SECTOR ENERGÍA Y MINAS
INGEMMET
INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO

INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica
N° 78

Geología y Evaluación de Peligros del Volcán Sara Sara (Ayacucho)

Lima, Perú
2020

INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica
N° 78

Geología y Evaluación de Peligros del Volcán Sara Sara (Ayacucho)

Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico

Equipo de Investigación:

Marco Rivera Porras
Kevin Cueva Sandoval
Jean-Luc Le Pennec
Jessica Vela Valdez
Pablo Samaniego Eguiguren
Nélida Manrique Llerena
Yhon Soncco Calsina

Lima, Perú
2020

INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica
N° 78

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2020-09310

Nombre del autor(es). "Esta es una obra colectiva"

Razón Social: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET)
Domicilio: Av. Canadá N° 1470, San Borja, Lima, Perú
Primera Edición, INGEMMET 2020
Se terminó de imprimir el 11 de diciembre de 2020 en los talleres del INGEMMET

Tiraje: 50

© **INGEMMET**

Presidenta Ejecutiva: Susana Vilca Achata.

Gerente General: César Rubio Mori.

Comité Editor: Mirian Mamani Huisa, Lionel Fídel Smoll, Yorri Carrasco Pinares.

Dirección encargada del estudio

Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico: Lionel Fídel Smoll.

Unidad encargada de edición

Unidad de Relaciones Institucionales: Yorri Carrasco Pinares.

Revisión Técnica: Mirian Mamani Huisa, Jean-Luc Le Pennec.

Revisor Externo: Wolfgang Morche.

Corrección gramatical y de estilo: Consuelo Meza Lagos.

Diagramación: Erick Rodríguez Zelada.

Fotografía de la carátula: Vista panorámica del flanco oeste del volcán Sara Sara, sector del lago Parinacochas - Ayacucho.

Referencia bibliográfica
Rivera, M.; Cueva, K.; Le, J.; Vela, J.; Samaniego, P.; Manrique, N. & Soncco, Y. (2020) - Geología y evaluación de peligros del volcán Sara Sara (Ayacucho). *INGEMMET, Boletín, Serie C: G*eodinámica e Ingeniería Geológica*,* 78, 154 p., 2 mapas.

Publicación disponible en libre acceso en el Repositorio Institucional del INGEMMET. La utilización, traducción y creación de obras derivadas de la presente publicación están autorizadas, a condición de que se cite la fuente original ya sea contenida en medio impreso o digital (https://repositorio.ingemmet.gob.pe).

Los términos empleados en esta publicación y la presentación de los datos que en ella aparecen, son de exclusiva responsabilidad del equipo de investigación.

Contenido

RESUMEN **7**

ABSTRACT **9**

CAPÍTULO I **11**

INTRODUCCIÓN 11

1.1 UBICACIÓN 12

1.2 VÍAS DE ACCESO 14

1.3 OBJETIVOS 14

1.4 DOCUMENTACIÓN BASE 14

1.5 METODOLOGÍA DE TRABAJO 15

1.5.1 Primera Etapa: Trabajos de gabinete y recopilación de material bibliográfico 15

1.5.2 Segunda Etapa: Trabajos de campo 15

1.5.3 Tercera Etapa: Trabajos de gabinete y redacción del informe 16

1.6 ESTUDIOS ANTERIORES 16

1.7 CLIMA E HIDROLOGÍA 17

1.7.1 Temperatura 17

1.7.2 Precipitación 18

1.7.3 Hidrología 18

1.8 ASPECTO SOCIO-ECONÓMICO 20

1.8.1 Dato poblacional 20

1.8.2 Vivienda 21

1.8.3 Actividad económica 24

1.8.4 Obras de infraestructura 28

CAPÍTULO II **29**

GEOMORFOLOGÍA 29

2.1 GEOFORMAS DE ORIGEN VOLCÁNICO 29

2.1.1 Estratocono constituido de flujos de lava y domos (Es-la) 29

2.1.2 Ladera de flujo de lava reciente (L3-la) 32

2.1.3 Colinas y laderas constituidas por flujos de lava del Mioceno- Plioceno (C1-la) 32

2.1.4 Vertiente constituida por depósitos de avalancha de escombros (V-av) 32

2.1.5 Ladera de ignimbrita consolidada del Mioceno (L-ig) 33

2.1.6 Piedemonte constituido por flujos y caídas piroclásticas del Pleistoceno (P-fp) 34

2.1.7 Domos de lava (Do) 34

2.1.8 Altiplanicie constituida por lapilli de pómez (Pi) 34

2.1.9 Meseta constituida por flujos piroclásticos del Pleistoceno (M-fp) 35

2.1.10 Colinas de flujos de lava de la primera generación del Sara Sara (C2-la) 36

2.1.11 Ladera de depósitos volcanoclásticos (L-vcl) 36

2.1.12 Piedemonte constituido por depósitos volcanoclásticos (P-vcl) 37

2.1.13 Vertiente constituida de flujos piroclásticos del Pleistoceno (V-fp) 37

2.1.14 Ladera de flujos de lava del Pleistoceno (Formación Lampa) L2-la 37

2.1.15 Ladera de flujos de lava del Paleógeno (Grupo Tacaza) L1-la 38

2.1.16 Ladera de depósitos volcano-sedimentarios (Formación Chocolate) L-vs 38

2.2 GEOFORMAS DE ORIGEN GLACIAR....39
2.2.1 Cobertura glaciar....39
2.2.2 Geoformas de erosión....39
2.2.3 Geoformas de acumulación....41
2.3 OTRAS GEOFORMAS....41
2.3.1 Valles interandinos....41
2.3.2 Pampas....42
2.3.3 Colina de roca sedimentaria (Formación Hualhuani)....43

CAPÍTULO III....45
GEOLOGÍA....45
3.1 MARCO TECTÓNICO REGIONAL Y LOCAL....45
3.2 ESTRATIGRAFÍA DEL SUBSTRATO (PRE-SARA SARA)....47
3.2.1 Formación Chocolate (Jurásico inferior)....47
3.2.2 Formación Hualhuani (Cretáceo inferior) (Ki-hu)....47
3.2.3 Formación Tacaza (Oligoceno) (PN-Ta/An)....48
3.2.4 Formación Alpabamba (Mioceno inferior-superior)....49
3.2.5 Ignimbrita Caravelí (Mioceno)....49
3.2.6 Grupo Barroso (Mioceno-Pleistoceno)....50
3.2.7 Intercalación de depósitos volcanoclásticos y de corrientes de densidad piroclástica del Grupo Barroso....51
3.2.8 Flujos de lavas de la Formación Lampa (Pl-La)....51
3.3 ESTRATIGRAFÍA Y EVOLUCIÓN DEL VOLCÁN SARA SARA....52
3.3.1 Sara Sara I (Pleistoceno inferior-medio)....55
3.3.2 Sara Sara II (Pleistoceno medio-superior)....57
3.3.3 Sara Sara III (Pleistoceno superior)....71
3.3.4 Sara Sara IV (Pleistoceno superior)....82
3.4 OTROS DEPÓSITOS....83
3.4.1 Depósito volcanoclástico (Qh-vol)....83
3.4.2 Lahares (Qh-l)....83
3.4.3 Depósitos morrénicos (Pl-Mo1; Pl-Mo2; H-Mo)....83
3.4.4 Depósitos coluviales (Qh-Cl)....84
3.4.5 Depósitos aluviales (Qh-Al)....84

CAPÍTULO IV....85
PETROGRAFÍA....85
4.1 SARA SARA I....85
4.2 SARA SARA II....88
4.3 SARA SARA III....90
4.4 SARA SARA IV....92

CAPÍTULO V....95
GEOQUÍMICA DE ROCAS....95
5.1 MÉTODO ANALÍTICO....95
5.2 CLASIFICACIÓN DE LA SERIE....95
5.3 EVOLUCIÓN DE LOS ELEMENTOS MAYORES....97
5.4 DIAGRAMAS DE VARIACIÓN DE ELEMENTOS TRAZA....97
5.5 DIAGRAMAS DE MULTIELEMENTOS....101
5.6 DIAGRAMAS DE TIERRAS RARAS....102
5.7 DIAGRAMAS DE RATIOS....102
5.8 EVOLUCIÓN PETROGENÉTICA....103

CAPÍTULO VI **105**
EVALUACIÓN DE LOS PELIGROS VOLCÁNICOS 105
6.1 VOLCÁN POTENCIALMENTE ACTIVO 105
6.2 TIPOS DE PELIGROS VOLCÁNICOS 106
6.2.1 Peligros por caídas de tefras 107
6.2.2 Peligros por corrientes de densidad piroclástica (flujos piroclásticos) 108
6.2.3 Peligros por flujos de barro (lahares) 109
6.2.4 Peligros por avalanchas de escombros 110
6.2.5 Flujos de lavas 110
6.3 ESCENARIOS ERUPTIVOS ANTE UNA POSIBLE REACTIVACIÓN DEL VOLCÁN SARA SARA 111
6.3.1 Primer escenario: erupción efusiva con emisión de lavas 111
6.3.2 Segundo escenario: erupción vulcaniana (iev 1-2) 112
6.3.3 Tercer escenario: erupción subpliniana o pliniana (iev 3-5) 112
6.3.4 Cuarto escenario: crecimiento y colapso de domo 114
6.4 MAPA DE PELIGROS DEL VOLCÁN SARA SARA 114
6.4.1 Mapa proximal de peligros múltiples 114
6.4.2 Mapa de peligros por caídas piroclásticas 118
6.3.3 Mapa de peligros por lahares y avalanchas de escombros 121

CONCLUSIONES **125**

RECOMENDACIONES **127**

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS **129**

ANEXOS **135**

RELACIÓN DE MAPAS E ILUSTRACIONES **153**

RESUMEN

El Sara Sara (15º18' S; 73º27' O; 5505 m s. n. m.) es un volcán potencialmente activo, localizado en la cadena volcánica del Pleistoceno-Holoceno del sur peruano, a 12 km al SE del distrito de Pausa, provincia de Páucar del Sara Sara (Ayacucho). Este volcán se encuentra en el extremo septentrional de la Zona Volcánica Central (ZVC) de los Andes, edificado sobre lavas del Grupo Barroso. El cartografiado geológico, estudio estratigráfico y el análisis de imágenes satelitales muestran que la actividad del volcán Sara Sara es dividido en cuatro etapas:

"Sara Sara I", que se inicia con una actividad efusiva que emplazó flujos de lava dacítica en el sector del cerro Sullcaymarca, seguido por el crecimiento de domos dacíticos. Luego, el volcán colapsa y genera depósitos de avalanchas de escombros que recorren hasta 15 km al NE del volcán, visibles en el poblado de Pausa, en donde miden hasta 180 m de espesor. "Sara Sara II", etapa en la cual presentó erupciones explosivas principalmente plinianas que depositaron voluminosos depósitos de flujos piroclásticos de pómez y cenizas, y caídas de lapilli de pómez dacíticos a riolíticos (66.2-73.6 wt. % SiO_2), que afloran al O y SE del volcán. Los depósitos de flujos de pómez y cenizas se emplazaron principalmente hacia el oeste del volcán, mientras que la mayoría de depósitos de caídas de lapilli de pómez cubrieron el extremo SE y E del volcán. "Sara Sara III", en la cual ocurre el prolongado crecimiento y colapso de domos que depositan una secuencia de al menos cinco depósitos de flujos de bloques y cenizas dacíticos y riolíticos (64.8-72.7 wt. % SiO_2), que afloran principalmente al pie del flanco oeste, pero también al E y NE del volcán Sara Sara. Entre ellos, un depósito destacado de flujo de bloques y ceniza riolítico "Diente de caballo" está preservado hasta más de 18 km al oeste del volcán, en donde mide 2 m de espesor. Este depósito ha sido datado en 162 ± 20 ka. En la última etapa, "Sara Sara IV", ocurrida a menos de 64 ka, se construye el cono del volcán, ligado principalmente a la emisión de flujos de lava dacíticos (64.9-67.8 wt. % SiO_2). Al final de esta etapa, hace aproximadamente 14 ka, ocurre la emisión de flujos de lava dacíticos (65.2-66.1 wt. % SiO_2), a través de un cráter adventicio localizado al extremo este del volcán, los cuales recorrieron una distancia aproximada de 15 km.

El estudio petrológico y geoquímico de las rocas del volcán Sara Sara muestra que estas rocas son de composición dacítica y riolítica (63.3-73.6 wt. % SiO_2), y pertenecen a la serie calco-alcalina, con alto contenido de K (2.9-4.8 wt. % K_2O). Las rocas de las cuatro etapas evolutivas muestran una gran homogeneidad mineralógica y petrográfica. En efecto, las dacitas contienen gruesos fenocristales de plagioclasa (que a veces miden hasta 4 cm), anfíbol, biotita, óxidos de Fe-Ti y, ocasionalmente, clinopiroxenos y esfena. Por su parte, las riolitas contienen fenocristales de plagioclasa, biotita, óxidos de Fe-Ti y, eventualmente, anfíbol, cuarzo y sanidina. Las rocas son principalmente de textura porfirítica con una pasta intersertal o microcristalina.

Según el comportamiento geoquímico de los elementos de las rocas del volcán Sara Sara, y según el contexto geodinámico ligado a la subducción, los magmas resultarían esencialmente de la fusión parcial de la cuña del manto metasomatizado por fluidos provenientes de la deshidratación de la corteza oceánica subducida. De otro lado, las rocas del volcán Sara Sara poseen bajos valores en Y y HREE, comparados con los magmas calco-alcalinos «clásicos» de arco. Esas características pueden reflejar la asimilación o mezcla de magmas basálticos «padres» que provienen del manto con magmas. Estos magmas que se generan en la base de la corteza (magmas generados a alta presión) contienen granate (± anfíbol) en el residuo de fusión, y en el contexto de una corteza continental engrosada (~70 km de espesor).

La evidencia geológica muestra cinco tipos principales de peligros volcánicos: 1) peligros por caídas de tefras; 2) peligros por emplazamiento de flujos y oleadas piroclásticas; 3) por flujos de barro o lahares; 4) por avalanchas de escombros; y 5) por flujos de lava. En base al comportamiento pasado del volcán, se propone cuatro escenarios eruptivos futuros en caso de una eventual reactivación del volcán Sara Sara, desde el más posible al menos posible. Estos son: el primer escenario considera la emisión de flujos de lava; el segundo escenario considera una erupción explosiva tipo vulcaniana (IEV 1-2); el tercer escenario considera una erupción explosiva de tipo subpliniana o pliniana (IEV 3-5); y el cuarto escenario considera el crecimiento y colapso de domos, que están asociados al colapso del flanco, que puede generar, a su vez, depósitos de corrientes de densidad piroclástica y avalanchas de escombros (IEV = Indice de Explosividad Volcánica).

En áreas aledañas al volcán, en un radio de unos 20 km, existen diecinueve poblados donde habitan más de 20 000 personas. Entre estos poblados se encuentra el de Pausa (12.5 km al NE del Sara Sara), capital de la provincia de Páucar del Sara Sara, así como el distrito de Sara Sara (Quilcata), localizado a 7 km al norte del volcán Sara Sara, y el distrito de Incuyo, localizado al NO, a 14 km del Sara Sara, entre otros. Estos distritos, por encontrarse muy cerca del volcán Sara Sara, se encontrarían en peligro si el volcán se reactivara y despidiera ceniza o pómez. Asimismo, se localizan importantes obras de infraestructura (reservorios, canales de agua, carreteras) y terrenos de cultivo que pueden ser afectados en caso de una eventual reactivación volcánica.

ABSTRACT

The Sara Sara (15º18' S, 73º27' W, 5505 m asl) is a potentially active volcano located in the Pleistocene-Holocene volcanic range of southern Peru, at 12 km SE of Pausa (Ayacucho). The volcano is located at the northern end of the Central Volcanic Zone (CVZ), built on lavas of the Barroso Group. Based on fieldwork, interpretation of satellite images, and radiometric ages, the eruptive history of Sara Sara is divided into four stages: "Sara Sara I", which began with effusive activity that emplaced dacitic lava flows in the sector Sullcaymarca, after which the growth of dacitic domes occurred. Then the volcano collapsed, generating debris avalanche deposits that traveled up to 15 km NE of the volcano (Pausa), where they measure up to 180 m thickness. The next stage, "Sara Sara II", started with explosive eruptions, mainly plinian style, depositing voluminous pumice flows, and pumice fall deposits of rhyolitic and dacitic composition (66.2-73.6 wt. % SiO_2) preserved to the West and SE of the volcano. Pumice flow deposits were emplaced mainly to the west of the volcano, while most pumice lapilli fall deposits covered the extreme SE and East of the volcano. "Sara Sara III" saw the prolonged growth and collapse of domes that deposited a sequence of at least five block-and-ash flows deposits of dacitic and rhyolitic composition (64.8-72.7 wt. % SiO_2), which appear mainly at the foot from the west flank, but also to the East and NE of the volcano. Among them, a block-and-ash flow "Diente de Caballo" traveled more than 18 km west of the volcano, where the preserved deposit is more than 2 m thick. This deposit has been dated to at least 162 ± 20 ka. Stage "Sara Sara IV" (<65 ka) corresponds to the main cone building phase due to eruption of dacitic lava flows (64.9-67.8 wt. % SiO_2). At the end of this stage at about 14 ka, where erupted dacitic lava flows (65.2-66.1 wt. % SiO_2) through a vent located at the east of the volcano and traveled 15 km of distance.

The Sara Sara rocks are dacites and rhyolites (63.3-73.6 wt. % SiO_2), belonging to the high-K calc-alkaline series (2.9-4.8 wt. % K_2O). The rocks are mineralogically and petrographically very homogenous. Dacites are characterized by an assemblage of plagioclase, amphibole, biotite, Fe-Ti oxides, and occasionally clinopyroxene and sphene. Whereas the rhyolites show an assemblage of plagioclase phenocrysts, biotite, Fe-Ti oxides and eventually, amphibole, quartz and sanidine. The rocks are mainly porphyritic with an intersertal or microcrystalline groundmass.

According to the geochemical characteristics of the rocks of the Sara Sara volcano, and the geodynamic context linked to subduction, the magmas should be derived from the mantle. On the other hand, the rocks of the Sara Sara volcano have low values in Y and HREE compared to the "classical" arc-alkaline magmas of the arc. These characteristics may also reflect the assimilation or mixing of mantle-derived basaltic "parent" magmas with magmas generated under high pressure conditions at the base of the crust. Considering the thickened continental crust (~70 km thick), such a process would result in garnet (± amphibole) in the fusion residue.

Geological evidence shows five main types of volcanic hazards: tephra falls, pyroclastic density currents and surges, lahars, debris avalanches and lava flows. Based on the past behavior of the volcano, in case of an eventual Sara Sara volcanic reactivation, four future eruptive scenarios have been proposed. From the most likely to the least likely, these are: the emission of lava flows, a vulcanian eruption (VEI 1-2); a subplinian or plinian eruption (VEI 3-5); and the growth and collapse of domes, associated with the collapse of the flank that can generate deposits of pyroclastic density currents and debris avalanches.

