de trabajo, N°17, 1 mapa escala 1:75000. Santiago. 32.
- ▶ Moreno, H. y Naranjo, J.A. (2003). Mapa de Peligros del Volcán Llaima, Región de La Araucanía. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental, No. 7, escala 1:75.000. Santiago.
- ▶ Moreno, H. y Clavero, J. (2006). Geología del área del volcán Villarrica, Regiones de la Araucanía y de los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, N° 96: 37pp. Santiago.
- ▶ Naranjo, J. A. y Moreno, H., (2005). Geología del Volcán Llaima, Región de La Araucanía. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental, No. 88, 33 p. 1 mapa escala 1:50.000.
- ▶ Petit-Breuilh, M.E. (2004). La historia eruptiva de los volcanes hispanoamericanos (Siglos XVI al XX). Servicio de Publicaciones del Exmo. Cabildo Insular de Lanzarote-Casa de los volcanes: 431 p. Huelva.
- ▶ SERNAGEOMIN. (2019). Ranking de riesgo específico para volcanes activos de Chile 2019. [https://www.sernageomin.cl/wpcontent/uploads/2020/07/2Ranking-2019\\_Tabla\\_Final.pdf](https://www.sernageomin.cl/wpcontent/uploads/2020/07/2Ranking-2019_Tabla_Final.pdf). (Última visita 15/07/2022).





# SESIÓN 4

## GEOPATRIMONIO EN ÁREAS VOLCÁNICAS Y RESILIENCIA ANTE LOS PELIGROS

# Inventario del Patrimonio Geológico en Torno a la Ciudad de Arequipa, Perú

Andy Ancalle<sup>1,2</sup>, Jersy Mariño<sup>1</sup>, Carla Arias<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geológico Minero y Metalúrgico-INGEMMET, Observatorio Vulcanológico del INGGEMMET

<sup>2</sup> Escuela Profesional de Ingeniería Geológica, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú (aancalleq@unsa.edu.pe)

**Palabras clave:** Patrimonio geológico, Geodiversidad, Inventario,

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día se ha puesto en manifiesto la importancia de cuidar y revalorar el patrimonio geológico y la geodiversidad. Desde 2002, el INGGEMMET toma la iniciativa de desarrollar el estudio del patrimonio geológico peruano, Zavala y Fidel (2002), recomiendan realizar un inventario nacional de lugares de interés geológico, el Ingemmet (2007), presenta la "Guía Geoturística de Marcahuasi". Ingemmet (2009), la "Guía Geoturística Reserva Nacional de Paracas. Ingemmet (2016), la "Guía Geoturística del valle de los volcanes de Andahua", Ingemmet (2019), el estudio de la "Geodiversidad y patrimonio geológico en el valle del Colca". Ingemmet (2022), evalúa el "Patrimonio geológico en la región Puno". Sin embargo, hasta el momento no se ha realizado un inventario del patrimonio geológico en torno a la ciudad de Arequipa.

## UBICACIÓN

La ciudad de Arequipa o también conocida como la ciudad blanca, es la capital de la región del mismo nombre, ubicada al suroeste del Perú; a una altitud de 2.335 msnm. Se encuentra ubicado en la Zona Volcánica de los Andes Centrales de Sudamérica (ZVC), mirando en nuestra área de estudio a los volcanes Misti, Chachani y Pichu Pichu.

## CONTEXTO GEOLÓGICO

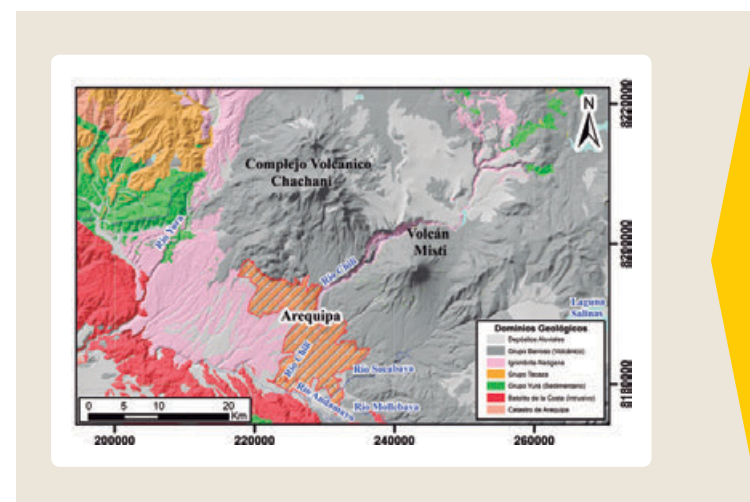
La diversidad geológica en torno a la ciudad de Arequipa se representa en la figura 1. Se encuentra el grupo barroso (Complejo Volcánico Chachani, volcán Misti y volcán Pichu Pichu) (Aguilar, et al. 2022; Mariño, et al. 2016). Ignimbritas neógenas (Ignimbrita Río Chili, Ignimbrita la Joya, Ignimbrita Aeropuerto y el Tufo Yura) (Paquereau, et al. 2006).

Formación Chocolate, Formación Socosani, Grupo Yura (Formación Puente, Formación Cachios, Formación Labra, Formación Gramadal, Formación Hualhuani), Formación Murco y Formación Arcurquina. El Batolito de la costa. Grupo Tacaza y la Formación Huanca (Vargas, 1970).

Petrologicamente se pueden encontrar rocas sedimentarias principalmente del tipo (calizas, lutitas, areniscas, margas, limolitas y conglomerados), rocas volcánicas como (andesitas, dacitas y riolitas), rocas intrusivas como (granodiorita, tonalitas y gabrodioritas) y rocas metamórficas como (gneis).

Geocronológicamente hay rocas del precámbrico como el gneis Charcani, formaciones del jurásico-cretácico como el Grupo Yura y depósitos piroclásticos del holoceno y pleistoceno del Volcán Misti y el Complejo Volcánico Chachani.

En el contexto geológico de Arequipa, se puede observar orígenes respecto a esfuerzos de tensión y



► Fig. 1 Mapa de dominios geológicos en torno a la ciudad de Arequipa (Modificado de INGGEMMET).

compresión, por lo cual se han producido intrusiones plutónicas (batolito de la costa). Tenemos el Sistema de Fallas Cincha-Lluta-Incapuquio, Falla Ayo-Lluta-Arequipa, Falla Chili y Falla Aguada Blanca. Los recursos hídricos en Arequipa se manifiestan en aguas subterráneas (manantiales, fuentes termales, pozos y bofedales). En cuanto a la actividad minera hay depósitos metálicos (Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A., etc.) y no metálicos (Cemento Yura S.A., etc.).

### METODOLOGÍA

El proceso de valoración de geositios, inicia con una serie de fases previas a tener en cuenta antes de iniciar con las dos etapas esenciales de la valoración (inventario y cuantificación). Estas fases previas según Carcavilla (2007), consiste en: 1. Realizar la delimitación de la zona de estudio bajo ciertos criterios geológicos, administrativos, naturales o arbitrarios, 2. Recopilación bibliográfica y/o revisión de la literatura geológica como artículos científicos y tesis, nacionales e internacionales, así también: libros, presentaciones en congresos, normas y leyes de gestión del medio natural y cultural, mapas, crónicas, etc. artículos y contribuciones en publicaciones electrónicas. 3. Otro punto importante es la parte geológica del área de estudio como unidades, estructuras geológicas en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Según Elízaga y Palacio (1996), el objetivo general de un inventario de Sitios de Interés Geológicos (SIGs) debe ser: "Lograr el mayor grado de conocimiento de las características (geológicas de un lugar)" y deberá ser realizado "con un grado de detalle que permita una evaluación tanto del propio como de la incidencia del soporte geológico sobre la actividad humana" también afirman dichos autores que "a partir de los puntos elegidos pueda reconstruirse la historia geológica, su morfología y procesos actuales y sus características de utilización del territorio, recursos y actividad humana en su incidencia sobre el soporte geológico".

### INVENTARIO

Es la primera etapa del proceso de valoración, el cual consiste en la 1. Identificación de potenciales geositios principalmente que destaquen en representatividad, integridad, rareza, conocimiento

científico y que cuenten con un gran valor geológico (Arias, 2021 y Brilha, 2005). 2. La evaluación cualitativa donde se evalúa aquellos geositios con características según tres aspectos fundamentales propuestas por Cendrero (1996), a. Valor intrínseco,

### b. Potencial de uso y c. La necesidad de protección.

3. Selección de geositios en base a la evaluación cuantitativa se elige a los geositios pasan a ser estudiados con detalle, ello con la 4. caracterización de geositios donde se describe su ubicación, descripción geológica, valor intrínseco, potencial de uso, la necesidad de protección, un texto descriptivo y acompañado de un panel fotográfico (Modificado de Arias, 2021).

CRITERIOS EVALUADOS		VALORES				
		0	1	2	3	4
Valor intrínseco	Científico	Nulo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
	Educativo	Nulo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
	Turístico	Nulo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Potencial de uso	Accesibilidad		Difícil	Moderado	Fácil	
	Estado de vía		Malo	Regular	Bueno	
	Visibilidad		Malo	Regular	Bueno	
Necesidad de protección	Deterioro		Poco	Medio	Avanzado	
	Vulnerabilidad		Baja	Media	Alta	
	Grado de preservación		Baja	Media	Alta	

► Fig. 2 Criterios para la evaluación cualitativa (Arias, 2021).

Para la selección de geositios se consideran como mínimo el 50% de la suma total del valor intrínseco (Pantoja, 2017; Arias, 2021). En el valor intrínseco se evalúan los criterios: Científico, educativo y turístico, como se muestra en la figura 2, donde la suma total es de 12 puntos, para que el potencial geositio sea seleccionado debe tener un puntaje mayor a 6.

A continuación, se presenta algunos de los geositios los cuales fueron inventariados en la zona de estudio:

### a. Quebrada Culebrillas (9 puntos)

Ubicado en el distrito de Uchumayo, es un importante afloramiento de la unidad blanca bien consolidada de hace 1.66 Ma de la ignimbrita Aeropuerto de Arequipa, la quebrada es angosta y se encuentra muy erosionada por diversos factores ambientales. Así mismo, en el geositio se pueden apreciar petroglifos

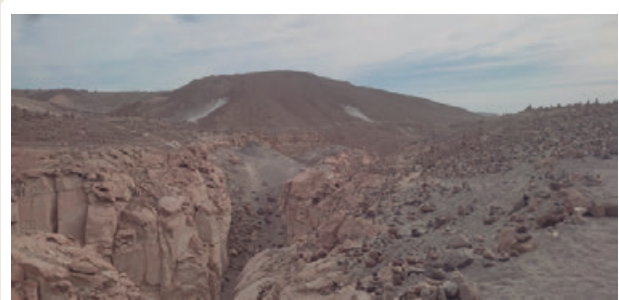


grabados en las paredes de la quebrada que posiblemente corresponda al periodo Horizonte Medio de la cultura Wari. Cada año en épocas de precipitación esta quebrada es afectada por lahares principalmente, además del peligro inminente por caída de rocas, por lo cual el geositio necesita urgente protección. El geositio posee un gran interés geomorfológico, volcánico y cultural.

de caída Fibroso I, depósito de caída Sacarosa, depósito de caída Fibroso II, depósito de caída Autopista, depósito de caída Sándwich Inferior, depósito de caída Sándwich Superior, depósito de caída 2ka, depósito de caída siglo XV, cenizas del Huaynaputina de 1600 d.C. El geositio posee un gran interés volcánico y tefroestratigráfico, además de ser importante para educar y realizar investigación científica.

### c. Cráter del Misti (9 puntos)

Ubicado en los distritos de Cayma, Alto Selva Alegre, Miraflores y Chiguata. El cráter histórico del volcán Misti se encuentra emplazado en el cráter de hace 2 mil años del volcán Misti, la cumbre está conformada por un cráter elongado en dirección SE-NO. El cráter posee un diámetro de 935 m, con una profundidad de 150 m. La forma actual de dicho cráter se originó durante la erupción subpliniana de hace 2050 años. Dentro del cráter, y en su extremo sureste, se emplaza un pequeño cono intracrático, que en promedio posee un diámetro de 530 m y una profundidad de 200 m, donde se emplaza un domo de lava de 100 m de diámetro. El cráter en mención posiblemente está relacionado a erupciones de baja a moderada magnitud, ocurridos posteriormente a la erupción de 2050 BP, probablemente durante época histórica. La cima del volcán Misti alcanza una altura de 5822 msnm, y el piso del cráter está a 5550 msnm. Al llegar a la cima desde la ruta Chiguata, se puede observar la cruz del Misti, la garganta del diablo y el camino hacia el cráter del volcán Misti. El geositio posee un gran interés geomorfológico, volcánico y cultural.



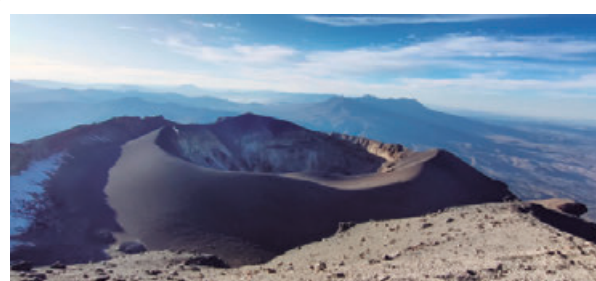
► Fig. 3 Ingreso a la Quebrada Culebrillas, donde se pueden apreciar los petroglifos tallados en las paredes de la ignimbrita aeropuerto en estructura de disyunciones columnares.

### b. Caídas Arcoíris (9 puntos)

Ubicado en el distrito de Cayma. En el geositio tenemos hasta veinte depósitos de caída con una discordancia angular particular, que le da la apariencia de arcoíris al afloramiento, Los depósitos de caída más importantes desde la base hacia al techo son: depósito



► Fig. 4 Depósitos de caída piroclástica del volcán Misti a 9.5km del mismo, afloramiento al costado de la carretera a la escuela de policías.



► Fig. 5 Vista SE donde se muestra el cráter histórico del volcán Misti, más al fondo el volcán Pichu Pichu.



#### d. Cerro Pillo (7 puntos)

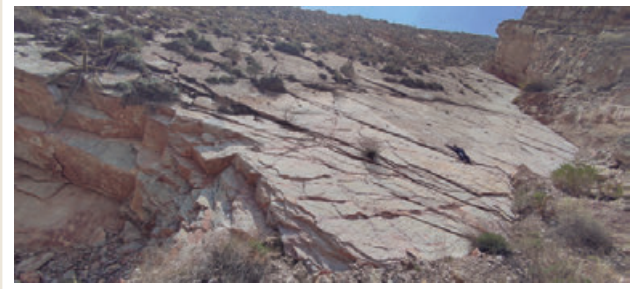
Ubicado en el distrito de Socabaya. El geositio se trata de una intrusión plutónica del tipo batolítico, donde se encuentran rocas intrusivas de diferentes tipos como, gabrodiorita, aplitas y en algunas zonas se encuentran gneis. También se encuentran fenocristales de anfíboles, cuarzos masivos y estructuras como sills, stocks y diques. El geositio tiene un gran interés geomorfológico, petrológico y mineralógico.



► Fig. 6 Vista N desde el cerro Pillo, al fondo se aprecian los volcanes Misti y Chachani.

#### e. Calizas Tabulares de la Formación Arcurquina (7 puntos)

Ubicado en el distrito de Yura camino a Liquirca, este sobreyace a la formación Murco y subyace a la formación Chilcane. Estructuralmente las rocas calcáreas se encuentran fuertemente plegadas formando sinclinales y anticlinales. Petrológicamente está constituido por wackestone, packstone bioturbadas, y mudstone. En el geositio se puede encontrar fósiles como ostrácodos, equinodermos y bivalvos. El geositio posee un gran interés geomorfológico, estratigráfico, paleontológico, tectónico y petrológico, además de ser un hermoso



► Fig. 7 Calizas tabulares distinguibles de hasta 1000m de espesor.

paraje por su estética paisajística y por su importancia para realizar investigación científica y educativa.

#### f. Fuente Termal Tapia (7 puntos)

Ubicado en el distrito de Yura, a un costado del río Yura, en el geositio se aprecian hasta 3 surgimientos, una de ellas embalsada (poza), alrededor de este se encuentran rocas: como calizas y conglomerados. también Ignimbrita, las cuales favorecen a que aflore la fuente termal, la temperatura medida en este lugar es de 33.2 °C. El geositio tiene un gran interés geomorfológico e hidrogeológico.



► Fig. 8 Poza Tapia, al costado del río Yura.

## CONCLUSIONES

Arequipa presenta una importante geodiversidad, pero carece de un estudio detallado de su patrimonio geológico, por lo que es indispensable realizar un proceso de valoración acorde a nuestra área de estudio, donde predominan geositios de interés volcánico debido a la presencia del arco volcánico frontal. La geomorfología por la actividad tectónica y sedimentaria por la gran cuenca de sedimentación.

Los geositos en torno a la ciudad de Arequipa fueron principalmente de interés geomorfológico, volcánico, estratigráfico, petrológico, mineralógico, paleontológico, hidrogeológico, tectónico, sedimentológico y minero.

A partir del proceso de valoración, en esta primera etapa se identificaron 36 potenciales geositos, pero después de aplicar la evaluación cualitativa se seleccionaron y caracterizaron 33.

#### PERSPECTIVAS A FUTURO

Los resultados son aún preliminares pues actualmente se siguen identificando más potenciales geositos que tengan las características geológicas "singulares y representativas" para enriquecer el inventario.

#### AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios y a mis padres por todo su apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida.

También quiero agradecer al equipo del Volcán Misti, M.Sc. Jersy Mariño, M.Sc. Kevin Cueva, Ing. Carla Arias, Ing. Juan Cuno y colega Andres Tisce por haber aportado en mi formación personal y profesional.

Por último, quiero agradecer a todos los integrantes del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET.

#### REFERENCIAS

- ▶ Acosta, J.; Rodríguez, I.; Huanacuni, D. & Dirección de Recursos Minerales y Energéticos - INGEMMET. (2011). Memoria sobre la geología económica de la región Arequipa. INGEMMET, Dirección de recursos minerales y energéticos, 43 p.
- ▶ Aguilar, R.; Thouret, J.; Samaniego, P.; Wörner, G.; Jicha, B.; Paquette, J.; Suaña, E. & Finizola, A. (2022). Growth and evolution of long-lived, large volcanic clusters in the Central Andes: The Chachani Volcano Cluster, southern Peru. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 426, 107539.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107539>.
- ▶ Arias, C. (2021). Recursos geoturísticos generados a partir del impacto de la erupción del volcán Huaynaputina del año 1600 d.C. como patrimonio geológico [Tesis de ingeniero geólogo]. Universidad Nacional del Altiplano.
- ▶ Brilha, J. (2005). Patrimonio geológico e geoconservação. A conservação da natureza na sua vertente geológica. Palimage Editores, 183 p.
- ▶ Brilha, J. (2016). Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites. *Geoheritage*, pp 120-130.
- ▶ Carcavilla, L.; Lopez, J. & Duran, J. (2007). Patrimonio geológico y geodiversidad: investigación, conservación, gestión y relación con los espacios naturales protegidos. Madrid, Spain: Instituto Geológico y Minero de España, 360 p.
- ▶ Carpio, J.; Quispe, B.; Peña, F. & Sulca, P. (2022). Hidrogeología de la cuenca del río Quilca-Vitor-Chili (132). INGEMMET, Boletín, Serie H: Hidrogeología, 15, 381 p.
- ▶ Cendrero, A. (1996). El patrimonio geológico. Ideas para su protección, conservación y utilización. In: El patrimonio geológico. Bases para su valoración, protección, conservación y utilización. Madrid: Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, pp 17-27.