In a radius of some 20 km from the volcano, there are 19 villages inhabited by more than 20000 people, including Pausa (12.5 km NE of Sara Sara), capital of the Province of Paucar del Sara Sara, as well as Sara Sara district (Quilcata), located 7 km north of the Sara Sara volcano, the Incuyo district, located NO, 14 km from Sara Sara, among others. These districts are close to the Sara Sara volcano, and they are potentially in danger, mainly due to ash pumice fall in case a possible reactivation of the volcano. Also, important infrastructure works (reservoirs, water channels, roads) and cultivation lands are located around the volcano, which may be affected in case of an eventual volcanic reactivation.

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

El volcanismo Plio-cuaternario en los Andes peruanos se manifiesta a lo largo de dos arcos volcánicos: un arco extenso y reciente de naturaleza calco-alcalina situado al oeste de la Cordillera Occidental (De Silva & Francis, 1991), y otro arco discontinuo y delgado de naturaleza shoshonítica, situada más al este de la Cordillera Occidental. El arco volcánico calco-alcalino en esta parte de los Andes forma parte de la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC; De Silva y Francis, 1991). En este arco se distinguen estratovolcanes, domos, calderas, complejos volcánicos, campos de conos monogenéticos, etc., cuya fase mayor de construcción se desarrolló durante el Oligo-Mioceno y el Pleistoceno (Thouret *et al*., 2016; Mamani *et al*., 2010). Este arco volcánico calco-alcalino tiene un promedio de 50 km de ancho y más de 1000 km de largo, y comprende los territorios de Chile y sur del Perú.

En la zona peruana, se han identificado al menos trece estratovolcanes del Pleistoceno superior-Holoceno: Sara Sara, Coropuna, Sabancaya, Ampato, Chachani, Misti, Ubinas, Huaynaputina, Ticsani, Tutupaca, Yucamane-Calientes, Purupuruni y Casiri. Además, se distinguen numerosos volcanes monogenéticos que corresponden a conos de escorias asociados a flujos de lava, como los que existen en el valle de Andahua, Orcopampa, Huambo, Yura, Caylloma (Arequipa) y Lampa (Ayacucho). Entre estos volcanes, el Sabancaya, Coropuna, Misti, Ubinas, Huaynaputina, Ticsani, Tutupaca y Yucamane son los ocho volcanes activos (figura 1.1). Es decir, volcanes que han presentado actividad eruptiva durante los últimos 10 000 años.

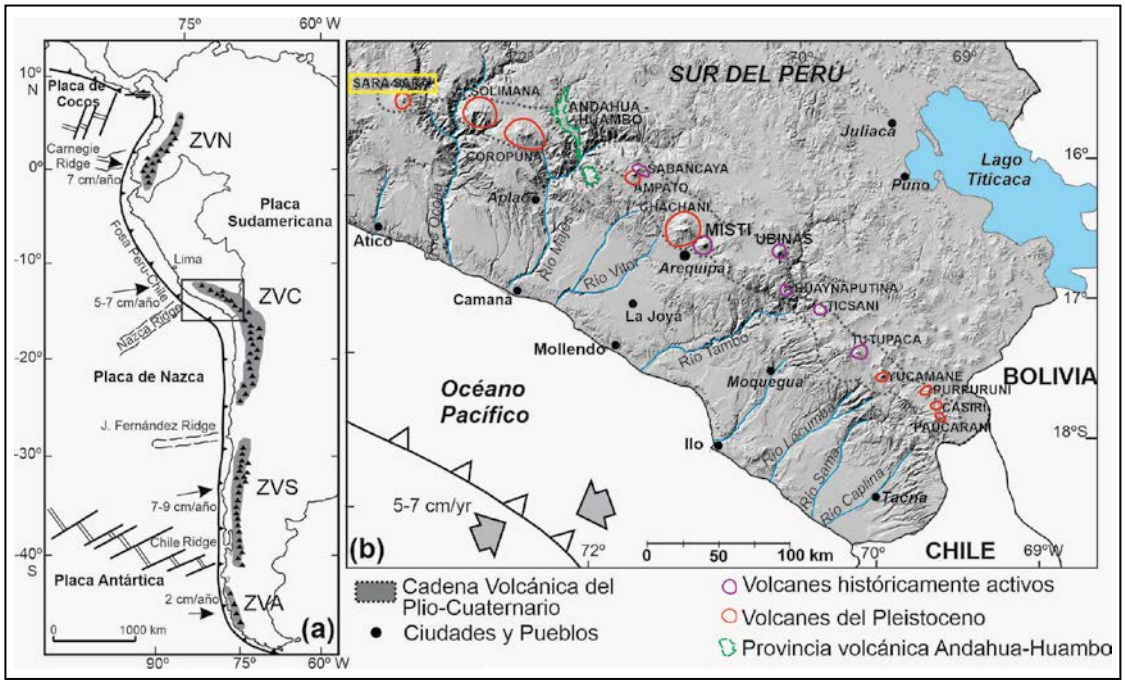


Figura 1.1 (a) Mapa de localización de las zonas volcánicas de Sudamérica: Norte (ZVN), Central (ZVC), Sur (ZVS) y Austral (ZVA), modificado de Stern (2004); (b) Sector norte de la ZVC en el sur del Perú. El volcán Sara Sara está localizado en el extremo norte de la cadena volcánica plio-cuaternaria del sur peruano

El volcanismo calco-alcalino en el Perú es consecuencia de la subducción de la placa oceánica de Nazca debajo de la placa continental sudamericana. Este vulcanismo se produce a aproximadamente 240 km al este del borde occidental de la placa sudamericana, paralela a la fosa peruano-chilena. La dirección de convergencia de la Placa de Nazca debajo del continente sudamericano es N79ºE, y tiene una velocidad media de 5-6 cm/año (Norabuena *et al*., 1999).

Los estudios geovulcanológicos efectuados desde la década de los años 90 en el sur del Perú han permitido conocer la intensa actividad volcánica reciente y pasada de los ocho volcanes activos: Sabancaya (Gerbe & Thouret, 2004; Rivera *et al*., 2016; Samaniego *et al*., 2016), Ubinas (Thouret *et al*., 2005; Rivera, 2010; Rivera *et al*., 2014), Misti (Thouret *et al*., 2001; Harpel *et al*., 2011, Rivera *et al*., 2017), Huaynaputina (Thouret *et al*., 1999; Thouret *et al*., 2002), Ticsani (Mariño & Thouret, 2003), Yucamane (Rivera & Mariño, 2004; Rivera *et al*., 2018), Tutupaca (Samaniego *et al*., 2016, Valderrama *et al*., 2015) y Coropuna.

Estos volcanes en épocas históricas causaron enormes estragos a varios poblados, terrenos de cultivo y obras de infraestructura localizados en sus inmediaciones. Cabe mencionar que los daños ocasionados por la erupción paroxismal del volcán Huaynaputina (sur del Perú, en los Andes centrales) —acaecida en febrero de 1600 d.C— fueron calificados como catastróficos, pues perdieron la vida más de 1500 personas (Thouret *et al*., 2002).

Posteriormente, la reactivación sucesiva de los volcanes Sabancaya (1990-1996; 2016-2019) y Ubinas (2006-2009; 2013-2016), así como el alto grado de exposición de los habitantes de la ciudad de Arequipa (~1 000 000 habitantes) frente a una eventual reactivación del Misti, ha llevado al Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), en cooperación con el Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) de Francia, a desarrollar un programa de estudios volcanológicos tendientes a comprender mejor la dinámica eruptiva pasada de los volcanes activos distribuidos a lo largo de la cordillera de los Andes. Asimismo, ha llevado a elaborar mapas de peligros.

El presente estudio geológico-vulcanológico, referido al volcán Sara Sara, forma parte del proyecto de investigación GA-17B: "Geología y mapa de peligros de los volcanes Coropuna y Sara Sara" de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico del INGEMMET, efectuado en cooperación con el Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) de Francia. En él se busca conocer el comportamiento geológico-vulcanológico de dicho volcán, en base al estudio de los diversos materiales emitidos durante su historia eruptiva, para poder así predecir su comportamiento en el futuro, con fines de prevención y mitigación de desastres frente al peligro volcánico potencial que representa.

Para evaluar los peligros volcánicos del volcán Sara Sara, se estableció un registro estratigráfico de los productos emitidos a lo largo de su historia eruptiva y se determinó, en forma relativa, la frecuencia de erupciones, la magnitud, y el sitio de las erupciones (ejemplo: vento lateral, cráter). Desde luego, es de suponer que una próxima erupción no diferirá mucho de las anteriores en sus características, y que el área afectada también será similar.

Muchas veces, existe confusión sobre lo que significa peligro y riesgo. El peligro es la posible ocurrencia de un fenómeno físico de origen natural (origen volcánico), de origen tecnológico o provocado por el hombre, que puede manifestarse en un sitio y durante un tiempo de exposición. Para poder cuantificar la posibilidad de que se presente un evento de una u otra magnitud durante un período de exposición, es necesario contar con detallada información acerca del número de eventos que han ocurrido en el pasado y acerca de la intensidad que tuvieron.

Sin embargo, el riesgo es la probabilidad de pérdidas (vida, propiedad, capacidad productiva) dentro de un área sometida a un peligro (Tilling, 1989). Se obtiene de relacionar la amenaza con la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Cabe mencionar que la vulnerabilidad es una medida del costo susceptible de ser perdido en un evento peligroso dado o la incapacidad de resistencia cuando se presenta un peligro.

Por lo tanto, el riesgo puede ser de carácter vulcanológico, hidrológico, atmosférico, etc., dependiendo de la naturaleza del fenómeno referido. En resumen, para evaluar el riesgo deben seguirse tres pasos: la evaluación del peligro, el análisis de la vulnerabilidad y la estimación del riesgo como resultado de relacionar los dos parámetros anteriores. El INGEMMET, dentro de su ámbito de competencia, realiza principalmente la evaluación del peligro.

1.1 UBICACIÓN

El volcán Sara Sara (5505 m s. n. m.) se encuentra ubicado a 250 km al SE de la ciudad de Huamanga (figura 1.2), en la cordillera occidental de los Andes del sur del Perú. Está situado entre las provincias de Páucar del Sara Sara y Parinacochas, región Ayacucho, cuyas coordenadas geográficas son las siguientes:

Latitud	15°18'	Sur,
Longitud	73°27'	Oeste

En coordenadas UTM N: 8304641, E: 666882 (WGS 84 – ZONA 18 sur)

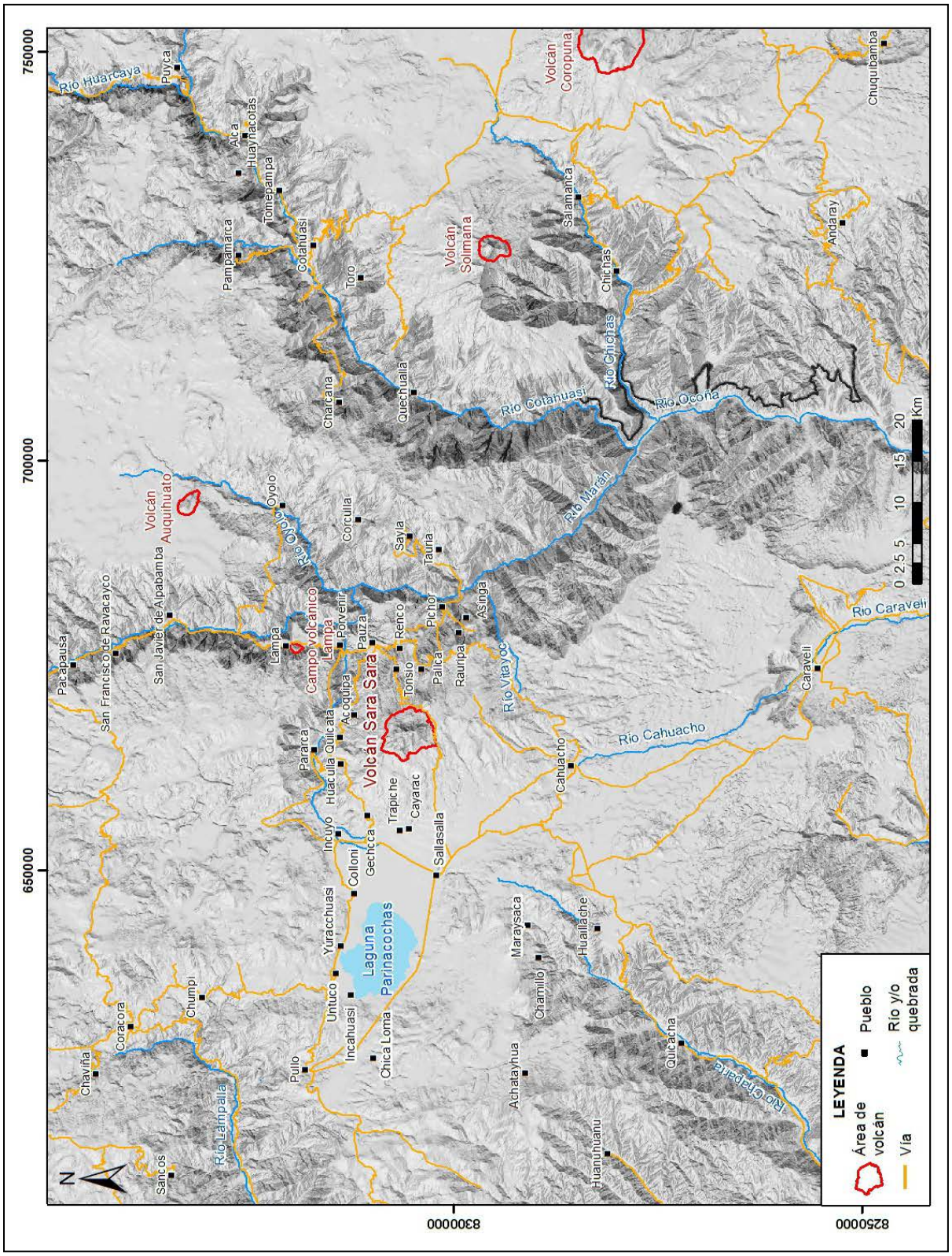


Figura 1.2 Mapa de ubicación del volcán Sara Sara y los poblados aledaños a dicho volcán

La cumbre del volcán Sara Sara está localizada a 5505 m s. n. m. Este volcán representa un volumen aproximado de 20-25 km^3. La altura relativa del cono es de 1000 m, y toma como base la pampa visible al extremo SE del volcán que se localiza a 4580 m s. n. m.

1.2 VÍAS DE ACCESO

Existen pocas vías de acceso que conducen al volcán Sara Sara, entre ellas se cuentan:

- La carretera Panamericana sur, que se dirige de la ciudad de Lima a Tacna, a lo largo del litoral costero es el eje articulador fundamental; a partir de ella, en las provincias de Nazca (Ica) y Caravelí (Arequipa) existen vías de penetración hacia el volcán Sara Sara, que está localizado en el límite de las provincias de Páucar del Sara Sara y Parinacochas (Ayacucho). Otra se dirige desde Puquio hasta Coracora, luego continúa hasta el distrito de Puyusca (Incuyo) para que desde allí se acceda al sector occidental y noroccidental del volcán Sara Sara, hasta finalmente llegar a Pausa, en el sector oriental del volcán.
- La otra vía de acceso es la que se dirige desde la localidad de Chala, por el valle del río Cháparra, hasta arribar a las localidades de Sifuentes y Salla Salla, ubicadas en una zona de altiplanicie, sobre los 3300 m s. n. m.; desde esta zona, se accede al flanco occidental del volcán Sara Sara. Esta vía está asfaltada desde Chala hasta la localidad de Sifuentes, desde donde se continúa a través de una trocha carrozable.
- Otra vía de acceso es la que se dirige desde la localidad de Yauca hasta la ciudad de Coracora, y de ahí al distrito de Puyusca (Incuyo), por donde se accede al flanco oeste del volcán Sara Sara.
- La otra vía de acceso es la que conduce desde la localidad de Atico hacia la localidad de Caravelí, desde donde se asciende en dirección noreste, a través de una trocha poco conservada, a la localidad de Cahuacho, y desde allí se accede al sector sur y occidente del volcán Sara Sara.

1.3 OBJETIVOS

El objetivo central de este trabajo fue conocer el comportamiento eruptivo pasado del volcán Sara Sara y elaborar el mapa de peligros de dicho volcán, con el propósito de brindar un documento oficial a la sociedad y autoridades locales y regionales (Gobierno Regional de Ayacucho, Municipalidades Provinciales y Distritales, INDECI, entre otros.), para la formulación de proyectos de desarrollo, la elaboración de planes de prevención, el manejo de crisis ante una eventual reactivación del volcán Sara Sara, así como para un adecuado ordenamiento territorial.

Para alcanzar los objetivos señalados se realizaron los siguientes trabajos:

- Recopilación y evaluación de los estudios efectuados sobre la geología del volcán Sara Sara
- Cartografiado geológico del volcán Sara Sara, a escala 1:25 000 (escala de detalle), que permitió conocer los tipos de lavas y depósitos volcánicos emitidos, y el área de emplazamiento de dichos productos. Esta información determinó los tipos de mecanismos eruptivos (efusivos, extrusivos, explosivos, etc.) acaecidos a lo largo de la historia eruptiva de dicho volcán.
- Estudio crono-estratigráfico en base a dataciones radiométricas ($^{40}K/^{40}Ar$, $^{40}Ar/^{39}Ar$), a partir del cual se conoció el modo de evolución del volcán Sara Sara, así como también se determinó de manera relativa la frecuencia de algunas erupciones presentadas por este volcán. Además, este estudio permitió conocer si el volcán Sara Sara se encontraba activo o potencialmente activo.
- Estudio de la petrografía, mineralogía y geoquímica de los productos volcánicos para inferir el modo de generación y evolución de los magmas del volcán Sara Sara
- Evaluación de peligros ligados a una eventual reactivación del volcán Sara Sara, considerado como uno de los volcanes potencialmente activos del sur peruano que presentó erupciones violentas en el pasado.
- Elaboración del mapa de peligros del volcán Sara Sara, que muestre las zonas de peligro alrededor del volcán y que sirva como herramienta para el ordenamiento territorial, la formulación de proyectos de desarrollo, la elaboración de planes de prevención y el manejo de una eventual crisis volcánica de este volcán.

1.4 DOCUMENTACIÓN BASE

La base topográfica empleada para la elaboración del mapa geológico y de peligros fue la hoja fotogramétrica; esta fue elaborada en el año 1967 por el Instituto Geográfico Militar, a escala 1: 100 000, y actualizada en el año 1990. Asimismo, se hizo uso de fotografías aéreas del IGN, cuya toma data del año 1955.

Se utilizaron imágenes satelitales Aster del año 2010, que fueron procesadas en el Laboratorio de Teledetección del INGEMMET. También se utilizaron imágenes satelitales Landsat TM, Google Earth y Rapideye (2015).

1.5 METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología empleada en el presente trabajo se dividió en tres etapas:

1.5.1 Primera Etapa: Trabajos de gabinete y recopilación de material bibliográfico

Estos trabajos se efectuaron durante los primeros meses del año 2015 y consistieron en los siguientes procedimientos:

- Recopilación de material bibliográfico referente a la geología, geomorfología, petrología, geoquímica, etc., que están disponibles en tesis universitarias, boletines y revistas científicas, consideradas de interés para la elaboración del presente trabajo.
- Confección de la base topográfica del cuadrángulo de Pausa, la cual sirvió como plano base para sobreponer los datos de la fotointerpretación geológica y los datos del cartografiado geológico.
- Procesamiento e interpretación de imágenes de satélite Aster del año 2010 referentes al volcán Sara Sara y sus alrededores, en combinación con las bandas 9,3,1, para delimitar el área de emplazamiento de los depósitos volcánicos y los tipos de estructuras volcánicas, así como para cartografiar la geometría y distribución de estructuras tectónicas (fracturas, fallas y/o lineamientos) presentes en la zona.
- Fotointerpretación geológica a base de fotografías aéreas de escala 1:42 000 pertenecientes al IGN y correspondientes al año 1955. Para este trabajo también se utilizaron imágenes de satélite Aster, Landsat TM, Google Earth y Rapideye.
- Elaboración de un Modelo Digital de Elevación (DEM) (1.5 m de celda) de la zona del volcán Sara Sara, con la ayuda de imágenes satelitales Pleiades, que fueron obtenidas de la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA). Asimismo, estas imágenes fueron procesadas por el Laboratorio de Teledetección del INGEMMET, para luego ser usadas en la elaboración de los mapas de peligro y geológico. Para georreferenciar la imagen Pleiades, se realizaron medidas con equipos GPS ubicados en diversos sectores del volcán. El DEM fue utilizado en el modelamiento de procesos volcánicos (por ejemplo, LaharZ).
- Utilización de los programas de Arcgis 10.1 y ENVI 4.5 para el procesamiento de imágenes satelitales, así como para la digitalización de mapas geológicos, geomorfológicos y estructurales del presente estudio.

1.5.2 Segunda Etapa: Trabajos de campo

Los trabajos de campo se efectuaron entre los años 2015 al 2017, durante los cuales se realizaron el cartografiado geológico, el estudio estratigráfico, la correlación estratigráfica y el muestreo de productos volcánicos emitidos y/o asociados al volcán Sara Sara. Estos estudios se dieron en forma alternada con los trabajos de gabinete.

Salida de campo en el año 2015

Durante el año 2015, las salidas de campo se efectuaron en los meses de abril, junio, agosto y noviembre, donde se ejecutaron los siguientes trabajos:

- Inicialmente, cartografiado geológico y muestreo de flujos de lava que afloran en los flancos E, O, SE y NE del volcán Sara Sara.
- Estudio estratigráfico de las lavas y depósitos piroclásticos del volcán Sara Sara, en el sector sureste (Huancara y Llique). Destacan ignimbritas y depósitos de caídas de lapilli de pómez.
- Estudio estratigráfico de las lavas y depósitos piroclásticos del volcán Sara Sara, que afloran al extremo occidental del volcán. Se distinguen depósitos de flujo de pómez y ceniza, depósitos de flujos de bloques y ceniza, y depósitos de caídas de lapilli de pómez.
- Estudio estratigráfico de las lavas y depósitos del volcán Sara Sara, que afloran al extremo noreste del volcán, en inmediaciones de la localidad de Pausa. Se distinguen avalanchas de escombros, depósitos de flujos de pómez y ceniza, y depósitos de flujos de bloques y ceniza.
- Iniciación de los trabajos de cartografiado de estructuras volcánicas y tectónicas y de depósitos, que afloran en los sectores S, SE y SO del volcán Sara Sara.
- Iniciación de los trabajos de difusión y sensibilización sobre peligros geológicos, especialmente de los peligros volcánicos, dirigido a docentes y a escolares de dos instituciones educativas de la provincia de Páucar del Sara Sara.

Salida de campo en el año 2016

Durante el año 2016, los trabajos de campo se efectuaron en los meses de abril, julio y noviembre, en aproximadamente 36 días. Los principales trabajos efectuados fueron:

- Cartografiado geológico y muestreo de productos volcánicos: flujos de lava e ignimbritas que afloran en los flancos N, E, SO y SE del volcán Sara Sara.
- Levantamiento de columnas estratigráficas en quebradas que se localizan al pie del flanco oeste del volcán Sara Sara. También se realizaron correlaciones estratigráficas.

- Georreferenciación de una imagen satelital de alta resolución (Pleiades) con equipos GPS que se desplegaron en diversos sectores alrededor del volcán Sara Sara.
- Cartografiado geológico de fallas y lineamientos
- Continuación de los trabajos de difusión y sensibilización sobre peligros geológicos; estos se dirigieron a docentes y a escolares de las diferentes instituciones educativas de la localidad de Pausa.

  Muestreo de los diversos depósitos volcánicos que afloran en la parte baja de los flancos O, E y SE del volcán Sara Sara.
- En gabinete, envío de muestras de rocas para análisis químicos a laboratorios externos y tratamiento de los resultados obtenidos; asimismo, se realizaron secciones delgadas en el Laboratorio de Petromineralogía del INGEMMET y el estudio petrográfico de rocas.

Salida de campo en el año 2017

Durante el año 2017, los trabajos de campo se efectuaron en los meses de abril, julio y noviembre, en aproximadamente 38 días. Los principales trabajos efectuados fueron:

- Cartografiado geológico y muestreo de productos volcánicos: depósitos de caídas piroclásticas y corrientes de densidad piroclástica que afloran al pie de los flancos E y SE del volcán Sara Sara.
- Levantamiento de columnas estratigráficas en quebradas que están localizadas al pie del flanco oeste del volcán Sara Sara. También se realizaron correlaciones estratigráficas.
- Muestreo de los diversos depósitos de corrientes de densidad piroclástica que afloran en la parte baja de los flancos O, N y SE del volcán Sara Sara.
- Continuación de los trabajos de difusión y sensibilización sobre peligros geológicos; estuvieron dirigidos a autoridades, docentes y escolares de las diferentes instituciones educativas de las provincias del Páucar del Sara Sara y Puyusca.
- Evaluación de los peligros volcánicos

1.5.3 Tercera Etapa: Trabajos de gabinete y redacción del informe

Entre los años 2015 al 2016 se efectuaron los siguientes trabajos:

- Elaboración de una base de datos de las muestras tomadas en campo que contiene el código de muestras, ubicación con coordenadas en proyección UTM/WGS84/zona 18S, cota, descripción petrográfica de la muestra y resultados de análisis químicos.
- Envío de muestras de rocas a la Dra. Céline Liorzou, quien trabaja en el Laboratorio "Dominios Oceánicos" de la Universidad de Bretaña Occidental (Brest, Francia). Estas muestras extraídas de campo fueron llevadas para los respectivos análisis químicos de elementos mayores y trazas, durante los años 2015 y 2016, de manera periódica.
- Envío de muestras de rocas al Laboratorio de Geocronología de SERNAGEOMIN (Chile) para efectuar dataciones $^{40}Ar/^{39}Ar$ y $^{40}K/^{40}Ar$; estos trabajos se realizaron durante los primeros meses del año 2016.
- Envío de rocas volcánicas del volcán Sara Sara al Laboratorio de Petromineralogía del INGEMMET para la confección de secciones delgadas; estos trabajos se realizaron durante los años 2015 y 2016.
- Revisión y culminación del mapa geológico a escala 1:25 000 del volcán Sara Sara, a base de la reinterpretación de las imágenes satelitales Aster, Google Earth y fotografías aéreas; estos trabajos se realizaron a fines de los años 2016 y 2017.
- Revisión, evaluación e interpretación de toda la información geológica, petrológica y geoquímica que se obtuvo durante la etapa de gabinete y de campo; estos trabajos se realizaron entre los años 2016 y 2017.
- Estudio de evaluación de peligros del volcán Sara Sara.
- Elaboración del mapa de peligros del volcán Sara Sara, con datos de campo y con la ayuda de *softwares* de modelamiento, como, por ejemplo, LaharZ.
- Redacción del informe final

1.6 ESTUDIOS ANTERIORES

Existen pocos trabajos relacionados al estudio geológico-vulcanológico del volcán Sara Sara; los que existen principalmente se basan en el reconocimiento geológico de campo. En lo referente a la actividad histórica o actividad ocurrida en los últimos 500 años, no existen relatos y/o escritos que describan la actividad de este volcán. Además, según evidencias de campo, el Sara Sara no muestra evidencias de actividad en dicho periodo.

A continuación, se expone de manera suscinta y en orden cronológico los principales trabajos realizados sobre este volcán:

Morche & Nuñez (1998) publicaron el "Estudio del riesgo geológico del volcán Sara Sara" (Boletín N°21, Serie C– Geodinámica e Ingeniería Geológica– INGEMMET, Lima). En base a datos de campo, realizaron un reconocimiento geológico, así como la evaluación de los peligros potenciales que puede presentar dicho volcán.

De Silva & Francis (1991) publicaron un estudio vulcanológico denominado "Volcanoes of the Central Andes", el cual fue realizado a base del análisis y tratamiento de imágenes de satélite Landsat TM y datos de campo.

Olchauski (1980) realizó el cartografiado geológico de los cuadrángulos de Chala, Jaquí, Cháparra y Coracora (Boletín N° 34, Serie A, INGEMMET, Lima). Cabe mencionar que el volcán Sara Sara está dentro del cuadrángulo de Pausa, pero parte de sus depósitos se extienden al cuadrángulo de Coracora.

Pecho (1983) realizó el cartografiado geológico de los cuadrángulos de Pausa y Caravelí, publicado en el Boletín N° 37, Serie A, INGEMMET, Lima, Perú. En dicho estudio, el volcán Sara Sara ha sido cartografiado como perteneciente al Grupo Barroso.

Finalmente, Martínez & Cervantes (2001) realizaron el cartografiado geológico a escala 1:50 000 de la hoja de Pausa 31-p (I, II, III, IV), es decir del sector oriental del volcán Sara Sara.

1.7 CLIMA E HIDROLOGÍA

Para el análisis de los elementos climatológicos, se ha recurrido a los datos registrados entre los años 1965-2005 por las estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), ubicadas en la cuenca de Ocoña. En la tabla 1.1, se muestra la ubicación de dichas estaciones meteorológicas.

Tabla 1.1

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), ubicadas en la cuenca de Ocoña

Localidad	Río	Latitud sur (°)	Longitud oeste (º)	Altitud (m s. n. m.)	Fecha inicio	Fecha final
Ocoña	Ocoña	16.43	73.1	58	Jan-65	Dec-79
Pausa	Marán	15.28	73.25	2530	Jan-65	Dec-05
Lampa	Marán	15.18	73.35	2715	Jan-65	Dec-05
Yanaquihua	Ocoña	15.28	73.25	2530	Jan-66	Dec-05
Salamanca	Arma	15.5	72.83	3203	Jan-65	Dec-05
Incuyo	Marán	15.25	73.57	3298	Jan-65	Dec-82

1.7.1 Temperatura

Para el análisis de esta variable, se utilizaron datos de cinco estaciones meteorológicas ubicadas en inmediaciones de las localidades de Ocoña, Lampa, Yanaquihua, Cotahuasi, Salamanca y Pausa. Estas estaciones cuentan con registros de temperatura media mensual desde el año de 1965 hasta el 2005. En la tabla 1.2 se presentan los valores medios mensuales obtenidos para cada estación.

Tabla 1.2

Temperatura media mensual de las estaciones meteorológicas

Estaciones	Temperatura media mensual (°C)											
	en.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ag.	set.	oct.	nov.	dic.
Ocoña	22.4	22.8	22	20.9	18.7	14.4	16.4	16.4	16.8	18.1	19.8	21.3
Pausa	26.6	16.4	16.3	16.2	15.4	14.7	14.7	15.1	15.7	16.4	16.8	16.8
Cotahuasi	15.6	15.5	15.3	15.6	15.4	14.9	14.7	15.4	15.8	16.6	16.7	16.5
Salamanca	12.8	12.7	12.4	13	12.5	11.7	11.2	12	12.1	13	13.4	13.1
Yanaquihua	13.3	12.8	13.1	13.9	13.7	13.2	12.7	13.6	13.8	14.6	14.3	14.2

Según los datos obtenidos, se concluye que las temperaturas máximas fueron registradas en la localidad de Pausa (a 2530 m s. n. m.); estas fluctúan entre 14.7 °C y 26.6 °C. El valor de la temperatura promedio mensual es de 15.5 °C. Las menores temperaturas se registran en los meses de junio y julio, con 14.7 °C, y la temperatura promedio mayor se registra en el mes de enero con 26.6 °C.

En las inmediaciones del volcán Sara Sara, no existen estaciones meteorológicas. Sin embargo, según datos meteorológicos de altitudes superiores a los 4500 a 5500 m s. n. m., que corresponden a los flancos y las cumbres del volcán Sara Sara, predomina un clima frío. En este sector, la temperatura diurna es casi siempre inferior a 5 °C. El aire de esta región es seco y poco denso. Durante los meses de enero, febrero, marzo y junio, gran parte de esta zona está prácticamente cubierta de hielo y nieve.

1.7.2 Precipitación

Para el análisis pluviométrico, se consideraron las estaciones de la cuenca Ocoña. Asimismo, se consideraron las estaciones meteorológicas de Carhuanillas y Chaviña, ubicadas en la cuenca vecina de Yauca. En la tabla 1.3 se puede distinguir el tipo de precipitación total mensual expresada en mm, desde el año 1965 hasta el año 2005. De acuerdo a la información obtenida, la variación de la precipitación media acumulada anual varía desde 0.6 hasta los 171.4 mm. Las precipitaciones más intensas en la estación de Pausa ocurren en los meses de enero, febrero y marzo, y las precipitaciones mínimas se registran en los meses de junio y julio.

Tabla 1.3

Precipitación media total anual y mensual (mm)

Estaciones	en.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	set.	oct.	nov.	dic.	Total
Lampa	60	63.1	61.9	13.2	1.9	0.5	2.1	1.4	5.6	3.8	3.2	16.6	233.2
Pausa	61.8	63.4	50.4	7.5	1.7	0.6	1.2	2.3	2.1	3	2.2	17.2	213.4
Incuyo	76.3	106.6	92.7	26.6	0.9	0.1	0.9	0.5	3.9	10.4	5.1	31.1	355.1
Ocoña	0.1	0	0	0	0	0.1	0.3	0.8	1.7	0	0.1	0	2.1
Carhuanillas	114.1	154.2	146.1	34.6	0.9	0	0.7	2.2	3.7	9.7	12.9	27.6	506.8
Chaviña	128.5	155.7	171.4	35.9	5.7	0.9	1	4.2	11.8	13.4	12	51.8	592.4

1.7.3 Hidrología

El volcán Sara Sara está localizado en el extremo occidental de la cuenca del río Ocoña. Al pie del volcán, existen numerosos manantiales producto del deshielo que son utilizados para el uso agrícola y el consumo humano.

Dentro de la cuenca del río Ocoña, se localiza la laguna Parinacochas, que deriva parcialmente sus aguas a los ríos Pararca, Marán y río Ocoña. Además, existen varias fuentes de aguas termales y lagunillas.

Tres principales ríos recorren la provincia del Páucar del Sara Sara, que en su trayecto van tomando diferentes nombres. El río Vado, que nace en el sector noroeste de la cuenca Ocoña, toma el nombre de río Tambillos, río Pararca y río Mirmaca, y al confluir en Tinkuq con el río Huanca Huanca, que viene del sector norte, toma el nombre de río Luicho. Este a su vez al confluir con el río Oyolo, que nace al este como río Huaccme, toma el nombre de río Uchubamba. Más abajo se lo reconoce como río Paqayani y, finalmente, como río Marán, que abandona la provincia al confluir con el río Challwamayu. Estos ríos son tributarios del río Ocoña que desemboca en el océano Pacífico (figura 1.3).

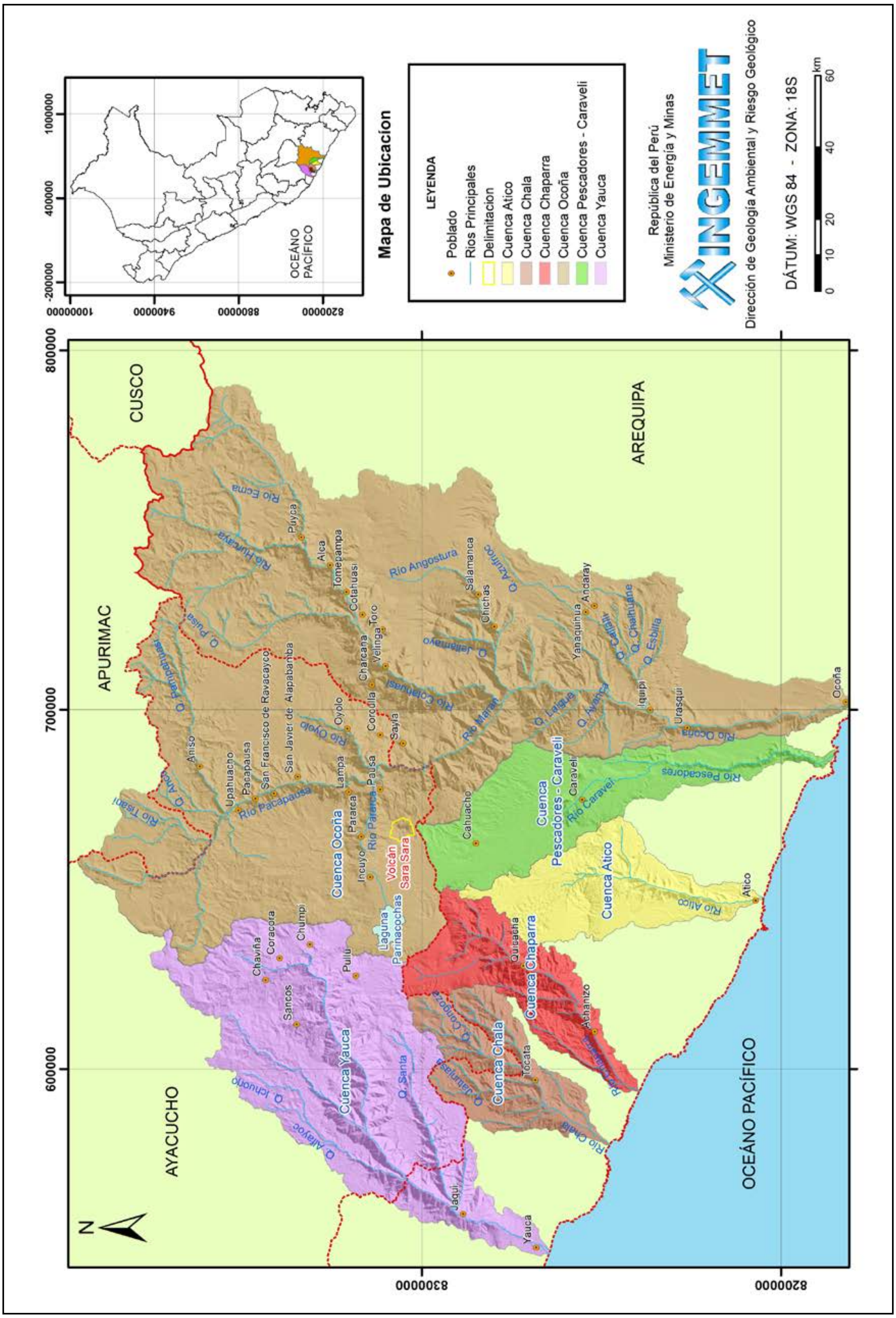


Figura 1.3 Mapa de cuencas hidrográficas localizadas alrededor del volcán Sara Sara

1.8 ASPECTO SOCIO-ECONÓMICO

A continuación, se presenta el aspecto socio-económico de los poblados localizados en el área de influencia del volcán Sara Sara.