- ▶ Díaz, A. & Ramírez, J. (2010). Estudio Geológico- Económico de Rocas y Minerales Industriales de Arequipa y Alrededores. INGEMMET, Boletín, Serie B: Geología Económica, 22, 163 p.
- ▶ Elízaga, E. & Palacio, J. (1996). Valoración de puntos y/o lugares de interés geológico. El Patrimonio Geológico. Bases para su valoración, protección, conservación y utilización, 61-79.
- ▶ Mamani, M.; Wörner, G. & Sempéré, T. (2010). Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13°S to 18°S): tracing crustal thickening and magma generation through time and space. Geol Soc Am Bull, 122: 162-182.
- ▶ Mariño, J.; Rivera, M.; Thouret, J.C. & Macedo, L. (2016). Geología y Mapa de Peligros del Volcán Misti. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica y Ingeniería Geológica, 60, 170 p.
- ▶ Mariño, J.; Cueva, K.; Thouret, J.-C.; Arias, C.; Finizola, A.; Delcher, E.; Fauchard, C.; Donnadieu, F.; Labazuy, P.; Japura, S.; Gusset, R.; Sanchez, P.; Ramos, M.; Macedo, L.; Lazarte, I.; Thouret, L.; Del Carpio, J.; Jaime, L. & Saintenoy, T. (2021). Multidisciplinary Study of the Impacts of the 1600 CE Huaynaputina Eruption and a Project for Geosites and Geo-touristic Attractions. *Geoheritage*, 13-64
- ▶ Martínez, P. (2021). Identificación, caracterización y cuantificación de geositos, para la creación del I geoparque en Chile, en torno al Parque Nacional Conguillío [Memoria para optar al Título de Geólogo]. Universidad de Chile.
- ▶ Pantoja, I. (2017). Geopatrimonio de la Península la Carmela, región de Aysén, Chile [Tesis de Geólogo]. Universidad Nacional Andrés Bello.
- ▶ Paquereau-Lebti, P.; Thouret, J.-C.; Wörner, G. & Fornari, M. (2006). Neogene and Quaternary ignimbrites in the area of Arequipa, Southern Peru: Stratigraphical and petrological correlations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. p. 251-275.
- ▶ Pereira, P.; Pereira, D. & Alves, C. (2007). Avaliação do Património Geomorfológico: proposta de metodologia. Geomorphological heritage assessment: a methodology proposal. *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*. Volume V, APGeom, Lisboa, p. 235- 247.
- ▶ Sánchez, A.; Zapata, A. & Zambrano, K. (2015). Contexto geológico de Arequipa para la caracterización del Patrimonio Geológico. 1er Simposio Geoparques. p. 48-51.
- ▶ Vargas, L. (1970). Geología del cuadrángulo de Arequipa. INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 24, 64 p.
- ▶ Zavala, B. & Fidel, L. (2002). Necesidad de un inventario geológico para su protección y conservación como patrimonio geológico. Congreso Peruano de Geología. 11, p. 1007-1024.
- ▶ Zavala, B.; Mariño, J. & Peña, F. (2016). Guía Geoturística del valle de los volcanes de Andahuay, INGEMMET. Boletín, Serie I: Patrimonio y Geoturismo, 6, 424 p.
- ▶ Zavala, B.; Churata, D. & Varela, F. (2019). Geodiversidad y patrimonio geológico en el valle del Colca. INGEMMET, Boletín, Serie I: Patrimonio y Geoturismo, 9, 303 p.

# Propuesta de geositorios alrededor del volcán Huaynaputina, para el desarrollo del geoturismo en la región Moquegua

Carla Arias<sup>1</sup>, Jersy Mariño<sup>1</sup>, Kevin Cueva<sup>1</sup>

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico-INGEMMET, Observatorio Vulcanológico del INGEMMET(carla.ariasalazar05@gmail.com)

**Palabras clave:** Geopatrimonio, geoturismo, Huaynaputina.

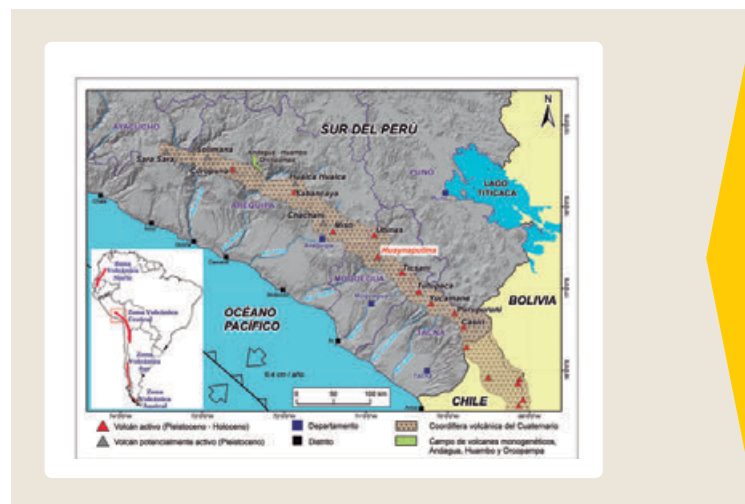
## RESUMEN

El volcán Huaynaputina, registró la erupción más grande en época histórica en Sudamérica con un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) 6, en el año 1600 d.C., y es considerada una de las mayores en el mundo en los últimos 2 mil años. Esta erupción ocurrió en la época de transición entre el Imperio Inca y el Virreinato. Tuvo un impacto en el clima global, con el descenso de la temperatura en el hemisferio norte -1.13 °C el año 1601, originando severas heladas y hambrunas en Rusia y China (Stoffel et al. 2015; Fei et al. 2015). Localmente, la erupción modificó la geografía de su entorno y sepultó al menos 15 pueblos Incas (Thouret et al., 1999), donde murieron más de 1500 personas (Navarro, 1994; Ticona, 2005). El volcán Huaynaputina y alrededores destaca por su geodiversidad litológica, reflejado en secuencias de flujos de lava, domos, caídas de tefra, flujos piroclásticos y depósitos de avalancha de escombros. Estos depósitos tienen un alto valor científico, educativo y turístico (Mariño et al. 2021). Por ello se realizó la valoración de geositorios con una metodología adaptada (Brilha 2005, 2016; Pereira 2007b, Cendrero 1996). Se clasificaron los geositorios según su interés local - regional o nacional - internacional, valor científico, uso potencial educativo - turístico y riesgo de degradación (Arias, 2021). Se identificaron 21 geositorios, agrupados como: 8 geositorios volcánicos (depósitos y estructuras volcánicas); 7 arqueológico volcánicos (pueblos sepultados por la erupción); 3 geomorfositorios (terrazas, zona de represamiento del río Tambo, lahares) y 3 fuentes termales (actividad hidrotermal). La valoración de geositorios y el impulso del geoturismo es una herramienta, que contribuirá con la educación sobre los peligros y beneficios de la actividad volcánica, el desarrollo socioeconómico de su población local y generación de comunidades resilientes ante los peligros volcánicos.

## UBICACIÓN

El volcán Huaynaputina es un estratovolcán activo que forma parte de la Zona Volcánica de los Andes Centrales (ZVC). Está localizado en la provincia de General Sánchez Cerro, en los distritos de

Quinistaquillas y Matalaque, al norte de la región de Moquegua en el sur peruano.



► Fig. 1 Mapa de ubicación del volcán Huaynaputina (Arias, 2021).

## METODOLOGÍA

La valoración de lugares de interés geológico nos permite conocer las características geológicas relevantes, su valor científico, educativo y turístico. También su grado de preservación y la vulnerabilidad, frente a amenazas naturales o antrópicas, para la implementación de estrategias de geoconservación y aprovechamiento sostenible. Por ello realizó la recopilación y adaptación (Arias, 2021; Mariño et al. 2021) de las metodologías propuestas por Cendrero (1996), Carcavilla et al. (2007), Pereira et al. (2007b), Brilha (2005, 2016), ASGMI (2018) y Zabala et al. (2016), para aplicarlas en nuestra área de estudio.



La metodología adaptada a partir de los autores ya mencionados consta de 2 etapas principales: inventario, cuantificación, y 4 etapas post ejecución de los geositios: clasificación, conservación, divulgación y monitoreo (Brilha, 2005).

Primero se hizo una recopilación de toda la información relacionada al área de estudio, como publicaciones nacionales e internacionales de artículos, boletines de INGEMMET, crónicas, libros y tesis, para orientar y fundamentar la investigación.

Además, se consideró la información tomada en campo respecto a los estudios de geofísica y cartografía geológica en el área como base importante para la identificación de lugares de interés geológico in situ (Arias, 2021; Mariño et al. 2021), durante las salidas de campo en INGEMMET.

### Inventario

El inventario es el primer paso a que un "Potencial Geositio" quede como "Geositio", cuenta con 4 sub-



► Fig. 2 Diagrama del proceso de valoración de geositios (modificado de Brilha, 2005).

etapas: identificación, evaluación cualitativa, selección y caracterización de geositios (Pereira 2007b). La identificación de sitios de interés geológico (SIG), se da en aquellos lugares que destaquen en representatividad, integridad, rareza y conocimiento científico (Brilha, 2005).

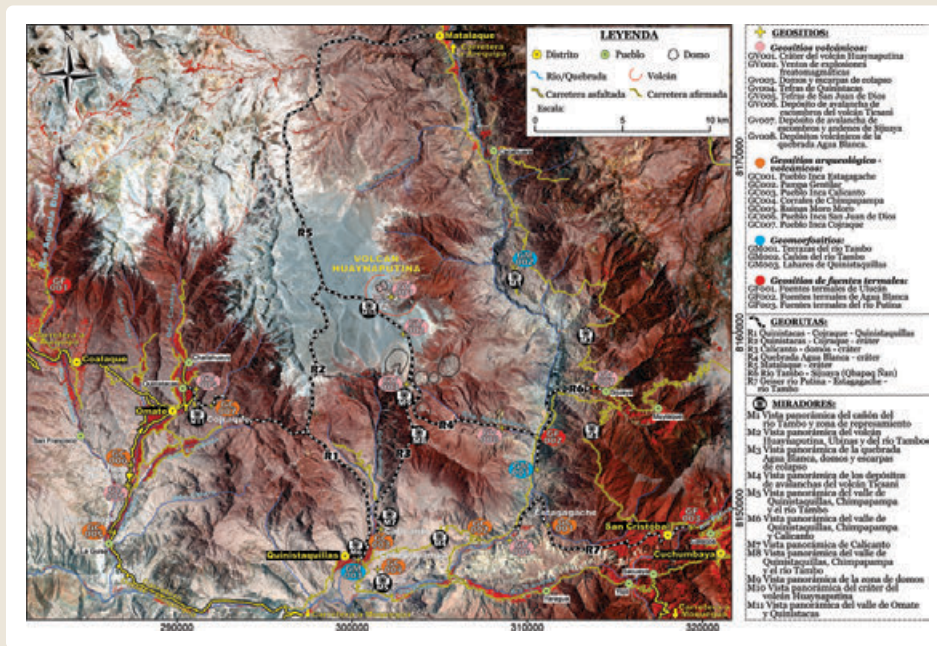
Seguido de una evaluación cualitativa (Martínez, 2010; Cendrero, 1996), según su valor intrínseco, potencial de uso, y necesidad de protección. Para la selección de geositios se da según su valor intrínseco, aquellos con un puntaje mayor o igual al 50%. Finalmente, la caracterización, es decir una descripción más detallada de cada geositio con información del valor intrínseco, incluyendo el interés científico (geológico, ecológico, conocimiento científico), educativo (didáctico, instructivo, informativo e histórico) y turístico (arquitectónico-cultural, estético, rareza, recreativo, paisajístico y nivel de influencia). Así mismo, el potencial de uso evaluando la accesibilidad, tipo y estado de vía, población más próxima, visibilidad, valor de uso

actual y obstáculos para su aprovechamiento. Y la necesidad de protección del geositio, frente a amenazas naturales o antrópicas, considerando el nivel de deterioro, la vulnerabilidad, medidas de protección y su situación administrativa, concluyendo con una breve descripción y un panel fotográfico representativo del lugar.

### Cuantificación

Para este proceso se utilizó la metodología de Brilha (2005) que permite clasificar los geositios según el tipo de interés actual, local a regional o nacional a internacional.

Por otro lado, para jerarquizar a los geositios según su valor científico, uso potencial educativo, uso potencial turístico y el riesgo de degradación se utilizó la metodología de Brilha (2016). Cada uno se evaluó independientemente, pues el valor del geositio no está directamente relacionado con su potencial de uso o vulnerabilidad.



► Fig. 3 Mapa de geositios, georutas y miradores del volcán Huaynaputina (Arias, 2021; Mariño et al. 2021).



► Fig. 4 Fotografías de algunos de los geositios: GV001 Cráter del volcán Huaynaputina, GV003 Domos y escarpas de colapso, GC001 Pueblo Inca Estagagache, GC003 Pueblo Inca Calicanto, GM001 Terrazas del río Tambo, GM002 Cañón del río Tambo, GF001 Fuentes termales de Ulucán, GF003 Fuentes termales del río Putina (Arias, 2021; Mariño et al. 2021).

## Clasificación, conservación, divulgación y monitoreo

Es necesario proveer al patrimonio geológico, a través de los geositios, de una base legal para su protección e incentivar medidas de conservación según el nivel de riesgo de cada sitio de interés geológico. Es fundamental difundir toda la información con la que se cuente y de los peligros relacionados para concientizar a la población frente a ello. Finalmente realizar un seguimiento constante a los geositios, con visitas periódicas y mantenimiento.

### Resultados

Se identificaron 21 potenciales geositios, en cada uno de ellos se tomaron datos generales de cada lugar, así como una descripción de las características geológicas y geomorfológicas más resaltantes para una posterior evaluación cualitativa, selección y caracterización de los geositios. De esta manera se seleccionaron los 21 geositios, que fueron agrupados en cuatro categorías: geositios volcánicos (8), arqueológico-volcánicos (7), geomorfositos (3) y de fuentes termales (3):

**Geositios volcánicos:** GV001 - GV008, que corresponden a depósitos y estructuras volcánicas, tales como el Cráter del volcán Huaynaputina, domos y escarpas de colapso, depósitos volcánicos de Agua Blanca; depósito de avalancha de escombros y andenes de Sijuaya, depósito de avalanchas del

Ticsani, tefras de Quinistacas y las tefras de San Juan de Dios.

**Geositios arqueológico-volcánicos:** GC001 - GC007, que corresponden a los pueblos e infraestructuras destruidas y sepultadas por la erupción. Como el pueblo Inca Estagagache; Pampa Gentilar; pueblo Inca Calicanto; corrales de Chimpapampa; ruinas Moro Moro; pueblo Inca San Juan de Dios y el pueblo Inca Cojraque.

**Geomorfositos:** GM001 - GM003, asociado a los cambios geomorfológicos en el río Tambo, originado por el represamiento del río con el material emitido en la erupción y que hoy pueden observarse en ambas márgenes, siendo las terrazas del río Tambo, el cañón del río Tambo y los lahares de Quinistaquillas.

**Geositios en fuentes termales:** GF001 - GF003, que corresponden a las fuentes termales de Ulucán, Agua Blanca y géiser del río Putina, que son frecuentemente visitados y utilizados por los pobladores de la zona.

Después del inventario, cada geosito se sometió a un proceso de cuantificación de su valor y/o relevancia con el fin de establecer una jerarquización de todos los geositios. Es así que de los 21 geositios en el volcán Huaynaputina, 12 actualmente presentan un interés nacional a internacional (Arias, 2021); y según su valor científico, uso potencial educativo - turístico y riesgo de degradación, se obtuvo un ranking individual, con distintos resultados según la particularidad de cada geosito (Arias, 2021).

## CONCLUSIONES

- ▶ La erupción del volcán Huaynaputina modificó la geografía de su entorno con gruesos depósitos de material piroclástico. Estudios multidisciplinarios permitieron identificar las estructuras y conocer mejor las características de 6 pueblos Incas sepultados por la erupción.
- ▶ Se realizó la valoración de lugares de interés geológico, de esta manera se proponen 21 geositios, clasificados como geositios volcánicos, arqueológico volcánicos, geomorfositos y de fuentes termales.
- ▶ Se proponen 11 miradores en sitios estratégicos para que los visitantes puedan entender los procesos geológicos - volcánicos y apreciar su belleza paisajística. Además de 7 georutas como un acceso a los geositios donde varios forman parte de la red de caminos Incas, Qhapaq Ñan.
- ▶ Con el estudio y propuesta de geositios se impulsará el desarrollo del geoturismo como recurso natural sostenible y con un beneficio socioeconómico directo a las poblaciones aledañas. Asimismo, incentivar medidas de protección y conservación de estos sitios de interés, pues parte del patrimonio cultural se ha deteriorado y es vulnerable a daños meteorológicos y antrópicos.



## AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial a los integrantes del proyecto GA 17E "Geología y mapas de peligros del volcán Huaynaputina" del INGEMMET, en el cual se desarrolló este trabajo, teniendo como resultado del esfuerzo de todos los integrantes, los siguientes productos: un artículo científico en una revista internacional, un informe técnico, una tesis de pregrado, una guía geoturística y distintas presentaciones orales y en formato poster en eventos y congresos nacionales e internacionales. En el cual se resalta la importancia del patrimonio geológico alrededores del volcán Huaynaputina, el joven mozo.

## REFERENCIAS

- ▶ Arias, C. (2021). Recursos geoturísticos generados a partir del impacto de la erupción del volcán Huaynaputina del año 1600 d.C. como patrimonio geológico [Tesis de ingeniero geólogo]. Universidad Nacional del Altiplano. Asociación de servicios de geología y minería de Iberoamérica - ASGMI. (2018). Bases para el desarrollo común del Patrimonio Geológico en los servicios geológicos de Iberoamérica. Salta, Argentina: Propuesta metodológica aprobada en la XXIV asamblea general de ASGMI.
- ▶ Brilha, J. (2005). Patrimonio Geológico e Geoconservação: A Conservação da Natureza na sua Vertente Geológica, Braga, Palimage Editores.
- ▶ Brilha, J. (2016). Inventory and Quantitative Assessment of Geosites and Geodiversity Sites: A Review. *Geoheritage*. pp.120-130.
- ▶ Carcavilla, L.; Lopez, J. & Duran, J. (2007). Patrimonio geológico y geodiversidad: investigación, conservación, gestión y relación con los espacios naturales protegidos. Madrid, Spain: Instituto Geológico y Minero de España, 360 p.
- ▶ Cendrero, A. (1996). El patrimonio geológico. Ideas para su protección, conservación y utilización. En *Patrimonio Geológico. Bases para su valoración, protección, conservación y utilización*. Madrid, 17 - 38 p.
- ▶ Fei, J.; Zhang, D. & Lee, H. (2016) 1600 AD Huaynaputina eruption (Perú), abrupt cooling, and epidemics in China and Korea. *Meteorological Impactson Land form Changes*. <https://doi.org/10.1155/2016/3217038>
- ▶ Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2021) - Patrimonio geológico asociado a la erupción del volcán Huaynaputina del año 1600 d.C. en el distrito de Quinistaquillas. Provincia General Sánchez Cerro, departamento Moquegua. Lima: INGEMMET, Informe Técnico A7184, 57 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3306>.
- ▶ Mariño, J.; Cueva, K.; Thouret, J.-C.; Arias, C.; Finizola, A.; Delcher, E.; Fauchard, C.; Donnadiou, F.; Labazuy, P.; Japura, S.; Gusset, R.; Sanchez, P.; Ramos.; Macedo, L.; Lazarte, I.; Thouret, L.; Del Carpio, J.; Jaime, L. & Saintenoy, T. (2021). Multidisciplinary Study of the Impacts of the 1600 CE Huaynaputina Eruption and a Project for Geosites and Geo-touristic Attractions. *Geoheritage*. DOI: 10.1007/s12371-021-00577-5
- ▶ Martínez, P. (2010). Identificación, caracterización y cuantificación de geositios, para la creación del I geoparque en Chile, en torno al Parque Nacional Conguillío. Memoria, Universidad de Chile, Santiago, 34 - 154 p.