1.8.1 Dato poblacional

Los datos que se presentan a continuación corresponden al resultado del último censo nacional: XII de población y VII de vivienda, efectuado en el año 2017 (INEI, 2018). Según este censo, la mayor población se concentra en la parte este, oeste y norte del volcán Sara Sara, en las provincias de Páucar del Sara Sara y Parinacochas (Ayacucho), y La Unión (Arequipa).

Pausa es la capital de la provincia de Páucar del Sara Sara, localidad más importante en población, donde habitan 3231 habitantes (INEI, 2018). Está ubicada a 12.5 km al NO de la cumbre del volcán Sara Sara (tabla 1.4). Le siguen en importancia por población los distritos de Lampa, Marcabamba, Sara Sara, Colta, Pararca, Corculla, San José de Ushua y Oyolo. Todos estos poblados pertenecen a la provincia de Páucar del Sara Sara. El total de la población de los distritos mencionados ha sufrido un ligero cambio durante los últimos años. En efecto, la población registrada en el censo del año 2007 fue de 9872 habitantes; esta disminuyó muy ligeramente en el año 2017 (9317 habitantes).Los distritos de la provincia de Parinacochas que están dentro del área de influencia del volcán Sara Sara son: Puyusca (2062 habitantes), Chumpi (2186 habitantes), Pacapausa (630 habitantes), Pullo (6271 habitantes) y San Francisco de Ravacayco (516 habitantes), como se aprecia en la tabla 1.5.

Tabla 1.4

Población censada total en el año 2017, provincia Páucar del Sara Sara (INEI, 2018)

Provincia	**Páucar del Sara Sara**								
Distrito	Pausa	Colta	Corculla	Lampa	Marcabamba	Pararca	San José de Ushua	Sara Sara (Quilcata)	Oyolo
Población									
Hombre	1632	251	209	981	329	208	117	252	887
Mujer	1599	217	236	972	284	211	104	262	566
Urbano	2717								
Rural	514	468	445	1953	613	419	221	514	1453
Total	3231	468	445	1953	613	419	221	514	1453

Tabla 1.5

Población censada total en el 2017, provincia de Parinacochas (INEI, 2018)

Provincia	**Parinacochas**				
Distrito	Puyusca	Chumpi	Pacapausa	Pullo	San Francisco de Ravacayco
Población					
Hombre	1034	1083	317	3537	274
Mujer	1028	1103	313	2734	242
Total	2062	2186	630	6271	516

Los distritos de la provincia de Caravelí que están dentro del área de influencia del volcán Sara Sara son: Cahuacho con 610 habitantes y Quicacha con 1837 habitantes, censados en el año 2017 (tabla 1.6).

Los distritos de la provincia de la Unión que están dentro del área de influencia del volcán Sara Sara son: Sayla (3198 habitantes) y Tauria (343 habitantes), tal como se aprecia en la tabla 1.7.

Tabla 1.6

Población censada total en el 2017, distritos de Cahuacho y Quicacha, provincia de Caravelí (INEI, 2018)

Provincia	**Caravelí**	
Distrito	Cahuacho	Quicacha
Población en 2017		
Hombre	305	966
Mujer	305	871
Rural	610	1837
Total	610	1837

Tabla 1.7

Población censada total en el 2017, distritos de Sayla y Tauria, provincia La Unión (INEI, 2018)

Provincia	**La Unión**	
Distrito	Sayla	Tauria
Población		
Hombre	177	152
Mujer	142	149
Rural	319	301
Total	319	301

1.8.2 Vivienda

Las viviendas existentes en la provincia de Páucar del Sara Sara (poblados de Pausa, Corculla, Lampa, Marcabamba, Colta, Pararca, Sara Sara, San José de Ushua y Oyolo), que se encuentran dentro del área de influencia del volcán Sara Sara, son aproximadamente 5867. En su gran mayoría son de adobe, mientras que otras viviendas son de material noble (ladrillo y cemento), otras de piedra y barro, y también de otros materiales (tabla 1.8).

Tabla 1.8

Características de las viviendas de los distritos de la provincia de Páucar del Sara Sara (INEI, 2018)

Provincia	**Páucar Del Sara Sara**								
Distrito	Pausa	Corculla	Lampa	Marca-Bamba	Colta	Pararca	Sara Sara	San José De Ushua	Oyolo
Vivienda									
Total, viviendas particulares censadas	1681	419	1365	471	379	315	445	118	674
Material predominante en paredes									
Con paredes de ladrillo o bloque de cemento	152		13	14	2	1	9		4
Con paredes de piedra o sillar con cal o cemento	2		6		1				
Con paredes de adobe	839	166	557	208	129	157	190	77	178

Continuación...

Provincia	Páucar Del Sara Sara								
Distrito	Pausa	Corculla	Lampa	Marca-Bamba	Colta	Pararca	Sara Sara	San José De Ushua	Oyolo
Con paredes de tapia	1							1	1
Con paredes de quincha (caña de barro)	2								
Con paredes de piedra con barro	7	3	90	7	14	2	3	5	113
Con paredes de madera (pona, tornillo, etc.)	1		4		2				3
Con paredes de triplay / calamina / estera	6		1		1				4
Otros	671	250	694	242	230	155	243	35	371
Total	1681	419	1365	471	379	315	445	118	674

Según el mismo censo del INEI del año 2017, en los distritos de Puyusca, Chumpi, Pacapausa, Pullo y San Francisco de Ravacayco (provincia de Parinacochas), existen aproximadamente 6947 viviendas. Los tipos de viviendas en estos distritos son principalmente de adobe, y algunas son de piedra con barro y otras son de material noble, esto es cemento y ladrillo (tabla 1.9).

Tabla 1.9

Características de las viviendas de los distritos de la Provincia de Parinacochas (INEI, 2018)

Provincia	Parinacochas				
Distrito	Puyusca	Chumpi	Pacapausa	Pullo	San Francisco de Ravacayco
Vivienda					
Total, viviendas particulares censadas	1402	1703	595	2848	399
Material predominante en paredes					
Con paredes de ladrillo o bloque de cemento	64	19	1	233	1
Con paredes de piedra o sillar con cal o cemento		1		4	1
Con paredes de adobe	636	697	226	1304	152
Con paredes de tapia	1	1			1
Con paredes de quincha (caña de barro)		1		20	
Con paredes de piedra con barro	30	4	22	31	34
Con paredes de madera (pona, tornillo etc.)				46	
Con paredes de triplay / calamina / estera	1	1		99	1
Otros	670	979	346	1111	209
Total	1402	1703	595	2848	399

Asimismo, según el censo del INEI del año 2017, en la provincia de Caravelí, especialmente en el distrito de Cahuacho, existen aproximadamente 473 viviendas, y en el distrito de Quicacha existen 920 viviendas. Los tipos de viviendas en estos distritos son principalmente de adobe (tabla 1.10).

Finalmente, con respecto a la cantidad de viviendas en la provincia La Unión, se puede mencionar que existen 315 viviendas en el distrito de Sayla y 256 viviendas en el distrito de Tauria, las cuales son principalmente de adobe, piedra y barro, y de otros materiales (tabla 1.11).

Tabla 1.10

Características de las viviendas de los distritos de la provincia de Caravelí (INEI, 2018)

Provincia	**Caravelí**	
Distrito	Cahuacho	Quicacha
Vivienda		
Total, viviendas particulares censadas	473	920
Con paredes de ladrillo o bloque de cemento		244
Con paredes de piedra o sillar con cal o cemento		
Con paredes de adobe	200	289
Con paredes de tapia		1
Con paredes de quincha (caña de barro)		2
Con paredes de piedra con barro	5	3
Con paredes de madera (pona, tornillo etc.)		22
Con paredes de triplay / calamina / estera	1	49
Otros	267	310
Total	473	920

Tabla 1.11

Características de las viviendas de los distritos de la provincia de La Unión (INEI, 2018)

Provincia	**La Unión**	
Distrito	Sayla	Tauria
Vivienda		
Total, viviendas particulares censadas	315	256
Con paredes de ladrillo o bloque de cemento		4
Con paredes de piedra o sillar con cal o cemento	1	2
Con paredes de adobe	83	71
Con paredes de tapia		
Con paredes de quincha (caña de barro)		
Con paredes de piedra con barro	28	23
Con paredes de madera (pona, tornillo, etc.)		
Con paredes de Triplay/ calamina/estera		
Otros	203	156
Total	315	256

1.8.3 Actividad económica

Los pobladores que habitan en áreas aledañas del volcán Sara Sara se dedican a las siguientes actividades socio-económicas: (I) agricultura, (II) ganadería, (III) comercio (IV), turismo y, otras actividades.

(I) En la agricultura, se cultiva tubérculos (papa, ulluco, etc.); granos (maíz, cebada, quinua, etc.); leguminosas (habas, arveja, etc.); forraje (avena); hortalizas en pequeña escala; árboles frutales como la tuna, la manzana, el membrillo, el higo, el durazno, el tumbo; la alfalfa para el ganado; la cochinilla, etc.

(II) En la ganadería, se cría el ganado vacuno, ganado equino como caballos, burros y mulas; animales de corral como chanchos, cuyes, conejos, gallinas y patos; y la explotación de las abejas. Algunos pobladores han empezado a darle mayor valor agregado a su producción, y elaboran queso, yogur, mantequilla y otros.

(III) En el comercio, existen bodegas, restaurantes, mercados, que se encuentran instalados en las distintas localidades aledañas al área de estudio.

(IV) En el turismo, a lo largo y ancho de la provincia, se puede encontrar diversos lugares turísticos, que van desde restos arqueológicos (figura 1.4), hasta bellezas paisajísticas, que hacen de la provincia un lugar espléndido para el turismo. Entre los atractivos arqueológicos de Páucar del Sara Sara podemos mencionar:

- La ruina de Inca-Wasi, localizada en el ingreso de la localidad de Pullo, al oeste de la Laguna Parinacochas, donde aparentemente era la casa de descanso del Inca.
- Volcán Sara Sara (fotografía 1.1), comprende los territorios del distrito de Pausa y la comunidad de Tonsio.

Fotografía 1.1 Vista del flanco sur del volcán Sara Sara donde turistas dedicados al ascenso de montañas o trekking podrían acampar

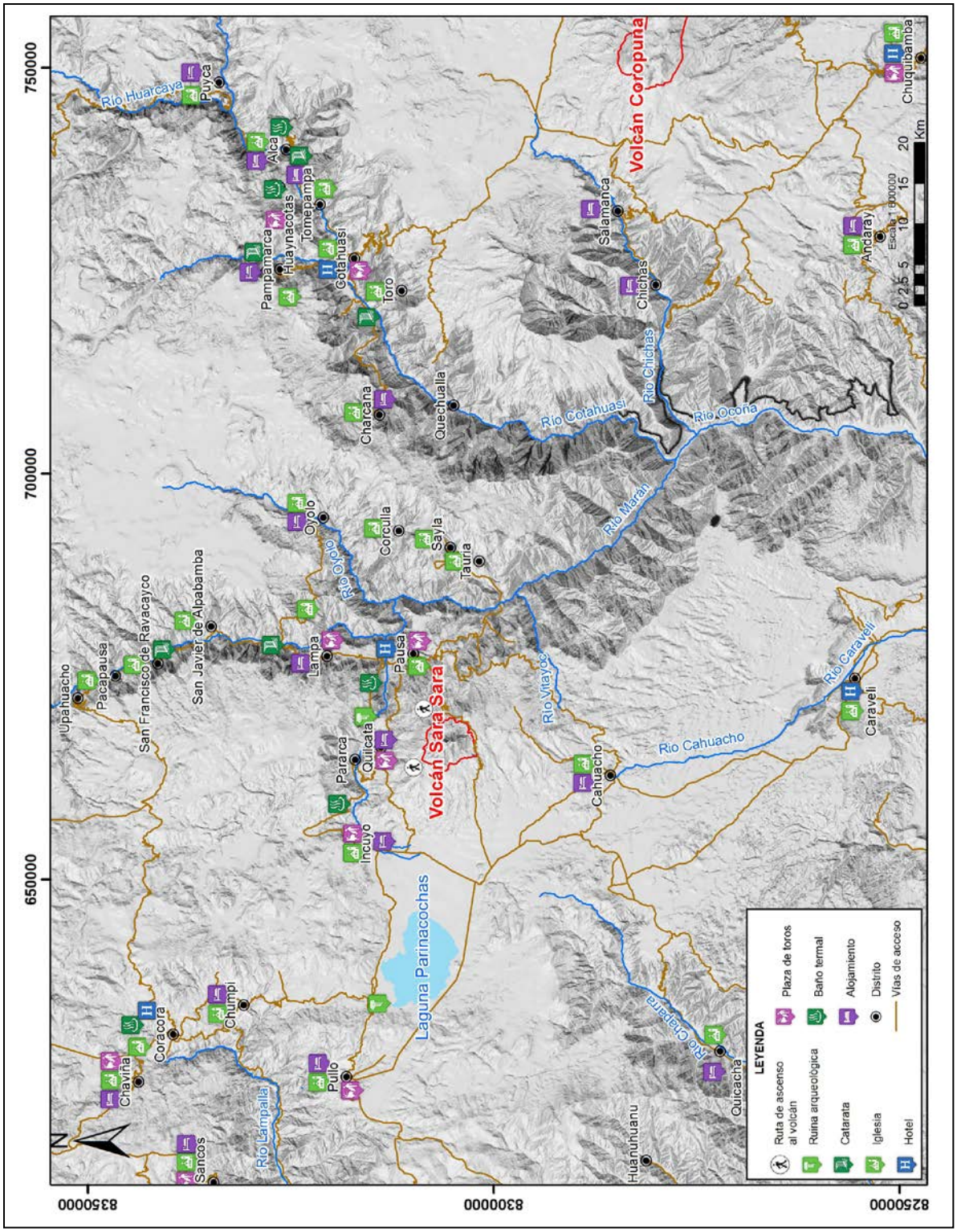


Figura 1.4 Mapa de atractivos turísticos e infraestructura hotelera localizados alrededor del volcán Sara Sara

- Zona arqueológica de Huampupampa, ubicada al NE de la localidad de Sara Sara-Quilcata (fotografía 1.2), donde se aprecia una andenería inca.
- Catarata de Lacaya, ubicada a 3.5 km al NO de la localidad de Lacaya, donde se puede disfrutar de la catarata y el buen clima.

Fotografía 1.2 Vista de la zona arqueológica de Huampupampa (Sara Sara- Quilcata)

Fotografía 1.3 Vista del sector de Lacaya (Incuyo)

- Baño Termal de Mirmaca, conocido como "Estera Mirmaca", se encuentra en la margen izquierda del río Mirmaca, en el distrito de Pausa. Sus aguas contienen sustancias minerales como silicatos y sales.

Fotografía 1.4 Vista del baño termal de Mirmaca, al fondo del valle del río Mirmaca

- La laguna Parinacochas, localizada a 21 km al oeste de la cima del volcán Sara Sara (fotografía 1.5), representa uno de los principales recursos turísticos en la zona. Cabe mencionar que la laguna Parinacochas es una laguna de tipo endorreica, ya que no presenta un drenaje directo al océano. Esta laguna alberga miles de parihuanas, de ahí el nombre de "Laguna Parinacochas".

Fotografía 1.5 Vista de la laguna Parinacochas, donde existe una variada fauna silvestre, entre ellos, parihuanas y patos

- Pinturas rupestres de Supay Rumi, las cuales tienen una antigüedad aproximada de 1200 años antes de nuestra era.
- Pampa de Auquihuato, localizada en la parte alta del distrito de Colta, a 38 km al NE del volcán Sara Sara, representa a un santuario natural. En esta zona se encuentra el volcán Auquihuato.
- Sitio arqueológico de Lampa, localizado en el distrito del mismo nombre, donde se observa un sistema de andenería que sigue estando en uso.
- Baño termal de Huacuya, que corresponde a aguas termomedicinales, que además de brindar un momento de relajación, también ofrece alivio del reumatismo.
- Cañones de los ríos Huanca Huanca, Marán y Cotahuasi, donde se puede apreciar valles profundos o encañonados de gran belleza paisajística.
- En Pausa nació a principios del siglo XVII, el tejido de las apaschas, que hasta hoy se conserva. También se tejen ponchos, costales, alforjas. Se elaboran bolsos de cuero, uno que otro artículo de cuero repujado, y alhajas de plata.

1.8.4 Obras de infraestructura

Además, existen diversas obras localizadas en áreas aledañas al volcán Sara Sara:

- La presa Vado-Congoza, la cual permite embalsar 12 millones de metros cúbicos de agua para mejorar la irrigación de 2265 ha de terrenos. Beneficia a los agricultores de los distritos de Pausa, Lampa, Pararca y Sara Sara, en la provincia de Páucar del Sara Sara, y Puyusca, en la provincia de Parinacochas.
- Sistema de riego Huaccme, que abarca los distritos de Colta y Oyolo, provincia de Páucar del Sara Sara. El proyecto tiene como objetivo el incremento del rendimiento agrícola en las localidades de Colta y Oyolo; asimismo, busca el bienestar económico y social de los agricultores.
- Presa Ancascocha (provincia de Parinacochas), ubicada a 12 km del distrito de Coracora, comprende una extensión aproximada de 1960 ha, y pertenece al ámbito de la administración técnica de la Dirección Regional Acarí-Yauca-Puquio.
- Sistema de riego integral de agua Tucso-Tauria-Usuhua-Corculla-Sayna -Sayla-Oyolo
- Irrigación Pausa, cuya fuente nace en el río Pararca y tiene un recorrido a 18 km desde la bocatoma hasta el punto final, ubicado en el estanque del sector de Huayllas. Estas aguas con caudal de 1 m3/s irrigan más de 300 hectáreas de tierras.
- Carretera asfaltada Coracora-Incuyo-Pausa, que tiene como fin vincular la provincia de Páucar del Sara Sara con la provincia de Parinacochas y los distritos arequipeños de Yauca y Chala.
- El sistema eléctrico Coracora I y II etapa. Además, en la provincia de Páucar del Sara Sara (distritos de Colta, Corculla, Lampa, Pararca, Oyolo, Marcabamba, Pausa, San Javier de Alpabamba) existen pequeños sistemas eléctricos. En la provincia de Parinacochas, los distritos beneficiados son Coracora, Pullo, Chumpi, Puyusca. En el departamento de Arequipa, la provincia de La Unión, los distritos beneficiados son Sayla y Tauria; en la provincia de Caravelí, el distrito beneficiado es Cahuacho. La empresa ADINELSA suministra un total de 122 localidades y más de 10 000 usuarios.