- ▶ Navarro, R. (1994) Antología del valle de Omate. Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa
- ▶ Pereira, P.; Pereira, D. & Alves, C. (2007). Avaliação do Património Geomorfológico: proposta de metodologia. Geomorphological heritage assessment: a methodology proposal. Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos. Volume V, APGeom, Lisboa, p. 235-247.
- ▶ Stoffel, M.; Khodri, M.; Corona, C.; Guillet, S.; Poulain, V.; Bekki, S.; Guiot, J.; Luckman, B.H.; Oppenheimer, C.; Lebas, N.; Beniston, M. & Masson-Delmotte, V. (2015) Estimates of volcanic-induced cooling in the Northern Hemisphere over the past 1,500 years. *Nature Geoscience*, 8:784–788. <https://doi.org/10.1038/ngeo2526>
- ▶ Thouret, J-C.; Davila, J. & Eissen, J.P. (1999) Largest explosive eruption in historical times in the Andes at Huaynaputina volcano 1600 CE, southern Peru. *Geology* 27(5):435–438. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1999\)027%3c0435:LEEIHT%3e2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027%3c0435:LEEIHT%3e2.3.CO;2)
- ▶ Ticona, M. (2005). El último atardecer. Historia antigua y colombina de los pueblos de Sánchez Cerro. Mater Gratiae, 231 p
- ▶ Zavala, B.; Mariño, J. & Peña, F. (2016) Guía Geoturística del valle de los volcanes de Andahua, INGEMMET. Boletín, Serie I: Patrimonio y Geoturismo, 6, 424 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/377>

# Identificación de potenciales geositos alrededor del Complejo Volcánico Casiri - Tacna

Nadya Calderón<sup>1,2</sup>, Rigoberto Aguilar<sup>1</sup>, Nélica Manrique<sup>1</sup>, Carla Arias<sup>1</sup>, Leonardo Zevallos<sup>2</sup>, David Arteaga<sup>1</sup>, Carla Palacios<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, Arequipa, Perú - [ncalderon@ingemmet.gob.pe](mailto:ncalderon@ingemmet.gob.pe)

<sup>2</sup> Escuela de Ingeniería Geológica - FGGM - UNSA, Arequipa, Perú

**Palabras clave:** geositio, turismo, vulcanismo, Casiri, Tacna.

## INTRODUCCIÓN

El patrimonio geológico son aquellos elementos abióticos o características de la naturaleza que permiten comprender la historia de nuestro planeta, teniendo así un valor significativo para la investigación científica, la educación, la estética y el desarrollo cultural (Urban et al., 2022).

El geopatrimonio comprende aquellos elementos y características de la geodiversidad de la Tierra que se considera que tienen un valor significativo por razones intrínsecas, científicas, educativas, culturales, espirituales, estéticas, ecológicas o ecosistémicas y, por lo tanto, deben ser conservados. El geopatrimonio constituye un legado del pasado que debe mantenerse en el presente y transmitirse en beneficio de las generaciones futuras (Sharples 2002; Crofts et al., 2020).

En un contexto de historia de la ciencia el geopatrimonio en su forma actual en términos de alcance y objetivos, es un esfuerzo relativamente nuevo que ha ganado impulso solo en los últimos años, es decir, la última parte del siglo XX (Gray 2004). De igual manera el campo de estudio del geopatrimonio es relativamente muy joven en el Perú. Entre el 2000 y 2002 se propuso realizar el estudio del patrimonio geológico peruano (Rivas et al., 2000) y se recomendó elaborar un inventario de puntos de interés geológico para su protección y conservación como patrimonio geológico del Perú (Zavala & Fidel, 2002).

Basándose en estas dos declaratorias públicas, el INGEMMET, en el año 2006 apertura el proyecto "Patrimonio y Geoturismo", categorizando al patrimonio geológico como un tema de interés nacional que, a partir de ello, el proyecto ha logrado

identificar sitios de interés geológico en el territorio peruano resaltando el alto potencial que tiene el Perú para tener más de un geoparque, ha brindado asesoramiento técnico para la designación del geoparque "Colca y Volcanes de Andagua", ha generado material de difusión y educación de geopatrimonio y ha sometido artículos en revistas indexadas.

El territorio peruano se encuentra en una zona de subducción de placas, donde la placa de Nazca se subduce debajo de la placa sudamericana, por lo que

existe una actividad volcánica importante (Lonsdale, 2002) por tanto un gran número de geositos se encuentran en zonas volcánicas, por lo cual, durante los últimos años, el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET también participa y apoya en el estudio y valoración de geositos en zonas volcánicas con el fin de asegurar su conservación y sensibilizar a las poblaciones aledañas a dichos sectores (e.g. Aguilar et al., 2022, Mariño et al., 2021, Manrique et al., 2020).



► Fig. 1 Mapa del sur del Perú con la ubicación de los volcanes activos y potencialmente activos.

El Complejo Volcánico Casiri (CVC) está ubicado en la región Tacna, sur del Perú, y forma parte de la Zona Volcánica Central de los Andes (Fig. 1) (Aguilar et al., 2021).

El área de estudio abarca una amplia complejidad de ambientes volcánicos y morfológicos relacionados a la actividad del CVC. Cercanos al CVC se ubican varios caseríos y centros poblados donde las principales actividades económicas son la ganadería y la agricultura; actividades que no suelen ser muy rentables para los pobladores de dichos sectores.

Uno de los objetivos de este estudio es identificar, evaluar y valorar los geosítios localizados en el CVC y sus alrededores, exponiendo el gran potencial geoturístico que presenta dicho sector como una alternativa para la creación de nuevas actividades económicas en la región que permitan el desarrollo sostenible en nuestro país.

Metodología La identificación de los posibles geosítios se realizó en dos etapas; la primera, netamente bibliográfica, donde en base a lo publicado en el boletín "Caracterización y evaluación del potencial geotérmico de la zona geotermal Casiri-Kallapuma, región Tacna" (Cruz et al., 2020) se determinaron los primeros potenciales geosítios (11) relacionados o cercanos al CVC. La segunda etapa se llevó a cabo en la

primera campaña de campo realizada por el proyecto "GA-17F: Estudiar y evaluar los peligros asociados a los volcanes Chachani y Casiri" desarrollado por el INGEMMET donde se identificaron tres nuevos potenciales geosítios.

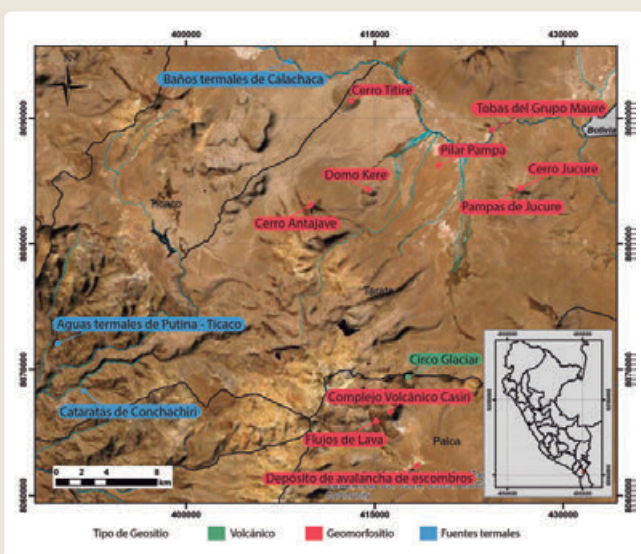
El término potencial geosítio engloba a todos los lugares postulados en base a sus características geológicas previa a una evaluación cualitativa que certifique si cumple o no con las condiciones establecidas para ser considerado como un geosítio.

La determinación de los geosítios dio paso a su compilación en el itinerario de los potenciales geosítios en los alrededores del CVC.

Posterior a ello se evaluó el valor intrínseco de los posibles geosítios (e.g. Arias, 2021, Pereira, 2007). La metodología utilizada fue la propuesta por Pereira (2007) en función de su valor científico, educativo y turístico de cada geosítio. El puntaje máximo que podría obtener cada geosítio postulado es de 4pts en cada criterio, es aquí donde los sitios son evaluados a partir de sus características geológicas, su capacidad para ser utilizado como fuente de referencia para dar cátedra acerca de procesos geológicos de forma didáctica e instructiva, así como su potencial para ser explotado como un bien turístico.

### Potenciales Geosítios del Área de Estudio

El CVC, se encuentra en el distrito de Palca, provincia y región de Tacna, aproximadamente a 76 km del centro de la ciudad de Tacna. El Casiri muestra una geología



► Fig.2 Mapa de ubicación de los potenciales geosítios dentro del área de estudio del CVC.



► Fig.3 Vista del sector sur-este del complejo volcánico Casiri.

bastante compleja en donde se observan depósitos volcánicos, glaciares y estructuras tectónicas que afectan el complejo, que resultan de gran interés para ser considerados como potenciales geositios.

Está constituido por al menos cinco edificios volcánicos coalescentes (Fig. 3). El edificio más joven presenta en su cima, un domo circular bien conservado en forma de cúpula. Las rocas de este domo tienen aspecto escoráceo de color pardo oscuro. La superficie de este domo es rugosa, y en forma de bosque de piedras, donde se observan algunas "agujas".

### 1. Flujos de lava del holoceno

Al oeste del edificio más joven, se observan al menos cuatro episodios de flujos de lava en bloques. Estos flujos de lava bien conservados, sin evidencia de glaciación, descienden en una serie de lóbulos de flujo superpuestos desde la cima del edificio (Fig. 3). Dos de estos flujos de lava fueron datadas por el método cosmogénico  $^{36}\text{Cl}$ , arrojando edades de  $2.6 \pm 0.4\text{ka}$  y  $6.0 \pm 0.9\text{ka}$  (Bromley et al., 2019). Estos flujos de lava muestran algunas estructuras de emplazamiento como levées, crestas de avance de 50 a 100 m de altura y lóbulos que varían entre 50 y 500 m de ancho.

### 2. Circo glaciar

El circo glaciar se encuentra a 3.12 km al noreste del complejo volcánico Casiri (Fig.4).

Esta estructura exhibe una escarpa en forma de herradura abierta hacia el sureste, con ~800 m de ancho y ~1200 m de largo. En el área interna de la escarpa aflora un glaciar rocoso con forma lobular de área aproximada a 25.7 hectáreas.

### 3. Depósito de avalancha de escombros

El depósito de avalancha de escombros se encuentra a 4.76 km al SSE del complejo volcánico Casiri (Fig. 4).

El afloramiento de depósito de avalancha de escombros se encuentra emplazado sobre unaplanicie. Se observan estructuras de tipo hummocks de material de bloques de lava de hasta 30 m de ancho por 5 m de alto. Este afloramiento se encuentra bien conservado y debido a su cercanía con la laguna de Paucarani se aprecia un panorama muy atractivo.



► Fig. 4 Geositios en un radio de influencia de 5km desde el cráter el edificio Paucarani del CVC.

### 4. Cerro Antajave

El estratovolcán Antajave, se encuentra a 17.64 km del complejo volcánico Casiri.

Se caracteriza por estar constituido por la secuencia volcánica de lavas andesíticas más antiguas del área, exponiendo un espesor aproximado de 400 m paralelo al arco volcánico Barroso de orientación NO-SE. Presenta lineamientos principales en dirección N-S con componente normal y un salto vertical aproximado de 250 m (Cruz et al., 2020).

### 5. Domo Cerro Kere

El cerro Kere se encuentra al SO del anexo de Mamuta, y aflora en el flanco oriental de la Cordillera del Barroso a unos 17.72 km del complejo volcánico Casiri.

Según Cruz et al., 2020, el cerro Kere se formó a partir de las intrusiones superficiales de lavas en la estructura de los edificios volcánicos existentes durante la actividad volcánica post glaciar, y su forma relieve actual se debe a las últimas glaciaciones durante el Holoceno. El domo Kere se encuentra fracturado con orientación N-S, con buzamiento moderado hacia el este. Se observa en las laderas, depósitos de arenas eólicas y residuales.

### 6. Pilarpampa

La pampa altiplánica de Pilarpampa se encuentra a 19.99 km del complejo volcánico Casiri.

Según Cruz et al., 2020, la pampa altiplánica de Pilarpampa en sus inicios fue una zona de depresión que posteriormente han sido rellenadas por



materiales detríticos o piroclásticos del Grupo Maure y permanece cubierto por depósitos fluvioglaciares. La pampa de Pilarpampa, así como las pampas de Titire, Chijitacape y Juntopujo; presentan fuentes termales con altas anomalías térmicas identificadas en la superficie que alcanzan los 44 °C, estas pampas

forman una gran depresión rellena con orientación NO-SE, asociada a flujos de agua termal y la influencia térmica del río Maure (Cruz et al., 2020).

### **7. Cerro Jucure**

El cerro Jucure, o "estrato volcán Jucure", se encuentra a 20.64 km del complejo volcánico Casiri. El cerro Jucure se formó a partir de continuas erupciones durante el Plioceno (5.5 a 8.4 Ma). Caracterizado por presentar afloramientos tabulares, compuestos principalmente por lavas de andesitas y traquiandesitas de color gris en todo el entorno del cono volcánico. Posteriormente, las glaciaciones del Pleistoceno y Holoceno erosionaron en la parte baja de este volcánico modelando su actual geomorfología (Cruz et al., 2020).

### **8. Pampas de Jucure**

Las Pampas de Jucure se encuentran al pie del flanco SE del cerro Jucure a 20.64 km del complejo volcánico Casiri.

Las Pampas de Jucure se caracterizan por mantener una pendiente horizontal aproximada de 1.5°, con relieve suave, ondulado, de regular extensión, y se encuentran delimitadas por formas topográficas positivas como los conos volcánicos y otras manifestaciones volcánicas pertenecientes al Grupo Barroso. Formadas por arenas y/o depósitos cuaternarios provenientes principalmente de la erosión de las rocas volcánicas. Presenta presencia de depósitos de sínter y salmueras geotérmicas en forma de costras; y extensiones de bofedales (Cruz et al., 2020).

### **9. Tobas del Grupo Maure**

Las tobas del Grupo Maure se encuentran a 23.8 km del complejo volcánico Casiri.

El grupo Maure es considerado como un depósito volcánico-sedimentario de litología variable que consiste desde su base en intercalaciones de brechas, conglomerados, areniscas, tobas, limolitas, andesitas

basálticas y sedimentos lacustres. El afloramiento se encuentra por el cerro Huancarama (Chiluyo) hasta llegar al anexo de Conchachiri, donde presenta capas de tobas vítreas de hasta 20 m de espesor bien conservadas, las cuales infrayacen a una capa de un metro de espesor de conglomerado monomítico compacto (Cruz et al., 2020).

### **10. Cerro Titire**

El cerro Titire se encuentra a 24.98 km del complejo volcánico Casiri, y exhibe una forma cónica parcialmente erosionada, presenta los flancos del cono tapizado por depósitos fluvioglaciares y morrénicos surcados por quebradas dispuestas radialmente. Predomina el sistema de lineamiento en dirección N-S que coincide con la orientación de la falla Pacollo y la actividad fisural de arco volcánico. Relacionado con el tercer evento de la secuencia litológica del grupo Barroso en la zona oeste, vemos que está compuesto de lavas traquiandesíticas y andesitas basálticas de espesor aproximado a 417 m (Cruz et al., 2020)

### **11. Cataratas de Conchachiri**

Las Cataratas de Conchachiri se encuentran a 24.48 km del complejo volcánico Casiri.

Las Cataratas de Conchachiri son caídas de agua de hasta 6 m de altura que se han formado debido en el curso del río Maure, en torno a este sector se encuentran bofedales.

### **12. Aguas Termales de Putina-Ticaco**

Las aguas termales de Putina-Ticaco se encuentran a 27 km del cráter del volcán Casiri.

Las aguas termales de Putina-Ticaco son una de las manifestaciones de aguas termales ligadas al sistema geotermal del Casiri-Kallapuma llegando a alcanzar temperaturas de hasta 45 °C (Cruz et al., 2020). Este sector ya es aprovechado a partir de piscinas rurales de roca que son visitadas por pobladores y turistas con la premisa de ser curativas.

### **13. Baños termales de Calachaca**

Los baños termales de Calachaca se encuentran a 28.98 km del cráter del volcán Casiri.

El agua de los baños termales de Calachaca son cloruradas-bicarbonatadas siendo un indicador de que

el agua de la fuente está sufriendo mezcla con agua superficial fría que se infiltra del río Maure. Las Aguas termales de Calachaca tienen una temperatura superior a 40 °C, y el lugar cuenta con dos fuentes termo-medicinales aptas para el baño de los visitantes.

Según los resultados de la evaluación cualitativa de los 14 geositios, se seleccionan de acuerdo a su valor intrínseco (Tabla 1). Para ello se considera como mínimo el 50% de la suma total, para que el geositio sea seleccionado (Pereira, 2070), es decir, el valor mínimo que debe obtener el potencial geositio es de 6.

Potenciales Geositios		Valor intrínseco 0 (Nulo)- 4 (Muyalto)			
		Científico	Educativo	Turístico	VI Total
ID	NOMBRE				
1	Complejo Volcánico Casiri	2	4	3	<b>9</b>
2	Flujo de lava	2	3	3	<b>8</b>
3	Depósito de avalancha de excombros	3	3	3	<b>9</b>
4	Cerro Antajave	2	3	2	<b>7</b>
5	Domo Kere	2	3	2	<b>7</b>
6	Pilar Pampa	2	2	3	<b>7</b>
7	Cerro Jucure	2	3	2	<b>7</b>
8	Pampas de Jucure	2	3	2	<b>7</b>
9	Tobas del Grupo Maure	2	2	2	<b>6</b>
10	Cerro Titire	2	3	2	<b>7</b>
11	Circo glaciar	1	3	3	<b>7</b>
12	Cataratas de Conchachiri	2	3	3	<b>8</b>
13	Aguas Termales de Putina - Ticaco	3	2	3	<b>8</b>
14	Baños termales de Calachaca	3	4	4	<b>11</b>

► Fig. 5 Tabla de evaluación cualitativa de los potenciales geositios en el área de estudio del CVC.

## CONCLUSIONES

Este trabajo expone la identificación de 14 potenciales sectores de interés geológico y turístico con base en sus características geomorfológicas, litológicas, paisajísticas; ubicados dentro del área de estudio del CVC.

La evaluación cualitativa como parte del inventario de los potenciales geositios determina que las 14 propuestas cumplen con el puntaje mínimo requerido, es decir, son aptos para ser considerados geositios y poder empezar con su caracterización.