CAPÍTULO II
GEOMORFOLOGÍA

El volcán Sara Sara presenta un cono ligeramente alargado de norte a sur (figura 2.1 y 2.2) que cubre un área de 47 km^2 y un volumen aproximado que varía entre 20 a 25 km^3. Se eleva desde los 4300 m s. n. m. hasta los 5505 m s. n. m. Está conformado por una intercalación de flujos de lava, domos erosionados y algunos depósitos volcanoclásticos y epiclásticos. La parte baja del sector occidental del volcán corresponde a una zona poco inclinada, surcada por quebradas de largo recorrido, que tienen entre 30 a 60 m de profundidad. Mientras, en su extremo oriental, corresponde a una zona semi-plana, surcada más hacia el este por valles con más de 1000 m de profundidad, con una pendiente más elevada que a veces llega a la vertical.

Para una mejor descripción, las unidades geomorfológicas han sido diferenciadas en tres grandes grupos: volcánicos, glaciares y otros.

2.1 GEOFORMAS DE ORIGEN VOLCÁNICO

2.1.1 Estratocono constituido de flujos de lava y domos (Es-la)

Corresponde a un apilamiento de lavas dacíticas y domos que conforman el volcán Sara Sara (fotografía 2.1 y figura 2.2). La mayoría de las lavas recorrieron menos de 5 km de distancia respecto al cráter. En la parte baja, las lavas (lavas del cono inferior) poseen pendientes poco inclinadas, que tienen entre 5° y 15° de inclinación, mientras que las lavas superiores (lavas y domos del cono superior y la cumbre) localizadas sobre los 4800 m s. n. m., presentan pendientes mayores a 30° de inclinación (fotografía 2.3). Las lavas están fracturadas y erosionadas.

Fotografía 2.1 Vista del sector sureste del volcán Sara Sara

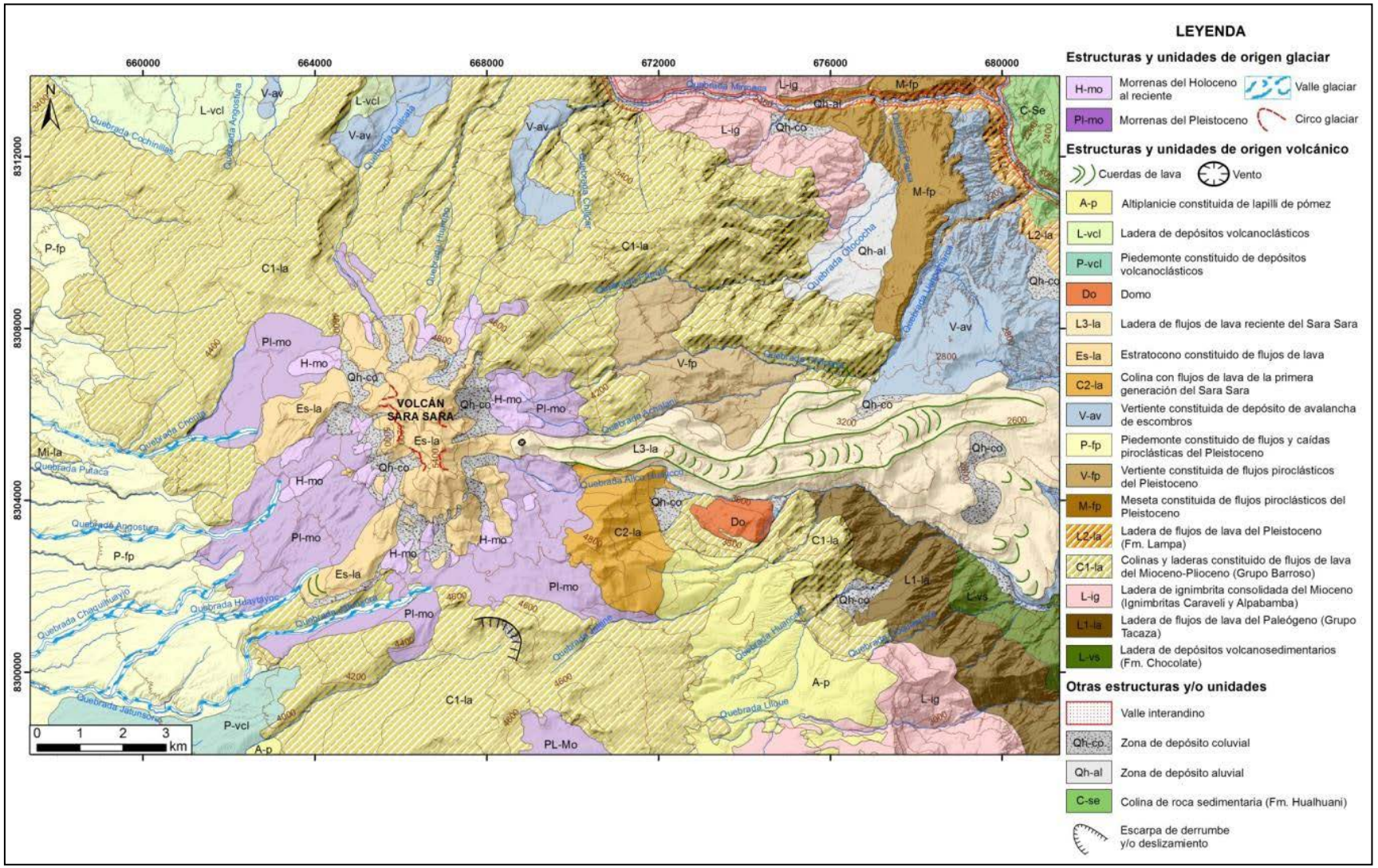


Figura 2.1 Mapa geomorfológico del volcán Sara Sara y áreas aledañas

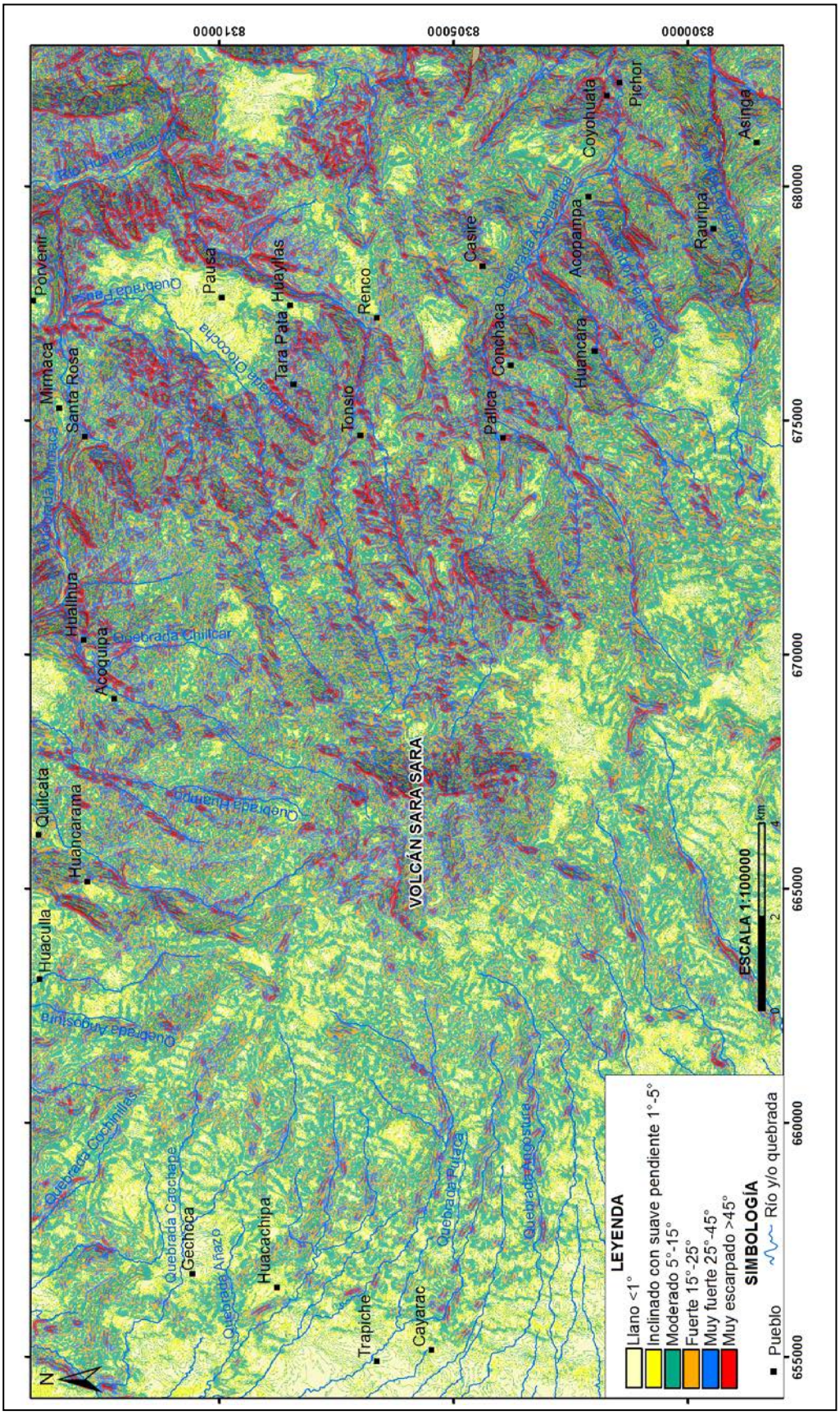


Figura 2.2 Mapa de pendientes del volcán Sara Sara y áreas aledañas

Las lavas del volcán Sara Sara fueron emitidas durante el Pleistoceno superior. Estas fueron afectadas por la erosión glaciar registrada principalmente durante el último máximo avance glaciar (LGM, por sus siglas en inglés), ocurrido entre 24 y 17 ka (Zech *et al*., 2009; Mayle *et al*., 2004), y los re-avances glaciares registrados en épocas posteriores al LGM.

2.1.2 Ladera de flujo de lava reciente (L3-la)

Al pie del flanco este del volcán Sara Sara, se distinguen flujos de lavas, emitidos a través de un vento, que descienden en dirección este hacia el río Marán, hasta una distancia aproximada de 14 km. Estas lavas presentan estructuras de flujo, como bordes de encauzamiento y cordones (figura 2.3). Estas lavas se emplazaron a menos de 3400 m s. n. m. y fueron emitidas por el volcán Sara Sara hace aproximadamente 14 ka, razón por la cual, no muestran evidencia de erosión por glaciares.

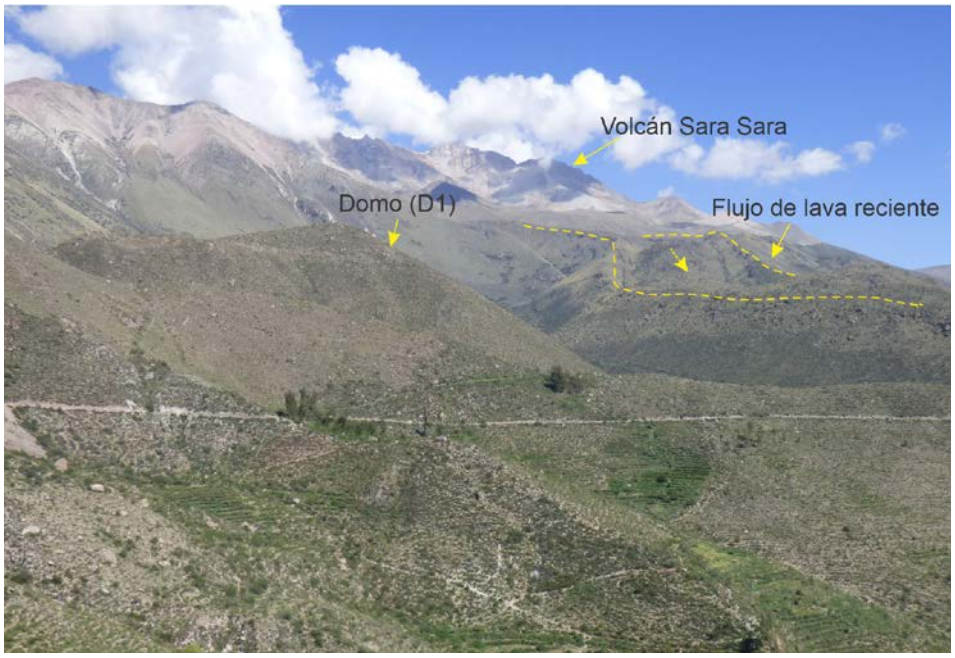


Figura 2.3 Vista del flujo de lava reciente y domo de lava dacítica visible al extremo oriental del volcán Sara Sara

2.1.3 Colinas y laderas constituidas por flujos de lava del Mioceno- Plioceno (C1-la)

Al E, N y NO del volcán Sara Sara, se distinguen colinas, algunas de las cuales presentan relieves empinados, con pendientes elevadas (figura 2.1 y 2.2), cortadas por quebradas angostas y profundas; mientras que al sur del volcán Sara Sara, se distinguen colinas de menos de 200 m de altura, con pendientes suaves, localizadas sobre una altiplanicie. Dichas morfologías están constituidas por secuencias de flujos de lavas andesíticas, densas, afaníticas y de color gris. Las lavas en total miden más de 800 m de espesor, y en general, están bastante erosionadas, fracturadas y oxidadas.

2.1.4 Vertiente constituida por depósitos de avalancha de escombros (V-av)

Corresponde a una zona de ladera localizada entre 12 y 14 km al este del volcán Sara Sara (figura 2.4), en inmediaciones de la margen derecha de la quebrada Ushpamarca y el poblado de Pausa. Estas laderas están labradas en depósitos de avalancha de escombros, poco endurecidos, que se caracterizan por presentar bloques lávicos y bloques densos de domos de composición andesítica y dacítica, de diferentes diámetros, incluidos dentro de una matriz fina de ceniza de colores gris claro y ocre.

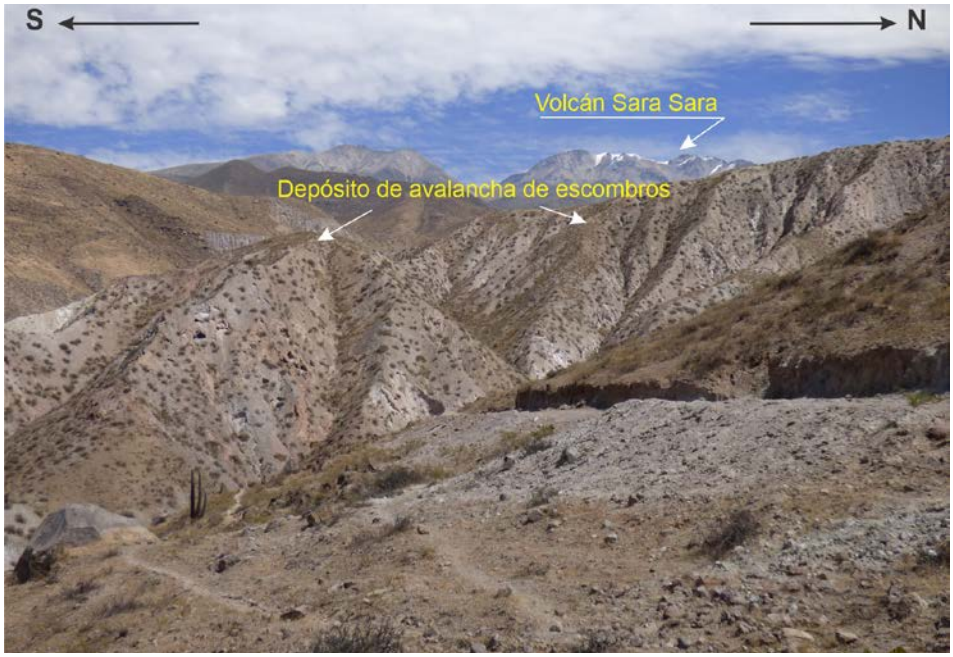


Figura 2.4 Vista de la zona del depósito de avalancha de escombros, al pie del flanco este del volcán Sara Sara (sector cerro Negro)

2.1.5 Ladera de ignimbrita consolidada del Mioceno (L-ig)

Se distinguen dos sectores donde son visibles estas morfologías:

Por un lado, a 13 km al noreste del volcán Sara Sara (figura 2.1 y 2.5), en las márgenes izquierda y derecha del río Mirmaca, las laderas se caracterizan por ser inclinadas, a veces llegan a medir hasta la vertical, y forman parte de las vertientes de los valles del río Mirmaca y Marán. Estas laderas están labradas en depósitos de flujos de pómez y ceniza (ignimbritas Alpabamba), consolidados, de color blanquecino, que tienen una pátina de color rojiza. En esta zona, la secuencia de flujos de pómez y ceniza, en total, mide aproximadamente 200 m de espesor.

Figura 2.5 Ladera de depósitos de ignimbritas del Mioceno cubierta por flujos de lavas andesíticas

Por el otro sector, se encuentra la zona de ladera que está localizada a 12 km al SE del volcán Sara Sara, en la margen derecha del cañón del río Uchubamba-Marán (figura 2.1). En esta zona afloran secuencias de ignimbritas consolidadas de composición riolitica, de colores gris claro, con una pátina rojiza perteneciente a la ignimbrita Caravelí. Dichas ignimbritas forman laderas que tienen pendientes pronunciadas (30-80° de inclinación). En total, la secuencia mide aproximadamente 300 m de espesor.

2.1.6 Piedemonte constituido por flujos y caídas piroclásticas del Pleistoceno (P-fp)

Corresponde a una extensa área poco inclinada, de menos de 10° de inclinación, visible al extremo occidental del volcán Sara Sara, en inmediaciones de la zona de Cayarac. Esta zona está constituida por una secuencia intercalada de depósitos de flujos de pómez y ceniza, flujos de bloques y ceniza, y lahares masivos, poco consolidados, de color gris. Está surcada por quebradas amplias, como también angostas y relativamente profundas (menos de 60 m de profundidad), entre las que destacan las quebradas Angostura, Ullacha, Huaytayoc, Jatunsora y Pomahuasi (figura 2.6).

Figura 2.6 Vista de la quebrada Jatunsora y de la zona de piedemonte, al oeste del volcán Sara Sara

2.1.7 Domos de lava (Do)

En el área de estudio, se distinguen dos domos de lavas de forma cónica y algo simétricas que presentan laderas de moderada a fuerte pendiente (30°-70° de inclinación). Estos domos fueron emplazados en diversos periodos, por lo cual son presentados según el orden cronológico:

El domo de la lava (D1) está ubicado a 7 km al SE del volcán Sara Sara, denominado como cerro Itanezo (figura 2.3). Dicho domo tiene forma cónica y tiene 1.1 km de diámetro y una altura de ~ 420 m.

El domo (D2) está localizado al extremo occidental de la cima del volcán Sara Sara. Este domo en forma de una cúpula irregular, mide aproximadamente 500 m de diámetro y 380 m de altura.