Los geositios propuestos en este trabajo serán analizados y evaluados con mayor detalle. Esta información puede servir como base para la promoción de nuevas alternativas de desarrollo económico como el geoturismo, así como una nueva propuesta educativa para el reconocimiento de ambientes volcánicos en el Distrito de Palca, Región Tacna.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolla en el marco del proyecto GA-17F, por ello, se hace extensivo el agradecimiento a todos los miembros del proyecto y al magister Leonardo Zevallos Valdivia, docente de la escuela profesional de Ingeniería Geológica, UNSA.

## REFERENCIAS

- ▶ Aguilar, R.; Thouret, J.; Samaniego, P.; Wörner, G.; Jicha, B.; Paquette, J.; Suaña, E. & Finizola, A. (2022). Growth and evolution of long-lived, large volcanic clusters in the Central Andes: The Chachani Volcano Cluster, southern Peru. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 426, 107539.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107539>
- ▶ Aguilar, R.; Taipe, E.; Antayhua, Y.; Ortega, M.; Apaza, F. & Cruz, L. (2021) "Hazard assessment studies and multiparametric volcano monitoring developed by the Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico in Peru", *Volcanica*, 4(S1):73-92. doi: 10.30909/vol.04.S1.7392.
- ▶ Arias, C. (2021). Recursos geoturísticos generados a partir del impacto de la erupción del volcán Huaynaputina del año 1600 d.C. como patrimonio geológico [Tesis de ingeniero geólogo]. Universidad Nacional del Altiplano.
- ▶ Bromley, G.R.M.; Thouret, J.; Schimmelpfennig, I.; Mariño, S.; Valdivia, D.; Rademaker, K.; Vivanco, S.; Aster Team; Aumaître, G.; Bourlès, D. & Keddadouche, K. (2019). In situ cosmogenic <sup>3</sup>He and <sup>36</sup>Cl and radiocarbon dating of volcanic deposits refine the Pleistocene and Holocene eruption chronology of SW Peru. *Bulletin of Volcanology*, 81(11), 64. <https://doi.org/10.1007/s00445-019-1325-6>.
- ▶ Crofts, R.; Gordon J.E., Brilha, J.; Gray, M.; Gunn, J.; Larwood, J.; Santucci, V.L.; Tormey, D. & Worboys, G.L. (2020) Guidelines for geoconservation in protected areas. Best Practice Protected Area Guidelines Series No. 31. IUCN, Gland, Switzerland. <https://doi.org/10.230/IUCN.CH.2020.PAG.31.en>.
- ▶ Cruz, V.; Flores, R. & Velarde, Y. (2020). Caracterización y evaluación del potencial geotérmico de la zona geotermal Casiri-Kallapuma, región Tacna. *INGEMMET, Boletín Serie B: Geología Económica*, 69, 315p., 4 mapas. <https://hdl.handle.net/20500.12544/2801>.
- ▶ Gray, M. (2004) *Geodiversity valuing and conserving abiotic nature*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- ▶ Lonsdale, P. (2005) Creation of the Cocos and Nazca plates by fission of the Farallon plate. *Tectonophysics*, 404(3-4):237-264, ISSN 0040-1951, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.05.011>
- ▶ Manrique, N.; Samaniego, P.; Médard, E.; Schiavi, F.; Mariño, J. & Liorzou, C. (2020). Pre-eruptive magmatic processes associated with the historical (218±14 aBP) explosive eruption of Tutupaca volcano (southern Peru). *Bulletin of Volcanology*, 82(1): 6. <https://doi.org/10.1007/s00445-019-13019-1335-4>.
- ▶ Mariño, J.; Cueva, K.; Thouret, J.; Arias, C.; Finizola, A.; Antoine, R.; Delcher, E.; Fauchard, C.; Donnadiou, F.; Labazuy, P.; Japura S.; Gusset, R.; Sanchez, P.; Ramos, D.; Macedo, L.; Lazarte, I.; Thouret, L.; Del Carpio, J.; Jaime, F. & Saintenoy, T. (2021) - Multidisciplinary Study of the Impacts of the 1600 CE Huaynaputina Eruption and a Project for Geosites and Geo-touristic Attractions. *Geoheritage*, 13(3): Article 64. <https://doi.org/10.1007/s12371-021-00577-5>

- ▶ Martínez, P. (2010). Identificación, caracterización y cuantificación de geositos, para la creación del I geoparque en Chile, en torno al Parque Nacional Conguillío. Memoria, Universidad de Chile, Santiago, 34– 154 p.
- ▶ Pereira, P.; Pereira, D. & Alves, C. (2007). Avaliação do Património Geomorfológico: proposta de metodologia. Geomorphological heritage assessment: a methodology proposal. Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos. Volume V, APGeom, Lisboa, p.235- 247.
- ▶ Rivas, F.; Rivera, M. & Guadalupe, E. (2000) El Patrimonio Geológico y una Metodología para su evaluación. Un tema de Protección Ambiental y Ordenación del Territorio. Resúmenes X Congreso Peruano de Geología.
- ▶ Sharples, C. (2002). Concepts and principles of geoconservation. Hobart, Tasmania, Australia: Tasmanian Parks & Wildlife Service. [www.dpiw.tas.gov.au/inter.nsf/Attachments/SJON-57W3YM/\\$FILE/geoconservation.pdf](http://www.dpiw.tas.gov.au/inter.nsf/Attachments/SJON-57W3YM/$FILE/geoconservation.pdf). Accessed 21 Dec 2020.
- ▶ Urban, J.; Radwanek-Bąk, B. & Margielewski, W. (2022). Geoheritage Concept in a Context of Abiotic Ecosystem Services (Geosystem Services) – How to Argue the Geoconservation Better. *Geoheritage* 14, 54. <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00688-7>
- ▶ Zavala, B. & Fidel, L. (2002) - Necesidad de un inventario de puntos de interés geológico para su protección y conservación como patrimonio geológico. En: Congreso Peruano de Geología, 11, Lima, 2002. Resúmenes. Lima: Sociedad Geológica del Perú, p.194.



## Geopatrimonio del Pedregal del Xitle, Ciudad de México

Marie-Noëlle Guilbaud<sup>1</sup>, María del Pilar Ortega-Larrocea<sup>2</sup>, Silke Cram<sup>3</sup>, Gijon Escobar Emmanuel Sebastián<sup>4</sup>, Días Contador Carla Marlen<sup>4</sup>, Hernández Hernández Guadalupe<sup>4</sup>, Galeana Cornejo Tenoch<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Vulcanología, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México - marie@igeofisica.unam.mx

<sup>2</sup> Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México <sup>3</sup> Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México <sup>4</sup> Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México

**Palabras clave:** Conservación, educación, patrimonio natural.

En ciudades localizadas en campos volcánicos activos, el geopatrimonio cumple una función social muy importante en la construcción de resiliencia ante los peligros naturales. Sin embargo, este tipo de patrimonio es comúnmente desconocido por los ciudadanos, poco valorizado y por tanto altamente deteriorado o sometido a una fuerte presión urbanística (Vereb et al. 2020). Una manera de conservar este geopatrimonio y hacerlo conocer a sus habitantes es a través de los geositios urbanos que preservan elementos claves de la identidad de una ciudad, son herramientas para educar a un amplio sector de la población sobre los fenómenos naturales, además cumplen con ciertas funciones ecosistémicas y pueden servir de sitios de recreación y de bienestar (Reynard et al. 2017; Vereb et al. 2020; Guilbaud et al. 2021).

La Ciudad de México es una zona urbana altamente transformada, donde existen pocos remanentes del medio natural original, lo cual amplifica los riesgos por fenómenos naturales que enfrenta la población (Schteingart, 1989). Aún con ello, zonas volcánicas del sur de la ciudad todavía conservan elementos del paisaje natural cuya preservación y valorización podría ser clave para resolver varios problemas. En particular, estudios recientes demuestran que los productos del volcán Xitle representan un geopatrimonio importante (Guilbaud et al. 2021).

El Volcán Xitle hizo erupción hace alrededor de 1700 años antes del presente y sus lavas basálticas recubren 70 km<sup>2</sup> en el sector suroeste de la Ciudad de México (Siebe, 2000). Debido a una urbanización acelerada desde los años 50s, solamente el 30% del campo de lavas todavía aflora, la mayor parte (270 ha) en la Reserva Ecológica de San Ángel (REPSA) ubicada

dentro del campus central de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). El acceso a la REPSA está fuertemente restringido para proteger un ecosistema único que se ha desarrollado sobre las coladas basálticas. En el resto del campus, la lava aflora localmente, formando los llamados "pedregales remanentes".

Para evaluar la riqueza geológica y biológica de estos espacios, así como su valor para la comunidad

universitaria y los elementos que lo amenazan, se realizó un estudio pluridisciplinario de varios pedregales localizados alrededor de los institutos de investigación en Ciencias de la Tierra. Nuestro grupo de trabajo consta de investigadores en geología y biología de los institutos y estudiantes de la Facultad de



► Fig. 1 Trabajo de campo llevado a cabo en el pedregal del Instituto de Geofísica, donde se llevó a cabo un levantamiento de las geoformas y especies vegetales. Noten la presencia de árboles no nativos que depositan una capa de hojas escondiendo las microestructuras de las lavas.

Ciencias, para integrar la visión de diferentes miembros de la comunidad universitaria (Fig. 1).

Los métodos consistieron en visitas repetidas en los pedregales, durante las que se realizaron cartografías de los elementos geológicos, biológicos y de amenazas a diferentes escalas (cm-m). Se incorporaron a las visitas expertos en la descripción de los diferentes elementos evaluados. Se utilizaron también sensores para medir diferencias en temperatura, luminosidad y humedad relativa en diferentes sitios. Estos datos se discutieron en reuniones grupales para completar, homogeneizar y recopilar la información en mapas, esquemas, listados y descripciones. Se estudió también la información publicada sobre los aspectos estudiados. Los estudiantes recibieron una formación pluri-disciplinaria sobre los aspectos a evaluar. Los resultados muestran que existe una alta geodiversidad en los pedregales que se expresa por la presencia de grandes estructuras lávicas como túmulos y lava rises asociadas con una red de grietas, grandes cuevas y a menor escala, lavas cordadas y abundantes vesículas (Fig. 2). Esta alta diversidad en geoformas produce una multitud de microambientes que dan pie a una alta diversidad biológica. Encontramos numerosas especies de plantas nativas tales como *Pittocaulon praecox*, *Tithonia tubaeformis*, *Tagetes lunulata*, *Buddleja cordata*, *echeveria gibbiflora*, *echeveria*

*micrantha*, *Opuntia* spp., *Zephyranthes* spp., *Sarclotis shaffneri* spp., y *Aulosepalum pyramidalis*. La fauna es principalmente compuesta por polinizadores, diferentes especies de reptiles, y mamíferos como *Didelphimorphia* y *Bassariscus astutus*. Son espacios agradables que producen una sensación de bienestar para sus visitantes.



► Fig. 3 Grieta profunda en túmulo en el pedregal del Circuito donde se observa el relleno por diversos tipos de basura. Las paredes lávicas sin embargo presentan elementos geológicos de alto interés como una zonación en las vesículas y la presencia de varios tipos de fracturas y fallas.



► Fig. 2 Lava cordadas sobre estructura de túmulo en el pedregal en el jardín entre los institutos de Geología y Geofísica

Proponemos que la recuperación de áreas naturales en el campus podría ser clave para desarrollar un método de educación alternativo (aulas vivas), propiciar la multidisciplinaridad en investigación y docencia en Ciencias de la Tierra, incrementar la sustentabilidad y seguridad del campus, así como confortar el sentido del lugar ("sense of place") y de identidad y apropiación por la comunidad universitaria.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo del Consejo Nacional De Ciencia y Tecnología (CONACYT) a través del proyecto FOP06 315306 "Geopedregal, Aula Viva y red de geosenderos". Este trabajo también recibió el apoyo del proyecto Papiit-DGAPA IN103421 "Las últimas erupciones volcánicas en la Sierra Pinacate, la Sierra Chichinautzin y la Cuenca Serdán-Oriental (México): Edad, estilo y relevancia para la evaluación de peligros y la geoevaluación", el proyecto SEP- CONACYT-ANUIES-ECOS NORD Francia N° 321145 "Construcción del sentido a través del patrimonio natural" y el proyecto UNESCO IGCP "Geoheritage for geohazards and sustainable development through capacity building for local communities in developing countries".

## REFERENCIAS

- ▶ Guilbaud, M. N.; Ortega-Larrocea, M.P.; Cram, S. & van Wyk de Vries, B. (2021). Xitle Volcano Geoheritage, Mexico City: Raising awareness on natural hazards and environmental sustainability in active volcanic areas. *Geoheritage* 13:6, 27p. <https://doi.org/10.1007/s12371-020-00525-9>
- ▶ Reynard, E.; Pica, A. & Coratza, P. (2017). Urban geomorphological heritage. An overview. *Quaestiones Geographicae* 36(3):7-20. <https://doi.org/10.1515/quageo-2017-0022>.
- ▶ Schteingart, M. (1989). The environmental problems associated with urban development in Mexico City. *Environ Urbanization*, 1(1):40-50
- ▶ Siebe, C. (2000). Age and archaeological implications of Xitle volcano, southwestern Basin of Mexico-City. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 104(1-4):45-64. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(00\)00199-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00199-2).
- ▶ Vereb, V.; van Wyk de Vries, B.; Guilbaud, M.N. & Karatson, D. (2020). The urban geoheritage of Clermont-Ferrand: from inventory to management. *Quaestiones Geographicae*, 39(3):5-31; <https://doi.org/10.2478/quageo-2020-0020>

# Caracterización del Macizo Rocosó de las Canteras de Añashuayco

Carlos Luza<sup>1</sup>, Fernando Mango<sup>1</sup>, José Castillo<sup>1</sup>, Diory Cervantes<sup>1</sup>, Rosa Ccalachua<sup>2</sup> y Ana Tunquipa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Geología, Geofísica y Minas, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa

<sup>2</sup> Escuela Profesional de Ingeniería Geológica, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa

**Palabras clave:** Ignimbrita, Macizo Rocosó y Caracterización geomecánica RMR

## RESUMEN

El presente artículo busca clasificar/caracterizar el Macizo Rocosó (MR) de las canteras de Añashuayco. Que son una de las fuentes más importantes para obtener la ignimbrita blanca (más conocida como sillar), siendo además una roca representativa de la ciudad de Arequipa. Esta zona presenta grandes afloramientos de Roca, los cuales presentan pocos estudios geotécnicos. Por tal motivo este trabajo incide en describir las características más importantes de este macizo rocosó.

La investigación de los macizos rocosos en la cantera de Añashuayco se evaluó mediante clasificación geomecánica de Bieniawski-RMR, para ello se utilizaron 10 EG dentro del área de estudio con el método de Windows Sampling, utilizando ventanas de 15 por 25 m. aproximadamente, dependiendo de la cara del talud. En el ajuste de los parámetros geomecánicos se usaron datos de campo y ensayos mencionados. En el MR existen discontinuidades predominantes y permiten que su calidad sea clasificada como mala a regular. Esto permite zonificar el MR en dominios estructurales, de acuerdo con características similares, como: litología, espaciado de cada discontinuidad, presencia de agua, entre otros. Estos dominios estructurales pueden coincidir o no con rasgos geológicos.

## INTRODUCCIÓN

El estudio del macizo rocosó de las Canteras de Añashuayco, es uno de los lugares que actualmente está ganando representatividad, ya que forma parte del camino turístico conocido como "La Ruta del Sillar". Además, en este lugar se realiza la extracción de la ignimbrita blanca, roca usada como material de construcción de en diversas localidades de Arequipa. La quebrada de Añashuayco está localizada en el distrito de

Uchumayo, tiene una extensión de aproximadamente 18 kilómetros (<sup>1</sup>). Ésta empieza a pies del volcán Chachani, uno de los volcanes más importantes de la famosa Ciudad Blanca, al lado del río Chili. El nombre de "Canteras del Sillar" se le dio precisamente porque éste es el principal material de construcción utilizado desde hace muchos años para las iglesias, casonas y conventos de Arequipa. Sin embargo, la existencia de problemas de inestabilidad lleva a la necesidad de abordar en estos estudios a fin de resolver el problema. Incluso el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) está al tanto de este riesgo geológico que es la inestabilidad de taludes, que puede generar la caída de bloques. La caracterización del macizo rocosó es un inicio para la solución del problema, permitiendo clasificarlo cualitativa y cuantitativamente, además de generar propuestas para la sostenibilidad y el posterior análisis de inestabilidad de los taludes. Porque esta inestabilidad puede conllevar a la pérdida de vidas humanas y económicas.

## OBJETIVOS

### Objetivo Principal

Caracterizar geomecánicamente el macizo rocosó de las canteras de Añashuayco.

### Objetivo Específico

Determinar propiedades geomecánicas y físicas del macizo rocosó que permitan obtener parámetros para el RMR.

Verificar las Propiedades Petrológicas de las muestras de ignimbrita en la zona de estudio.

## UBICACIÓN

Las canteras de sillar de Añashuayco se encuentran en el distrito de Cerro Colorado, al norte de la ciudad de

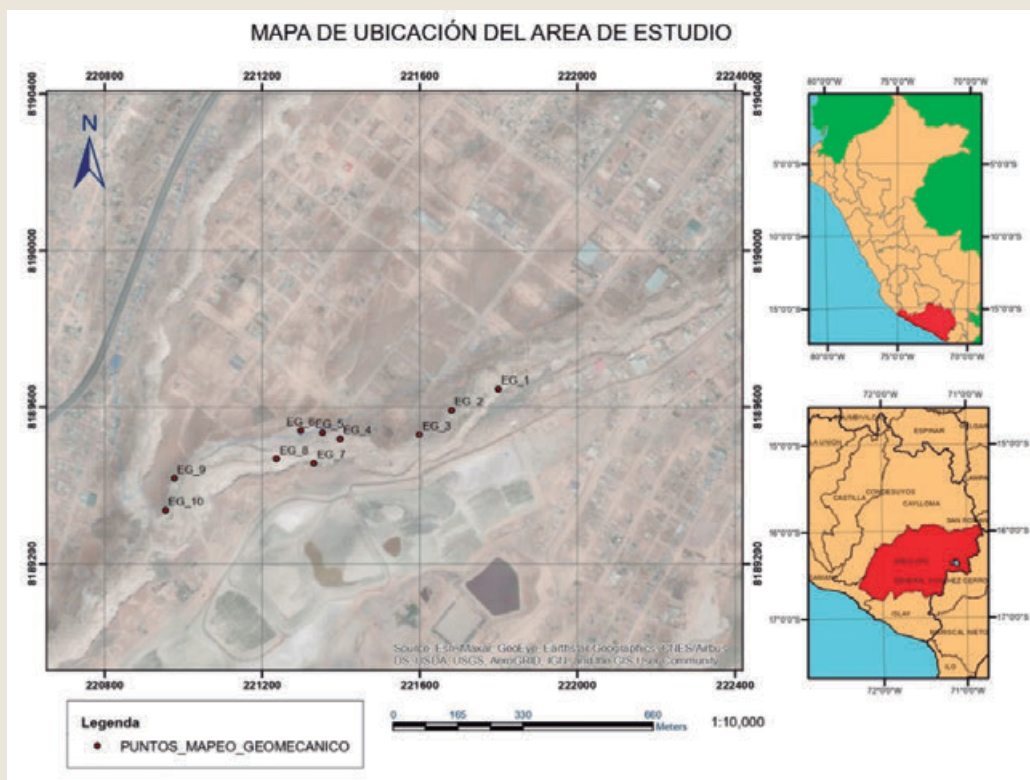


Arequipa, a unos 13 km de la plaza de armas de Arequipa, actualmente es uno de los sitios turísticos recientemente creados que viene ganando reconocimiento y su afluencia turística ha ido en aumento en los dos últimos (Núñez & Sucso, 2019).

## METODOLOGÍA

El trabajo realizado se divide en dos etapas. La primera consiste en un trabajo de campo efectuando

reconocimiento petrológico de la roca y levantamiento Geomecánico del macizo rocoso, y la segunda etapa se basa en la realización de ensayos geotécnicos para obtener valores de las propiedades físicas y mecánicas. La etapa de caracterización petrográfica permite determinar la composición mineralógica de las ignimbritas que complementarán al estudio de la caracterización geomecánica para el aprovechamiento de este recurso con fines industriales.



► Fig. 1 Mapa de localización del área de estudio en la quebrada de Añashuayco.

Se establecieron 10 Estaciones Geomecánicas (EG) dentro del área de estudio con el método de Windows Sampling, utilizando ventanas de 15 por 25 m. aproximadamente, dependiendo de la cara del talud. Se evaluó mediante clasificación geomecánica de Bieniawski-RMR determinando un valor de calidad del macizo rocoso. Los parámetros geotécnicos se sustentan mediante pruebas de laboratorio como el Ensayo de compresión uniaxial, Tilt test y Ensayo de Ultrasonido., obteniéndose así propiedades físicas y mecánicas del material en estudio.

### ► Caracterización petrológica macroscópica de las ignimbritas

Según el estudio petrográfico realizado por Alvarez (2021) utilizando muestras de la Quebrada Añashuayco, teniendo en cuenta las relaciones observadas en campo, como son: mayor proporción en cristales, fragmentos tanto cristales como líticos, etc. y haciendo uso de un microscopio petromineralógico polarizante; para complementar el estudio petrográfico (Figura).

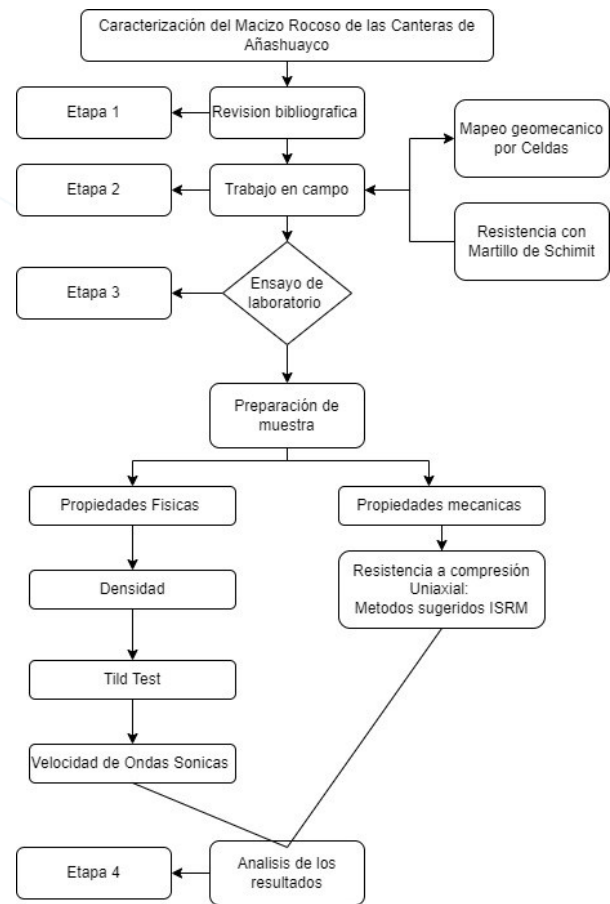
En referencia a los puntos muestreados se identificó poco contenido de cuarzo (<1%) presencia de cristales de plagioclasas (10%) algunos bien conservados y otros alterados (arcillas) y como minerales accesorios la biotita (<5%). También se encuentra presencia de fragmentos líticos (5 - 10%) que varían de 0.1 - 1.2 cm de color gris a marrón rojizo. La matriz (70%) es afanítica de color blanco de aspecto pulverulento algo alterada, Algunas muestras presentan clastos de pómez (<10%) de 0.1

- 0.5 cm. de color marrón claro de textura fibrosa formando pequeñas oquedades.

### ► Características de las Ignimbritas bajo el microscopio Petromineralógico

Lo más representativo de las muestras analizadas por Alvarez (2021) son rocas volcánicas piroclásticas que presentan en su litología, características correspondiente a una toba vitrocristalolítica de cenizas lapillis con un patrón textural hialocristalino y textura esencialmente vitrofídica, presencia de cristales de plagioclasas y biotita en una matriz de exclusivamente vidrio volcánico ácido (desvitrificado a material arcilloso), parcialmente perlítica y en partes vacuolar (Figura).

Con esta Información recabada y los análisis complementarios realizados concluye que son tobas



“Ignimbrita” Vitrocristalítica de cenizas > lapillis de composición aproximada de dacita - riolita.

### ► Caracterización geomecánica

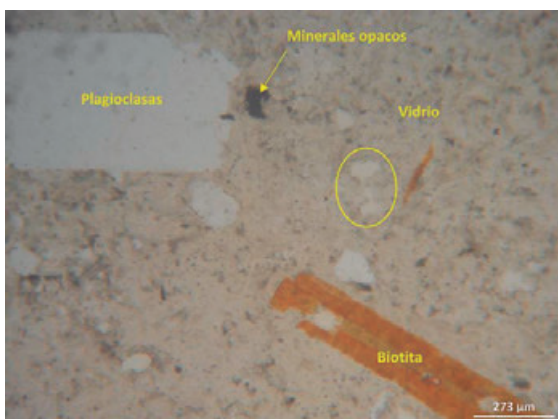
Se realizó mapeo geomecánica mediante celdas, en 10 estaciones. Para ejecutar la clasificación geomecánica se utilizó sistema RMR de Bieniawski. La estimación de la resistencia se realizó utilizando la tabla de índice de resistencia de (Brown et al., 1981), que es una estimación indirecta de la resistencia de la roca.

Para determinar el valor de RQD, se utilizó la ecuación de Palmstrom (2005).

$$RQD = 110 - 2.5J_v$$

### ► Determinación de las propiedades Mecánicas

Mediante el Ensayo de Tilt Test se determinó el Angulo fricción básico de las discontinuidades de la ignimbrita.



► Fig. 2 Nótese minerales opacos diseminados, roca de textura vitrofídica, conformada por fragmentos de cristales de plagioclasas y biotita en una matriz de vidrio volcánico. (Alvarez, 2021).

El ensayo de velocidad sónica de rocas determinó la velocidad de propagación de las ondas elásticas en la ignimbrita. Este procedimiento fue realizado haciendo uso del método recomendado por el ISRM (Aydin, 2013). Donde se analizó 05 muestras cilíndricas y bloques prismáticos.

Para determinar la resistencia a la compresión uniaxial, se realizó el ensayo UCS, el cual consiste en aplicar una carga de compresión de manera continua sobre un testigo cilíndrico de diámetro de "D" hasta producir su ruptura. Este ensayo se realizó siguiendo la metodología de ISRM: determinar la resistencia a la compresión y la deformabilidad uniaxial de materiales rocosos. La muestra la secuencia de la metodología de la investigación realizada.

► **Determinación de las propiedades físicas**

Basado en las sugerencias dadas por la ISRM se determinaron las propiedades físicas de cinco muestras de roca de forma cilíndrica, obteniéndose la densidad (Kg/ m<sup>3</sup>) y el peso específico (N/m<sup>3</sup>) de las muestras.

Este procedimiento fue realizado haciendo uso del método recomendado por el ISRM (Aydin, 2013). Donde se analizó 05 muestras cilíndricas y bloques prismáticos.

**Resultados y Análisis**

► **Clasificación geomecánica**

Para establecer la valoración y calidad del macizo rocoso se realizó el mapeo Geomecánico en las 10 estaciones usando la clasificación geomecánica RMR. Los resultados se muestran resumidos en la junto a la calidad cualitativa del estado del macizo rocoso.

► **Resultados y análisis de ensayos de laboratorios**

Respecto a las propiedades físicas determinadas con el equipo de ultrasonido se obtuvieron las velocidades de onda de la ignimbrita blanca (ver ) que permiten establecer propiedades dinámicas de las rocas, a través de testigos cilíndricos obtenidos a partir de los bloques muestreado en campo.

Ver Tabla N°3 y 4 para observar los resultados.

Número de Estación	Valoración RMR	Tipo de Macizo Rocosos
EG 001	61	BUENA
EG 002	63	BUENA
EG 003	55	REGULAR
EG 004	44	REGULAR
EG 005	70	BUENA
EG 006	50	REGULAR
EG 007	64	BUENA
EG 008	58	REGULAR
EG 009	75	BUENA
EG 010	70	BUENA

► **Tabla 1 Valoración del macizo rocoso de las 10 estaciones geomecánicas volcánico.**

Número de Muestra	Velocidad de transmisión de ondas en m/s
Muestra 001	1728.6298
Muestra 002	1831.3238
Muestra 003	1800.776
Muestra 004	1837.092
Muestra 005	1877.748

► **Tabla 2 Resultados de densidad y peso específico aparente de la ignimbrita blanca.**

Número de Muestra	Velocidad de transmisión de ondas en m/s
Muestra 001	1728.6298
Muestra 002	1831.3238
Muestra 003	1800.776
Muestra 004	1837.092
Muestra 005	1877.748

► **Tabla 3 Resultados de velocidad de transmisión de onda promedio sobre las 05 muestras de ignimbrita.**

Valor Promedio	Desviación Estándar	Valor Máximo	Valor Mínimo
1815,11 m/s	55.57	1877,75 m/s	1728,63 m/s

► **Tabla 4 Resumen de valores estadísticos sobre los resultados de la velocidad de transmisión de onda.**

Metodología	Schmidt Hammer Rebound Hardness	UCS en MPa Diagrama de Miller
ISRM, 2008	34,60	27,2
ASTM, 2005	35,39	27,5

► **Tabla 5 Resultados de resistencia a la compresión uniaxial (UCS) estimados del rebote de dureza del martillo de Schmidt.**

Número de Muestra	Resistencia a la compresión uniaxial(MPa)
M-S-09	12.231
M-S-10	10.402
M-1	9.132
M-S-05	10.322
M-4	8.731

► **Tabla 6 Resultados de resistencia a la compresión uniaxial por el ensayo de compresión uniaxial.**

Propiedad	Metodo aplicado	Valor promedio
Densidad aparente de la roca	Metodo sugerido por el ISRM	1178 Kg/m <sup>3</sup>
Peso Especifico aparente de la roca	Metodo sugerido por el ISRM	11,65 KN/m <sup>3</sup>
Velocidad de transmisión de ondas	Ensayo de pulso de transmisión Ultrasonico	1815,11 m/s
Resistencia a la compresión	Ensayo de Compresión Uniaxial	10,167 MPa
Resistencia a la compresión	Estimado usando el martillo de Schmidt	27,35 MPa
Coefficiente de Poisson	Ensayo de deformaciones elásticas-uniaxial	0.176
Modulo de Elasticidad	Ensayo de deformaciones elásticas-uniaxial	3.069 GPa
Ángulo de fricción básico	Ensayo de Tilt Test	33 grados

► **Tabla 7 Resumen de propiedades físicas, resistentes y/o mecánicas de la Ignimbrita del Aeropuerto, facie blanca (Sillar de Arequipa).**

Minerales	Composición Normalizada c(%)	V. Teórica Vt (m/s)	V. Teórica Concentrada Vpt (m/s)	Velocidad real de ondas P Vp(m/s)	Índice de Calidad IQ=(Vp/Vpt) x100
Cuarzo	83%	6050	6057.032	1815.11	29.97%
Plagioclasa	11%	6250			
Biotita	6%	5800			

► **Tabla 8 Determinación del Índice de Calidad (IQ, mediante la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas.**

También se realizó ensayos para obtener propiedades resistentes y/o mecánicas con el Martillo de Schmidt o esclerómetro de tipo L, tomando 23 lecturas. Los valores de rebote fueron analizados aplicando el tratamiento de datos recomendado por el método sugerido del ISRM (Aydin, 2009) y ASTM D 5873 (2005), donde los valores obtenidos fueron analizados para la estimación del UCS usando el diagrama de Miller.(Tabla N°5).

Respecto al ensayo de compresión uniaxial aplicando el método sugerido por ISRM (1979), se realizó 05 pruebas de laboratorio sobre testigos cilíndricos (.). Además, se realizó una prueba uniaxial de deformaciones elásticas donde se obtuvo el módulo de elasticidad axial y el coeficiente de Poisson. Por último, se tiene el valor de ángulo de fricción básico a partir del ensayo de Tilt Test propuesta por el ISRM (Alejano et al., 2018), para ver los resultados ir a la Tabla N°7.

## Discusión

La muestra el resumen de los resultados de las propiedades físicas, resistentes y/o mecánicas caracterizadas de la ignimbrita del Aeropuerto blanca (sillar). Estos resultados deben ser tomados con cuidado debido a la heterogeneidad que presenta este tipo de roca volcánica donde el grado de soldadura, el porcentaje de pómez (fiamme) y el porcentaje de fragmentos líticos puede variar horizontalmente y verticalmente produciendo un cambio en los valores de las propiedades obtenidas.

Esto último se puede evidenciar en la diferencia de compresión uniaxial obtenido usando el Martillo de Schmidt y el ensayo de compresión uniaxial. Las diferencias podrían deberse a la baja resistencia de la roca que influye en el comportamiento del rebote en el martillo de Schmidt. Ahora los ensayos de compresión muestran una media de 10.16 MPa de resistencia uniaxial con una desviación estándar de 1.37 MPa. Mostrando a la ignimbrita de Añashuayco como una roca blanda respecto a los resultados del martillo de Schmidt que muestra como una roca moderadamente resistente. En cuanto a los ensayos de ultrasonido se obtuvo resultados del módulo de elasticidad longitudinal o de Young de 3.589 GPa, Al compararlo con el valor obtenido de Lara G. (1988) se reconoce una gran diferencia.



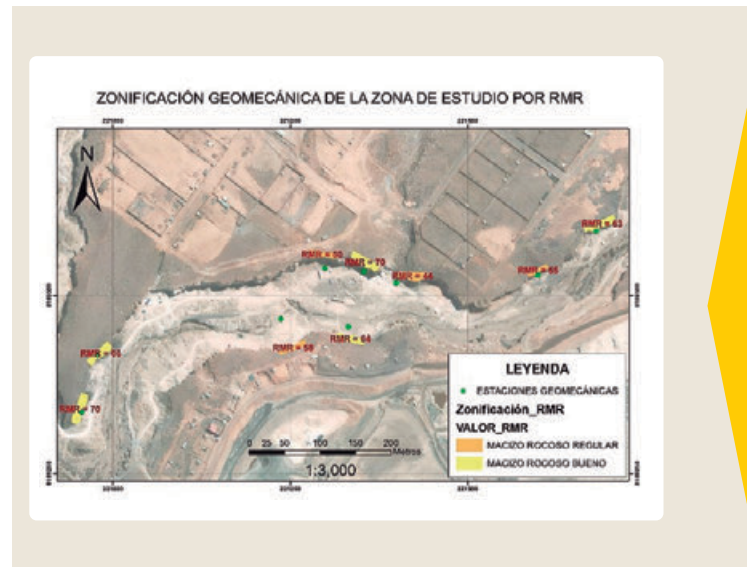
El módulo de rigidez obtenido confirma el comportamiento dúctil del material, que es reflejado en su gran trabajabilidad para ser moldeado o tallado por los artesanos de la zona. La relación de Poisson nos muestra ante cargas externas la muestra se deforma axialmente en una relación aproximada de 10 a 1 con respecto a la deformación lateral, esto producido por su elevada porosidad y fabrica.

De acuerdo con el ensayo de ultrasonido, en función de la velocidad longitudinal obtenida, se determinó el índice de calidad IQ propuesto por Fourmaintraux (1976), lo cual nos muestra que la ignimbrita en estudio tiene un Índice de Calidad relativamente bajo aparentemente por su alta porosidad y heterogeneidad que son los rasgos medidos por este tipo de análisis.

Respecto al macizo rocoso con el mapeo Geomecánico por ventanas y los resultados se zonifico la zona de estudio (Ver ) para identificar las zonas de menor calidad del macizo rocoso de las paredes de la quebrada. Se observa que existen zonas con valoración cercana al rango malo donde se debe prestar mayor atención, pero predomina la valoración buena y regular. En las zonas de menor valoración se tiene un intenso fracturamiento local que podría

afectar a los turistas e infraestructura del lugar. Siendo necesario tomar medidas de mitigación como remover los bloques de sillar ubicados o medidas de prevención como colocar sostenimiento local apropiado.

Además, la zonificación tiene como utilidad ser la base para un estudio de riesgos teniendo en cuenta el nivel de peligro y vulnerabilidad.



► Fig.3 Zonificación Geomecánica de la zona de estudio por RMR.

## CONCLUSIONES

El Macizo Rocosos de Añashuayco se puede clasificar geomecánicamente como un macizo da calidad regular a buena calidad, mostrando zonas con variaciones con RMR entre 44 -70, un índice RQD entre 50-75% que implica que es un macizo de calidad regular a buena.

La roca muestra un índice de calidad IQ de 29,97%, producto de su heterogeneidad y elevada porosidad. Podemos mencionar que a pesar de este resultado la calidad del macizo rocoso se ve como alentadora, aunque el mayor fracturamiento de algunas zonas unido a la baja resistencia y calidad de esta roca afectarían de forma negativa el comportamiento del Macizo Rocosos.

La resistencia, que geomecánicamente hablando una de las principales propiedades, se muestra con un valor promedio de 10.16 MPa y una desviación estándar de 1.37 MPa que indican que la ignimbrita es una roca blanda.

El módulo de Young de 3.589 GPa, implica que es una roca Dúctil, lo cual se refleja en la facilidad de ser tallada.

Dentro de sus propiedades físicas muestra una densidad de 1178 Kg/m<sup>3</sup> y un peso específico de 11,65 KN/m<sup>3</sup>, que se relacionan de manera adecuada con su baja resistencia.

Finalmente se puede corroborar que los constituyentes de las ignimbritas de la zona de estudio, predominan fenocristales de plagioclasas 10%, biotitas 3%, líticos (8%), pómez (3%) y la matriz conforma el 74%, en relación a los

fenocristales y la matriz para la caracterización, Además se evidencian fragmentos líticos volcánicos piroclásticos sin alteración, se observa un comportamiento de composición ácida de dacítica a riolítica. Lo que indica que se trataría de la misma composición de la fuente de emisión del flujo piroclástico.

#### AGRADECIMIENTOS

Se agradece amablemente al área de geotecnia de la UNSA, a su laboratorio por su apoyo y motivación al estudio Geomecánico en las canteras de Añashuayco.