2.1.8 Altiplanicie constituida por lapilli de pómez (Pi)

Corresponde a una zona semi-plana (menos de 10° de inclinación), localizada sobre los 3800 m s. n. m. al pie del flanco SE del volcán Sara Sara (fotografía 2.2), entre 8 y 10 km de distancia de la cumbre de dicho volcán. Esta zona está surcada por quebradas anchas y algunas profundas, que discurren en dirección este hacia los sectores de Ocopampa y Rauripa, y río Marán. Litológicamente, está constituida por una intercalación de depósitos de caída de lapilli de pómez, y algunos depósitos de oleadas piroclásticas, poco endurecidos o a veces sueltos, emplazados durante la segunda etapa eruptiva del volcán Sara Sara ("Sara Sara II"). Estos depósitos recubren secuencias de flujos de lavas andesíticas y dacíticas del Mioceno y Pleistoceno.

Fotografía 2.2 Vista de depósitos de caída de lapilli de pómez, intercalados con oleadas piroclásticas, al pie del flanco sureste del volcán Sara Sara

2.1.9 Meseta constituida por flujos piroclásticos del Pleistoceno (M-fp)

Esta unidad es relativamente amplia, alargada de norte a sur (figura 2.7), con un relieve de poca pendiente (<8° de inclinación); está constituida por depósitos de corrientes de densidad piroclástica que cubren depósitos de avalanchas de escombros y flujos de lavas. Estos depósitos han sido disectados por los cursos de los ríos Huanca Huanca, Marán y otros, que son relativamente profundos y angostos. Sobre estas mesetas se asientan los poblados de Pausa, Mirmaca, Lampa, Marcabamba y sus anexos.

Figura 2.7 Vista del poblado de Pausa, asentado sobre una meseta semiplana disectada por quebradas relativamente profundas en forma de "V"

2.1.10 Colinas de flujos de lava de la primera generación del Sara Sara (C2-la)

Corresponde a un apilamiento de flujos de lavas dacíticas, emitidos durante la primera etapa eruptiva del volcán Sara Sara que aflora en el cerro Yanarancha, a 4 km al este de la cumbre del dicho volcán (figura 2.1 y 2.8). La erosión de los flujos de lava ha generado una colina alargada, de más de 1.4 km de largo por 700 m de ancho, y de 200 a 600 m de alto. Las laderas inferiores tienen entre 20-50° de inclinación, mientras que la parte superior es empinada (50-70° de inclinación). Los flujos de lava son de color gris, de textura porfirítica, y están constituidos de gruesos fenocristales de plagioclasa, biotita, óxidos de Fe-Ti, y eventualmente anfíbol.

Figura 2.8 Vista de la zona de colina, constituida de una secuencia de lavas dacíticas, al este del volcán Sara

2.1.11 Ladera de depósitos volcanoclásticos (L-vcl)

Corresponde a una zona de ladera localizada entre 8 y 13 km al norte y NO del volcán Sara Sara, constituida de una intercalación de depósitos de lahares (flujos de escombros y flujos hiperconcentrados), intercalados con algunos niveles de corrientes de densidad piroclástica (fotografía 2.3), alterados, erosionados y deformados. Los depósitos son de color marrón, bruno, gris y blanquecino, que están consolidados y endurecidos. Las capas miden desde pocos centímetros a más de 4 m de espesor. Las laderas tienen entre 50-80° de inclinación.

Fotografía 2.3 Vista de la zona de ladera al NO del volcán Sara Sara, constituida principalmente de una secuencia de depósitos volcanoclásticos

2.1.12 Piedemonte constituido por depósitos volcanoclásticos (P-vcl)

Corresponde a una zona amplia de suave pendiente (menor de 12° de inclinación), localizada entre 9 y 12 km al SO del volcán Sara Sara, sobre los 3300 m s. n. m. (figura 2.9). Esta zona está constituida esencialmente de una intercalación de depósitos de flujos de escombros (lahares), flujos hiperconcentrados, intercalados con algunos niveles de caída de lapilli de pómez y flujos piroclásticos de bloques y ceniza. Estos depósitos son poco o nada consolidados, de tonalidades grisáceas, y son surcados por quebradas angostas y poco profundas.

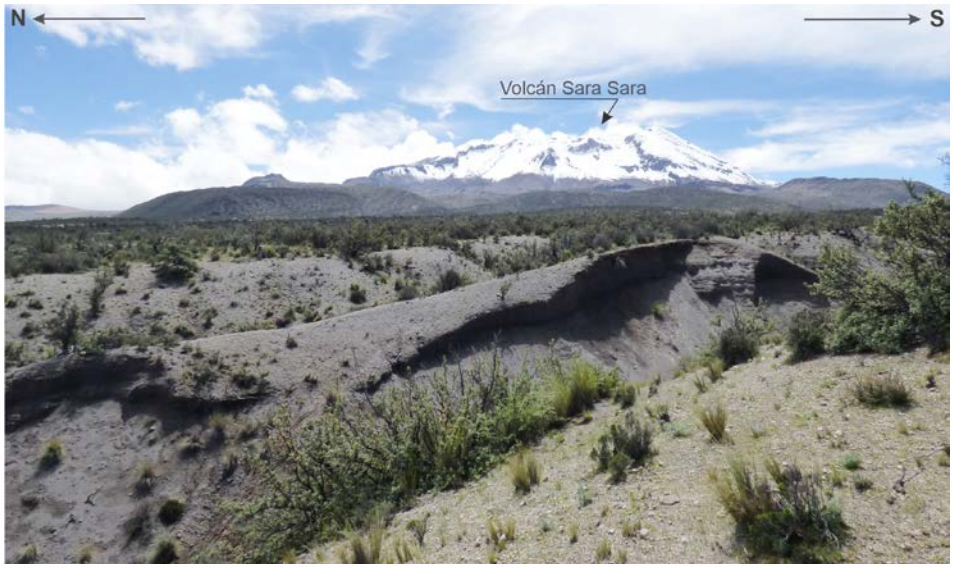


Figura 2.9 Vista de la zona de piedemonte al suroeste del volcán Sara Sara, constituida de una secuencia de depósitos volcanoclásticos

2.1.13 Vertiente constituida de flujos piroclásticos del Pleistoceno (V-fp)

A 8 km al este del volcán Sara Sara, en inmediaciones del poblado de Tonsio, se distingue una zona de vertiente labrada en depósitos de flujo piroclástico de bloques y ceniza, poco endurecidos, que tienen más de 10 m de espesor. Los depósitos son masivos y de color gris claro. La zona de vertiente es cortada por quebradas poco profundas y angostas, entre ellas resaltan las quebradas Papata, Chilcana y Achalani.

2.1.14 Ladera de flujos de lava del Pleistoceno (Formación Lampa) L2-la

A una distancia de 12 y 16 km al NE del volcán Sara Sara, en ambas márgenes del valle del río Mirmaca, y en la margen derecha del río Huanca Huanca, se distinguen laderas casi verticales, constituidas por una secuencia de flujos de lavas andesíticas, afaníticos, de color gris oscuro, dispuestos de manera subhorizontal. Aquí las lavas tienen un espesor total de más de 300 m, denominado inicialmente por Pecho (1993) como volcánico Lampa. Estas lavas yacen en discordancia sobre rocas sedimentarias marinas del Grupo Yura, y están en parte cubiertas por depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza del volcán Sara Sara y secuencias de depósitos lacustres.

Fotografía 2.4 Vista de zona de ladera constituida de flujos de lava en la margen izquierda del río Mirmaca

2.1.15 Ladera de flujos de lava del Paleógeno (Grupo Tacaza) L1-la

Al SE del volcán Sara Sara, en el sector de Pallca, y en la margen derecha del río Marán, se distingue una zona de ladera litológicamente constituida por una gruesa secuencia estratificada de depósitos volcanoclásticos y depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza que engloban fragmentos de rocas de composición andesítica y dacítica, de color gris verdoso a gris rojizo. Estos depósitos están consolidados, ligeramente deformados, y se hallan en discordancia angular sobre las rocas volcano-sedimentarias de la Formación Chocolate del Jurásico.

2.1.16 Ladera de depósitos volcano-sedimentarios (Formación Chocolate) L-vs

A 20 km al E-SE del volcán Sara Sara, se distinguen zonas de laderas de pendientes pronunciadas (30-80° de inclinación), que conforman las vertientes del cañón del río Uchubamba-Marán (figura 2.1 y 2.10). En esta zona aflora una secuencia estratificada de rocas volcano-sedimentarias y depósitos de corrientes de densidad piroclástica de composición dacítica y andesítica de colores ocre, gris y rojizo oscuros, denominados como Formación Chocolate (Jurásico) por Martínez & Cervantes (2001). Las capas de esta formación están plegadas y generalmente tienen espesores centimétricos a métricos, y a veces alcanzan a medir hasta 8 m de espesor. En total, la secuencia mide aproximadamente 800 m de espesor.

Figura 2.10 Vista de zonas de ladera constituidas de una intercalación de sedimentos y corrientes de densidad piroclástica asignada como Formación Chocolate

2.2 GEOFORMAS DE ORIGEN GLACIAR

Durante el Pleistoceno superior y el Holoceno, en los Andes centrales, han ocurrido periodos glaciares. Entre ellos, el más importante denominado el Último Avance Glaciar Máximo (LGM, por sus siglas en inglés), durante el cual gran parte de los Andes fue cubierto de hielo y nieve. Según Zech *et al*. (2009) y Mayle *et al*. (2004) el LMG ocurrió entre 24 y 17 ka, mientras que Clapperton (1993) afirma que ocurrió entre 18 y 12 ka. Estudios realizados por Alcalá-Reygosa *et al*. (2017) por medio de elementos cosmogénicos ^{36}Cl sobre morrenas del volcán nevado Hualca Hualca, localizado a ~175 km del volcán Sara Sara, muestran que el LGM ocurrió entre 17 y 16 ka. Posteriormente, en los Andes centrales han ocurrido re-avances glaciares, entre 18 y 14 ka (periodo Tardiglaciar), y entre 12 y 10 ka. Este último probablemente asociado a la anomalía climática denominada "Younger Dryas" (Clapperton 1983; Zech *et al*., 2007; Alley, 2000). También ocurrieron re-avances glaciares durante el Neo-glaciar, es decir, en los últimos 5000 años.

Las geoformas que a continuación se describen fueron modeladas principalmente durante las glaciaciones del Plio-cuaternario. Actualmente, el volcán Sara Sara solo tiene una cobertura de nieve y hielo de poco volumen, y de manera estacional.

2.2.1 Cobertura glaciar

El volcán Sara Sara presenta periódicamente una delgada capa o cobertura de hielo y nieve que tiene entre 30 y 60 cm de espesor, ubicada entre 4900 y 5505 m s. n. m. Esta cobertura glaciar está presente desde los meses de noviembre hasta marzo de cada año, es decir, durante la época de lluvia en la zona altoandina, y van desapareciendo a mediados de año. Gracias a esta capa de hielo, existe un importante abastecimiento de aguas para la mayoría de los poblados que se encuentran en la parte baja de dicho volcán.

2.2.2 Geoformas de erosión

- **Circos glaciares**, son geoformas semi-circulares y cóncavas labradas en la parte alta de los flancos N, O, E y SO del volcán Sara Sara. Se han reconocido al menos siete circos glaciares, ubicados en zonas de cambio de pendiente del cono volcánico. Estos circos son el resultado de la intensa actividad glaciar a la cual estuvo sometido el volcán Sara Sara en épocas pasadas (figura 2.11).

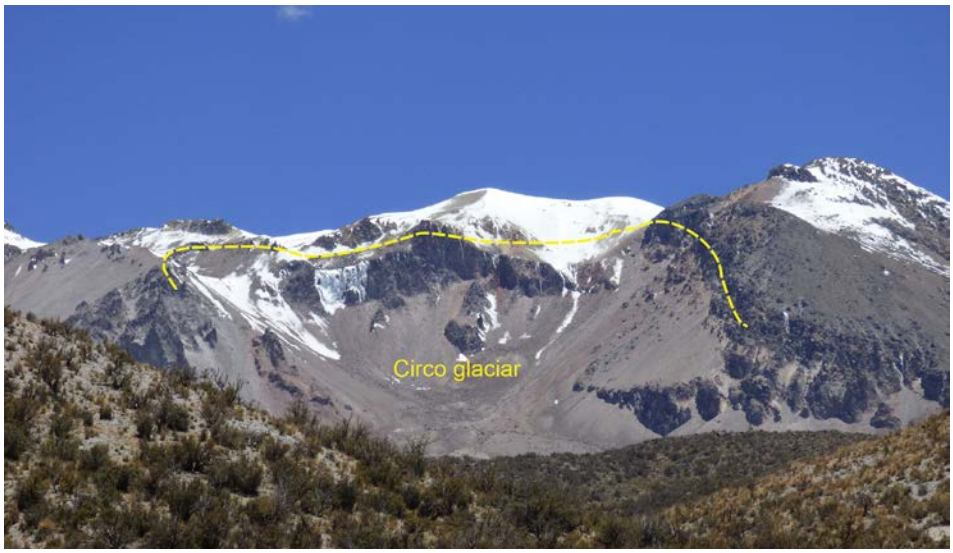


Figura 2.11 Circo glaciar visible en el flanco suroeste del volcán Sara Sara

- **Valles glaciares:** En la zona se distinguen al menos tres valles glaciares localizados al extremo oeste y suroeste del volcán Sara Sara, entre los 4000 a 4400 m s. n. m., los cuales son descritos a continuación: a) uno de los valles se localiza en la naciente de la quebrada Ullacha Grande, al oeste del volcán Sara Sara, (figura 2.1 y 2.12), que se prolonga en dirección oeste hacia la laguna Parinacochas; b) otro corresponde a la quebrada Jatunsora (al suroeste del volcán Sara Sara), que es un valle glaciar abierto en forma de "U" o artesa (figura 2.1 y 2.6); c) otro valle está localizado al oeste del volcán Sara Sara, el cual corresponde a la quebrada Angostura (figura 2.1). Al fondo de estos valles, se encuentran depósitos de lahares y depósitos aluviales dispuestos en forma de terrazas escalonadas, que a veces miden más de 6 m de espesor.

  Estos valles tienen un ancho promedio de 300 m y una longitud aproximada de 3.5 km, con una morfología cóncava y con geoformas de morrenas en sus costados. Los valles fueron originados por el desplazamiento y derretimiento del glaciar acumulado en el edificio volcánico. Estos sirvieron como zonas de encauzamiento de la desglaciación, conjuntamente con los depósitos morrénicos.

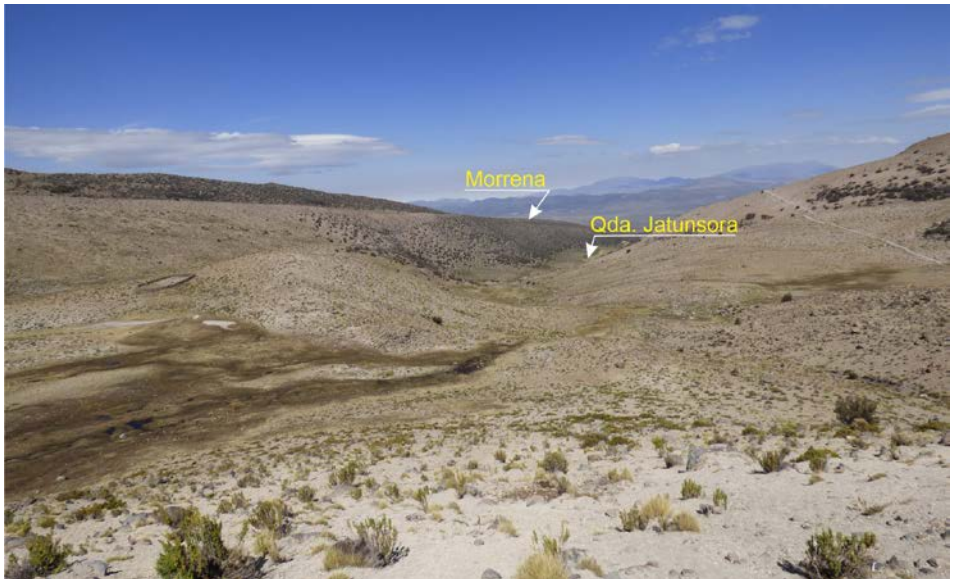


Figura 2.12 Vista aguas abajo de la quebrada Jatunsora, que corresponde a uno de los tres valles glaciares distinguidos en inmediaciones del volcán Sara Sara

2.2.3 Geoformas de acumulación

- **Morrenas:** En la zona corresponden a acumulaciones de bloques de rocas volcánicas, incluidas dentro de una matriz areno-limosa, poco endurecida (figura 2.13), localizadas en los alrededores del volcán Sara Sara. Estas tienen entre 8 a 20 m de altura y de más de 100 m de longitud. Según la época de emplazamiento y su posición altitudinal, se distinguen hasta dos generaciones.

  Morrenas del Pleistoceno: Corresponden a los depósitos morrénicos más antiguos distinguidos en áreas alejadas del volcán Sara Sara. Estos se encuentran a altitudes de 4000 a 4300 m s. n. m., presentando superficies onduladas u ovaladas. Estas probablemente se emplazaron durante el último avance glaciar (LGM), es decir, entre 24 y 17 ka.

  Morrenas del Holoceno al reciente: Corresponden a la segunda generación de depósitos morrénicos, encontrados a altitudes de 4300 a 4800 m s. n. m. Estas presentan superficies onduladas y suavizadas, y a veces yacen sobre las morrenas de la primera generación. Las morrenas se encuentran ubicadas al pie de las laderas o flancos O, E, SE, SO y NO del volcán Sara Sara. Estos depósitos morrénicos se relacionan con fases posteriores al re-avance glaciar y se caracterizan por ser poco voluminosos, o de reducidas dimensiones respecto a los anteriores.

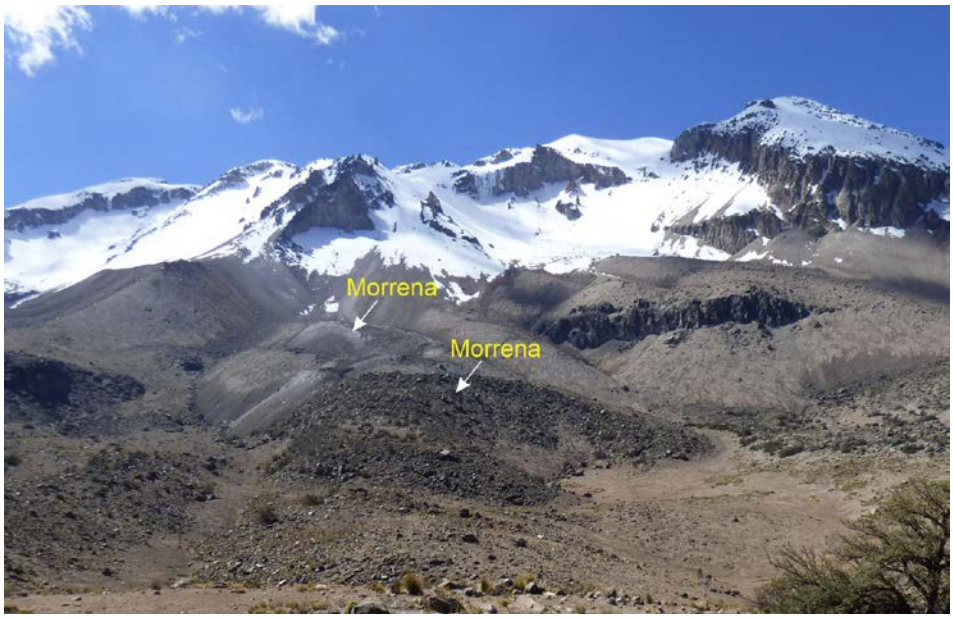


Figura 2.13 Morrenas del Holoceno que afloran al pie del flanco oeste del volcán Sara Sara

  Las morrenas son el resultado de los periodos de desglaciación, también son producto de la erosión de las estructuras rocosas, del acarreo y acumulación de estos.