#### REFERENCIAS

- ▶ Alvarez P. M. (2021). Caracterización Petromineralógica de las ignimbritas en la Quebrada de Añashuayco, Arequipa, pp 73-153.
- ▶ Alejano, L. R.; Muralha, J.; Ulusay, R.; Li, C. C.; Pérez- Rey, I.; Karakul, H.; Chryssanthakis, P. & Aydan, Ö. (2018). ISRM Suggested Method for Determining the Basic Friction Angle of Planar Rock Surfaces by Means of Tilt Tests. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(12), 3853–3859. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1627-6>
- ▶ ASTM International (2005). ASTM D 5873. Standard test method for determination of rock hardness.
- ▶ Aydin, A. (2009). ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(3), 627–634. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.01.020>
- ▶ Aydin, A. (2013). Upgraded ISRM Suggested Method for Determining Sound Velocity by Ultrasonic Pulse Transmission Technique. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(1):255–259. <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0454-z>
- ▶ Brown, E. T., & International Society for Rock Mechanics. (1981). *Rock characterization, testing & monitoring: ISRM suggested methods*. Oxford: Published for the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics by Pergamon Press.
- ▶ Fourmaintraux, D. (1976), "Characterization of rocks; laboratory tests: Chapter IV in *La Mécanique des roches applique aux ouvrages du génie civil* by Marc Panet et al.", Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- ▶ Lara G., J. (1988). *Ensayos de Albañilería en Sillar*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú Facultad de Ciencias e Ingeniería. pp 22-243
- ▶ Palmstrom, A. (2005). Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20:362-377. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.01.005>
- ▶ Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. (1979). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 16(5), 102. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(79\)90262-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(79)90262-6)

## Ruta del Sillar: Quebrada de Añashuayco, Arequipa - Perú

Nélida Manrique<sup>1</sup>, Carla Arias<sup>1</sup>, Benjamin Van Wyk de Vries<sup>2</sup>, Rigoberto Aguilar<sup>1,2</sup>, Carla Palacios<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, Urb. Magisterial 2 B-16, Yanahuara, Arequipa, Perú

<sup>2</sup> Université Clermont Auvergne, Laboratoire Magmas et Volcans UMR 6524 CNRS, OPGC, IRD, Campus Universitaire des Cézeaux, 6 Avenue Blaise Pascal, 63178 Aubière Cedex, France

**Palabras clave:** Ruta del sillar, Ignimbrita, Chachani

### INTRODUCCIÓN

Arequipa es la segunda ciudad más poblada del Perú, y en los últimos años ha experimentado un crecimiento poblacional acelerado, sin considerar un plan urbano, lo que ha conllevado al asentamiento de ~25% del millón de habitantes en zonas de alto y moderado peligro por su cercanía a los volcanes Misti y Chachani. El centro histórico de la ciudad (casco antiguo), reconocida por la UNESCO como Patrimonio Cultural de la Humanidad, está construido con rocas volcánicas (sillar) que le dan a la ciudad una peculiaridad arquitectónica. Estas rocas provienen de los depósitos de ignimbritas producto de erupciones explosivas voluminosas (Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa).

Con la finalidad de promover espacios con interés geológico que se conviertan en herramientas para la educación, difusión y comunicación de los peligros relacionados a la actividad volcánica, el Proyecto GA17F "Estudiar y Evaluar los peligros asociados a los volcanes Chachani y Casiri" del INGEMMET y el proyecto IGCP 692 "Geopatrimonio para la resiliencia ante peligros naturales" propusieron 6 geositos pilotos cercanos a la ciudad: 1) las canteras de sillar, donde afloran las Ignimbritas Aeropuerto de Arequipa, que han jugado un rol importante en el desarrollo de la ciudad y se han convertido en un atractivo turístico en potencia. 2) Valle del río Chili, donde se observan afloramientos de la Ignimbrita Río Chili y depósitos volcanoclasticos del Misti y Chachani. 3) Mirador de los volcanes Misti y Chachani, localizado en el borde norte del cañón del río Chili, desde el cual, se observa la base de ambos volcanes. 4) Volcán monogenético Nicholson. 5) Campo Monogenético de Yura, localizados en pueblos tradicionales del distrito de Yura. 6) Domo Volcancillo, donde se

aprecian los depósitos más antiguos y más jóvenes del Complejo Volcánico Chachani.

De estos 6 geositos se ha realizado un trabajo más extenso y detallado en la "Canteras de Añashuayco", donde se explota el sillar. El presente resumen muestra los estudios realizados en las canteras donde se desarrollaron reuniones de comunicación con la "Asociación Turística de Cortadores y Artesanos

Ruta del Sillar Cantera Añashuayco", evaluación de peligros volcánicos, análisis de la percepción del peligro volcánico y valoración de la zona como geosito.

### Contexto geológico

Las canteras de sillar se localizan al suroeste del Complejo Volcánico Chachani en la que se explotan los depósitos de la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (IAA), la cual ha rellenado gran parte de la depresión de Arequipa entre los valles de los ríos Chili y Yura. La IAA (Fig 2) está constituida por una unidad blanca superpuesta por una unidad rosada (Paquereau-Lebti et al., 2006), que sobreyacen a la Ignimbrita "La Joya" (c. 4.9 Ma; Paquereau-Lebti et al., 2006; 2008).

La unidad blanca (Fig. 1) varía desde unas pocas decenas de metros hasta 150 metros de espesor, con un área de 400 km<sup>2</sup>, un espesor promedio de 40 m, y un volumen preservado de 15 - 20 km<sup>3</sup>. La unidad rosada forma la mayor parte de la superficie plana de la depresión de Arequipa de unos pocos metros hasta 50 m, un área de 600 km<sup>2</sup> y un volumen preservado de aproximadamente 5 km<sup>3</sup> (Paquereau-Lebti et al., 2006). La Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa tiene composición dacítica a riolítica y ha sido datada entre 1.66 Ma la unidad inferior (unidad blanca), y 1.63 Ma la unidad rosa superior.

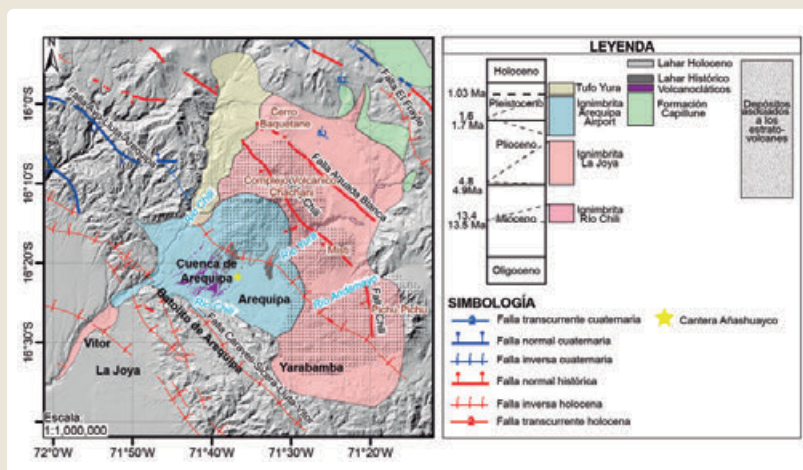
La geometría del afloramiento y las unidades regulares de inmersión en la cuenca por el lado sur del Complejo Volcánico Chachani indican que la IAA probablemente se originó a partir erupciones explosivas voluminosas que formaron una caldera que estaría por debajo del complejo volcánico Chachani. Esto es soportado por las mediciones de anisotropía de susceptibilidad magnética y litológicas contando fragmentos líticos cuyo tamaño disminuye

gradualmente de norte a suroeste de la unidad rosa (Paquereau-Lebti et al., 2008). Estudios geoquímicos y mineralógicos realizados por Aguilar et al. (2022) también soportan este argumento.

Gran parte de los depósitos de la ignimbrita, posteriormente fueron cubiertos por lahares, y depósitos de tefra de los volcanes Chachani y Misti (Fig.3).



► Fig. 1 Quebrada Añashuayco donde se visualiza la unidad blanca de la ignimbrita Aeropuerto.



► Fig. 2 Mapa de distribución espacial de las ignimbritas de Arequipa (modificado de Paquereau-Lebti et al., 2006).

## METODOLOGÍA

### Valoración del geositio

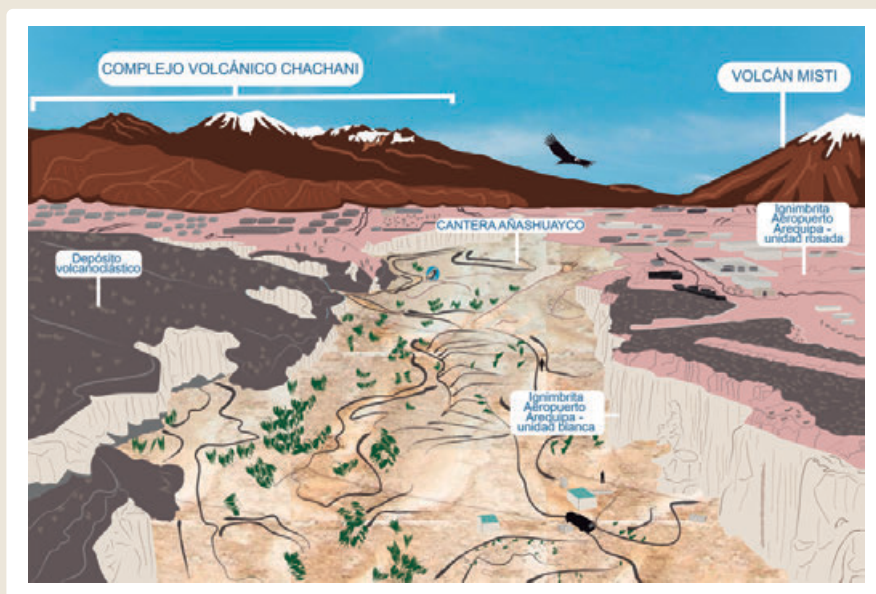
La valoración de geositios permite conocer características geológicas relevantes, además de su valor científico, educativo, turístico y cultural. Con este

estudio podremos conocer el grado de preservación y vulnerabilidad de los geositios, frente a amenazas naturales o antrópicas, para una posterior propuesta de estrategias de conservación y aprovechamiento sostenible.



Se adaptó una metodología a partir de las propuestas metodológicas de varios autores, e.g. Cendrero (1996), Carcavilla et al., (2007), las "Bases para el desarrollo común del patrimonio Geológico en los servicios geológicos de Iberoamérica", realizada por la Asociación de Servicios de Geología y Minería de Iberoamérica - ASGMI (2018); el libro de "Patrimonio Geológico y Geo-conservación"; la conservación de la naturaleza en su aspecto geológico por Brilha (2005, 2016), para ser aplicadas a nuestra zona de trabajo.

Esta metodología adaptada (Arias, 2021), consta de 2 etapas fundamentales (Fig. 4): inventario, cuantificación, además de 4 etapas post ejecución de los geositos: clasificación, conservación, divulgación y monitoreo (Brilha, 2005). Para poder conservar la quebrada de Añashuayco es necesario solicitar el apoyo de las autoridades y la población, tener un plan de desarrollo a corto y mediano plazo, realizar talleres para involucrar a la población, colocar paneles informativos sobre la geología y los peligros geológicos que pueden afectar el lugar.



► Fig. 3 Representación esquemática de la Ignimbrita Aeropuerto en la Quebrada Añashuayco.



► Fig. 4 Diagrama del proceso de valoración de geositos (Modificado de Brilha, 2005 en Arias, 2021)

Análisis de percepción de los peligros volcánicos en la quebrada Añashuayco

Para realizar el análisis de la percepción de los peligros volcánicos en la cantera de Añashuayco se realizaron 400 encuestas semiestructuradas a turistas que visitaron la cantera de sillar de Añashuayco y 62 encuestas a los canteros de Añashuayco, Culebrillas, Covarse 1 y Sr. de la Caña.

La toma de datos se realizó entre los meses de julio y agosto del 2021 y se procesaron con el programa Statistical Package for the Social Sciences (SPSS), generando gráficos de barras y tablas de frecuencia. Las encuestas para los canteros y los turistas tuvieron la misma distribución, sin embargo, algunas preguntas variaron. La encuesta dirigida a los canteros consta de

11 preguntas mientras que, de los turistas consta de 13. La primera parte de las encuestas está comprendida por los datos generales (edad, género, procedencia y tiempo de trabajo para los canteros y edad, género y lugar de procedencia en el caso de los turistas), la segunda parte comprende preguntas sobre conceptos básicos de los volcanes en la ciudad de Arequipa, la tercera parte está constituida por preguntas referidas a los peligros volcánicos y finalmente la cuarta parte está comprendida por recomendaciones y niveles de satisfacción al desempeñarse como cantero y de la visita a las canteras de sillar en el caso de los turistas.

## RESULTADO

### Valoración del geositio

En la evaluación cualitativa de la Cantera de Añashuayco, se ha tenido en cuenta su valor intrínseco, potencial de uso y necesidad de protección (Cendrero, 1996; Martínez, 2010), alcanzando un valor de 27 puntos. Lo resaltante de la evaluación es que, los valores científico y turístico son los más elevados entre los 6 geositios propuestos en Arequipa. De todas las canteras la más conocida es la Cantera de Añashuayco, con un potencial de uso regular; sin embargo, llegar a las otras canteras es mucho más complicado, ya que no existen vías conocidas ni señalización adecuada. Según su valor intrínseco, este geositio cuenta con más del 50% del valor total así que ya es considerado un geositio y se procede a su caracterización.

Para la etapa de cuantificación, para la evaluación del interés local a regional o nacional a internacional se

logró identificar que, de los geositios de Arequipa, las Canteras de Sillar obtuvo el mayor valor respecto a los geositios identificados preliminarmente en inmediaciones del CV Chachani, siendo así un geositio de gran interés nacional a internacional. Según su valor científico, uso potencial educativo y turístico, se obtuvo un ranking individual en el cual lideró también este geositio, demostrado así el gran potencial que posee en todos los aspectos, sin embargo, tomando en cuenta el riesgo de degradación, este se encuentra en un nivel alto por lo que necesita también de propuestas de geoconservación urgente.

Análisis de percepción de los peligros volcánicos en la quebrada Añashuayco

Según la encuesta realizada el rango de edad predominante oscila entre 40 y 49 años. El tiempo de trabajo es variable el 81% ha trabajado entre 13 y más de 30 años. El 58% de los canteros consideran al Misti, Chachani y Pichu Pichu como volcanes; el 50% respondió que si conoce los lahares volcánicos; un 47% define al lahar como mezcla de material volcánico con agua y solo el 57% considera que el sillar o ignimbrita se ha originado por los flujos piroclásticos de una erupción volcánica.

De los turistas que visitaron las canteras, los jóvenes de 20-29 años son los que tienen mayor concurrencia, con un 38,5%. El 53% de los turistas considera que el Misti, Chachani y Pichu Pichu son volcanes; el 35% define correctamente al lahar como la mezcla de material volcánico con agua y el 81% considera que el sillar se ha originado por los flujos piroclásticos de una erupción volcánica.

## CONCLUSIONES

La quebrada de Añashuayco es apta para ser considerada como un geositio y tiene un potencial nacional a internacional, un alto valor científico, un gran interés geológico, alto potencial turístico y alto potencial educativo.

Según el riesgo de degradación se encuentra en un nivel alto por lo que necesita también de propuestas de geoconservación urgente por ser un geositio de gran valor e interés.

Las canteras de Sillar como geositio pueden contribuir a la gestión de riesgo volcánico en la ciudad de Arequipa, ya que cada año en época de lluvia se desencadenan lahares que afectan la mayoría de las quebradas que descienden por el flanco sureste del CV Chachani.

## REFERENCIAS

- ▶ Aguilar, R.; Thouret, J.; Samaniego, P.; Wörner, G.; Jicha, B.; Paquette, J.; Suaña, E. & Finizola, A. (2022). Growth and evolution of long-lived, large volcanic clusters in the Central Andes: the Chachani volcano Cluster, southern Peru. *J Volc Geoth Res*, 426, 107539
- ▶ Arias, C. (2021) Recursos geoturísticos generados a partir del impacto de la erupción del volcán Huainaputina del año 1600 d.C. como patrimonio geológico [Tesis de ingeniero geólogo]. Universidad Nacional del Altiplano.
- ▶ Asociación de servicios de geología y minería de Iberoamérica – ASGMI. (2018). Bases para el desarrollo común del Patrimonio Geológico en los servicios geológicos de Iberoamérica. Salta, Argentina: Propuesta metodológica aprobada en la XXIV asamblea general de ASGMI.
- ▶ Brilha, J. (2005). Patrimonio Geológico e Geoconservação: A Conservação da Natureza na sua Vertente Geológica, Braga, Palimage Editores.
- ▶ Brilha, J. (2016). Inventory and Quantitative Assessment of Geosites and Geodiversity Sites: A Review. *Geoheritage*. pp.120-130.
- ▶ Carcavilla, L.; Lopez, J. & Duran, J. (2007). Patrimonio geológico y geodiversidad: investigación, conservación, gestión y relación con los espacios naturales protegidos. Madrid, Spain: Instituto Geológico y Minero de España, 360 p.
- ▶ Cendrero, A. (1996). El patrimonio geológico. Ideas para su protección, conservación y utilización. En *Patrimonio Geológico. Bases para su valoración, protección, conservación y utilización*. Madrid, 17 – 38 p.
- ▶ Martínez, P. (2010). Identificación, caracterización y cuantificación de geositios, para la creación del I geoparque en Chile, en torno al Parque Nacional Conguillío. Memoria, Universidad de Chile, Santiago, 34 – 154 p.
- ▶ Paquereau-Lebti, P.; Thouret, J.-C.; Wörner, G. & Fornari, M. (2006) - Neogene and Quaternary ignimbrites in the area of Arequipa, southern Peru: stratigraphical and petrological correlations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 154(3-4): 251-275.
- ▶ Paquereau-Lebti, P.; Fornari, M.; Roperch, P.; Thouret, J.-C. & Macedo, O. (2008). Paleomagnetic, magnetic fabric properties, and  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  dating, of Neogene - Quaternary ignimbrites in the Arequipa area, Southern Peru. Flow directions and implications for the emplacement mechanisms. *Bull Volc.* 70: 977- 997
- ▶ Pereira, P.; Pereira, D.; Alves, C. (2007). Avaliação do Património Geomorfológico: proposta de metodologia. *Geomorphological heritage assessment: a methodology proposal*. Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos. Volume V, APGeom, Lisboa, p. 235-247.

# Proyecto Geoparque Pillanmapu: Estrategias de Gobernanza local para la resiliencia ante escenarios multiamenaza en Chile Central

Felipe Orellana<sup>1</sup>, Rodrigo Pérez<sup>2</sup>, Carlos Rungruangsakorn<sup>3</sup>, Emil Stefani<sup>2</sup>, Cristobal Salazar<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Básicas, Universidad Católica del Maule, Talca, Chile faorellana@ucm.cl

<sup>2</sup> Fundación Geoparque Pillanmapu

<sup>3</sup> Universidad Autónoma de Chile.

<sup>4</sup> Universidad Católica de Temuco

**Palabras clave:** Multiamenaza, Geositios, Transdisciplina, Maule.

## INTRODUCCIÓN

Aproximadamente a 272 km al sur de Santiago de Chile se encuentra la región del Maule, territorio con una gran geodiversidad cordillerana, siendo objeto de interés científico, particularmente en la comuna de San Clemente – 4.504 km<sup>2</sup> de superficie y 41.366 habitantes – por albergar importantes volcanes, que si bien, por más de 5 décadas han estado sin variaciones (o en alerta verde) representan un alto riesgo asociado (Descabezado Grande #19, Quizapu #10 según el Ranking de Riesgo Específico de la Red de Vigilancia Volcánica del SERNAGEOMIN).

A ellos contrasta la inestabilidad presente en el Complejo Volcánico Laguna del Maule (CVLdM, #27 Ranking de Riesgo Específico), lo que permite afirmar que se encuentra por sobre su línea base, siendo una de las tres Alertas Amarillas volcánicas en Chile durante el 2021. El acceso principal a esta comuna se da en dirección este por la Ruta pavimentada CH-115 o Paso Internacional Pehuenche, donde se recorre toda la Región hasta la frontera con la República de Argentina. Lo anterior hace a esta comuna un territorio clave, junto a otras 5 más (Romeral, Curicó, Colbún, Molina y Linares), para ser reconocidas como un Geoparque Mundial UNESCO.