- **Sedimentos glaciares, aluviales y bofedales** rellenan las quebradas, valles y altiplanicies ubicados al suroeste y este del volcán Sara Sara. A veces forman extensas superficies planas.

2.3 OTRAS GEOFORMAS

A continuación, se hace una breve descripción de otras geoformas distinguidas en el área de estudio.

2.3.1 Valles interandinos

Al extremo NE y E del volcán Sara Sara, existen dos valles de considerable longitud: valle del río Pararca-Mirmaca y valle del río Huanca Huanca-Uchubamba (figura 2.14), cuyos cursos medios e inferiores presentan perfiles transversales asimétricos, y laderas de moderada a fuerte pendiente. Por ejemplo, el valle del río Pararca-Mirmaca presenta perfiles subverticales, muy estrechos y a veces encañonados, de más de 1200 m de profundidad. Asimismo, el valle del río Huanca Huanca tiene entre 800 a 1700 m de profundidad, y presenta vertientes muy inclinadas y profundas a manera de cañones. Estos valles son el resultado de la erosión de los ríos labrados en las mesetas constituidas de rocas volcánicas y sedimentarias.

El valle interandino Huanca Huanca-Marán y sus tributarios presentan perfiles en forma de "V" (fotografía 2.5). Estos son relativamente angostos, cuyos cauces a veces sobrepasan los 120 m de ancho y las laderas de dichos valles son bastante inclinados (>30°).

Fotografía 2.5 Vista aguas abajo del valle del río Huanca Huanca, al noreste del volcán Sara Sara

2.3.2 Pampas

Las pampas son áreas semi-planas y extensas, localizadas al este, oeste y SE del volcán Sara Sara (fotografía 2.6). Estas áreas están disectadas por quebradas poco profundas y de corto recorrido. Se distinguen varios tipos: área hidromórfica de pajonales, área desértica de muy escasa vegetación, área desértica rocosa y nival, etc. Por ejemplo, el área desértica de muy escasa vegetación puede observarse hacia el oeste del volcán Sara Sara, como la pampa Rupascahuasi. Resaltan además las pampas de Ischupilana, Parinacochas y Huancarama.

Fotografía 2.6 Pampa de Parinacochas, localizada al oeste del volcán Sara Sara

2.3.3 Colina de roca sedimentaria (Formación Hualhuani)

A 17 km al extremo noreste del volcán Sara Sara, en el sector de Luicho, en medio de dos valles profundos —los valles del río Pararca-Mirmaca y el valle del río Oyolo—, existe una zona de colina de moderada a fuerte pendiente (figura 2.15) de más de 1200 m de altura. Esta zona está constituida de rocas sedimentarias estratificadas que corresponden a areniscas de la Formación Hualhuani.

Figura 2.14 Zona de colina observada en el sector de Luicho, al NE del volcán Sara Sara

CAPÍTULO III
GEOLOGÍA

3.1 MARCO TECTÓNICO REGIONAL Y LOCAL

En base al análisis de imágenes satelitales Aster 2006, Landsat, Google Earth, datos de campo, y estudios realizados por Morche & Nuñez (1998) y Martínez & Cervantes (2001), en áreas aledañas al volcán Sara Sara, se puede diferenciar dos principales sistemas de fallas y/o lineamientos (figura 3.1):

- **El sistema de fallas NO-SE** es el de mayor longitud y forma parte del sistema de fallamiento de dirección andina NO-SE. Este sistema controla el emplazamiento de volcanes plio-cuaternarios a lo largo del extremo occidental de la Cordillera de los Andes, así como el curso de los principales ríos de la cuenca del río Ocoña, como el río Huanca Huanca, Marán y otros.

  En inmediaciones del volcán Sara Sara, existe una serie de lineamientos de rumbo NO-SE, como por ejemplo, los ubicados en el sector oeste del volcán Sara Sara, que marca el límite de los cerros y la altiplanicie. Asimismo, al NE del volcán Sara Sara, existe una falla normal que separa ignimbritas de la Formación Alpabamba del Mioceno, con depósitos piroclásticos del volcán Sara Sara.

- **El sistema de fallas NE-SO** marca la red de drenaje existente alrededor de dicho volcán. Las fallas con este tipo de rumbo se observan al S, O, NO y NE del volcán Sara Sara (figura 3.1). Corresponde principalmente a fallas normales con desplazamiento vertical. Los escarpes son casi verticales y tienen algunas decenas a centenas de metros de longitud.

  Asociadas a este sistema de fallas se distinguen varios lineamientos y escarpes que pueden corresponder a fallas.

- **Otros:**

Al NO del volcán Sara Sara, se distingue una depresión de forma semi-circular, en donde se ubica la laguna Parinacochas, que corresponde a la caldera volcánica "Incahuasi" (Le Pennec *et al*., 2016). En los límites o bordes del extremo occidental de dicha caldera, se distinguen trazas de un sistema de fallas normales. Asimismo, al interior de esta caldera, por inmediaciones del poblado de Yurachuasi, se observa fallas normales a manera de graben (figura 3.1).

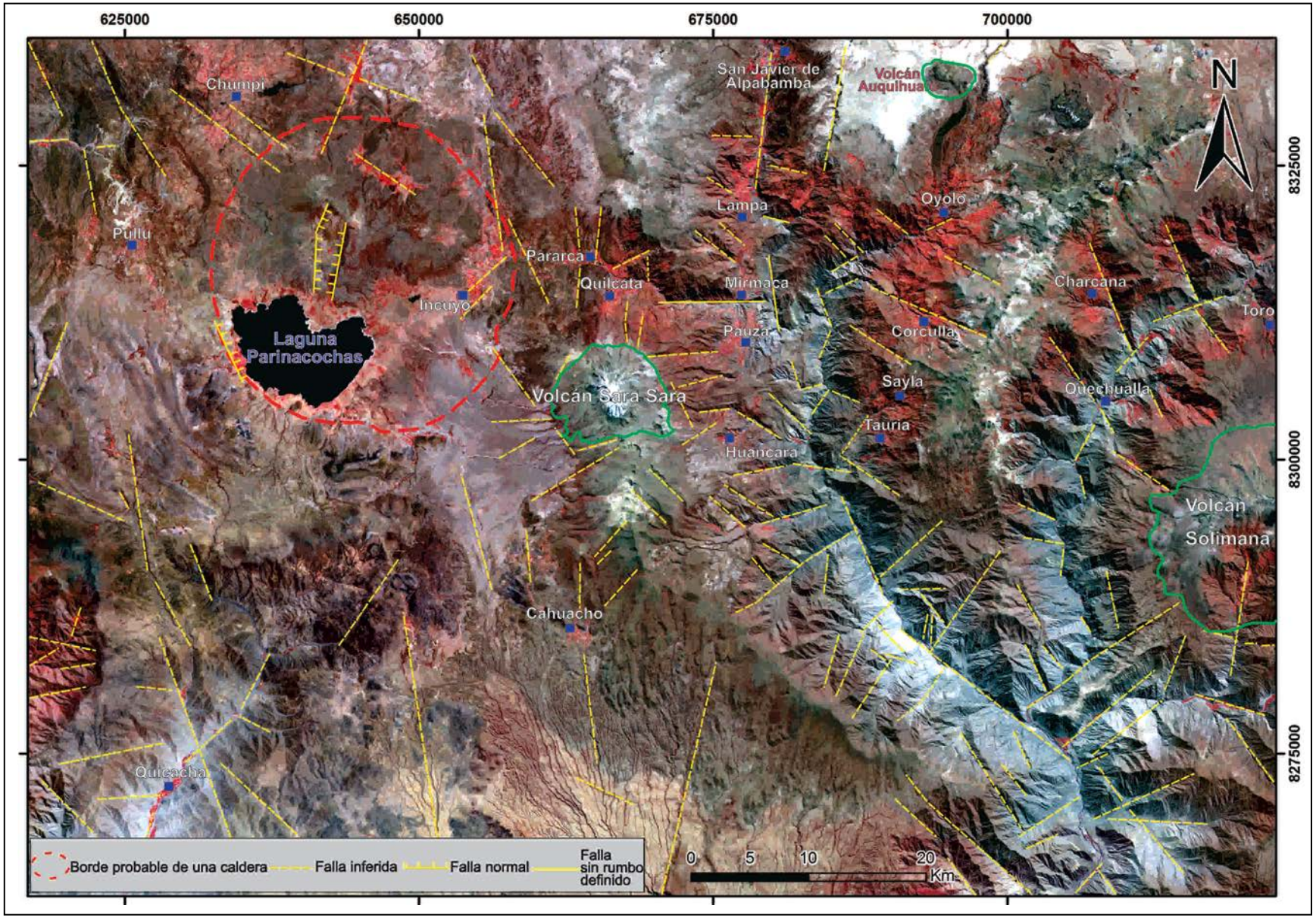


Figura 3.1 Imagen satelital Aster 2006, resalta las estructuras volcánicas y tectónicas aledañas al volcán Sara Sara

3.2 ESTRATIGRAFÍA DEL SUBSTRATO (PRE-SARA SARA)

El substrato del volcán Sara Sara está constituido por una gruesa secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias del Mesozoico (Formación Chocolate, Formación Hualhuani); esta secuencia está cubierta por rocas de las formaciones del Oligo-Mio-Plioceno (formaciones Tacaza, Huaylillas, Alpabamba y Barroso). A continuación, se describen las características de dichas formaciones y/o secuencias.

3.2.1 Formación Chocolate (Jurásico inferior)

La Formación Chocolate (195-190 Ma) fue inicialmente estudiada por Jenks (1948). Se la ubica a 500 m aguas abajo de los baños termales de Socosani (Arequipa). Esta formación está constituida por una secuencia de rocas volcano–sedimentarias del Jurásico inferior que se exponen en varios tramos a lo largo de la costa sur del Perú, desde Paracas hasta la frontera con Chile.

A 20 km al SE del volcán Sara Sara (fotografía 3.1), en ambas márgenes del cañón del río Uchubamba-Marán, Martínez & Cervantes (2001) han descrito una secuencia estratificada de rocas volcano-sedimentarias y depósitos de corrientes de densidad piroclástica, de composición dacítica y andesítica, de colores ocre, gris, rojizo oscuro, asignada como Formación Chocolate. Las capas de esta formación generalmente son de espesores centimétricos a métricos, y a veces alcanzan a medir hasta 8 m de espesor. En total, la secuencia mide aproximadamente 800 m de espesor. Estructuralmente, las rocas de esta formación se encuentran deformadas, con rumbos al NE y buzamientos de 15 y 30°, además, forman pliegues abiertos en forma de “S”.

Fotografía 3.1 Vista de la Formación Chocolate, margen izquierda del río Uchubamba

3.2.2 Formación Hualhuani (Cretáceo inferior) (Ki-hu)

En el sector de Luicho, a 10 km al NE de la localidad de Pausa, se distingue una secuencia de areniscas cuarzosas gris blanquecinas (fotografía 3.2), dispuestas en capas de espesores centimétricos a métricos, e intercalados con algunos niveles de limolitas gris y gris verdosas. Esta secuencia presenta niveles con estratificación cruzada, y un buzamiento 35-40° hacia el SO. El espesor total de la secuencia sobrepasa los 400 m. Según Pecho (1983), esta secuencia pertenecería a la Formación Hualhuani (Cretáceo inferior) que forma parte del Grupo Yura. Dicha secuencia está cubierta por depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza, y depósitos de lahares, probablemente pertenecientes al Grupo Tacaza. Este sector alberga vetas de oro, actualmente explotadas.

Fotografía 3.2 Secuencia de areniscas cuarzosas de la Formación Hualhuani, en el sector de Luicho, a 10 km al noreste de la localidad de Pausa

3.2.3 Formación Tacaza (Oligoceno) (PN-Ta/An)

Las rocas que conforman el Grupo Tacaza tienen una amplia distribución geográfica a lo largo de la cordillera de los Andes del sur peruano. Dataciones realizadas por Wasteneys (1990), Sandeman *et al*. (1995), Thouret *et al*. (2007), Mamani *et al*. (2010) y otros autores, en rocas del Grupo Tacaza, determinaron una edad de emplazamiento que varía entre 30 a 24 Ma (Oligoceno).

Al este del volcán Sara Sara, en el sector de Pallca, se ha reconocido una gruesa secuencia estratificada de depósitos volcanoclásticos, conformada por lahares y depósitos de flujos de bloques y ceniza que engloban fragmentos de rocas volcánicas de composición andesítica y dacítica, de color gris verdoso a gris rojizo. Estos depósitos están consolidados, y se hallan en discordancia angular sobre rocas de la Formación Chocolate del Jurásico (figura 3.2).

Figura 3.2 Secuencias de flujos piroclásticos de bloques y cenizas y lahares pertenecientes al Grupo Tacaza, a 10 km al este del volcán Sara Sara

Asimismo, en la zona de Huancará y Rauripa, margen derecha del río Marán, aflora una potente secuencia de depósitos de flujo piroclástico de bloques y ceniza endurecidos, y a veces consolidados, de color gris, intercalados con niveles de lahares (figura 3.2). Esta secuencia tiene más de 600 m de espesor. Los depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza presentan bloques de rocas volcánicas alteradas, de tipo cloritización y argilización.

3.2.4 Formación Alpabamba (Mioceno inferior-superior)

Las ignimbritas que constituyen esta formación se emplazaron entre 18.23 ± 0.17 y 20.10 ± 0.12 Ma (Thouret *et al*., 2016), correspondiente al Mioceno inferior. Estas ignimbritas descansan en discordancia angular sobre rocas del Grupo Tacaza.

En el área de estudio, a 15 km al NE del volcán Sara Sara, Martínez & Cervantes (2001) han reconocido secuencias de ignimbritas pertenecientes a la Formación Alpabamba (figura 3.3). Estas ignimbritas son de color gris claro, que tienen una pátina de alteración de color rosado a rojizo, soldadas y consolidadas, que dan origen a grandes farallones. Estas ignimbritas tienen un espesor total de 800 m. Las ignimbritas son de composición riolítica y dacítica, intercaladas con niveles de limos y arenas.

Figura 3.3 Ignimbritas riolíticas pertenecientes a la Formación Alpabamba, en inmediaciones de la localidad de Santa Ana (Pausa)

3.2.5 Ignimbrita Caravelí (Mioceno)

El término de ignimbrita Caravelí ha sido propuesto por Thouret *et al*. (2007), refiriéndose a una secuencia de ignimbritas inicialmente descritas y datadas entre 14 y 8 Ma por Tosdal *et al*. (1981) y Sébrier *et al*. (1988), como parte de la Formación Chuncatala. La ignimbrita Caravelí aflora en una zona de altiplanicie, al sur, oeste y sureste de la laguna Parinacochas, es decir, al suroeste del volcán Sara Sara, y se extiende hasta una distancia aproximada de 80 km. En total, mide entre 50 a 120 m de espesor y cubre un área de ~810 km^2 (Thouret *et al*., 2016).

Presenta dos unidades de enfriamiento: a) un depósito inferior con disyunción columnar; y b) un depósito superior, masivo, consolidado, que corresponde a un flujo de pómez y ceniza rico en cristales de cuarzo, biotita y plagioclasa. Dataciones radiométricas efectuadas en dichas ignimbritas por Thouret *et al*. (2016) arrojan edades que varían entre 9.35 ± 0.06 a 8.97 ± 0.06 Ma.

Fotografía 3.3 Vista de las ignimbritas Caravelí, en inmediaciones de la localidad de Cahuacho, SO del volcán Sara Sara

3.2.6 Grupo Barroso (Mioceno-Pleistoceno)

Está conformado por secuencias de flujos de lavas, así como por depósitos de corrientes de densidad piroclástica de composición andesítica y dacítica. Estos depósitos fueron originados por erupciones de tipo efusivo y explosivo, respectivamente, registrados a lo largo de la Cordillera de los Andes. El Grupo Barroso, en el sur peruano, está dividido en dos miembros:

1) El Barroso inferior, que está constituido por flujos de lavas emitidos por los complejos volcánicos y estratovolcanes mayormente andesíticos presentes de norte a sur, entre 16° y 20° S, y que aparecen emplazados hacia el seno de la Cordillera Occidental, durante el Mio-Plioceno (10-3 Ma), tal como lo señalan Mamani *et al*. (2010).
2) El Barroso superior, constituido por lavas y depósitos volcánicos asociados a los edificios volcánicos que fueron emplazados en la Cordillera Occidental durante el Plio-Pleistoceno (de 3 a 1 Ma) (Benavides, 1999; Mamani *et al*., 2010).

Lavas del Grupo Barroso

Al pie del flanco sur del volcán Sara Sara, aflora una secuencia de flujos de lavas andesíticas y afaníticas, de color gris, dispuestas de manera subhorizontal, que forman parte del substrato de dicho volcán. Cada flujo de lava mide entre 30 a 50 m de espesor, y se encuentra parcialmente fracturado (figura 3.7). Una de las lavas superiores en este estudio fue datada en 4.26 ± 0.03 Ma, que corresponde al Barroso inferior.

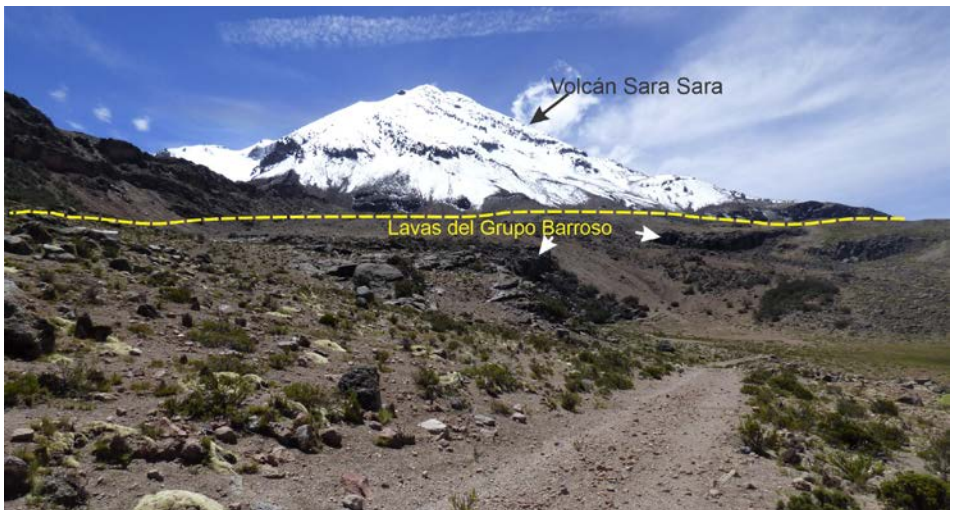


Figura 3.4 Vista de flujos de lavas subhorizontales del Grupo Barroso sobre los cuales yace el volcán Sara Sara

En el área de estudio, no se han reconocido o diferenciado secuencias volcánicas pertenecientes al miembro superior del Grupo Barroso; por ello, es necesario realizar dataciones radiométricas en rocas de los volcanes "antiguos" o extintos que afloran en inmediaciones del volcán Sara Sara, para determinar si algunos de ellos corresponden a dicho miembro.