Dada su naturaleza multiamenaza, la consolidación del proyecto Geoparque Pillanmapu (Fig. 1) permite desarrollar un modelo de gestión territorial que establece una línea base de acciones, consagrando el desarrollo de un modelo de gobernanza 'Ciencia-Sociedad', que integre a los actores clave tanto del sector público como privado, llegando a tomadores de decisiones a nivel local y regional, fomentando, así, la

resiliencia y sostenibilidad en los territorios de Montaña de la región.

## Contexto Global

Chile se emplaza en un margen activo, en el Cinturón de Fuego del Pacífico; lo suficientemente largo y angosto para presentar ecosistemas montañosos como costeros, territorios áridos, semi-áridos y boscosos.

Es propenso a la desertificación, a la sequía, pérdida de biodiversidad y contaminación atmosférica, y con una alta susceptibilidad a desastres siconaturales. Todas características que, conjugadas, ubican a Chile en el lugar 25 en índice de Riesgo Climático Global (Eckstein et al. 2021).

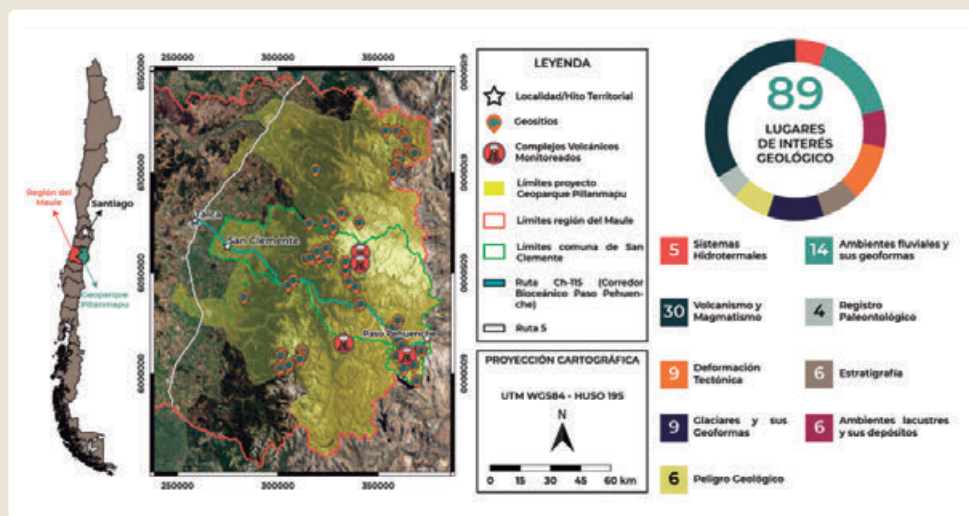
A esto se suma la inequívoca influencia antrópica durante, al menos, los últimos 170 años, lo que ha generado impactos irreversibles en nuestro planeta a escala humana (IPCC, 2022), dado que, la riqueza humana se basa en el uso y el consumo de los recursos naturales, y el continuo aumento de este hecho y de los impactos ambientales relacionados a ello pueden tener variados efectos negativos que conduzcan a crisis ecológicas y amenazas a la seguridad. Por ello, el uso y la gestión sostenible de los recursos naturales han cobrado protagonismo y han sido objeto de numerosos debates políticos a lo largo de décadas, empezando por la cumbre Medioambiente y Desarrollo en Río de Janeiro de 1992 (Moll et al., 2005).

El actual contexto de Crisis Ambiental Global refuerza la necesidad de acelerar estrategias de acción directa y eficaz, bajo una perspectiva territorial que permitan



desarrollar estrategias "Bottom up" cuestión que se viene planteando desde la Agenda Local 21 (Naciones Unidas, 1992). Estos principios fueron reafirmados en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Desarrollo Sostenible - Rio+20 - celebrada en el 2012, poniendo en valor la acción local para generar cambios sostenidos y que se ajusten estrategias de gobernanza bajo una mirada sostenible.

Asimismo, instrumentos como el Marco de Acción de Hyogo y su sucesora, el Marco de Sendai, presentan entre sus prioridades de acción el fortalecer la Gobernanza de la Gestión del Riesgo del Desastres invirtiendo en ella para apuntar a una mayor resiliencia, todo suscrito además dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en la mayoría de sus 169 metas.



► Fig. 1 Distribución de geositios identificados y categorizados, y de complejos Volcánicos monitoreados, en la Comuna de San Clemente, Proyecto Geoparque Pillanmapu.

### Contexto Local

Por una parte, la actividad geológica de los Andes del Maule trae consigo un registro de eventos volcánicos manifestado en su diversidad geológica (Geodiversidad), posicionando a sectores como el Paso Pehuenche como un modelo que da cuenta del riesgo de desastres en territorios de montaña. Mientras que, por otra parte, la Geodiversidad converge con otras dimensiones indisolubles para la gestión integrada del territorio, pues sustenta una biodiversidad considerada uno de los 25 Hotspot mundiales para los ecosistemas del clima mediterráneo (Andrasanu, 2006; Myers et al. 2000) y ha definido el estilo de vida de grupos humanos prehispánicos desde hace 8000 años que han utilizado los recursos geológicos como la obsidiana para la confección de herramientas (Duran et al., 2004).

Adicionalmente, y dada la virtud del Paso Pehuenche como un corredor binacional y que conecta el Pacífico con el Atlántico, se presenta una oportunidad de relevancia para quienes conforman el territorio, entre ellos quienes habitan la comuna de San Clemente. En este caso, la generación de conocimiento bajo un modelo de gobernanza Ciencia-Sociedad, en la cual se trabaje de manera coordinada con el Municipio y la comunidad, permite generar un modelo de gestión territorial desde una perspectiva sostenible que permita incidir en las políticas públicas a nivel local, desarrollando modelos funcionales y replicables a nivel regional y nacional (alineadas a la Agenda 2030).

Esta ruta tiene importantes implicancias para un desarrollo integrado de la comunidad, entregando ventajas comparativas para realizar investigación y desarrollo científico, permitiendo integrar distintas áreas del conocimiento, generando sentido de

pertenencia e identidad local, creando un relato que une ciencia, historia, cultura y tradición. Esto genera externalidades positivas en su entorno (spillovers), tales como el incremento en el capital humano, tecnológico y social, desarrollo de universidades y otros centros de investigación, intercambio de experiencias de transferencia tecnológica, creación de nuevos emprendimientos y desarrollo del turismo, entre otras (Aguilera y Larraín, 2016).

En consecuencia, la Comuna de San Clemente y en particular el Corredor Bioceánico Paso Pehuenche, constituye uno de los mejores modelos conocidos a nivel nacional para abordar la temática de desastres en territorios cordilleranos, al verse expuestos a amenazas posibles de encontrar tanto en el norte de Chile como en la zona sur. Esto, dota de versatilidad al territorio para ser abordado integralmente como un laboratorio natural de cualquier tipo (Aguilera y Larraín, 2018), con énfasis en desastres siconaturales, además de su vínculo con otras tipologías de laboratorios naturales.

### Patrimonio Local

La complementariedad entre la variedad de elementos Geológicos presentes como registro de la evolución de la Tierra, la flora y fauna en el territorio, conforman el Patrimonio Natural de la Región del Maule. El patrimonio Geológico (Geopatrimonio) se constituye por un conjunto de lugares con elementos

geológicos de relevancia y valor especial, los cuales son vestigios clave para reconstruir el pasado, comprender el presente y predecir el futuro (Schilling et al., 2012), reconociendo un importante valor en el ámbito científico, educativo, turístico y/o cultural. Eluso del patrimonio geológico en conexión con los demás aspectos del patrimonio natural y cultural es considerado una herramienta fundamental para aumentar la comprensión de los principales conflictos que enfrenta la sociedad, como el aprovechamiento sostenible de los recursos, la mitigación de los efectos del cambio climático y la reducción del impacto de los desastres (UNESCO, 2017).

Ese cruce en el Patrimonio Natural, de ciencias biológicas y geológicas, se potencia al incorporar una mirada integral y con foco en la innovación, donde exista una coordinación de voces expertas, que sitúen la investigación más allá de la preservación entendiendo que esa diversidad pone al territorio en un escenario altamente vulnerable, considerando su condición multiamenaza (de peligros Geológicos, hidrometeorológicos o antrópicos), y el grado de exposición de quienes los habitan (sean humanos u otras especies). Estas voces expertas no pueden venir únicamente de las universidad y centros de investigación, deben surgir del mundo privado y también del mundo público, como el saber local de las y los habitantes del territorio para potenciar la transdisciplinariedad.



► Fig. 2 Geositio de las Mesetas escalonadas del Valle de los Cóndores, San Clemente, Región del Maule. Fotografía de Pablo Cifuentes. Proyecto Geoparque Pillanmapu.

### Escenario Multiamenaza

Como principal amenaza en el territorio se reconoce la de Riesgo Volcánico, donde ha cobrado cierta popularidad durante los últimos años el Complejo Volcánico Laguna del Maule (CVLdM, #27 Ranking de Riesgo Específico), destacando por su singularidad, siendo un caso de estudio único en el mundo. Presenta más de 40 centros eruptivos (Hildreth et al. 2021), tanto monogenéticos como poligenéticos, registrando erupciones explosivas y efusivas (Contreras, 2020), llamando la atención de distintos centros de investigación a nivel nacional e internacional.

Adicionalmente el territorio se encuentra expuesto a diversos riesgos hidrometeorológicos (Remociones en Masa, Aluviones, Avalanchas de nieve, sequía entre otros) que lo hacen vulnerable a otras amenazas como incendios forestales. En consecuencia, gran parte del territorio a lo largo de la Ruta CH115 - Paso Internacional Pehuenche, y principal vía de evacuación, se ve expuesto a escenarios multiamenaza que requieren la comprensión de los procesos relacionados con el ciclo del riesgo en materia de prevención, respuesta, recuperación y mitigación (De la Llera et al. 2018 en Laboratorios Naturales para Chile de Aguilera y Larraín).

Esta ruta se ha consolidado en los últimos años como un nodo de articulación y destino turístico emergente a nivel regional, lo que se evidencia en las 156.992 personas que atravesaron por el Paso Fronterizo Pehuenche (Salinas, 2017) y en los 85.996 visitantes que subieron al sector Lo Aguirre en temporada invernal de 2019 (Gobernación de Talca, 2019). No obstante, el territorio carece de infraestructura e información que permita el desarrollo de un turismo seguro y sostenible, pese a contar con un recurso turístico y patrimonial con potencial de posicionar el turismo maulino ante mercados nacionales e internacionales. Este diagnóstico se condice con la "Estrategia Regional de Innovación" (Gobierno Regional del Maule, 2021) y la "Política Pública de Turismo de la Región del Maule" (Gobierno Regional del Maule, 2020), los que establecen al turismo de montaña, y con ello al Paso Pehuenche, como ejes estratégicos de desarrollo y competitividad regional.

### El paso Pehuenche como Laboratorio Natural

Laboratorios Naturales 'Tipo I' de la ruta Ch-115, Corredor Bioceánico Paso Pehuenche

Las condiciones geográficas de altas pendientes, la ubicación en una zona amenazada por 4 de los 45 volcanes considerados actualmente monitoreados a nivel nacional y la susceptibilidad a crisis hídrica ante el cambio climático en la cuenca de mayor productividad agrícola e hidroeléctrica a nivel regional hacen de la ruta al Paso Internacional Pehuenche un caso de estudio relevante de fomentar dada su capacidad de impulsar investigación aplicada y transdisciplinar, potenciando la generación de nuevas vertientes disciplinares.



► Fig. 3 Cráter Volcán Quizapu., San Clemente, Región del Maule. Fotografía de Nicolas Mendoza. Proyecto Geoparque Pillanmapu.

Uno de los riesgos de desastres más relevantes en los últimos años ha sido el riesgo volcánico asociado al CVLdM, y que ha atraído a cientos de investigadores de todo el mundo para comprender las implicancias de un ícono mundial dada su singularidad. Otro ícono de la ruta Ch-115 corresponde al Volcán Quizapu (Fig. 3) ubicado en el límite de la Precordillera con la Cordillera Andina, el cual generó la erupción efusiva más voluminosa de Chile durante el siglo XIX, y la erupción más violenta de Chile durante el siglo XX, siendo la quinta más explosiva a nivel mundial para el mismo siglo (Hildreth y Drake, 1992). La erupción del Quizapu de 1932 generó un impacto ambiental, social y económico catastrófico al cubrir más de 90.000 ha de



material volcánico, generando la muerte de la flora y fauna silvestre y de miles de vacunos y caprinos en Argentina.

Por otra parte, estos procesos volcánicos se encuentran estrechamente ligados a otros laboratorios naturales (Aguilera y Larraín, 2018), siendo el de las energías renovables ligado a la producción hidroeléctrica la más importante. La cuenca del Maule posee la mayor producción de energía hidroeléctrica del país a través de sus 11 centrales, convirtiendo al río Maule en una de las cuencas más intervenidas a nivel nacional en número de centrales de embalse y pasada (Carrasco, 2019). Desafortunadamente, el riesgo de crisis climática amenaza directamente la sostenibilidad de este tipo de energía, mientras que las centrales hidroeléctricas Los Cóndores, Río Colorado y Cipreses se encuentran dentro de los polígonos amenazados por el riesgo volcánico (IDE, 2021).

#### **Laboratorios Naturales 'Tipo II' de la ruta Ch-115, Corredor Bioceánico Paso Pehuenche**

La resiliencia en territorios de montaña exige desafíos mayores considerando la exposición multiamenaza (de peligros Geológicos, hidrometeorológicos o antrópicos), y el grado de exposición de quienes los habitan (sean humanos u otras especies). En este contexto, no solo basta con perseguir la captación de una masa crítica de investigadores y emprendedores que generen impacto internacional (De la Llera et al. 2018), sino que se deben destinar esfuerzos a la captación de una masa crítica de expertos que puedan desarrollar de manera transdisciplinar, investigación aplicada a la reducción del riesgo de desastres. Un aspecto relevante para considerar es que la transdisciplinariedad en el campo de la gestión de desastres posee la particularidad de exigir la participación de actores públicos y privados, y sobre todo las comunidades locales, pues son estas las que se ven afectadas por los eventos.

El cruce disciplinar que impulsa la temática de desastres permite a su vez constituir un catalizador del perfeccionamiento de nuevas áreas de investigación. Un ejemplo de aquello es el vínculo entre elementos del patrimonio geológico con el arqueológico, donde las canteras de obsidiana de la Laguna del Maule dan cuenta que, si bien el complejo volcánico constituye

un elemento de riesgo, este ha sido utilizado desde épocas prehispánicas para el desarrollo de herramientas, cruzándose así con el Laboratorio Natural del Poblamiento de América propuesto por Aguilera y Larraín. Otro ejemplo para destacar es el vínculo con la producción hidroeléctrica en la cuenca del Maule, la cual posee 11 centrales en el área de intervención de la presente iniciativa (Carrasco, 2019), pero 4 de estas se encuentran amenazadas por riesgo volcánico y la totalidad por el riesgo climático que amenaza la productividad. De esta manera, la temática de Desastres presenta puntos de interrelación con las Energías Renovables, otro laboratorio natural propuesto (Aguilera y Larraín, 2018); lo cual cobra relevancia en un contexto de cambio climático en el cual se busca avanzar hacia el desarrollo sostenible en línea con la Agenda 2030 de las Naciones Unidas.

#### **Laboratorios Naturales 'Tipo III' de la ruta Ch-115, Corredor Bioceánico Paso Pehuenche**

Dada la virtud del Paso Pehuenche de ser un corredor bioceánico que conecta la región del Maule (Chile) con la provincia de Malargüe (Argentina), la ruta CH- 115 constituye el principal nodo articulador y polo de desarrollo económico regional. Esta ruta, y la cuenca del río Maule en sus porciones cordilleranas, sustentan una de las mayores fuentes de producción hidroeléctrica a nivel nacional a través de las 11 centrales de embalse y pasada (Carrasco, 2019). Por otra parte, de este río y la mantención de los embalses cordilleranos, accesibles gracias a la ruta Pehuenche, dependen 190.000 ha de riego para el sector agrícola, principal motor de desarrollo regional (Palma, 2018). Adicionalmente, en los últimos años el sector ha evidenciado un incremento acelerado de la actividad turística, la cual acude al sector por su entorno natural

vinculado al recurso hídrico y nival, alcanzando un total de 156.992 visitantes que accedieron por la ruta Ch-115 a través del Paso Fronterizo Pehuenche en 2016 (Salinas, 2017) y 85.996 visitantes que subieron al sector Lo Aguirre en temporada invernal de 2019 (Gobernación de Talca, 2019).

No obstante, la ruta CH-115 presenta diversos escenarios multi-amenaza por los desastres previamente mencionados, amenazando el modo de vida de una región. En este contexto, la presente



iniciativa busca proponer e implementar estrategias de socialización de los desastres a través de hitos

patrimoniales validados de manera participativa, avanzando así hacia sociedades resilientes.

### COMENTARIOS FINALES

La Comisión Nacional para la Resiliencia frente a Desastres de Origen Natural (CREDEN) define la Resiliencia como las "capacidades de un sistema, persona, comunidad o país expuestos a una amenaza de origen natural, para anticiparse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, para lograr la preservación, restauración y mejoramiento de sus estructuras, funciones básicas e identidad". En consecuencia, es necesario incorporar el I+D+i+e en el desarrollo de capacidades tanto técnicas como científicas comprendiendo así los desastres siconaturales en su contexto general, junto a la académica, el sector público y el sector privado. Pero para lograr que se consagre una estrategia

contundente deben involucrarse los diversos organismos de la Sociedad Civil como las diversas comunidades que habitan el territorio, permitiendo, así, anticiparse y recuperarse ante diversos eventos.

Es por tal motivo que las estrategias de Gobernanza a nivel local deben ser bajo un carácter transdisciplinar, que permita la evaluación del impacto desde un esfuerzo colectivo de todas aquellas personas involucradas con el territorio.

### AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a la Municipalidad de San Clemente y al Departamento de Gestión Ambiental Local del Ministerio del Medioambiente.

### REFERENCIAS

- ▶ Aguilera, J. M. & Larraín, F. (Eds.). (2018). Laboratorios Naturales para Chile: Ciencia e innovación con ventaja (1st ed.). Ediciones UC. <https://doi.org/10.2307/j.ctv14rmr8>
- ▶ Andrasanu, A. (2006). Basic concepts in geoconservation. In Z. Csiki (Ed.), Mesozoic and Cenozoic Vertebrates and Paleoenvironments – Tributes to the career of Dan Grigorescu. ED. Ars Docendi, p. 37-41
- ▶ Armesto, J. J.; Rozzi, R.; Smith-Ramirez, C. & Arroyo, M. T. (1998). Conservation targets in South American temperate forests.
- ▶ Contreras Hidalgo, C. (Author). (2020). Silicic Eruptive Transitions of Laguna del Maule
- ▶ De la Llera, J. C.; Rivera, F.; Gil, M. & Schwarzhaupt, Ú. (2018). Un gran laboratorio de resiliencia frente a desastres. En J.M. Aguilera y F. Larraín (Eds.), Laboratorios naturales para Chile, ciencia e innovación con ventaja. Ediciones Universidad Católica de Chile.
- ▶ Duran, V.; Giesso, M.; Glascock, M.; Nerme, G.; Gil, A.; & Sanhueza, L. (2004). Estudio de fuentes de aprovisionamiento y redes de distribución de obsidiana durante el Holoceno Tardío en el sur de Mendoza (Argentina). Estudios Atacameños (28), pp. 25-43.
- ▶ Eckstein, D.; Künzel, V. & Schäfer, L. (2021). GLOBAL CLIMATE RISK INDEX 2021.

- ▶ Gobernación de Talca (2019). Noticia: Más de 85 mil personas disfrutaron de la nieve en sector Lo Aguirre en vacaciones de invierno. Gobernación de Talca: Talca, Chile. Noticia disponible en : <http://www.gobernaciontalca.gov.cl/noticias/mas-de-85-mil-personas-disfrutaron-de-la-nieve-en-sector-lo-aguirre-en-vacaciones-de-invierno/>
- ▶ Gobierno Regional del Maule (2020). Política Pública de Turismo de la Región del Maule 2020. Gobierno Regional del Maule, Talca, Chile. Disponible en: <https://www.goremaule.cl/goremauleVII/wp-content/uploads/2021/05/Informe-Final-Politica-Publica-de-Turismo-Region-del-Maule.pdf>
- ▶ Gobierno Regional del Maule (2021). Política Pública de Turismo de la Región del Maule 2020. Gobierno Regional del Maule, Talca, Chile. Disponible en: <https://www.goremaule.cl/goremauleVII/wp-content/uploads/2021/03/Estrategia-Regional-de-Innovacion.pdf>
- ▶ Hildreth, Wes. (2021). Comparative Rhyolite Systems: Inferences from Vent Patterns and Eruptive Episodicities: Eastern California and Laguna del Maule. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 126. 10.1029/2020JB020879.
- ▶ Hildreth, W. & Godoy, Estanislao & Fierstein, J. & Singer, Brad. (2010). Laguna del Maule Volcanic and Eruptive history of a Quaternary basalt-to-rhyolite distributed volcanic field on the Andean range crest in central Chile. *Boletín Servicio Nacional de Geología y Minería*. 63.
- ▶ Hildreth, W., & Drake, R. E. (1992). Volcán Quizapu, Chilean Andes. *Bulletin of Volcanology*, 54(2), 93-125. Doi: <https://doi.org/10.1007/BF00278002>
- ▶ IPCC, (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- ▶ Moll, S.; Skovgaard, M.; & Schepelmann, P. (2005). Sustainable use and management of natural resources.
- ▶ Myers, N.; Mittermeier, R.A.; Mittermeier, C.G.; da Fonseca, G.A.B. & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403: 853-858.
- ▶ NACIONES UNIDAS. Agenda 21: Programa de Acción para el Desarrollo Sustentable. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio Ambiente y Desarrollo, Rio de Janeiro, 3- 14 junio, 1992. NACIONES UNIDAS.
- ▶ Palma, M. (2018). Propuesta de modificación convenio de operación embalse Laguna del Maule y sus efectos sobre los recursos disponibles para riego y generación hidroeléctrica [Tesis de pregrado]. Universidad Técnica Federico Santa María.
- ▶ Salinas (27-30 de junio de 2017). Avances en paso pehuenche y desafíos futuros [Sesión de conferencia]. Conferencia Internacional Sobre Vialidad Invernal, Mendoza, Argentina.
- ▶ Schilling, M.; Toro, K.; Contreras, P.; Levy, C.; & Moreno, H. (2012). Geoparque Kütralcura: Patrimoniogeológico para el desarrollo sustentable de la Región de la Araucanía. In Congreso Geológico de Chile No 13, Actas, T-10, Geopatrimonio: 893-895.
- ▶ UNESCO (2017). Los Geoparques Mundiales de la UNESCO: Celebrando el patrimonio de la Tierra, sosteniendo las comunidades locales. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, Oficina de París, Francia. Disponible en: [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000243650\\_spa](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000243650_spa)

## Geoparque Mundial UNESCO Kütralkura: Laboratorio natural para la educación sobre los peligros volcánicos

Manuel Enrique Schilling<sup>1</sup>, María Angélica Contreras<sup>2</sup>, Cristian Fariás<sup>3</sup>, Gabriela Tascón<sup>3</sup>, y Diego Partrariou<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile, Chile – manuel.schilling@uach.cl

<sup>2</sup> Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur, Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile

<sup>3</sup> Departamento de Obras Civiles y Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Temuco, Chile

<sup>4</sup> Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Chile

**Palabras clave:** Geoparque Mundial UNESCO Kütralkura, laboratorio natural, educación, peligros geológicos.

Los Geoparques Mundiales UNESCO (GMU) son territorios unificados que tienen un patrimonio geológico de relevancia internacional donde se promueve el desarrollo de las comunidades locales. En estos territorios se gestiona el patrimonio natural y cultural de manera holística, y sus pilares principales son la educación, la conservación y el geoturismo. Los GMU ubicados en zonas con volcanismo activo tienen un desafío particular en torno a la educación y gestión de los riesgos volcánicos. Este es justamente el caso de los tres GMU de Sudamérica que fueron certificados por la UNESCO el 2019: Imbabura en Ecuador; Valle del Colca y Volcanes de Andagua en Perú; y Kütralkura en Chile.

El GMU Kütralkura se ubica en la cordillera de los Andes de la Región de la Araucanía, en el sur de Chile, entre los 38°05'S y 39°38'S. Su territorio se extiende por más de 12.000 km<sup>2</sup>, se superpone parcialmente con la Reserva de Biósfera UNESCO Araucarias, contiene 6 áreas silvestres protegidas y se reconoce como un destino turístico emergente. Aquí se encuentran 6 volcanes activos que de norte a sur son Tolhuaca, Lonquimay, Llaima, Sollipulli, Quetrupillán y Lanín. La población es de aproximadamente 125.000 personas (Censo 2017), de las cuales cerca de 87.000 habitan zonas expuestas a peligros volcánicos (considerando que viven dentro del área definida por un radio de 30 km en torno a los volcanes activos). Esto representa un gran desafío para la educación y gestión del riesgo volcánico, que requiere una compleja coordinación entre diversos organismos públicos y la sociedad civil. En este trabajo presentamos las principales acciones realizadas por actores vinculados a la educación y la reducción del riesgo volcánico en este territorio, entre los que destacan la Asociación de

Municipalidades Cordilleranas de la Araucanía que es responsable de la gestión del GMU Kütralkura, el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) a cargo del monitoreo volcánico en tiempo real y de la zonificación de peligro en el país, la Oficina Nacional de Emergencia (ONEMI) encargada de la prevención y atención de emergencias y desastres, y varias universidades regionales que realizan diversas actividades de docencia, investigación y vinculación.

La actividad volcánica de esta zona está asociada a la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. El volcán más activo es el Llaima (3179 m; Fig. 1), que es considerado como el segundo volcán de mayor riesgo a nivel nacional por el SERNAGEOMIN después del volcán Villarrica (SERNAGEOMIN, 2019). Su último ciclo eruptivo fue el 2007-2009 y sus peligros principales son los lahares y la caída de ceniza (Moreno y Naranjo, 2003).



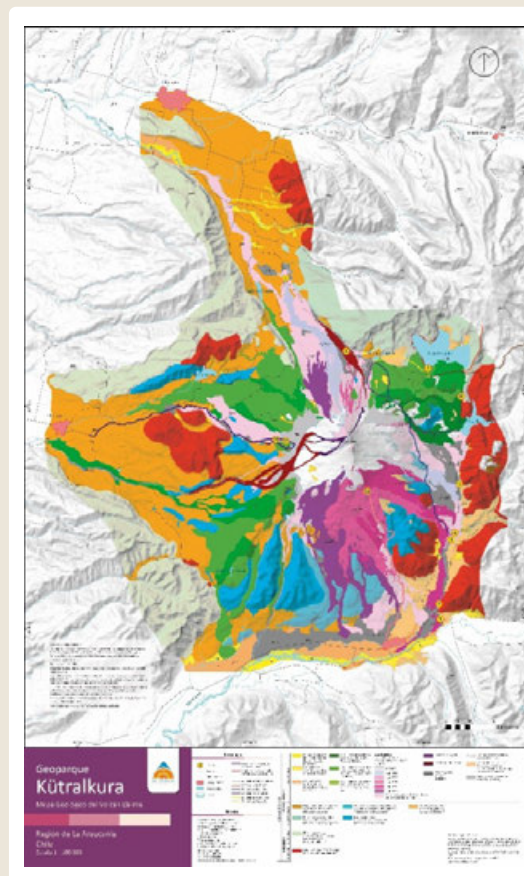
► Fig. 1 Volcán Llaima ubicado en el Parque Nacional Conguillío, al centro del GMU Kütralkura. Se observa una de las dos coladas de lava generadas durante la erupción de 1957, la cual se extendió por más de 10 km hacia el norte del volcán.

El volcán Lonquimay (2865 m) registra varias erupciones históricas, entre las que destaca la que comenzó el 25 de diciembre de 1988 y que duró 13 meses. Esta erupción dio origen al cráter Navidad y causó evacuaciones y graves problemas a la salud, especialmente de animales, debido a la caída de ceniza con inusuales concentraciones de flúor (Moreno y Gardeweg, 1989). El Sollipulli es un volcán tipo caldera excepcional, con un glaciar de 6x4 km de diámetro y espesores de hasta 500 m, el cual podría generar grandes lahares. Su última erupción fue hace unos 750 años y tuvo una erupción pliniana hace 2900 años que generó flujos piroclásticos y eyectó 7,5 km<sup>3</sup> de pómez (Naranjo et al., 1993). Los volcanes Tolhuaca, Quetrupillán y Lanín no registran erupciones históricas, pero si ocurridas durante el Holoceno, por lo que son considerados como activos. El monitoreo de 45 volcanes activos y la generación de información sobre la actividad volcánica en territorio nacional es responsabilidad del SERNAGEOMIN. Esta labor se realiza a través del Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS) ubicado en la ciudad de Temuco, muy cerca del límite occidental del GMU Kütralkura. Además, el SERNAGEOMIN provee información volcanológica a través de mapas geológicos y de peligros volcánicos, difusión mediante charlas y ferias, y el uso de tecnologías de la información.

Una de las primeras acciones realizadas en el GMU Kütralkura que tiene relación con su estrategia de geoconservación, es la identificación, caracterización, evaluación, divulgación y monitoreo de sitios de interés geológico (geositos). Los inventarios del patrimonio geológico de este territorio han permitido priorizar los sitios que pueden ser utilizados en actividades turísticas, educativas y de conservación (Martínez, 2010; Partarrieu, 2013; y Scherer, 2021). Recientemente, se realizó una actualización del inventario de sitios de interés natural y cultural por parte de un equipo de profesionales, guías locales, y funcionarios de las 7 municipalidades que integran este GMU. La gran mayoría de los cerca de 120 geositos inventariados, están asociados a procesos volcánicos y ofrecen excelentes oportunidades para educar sobre los peligros volcánicos a los habitantes y visitantes. La mayoría de estos geositos, junto con información de interés turístico, se encuentran en el

sitio web [www.kutralkura.cl](http://www.kutralkura.cl) y en la aplicación para dispositivos móviles Kütralkura, los cuales permiten acceder a información relevante para los visitantes del territorio.

Apartir de la puesta en valor del patrimonio geológico, el trabajo de guías locales, la colaboración con instituciones públicas y privadas, y el apoyo de académicos y académicas, se han logrado importantes avances en torno al desarrollo del geoturismo. Específicamente, diez geositos fueron implementados con paneles de interpretación y se remodeló el centro de información ambiental del parque nacional Conguillío, incluyendo en ambos casos antecedentes sobre los procesos y peligros volcánicos. También, se publicó el libro Geoparque Kütralkura: Guía Geoturística (Schilling et al., 2013)



► Fig. 2 Mapa geológico del volcán Llama incluido en la Guía Geoturística del Geoparque Kütralkura, donde se muestran los geositos asociados y los senderos que permiten visitarlos (modificado de Naranjo y Moreno, 2005).



donde se incluyó un mapa de peligros volcánicos del territorio y un mapa geológico del volcán Llaima (Fig. 2). Un hito destacado fue un diplomado ofrecido el 2021 a guías, empresarios y emprendedores turísticos del territorio que consideró contenidos relacionados con el riesgo volcánico. Eventos de gran importancia fueron el I y IV Simposio de Geoparques y Geoturismo en Chile realizados el 2011 en Melipeuco, y el 2022 en Temuco, respectivamente.

Respecto a las actividades dedicadas a la comunidad escolar y público general, se han realizado diversas iniciativas desde el año 2011. Un primer ejemplo fue el proyecto "Exploradores del volcán Llaima" ejecutado por la Sociedad Geológica de Chile y financiado por el Programa Explora. Más recientemente, se ofreció un curso en línea abierto a la comunidad, especialmente destinado a operadores turísticos, guardaparques, profesores, estudiantes universitarios y de enseñanza media, y organizaciones ciudadanas, entre otros. El objetivo fue compartir conocimientos sobre el patrimonio natural y cultural del GMU Kütralkura, los peligros geológicos existentes, evidencias e impactos del calentamiento global, y experiencias asociadas actividades turísticas, educativas y de conservación que promueven el buen vivir y el desarrollo sustentable del territorio. Adicionalmente, se ha elaborado material de apoyo para la realización de actividades educativas dentro y fuera del aula.

Paralelamente, las ferias de divulgación volcánica que organiza el SERNAGEOMIN a nivel nacional han tenido un positivo impacto en las comunidades locales. Dos de las doce ferias organizadas a la fecha se han realizado en el GMU Kütralkura: en Lonquimay el 2019 (Fig. 3), y en Melipeuco el 2021. Estas ferias consideran charlas, juegos y exposiciones interactivas que buscan crear conciencia ciudadana sobre los peligros volcánicos y la vulnerabilidad ante situaciones de emergencia. Por otra parte, se realizan visitas por parte de grupos de escuelas al OVDAS para conocer la tecnología y el trabajo que se realiza de manera continua para el monitoreo de los volcanes activos de Kütralkura y del país. Estas visitas fueron suspendidas durante la crisis de pandemia por Covid-19 y actualmente se están retomando. Adicionalmente, destacamos un primer estudio

destinado a estimar la influencia de actividades educativas en la percepción del riesgo volcánico realizado en dos establecimientos educacionales del GMU kütralkura (Queizal, 2022). Este trabajo debiera servir como base para realizar actividades similares en otras escuelas del territorio y contribuir a reducir el riesgo de desastres de origen volcánico.

Una actividad muy relevante fue el último simulacro de erupción del volcán Llaima realizado el 2021 en Melipeuco y comunas vecinas. Esta actividad fue liderada por la Oficina Nacional de Emergencias, en colaboración con las municipalidades, SERNAGEOMIN y la Corporación Nacional Forestal que está a cargo de las áreas silvestres protegidas. La actividad se realizó también en contexto de pandemia por Covid-19, por lo que la participación tuvo que ser restringida para respetar los aforos permitidos. La evaluación de la actividad fue positiva y sirvió para revisar y actualizar los planes de emergencia volcánica establecidos.



► Fig.3 Afiche de difusión de la 7ª Feria de Divulgación Volcánica organizada por SERNAGEOMIN con la colaboración del GMU Kütralkura y universidades regionales.

Finalmente, el GMU Kütralkura y los municipios que lo integran, realizan importantes esfuerzos en la planificación territorial y la gestión del riesgo de desastres. Esto se enmarca en un contexto de actualización del marco legal nacional, que establece el Sistema y Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres como una nueva institucionalidad para una sociedad más resiliente (Ley N°21.364). De esta manera, el GMU Kütralkura desarrolla acciones para el fortalecimiento institucional a nivel local en relación con los riesgos volcánicos y en el contexto de cambio climático, donde se incorporan amenazas asociadas a la variación del clima como son las remociones en masa, incendios forestales, sequía, inundaciones y nevazones intensas, entre otras. En la planificación estratégica para el periodo 2022-2026 del GMU Kütralkura se ha propuesto: la implementación de las unidades de riesgos y desastres según el nuevo marco legal; la actualización de los planes de riesgos volcánicos; realizar estudios de riesgos en todas las comunas asociadas; y conformar un grupo de trabajo sobre riesgos y desastres.

Entre los principales desafíos que tiene actualmente el GMU Kütralkura en relación con la educación y la gestión del riesgo volcánico, destacamos los siguientes:

**1)** La puesta en valor y protección legal de geositos que se encuentran fuera de las áreas silvestres

protegidas, en particular aquellos que permiten desarrollar actividades educativas y turísticas destinadas a aumentar la resiliencia frente a los peligros geológicos.

**2)** Mejorar la infraestructura turística incluyendo la implementación de nuevos paneles de interpretación, audio-guías, museos y centros de visitantes, mediante la cual se comunique información necesaria para la reducción de los riesgos naturales. Especialmente, se deben sociabilizar las zonas seguras e inseguras en caso de gatillarse erupciones volcánicas, y los puntos de encuentro transitorio definidos por ONEMI.

**3)** Ofrecer de manera periódica cursos de formación sobre el GMU Kütralkura, para contribuir a la formación permanente de personas relevantes asociadas al turismo, la comunidad escolar y otros actores relevantes en esta zona con volcanismo activo.

Avanzar en la planificación territorial integrada y participativa del GMU Kütralkura para la reducción del riesgo de desastres, teniendo en cuenta el nuevo marco legal que considera el principio de la prevención. Para esto se requiere que actores públicos y privados, junto con la comunidad organizada, aporten colaborativamente sus competencias y capacidades en aquellas fases del ciclo del riesgo de desastres en que tengan responsabilidades establecidas.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a cada una de las instituciones y personas que contribuyen de manera constante y comprometida con la reducción del riesgo volcánico en el GMU Kütralkura, y para el desarrollo sustentable de sus comunidades locales.

## REFERENCIAS

- ▶ Martínez, P. (2010). Identificación, caracterización y cuantificación de geositos, para la creación del I Geoparque en Chile, en torno al Parque Nacional Conguillío. [Memoria para optar al título de Geóloga]. Universidad de Chile.
- ▶ Moreno, H. & Gardeweg, M. (1989). La erupción reciente en el complejo volcánico Lonquimay (diciembre 1988), Andes del Sur. Revista Geológica de Chile, 16: 93-117.

- ▶ Moreno, H. & Naranjo, J.A. (2003). Mapa de peligros del volcán Llaima, Región de La Araucanía. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental 7, escala 1:75.000. Santiago.
- ▶ Moreno, H. (2000). Peligros del Volcán Quetrupillán, Regiones de La Araucanía y de Los Ríos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Serie Geología Ambiental, No. 30, 1 mapa escala 1:50.000. Santiago.
- ▶ Naranjo, J.; Moreno, H.; Emparan, C. & Murphy, M. (1993). Volcanismo explosivo reciente en la caldera del volcán Sollipulli, Andes del Sur (39° S). Revista Geológica de Chile. 20: 167-191.
- ▶ Naranjo, J.A. & Moreno, H. (2005). Geología del volcán Llaima, Región de La Araucanía. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 88: 33 p., 1 mapa escala 1:50.000, Santiago.
- ▶ Partarrieu, D. (2013). Inventario de geositios en la comuna de Lonquimay, para la creación del Geoparque.









**DIRECCIÓN**

Av. Canadá 1470, San Borja  
Telf.: 051-1-618-9800 Fax: 225-4540  
comunicacion@ingemmet.gob.pe

Síguenos en:



[www.gob.pe/ingemmet](http://www.gob.pe/ingemmet)

ISBN: 978-612-47898-3-0



9 1786124 789830