3.2.7 Intercalación de depósitos volcanoclásticos y de corrientes de densidad piroclástica del Grupo Barroso

A una distancia de 8 y 13 km al N y NO del volcán Sara Sara, aflora una secuencia intercalada de depósitos de lahares (flujos de escombros y flujos hiperconcentrados), intercalados con algunos niveles de corrientes de densidad piroclástica (figura 3.5), alterados, erosionados y deformados. Los depósitos son de color marrón, bruno, gris y blanquecino, que están consolidados y endurecidos. Las capas miden desde algunos centímetros a más de 6 m de espesor.

3.2.8 Flujos de lavas de la Formación Lampa (Pl-La)

A 15 km al noreste del volcán Sara Sara, en los sectores de Mirmaca, Lampa y en la margen derecha del río Marán (cerca de la localidad de Marán), aflora una secuencia de flujos de lava andesítica y afanítica, de color gris oscuro, subhorizontal (figura 3.6), que forma una meseta alargada de norte a sur. Las lavas presentan un fracturamiento vertical y a veces forman columnas hexagonales. Aquí, las lavas tienen un espesor de más de 300 m, y rellenan el paleovalle del actual río Huanca Huanca.

Esta secuencia de lavas, inicialmente fue denominada por Pecho (1983) como volcánico Lampa; posteriormente, Martínez & Cervantes (2001) le asignarían el nombre de Formación Lampa. Estas lavas yacen en discordancia sobre las rocas sedimentarias del Grupo Yura, y están en parte cubiertas por depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza del volcán Sara Sara, y por secuencias de depósitos lacustrinos.

Figura 3.5 Vista de una intercalación de depósitos de lahares (flujos de escombros y flujos hiperconcentrados), con algunos niveles de corrientes de densidad piroclástica, a 2 km al NE de la localidad de Quilcata

Figura 3.6 Vista de lavas andesíticas con prismación vertical que afloran en la margen izquierda del río Mirmaca, sector de Mirmaca (norte del poblado de Pausa)

3.3 ESTRATIGRAFÍA Y EVOLUCIÓN DEL VOLCÁN SARA SARA

El volcán Sara Sara es un estratovolcán parcialmente erosionado, construido sobre secuencias lávicas andesíticas, afaníticas del Mioceno-Plioceno. Este volcán está constituido por secuencias de flujos de lava dacíticas, porfiríticas, masivas, a veces alteradas e hidrotermalizadas, que en la mayoría de los casos recorrieron distancias de hasta 6 km respecto al centro de emisión. El volcán tiene forma alargada, va en dirección N-S, de aproximadamente 7 km de largo y 3.5 km de ancho. El edificio volcánico fue parcialmente destruido por colapsos de flanco, explosiones violentas y posiblemente por glaciaciones registradas en el Pleistoceno superior y Holoceno.

Según los tipos de depósitos emitidos y sus características morfo-estructurales, el estratovolcán Sara Sara se ha construido en cuatro etapas evolutivas: Sara Sara I, II, III y IV. Una serie de depósitos se emplazaron durante estas etapas.

Para tener una idea clara acerca de los depósitos emitidos por el volcán Sara Sara, se presenta a continuación una columna estratigráfica generalizada (figura 3.7). Asimismo, se presenta una imagen satelital con la ubicación de las fotografías tomadas en trabajo de campo (figura 3.8).

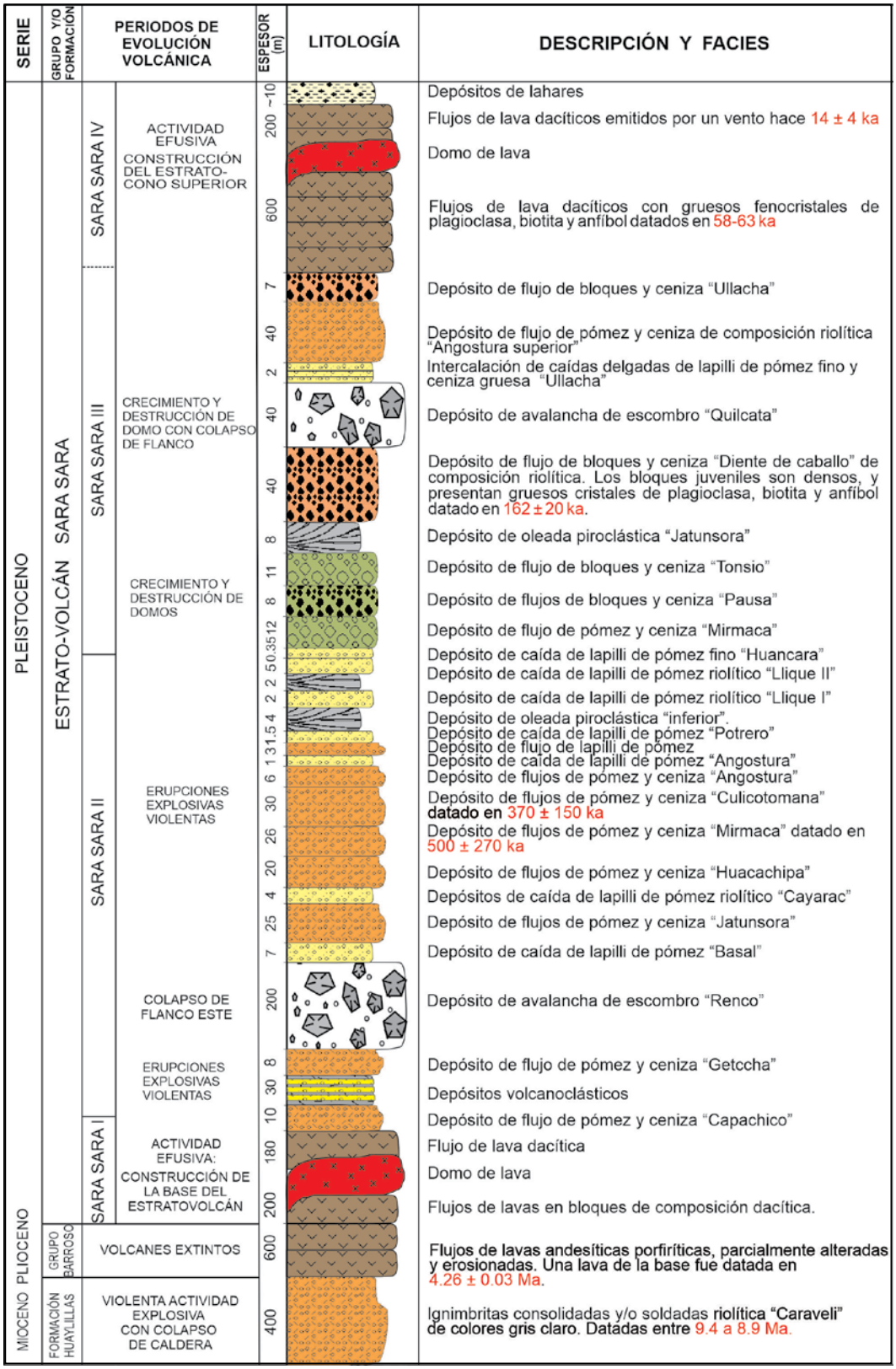


Figura 3.7 Columna estratigráfica generalizada del volcán Sara Sara

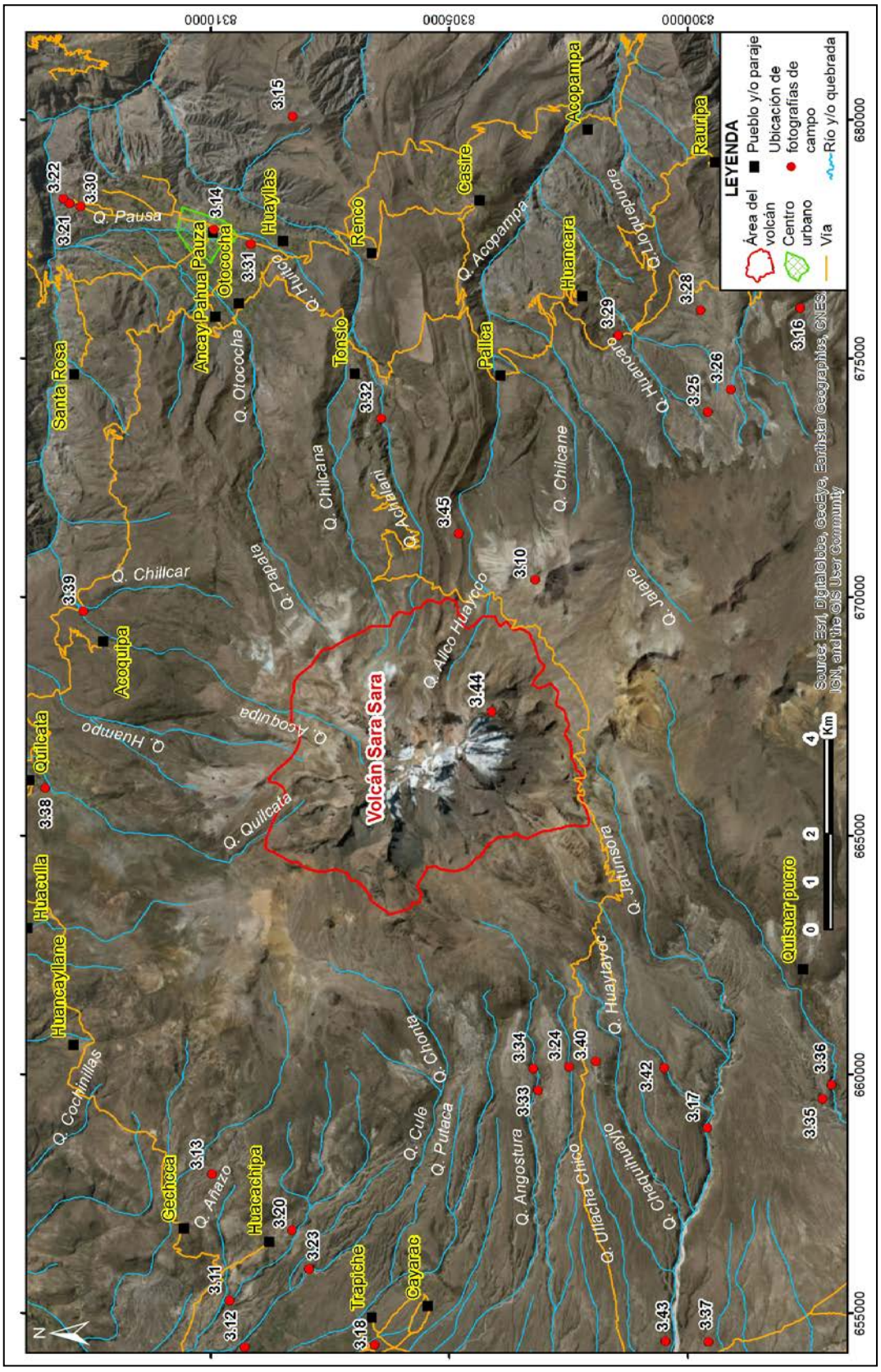


Figura 3.8 Imagen satelital con la ubicación de las fotografías tomadas en campo

3.3.1 Sara Sara I (Pleistoceno inferior-medio)

Corresponde a la etapa inicial, cuando el volcán emitía flujos de lava, lo que dio origen a la construcción de la base del edificio. Luego, se produjeron reiteradas erupciones explosivas con emplazamiento de corrientes de densidad piroclástica (flujos piroclásticos). A continuación, se detallan los depósitos emitidos durante esta etapa:

Flujos de lava dacíticas (Pl-Sal1)

Los flujos de lava de la primera etapa eruptiva del volcán corresponden a las lavas dacíticas que actualmente afloran en el cerro Sullcaymarca, a 4 km de la cumbre del volcán Sara Sara (fotografía 3.4). Los flujos de lava son de color gris, de textura porfirítica, y están constituidos de gruesos fenocristales de plagioclasa, biotita, óxidos de Fe-Ti, y eventualmente anfíbol.

Cabe mencionar que las dataciones ^{40}Ar-^{39}Ar efectuadas sobre las lavas del cono del volcán Sara Sara arrojan edades inferiores a 60 ka, razón por la cual se infiere que dichas lavas son del Pleistoceno superior; pero a la vez, existen diversos depósitos piroclásticos emitidos por el volcán Sara Sara en periodos más antiguos > 300 ka que las lavas del cono, que sugieren una edad inicial de emplazamiento del "Sara Sara I" a más de 60 ka.

Fotografía 3.4 Vista de lavas dacíticas que afloran en el cerro Sullcaymarca, a 4 km al este del volcán Sara Sara

Depósito de flujo de pómez y ceniza riolítica "Capachico"

En el sector de Capachico, entre 7 y 10 km al NO del volcán Sara Sara, en la zona de altiplanicie, se ha identificado un depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza (figura 3.9), de composición riolítica (73.6 wt. % SiO_2), masivo, endurecido, que mide entre 4 y 8 m de espesor. El depósito es de color ocre y de granulometría casi homogénea, y tiene una disposición subhorizontal. El depósito está enriquecido por fragmentos líticos lávicos, frescos y oxidados (10-15 % en volumen), que se concentran en mayor porcentaje en la parte media y superior del depósito, y miden hasta 8 cm de diámetro. Sobre este depósito aflora una secuencia de depósito volcanoclástico gris claro, que será descrito más adelante.

Figura 3.9 Depósito de flujo de pómez y ceniza, intercalado con secuencias de depósitos volcanoclásticos, al NO del volcán Sara Sara

Depósitos volcanoclásticos

Los depósitos volcanoclásticos corresponden a una secuencia de depósitos de lahares (flujo de lodo), flujos hiperconcentrados y sedimentos lagunares (arenas y limos sueltos) que afloran sobre el depósito de flujos de pómez y ceniza "Capachico", descrito anteriormente. La secuencia volcanoclástica aflora en una superficie amplia, a 8 km al NO del volcán Sara Sara, cerca del poblado de Getccha (figura 3.9 y 3.10). También es visible en las quebradas Cachape y Añazo.

Estos depósitos están estratificados y son de color gris, blanquecino, amarillento y a veces de color rojizo, debido al grado de oxidación e intemperismo al que han estado expuestos. En su mayoría, son depósitos ligeramente masivos, dispuestos en capas horizontales. El espesor de las capas es variable, algunas son centimétricas, y otras alcanzan a medir hasta 4 m de espesor. En total, miden entre 10 y 30 m de espesor.

El grado de alteración de estos depósitos probablemente se debe a que en un determinado periodo fueron invadidos por la laguna Parinacochas —ubicada a 11 km de distancia del afloramiento—, o porque esta zona se ubica en el límite o borde de la caldera "Incahuasi", donde aún persiste una leve actividad hidrotermal (Le Pennec *et al*., 2016).

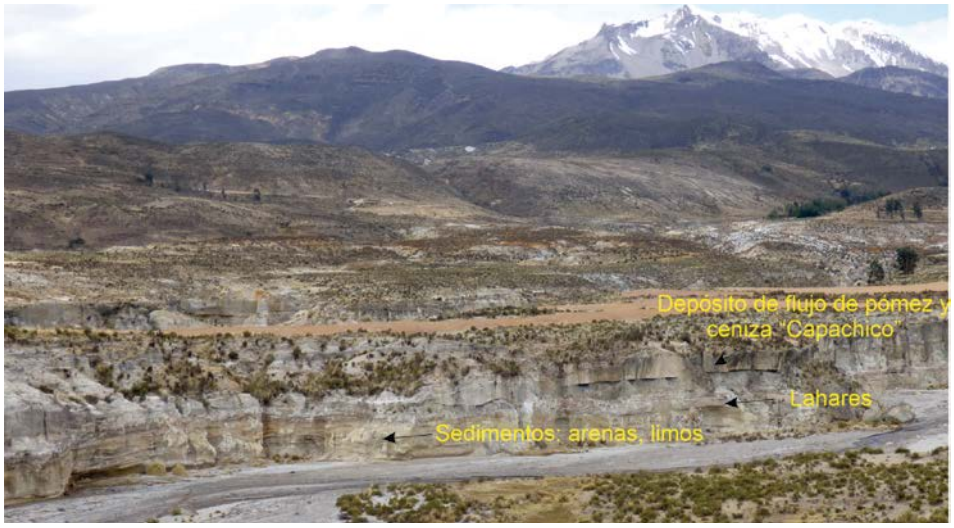


Figura 3.10 Secuencia de sedimentos volcanoclásticos, lahares y un depósito de flujos de pómez y ceniza, al NO del volcán Sara Sara

3.3.2 Sara Sara II (Pleistoceno medio-superior)

En esta etapa, el volcán Sara Sara presentó erupciones explosivas que dieron lugar al emplazamiento de caídas de tefras y depósitos de corrientes de densidad piroclástica, cuyos afloramientos son visibles en las quebradas Pausa, Mirmaca, Culé, Angostura, Ullacham, entre otras; estas quebradas están localizadas principalmente en los sectores NE, NO, O y SO del volcán Sara Sara.

Depósito de flujo de pómez y ceniza riolítica "Getccha" (Pl-Sall1)

En el sector de Getccha y en la quebrada Angostura, entre 7 y 10 km al noroeste y oeste del volcán Sara Sara, respectivamente, se ha identificado un depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza (figura 3.11), de composición riolítica (73.6 wt. % SiO_2), masivo, endurecido, que mide más de 8 m de espesor. El depósito es de color ocre y de granulometría casi homogénea, enriquecido en fragmentos líticos lávicos, frescos y oxidados (10-15 % en volumen). Estos fragmentos se concentran en mayor porcentaje en la parte media y superior del depósito, y miden hasta 8 cm de diámetro.

Las pómez del depósito de flujo son fibrosas, livianas y subredondeadas, y miden hasta 12 cm de diámetro. Estas contienen fenocristales de plagioclasa, biotita y cuarzo. El tamaño de los fragmentos líticos y de pómez disminuye hacia el tope del depósito.

Depósito de avalancha de escombros "Renco" (Pl-Sall2)

Entre 12 y 15 km al NE del volcán Sara Sara, específicamente al sur de la localidad de Pausa, se distingue un voluminoso depósito de avalancha de escombros de hasta ~200 m de espesor (figura 3.12). Este depósito presenta dos facies: una facies rica en matriz (70-80 %), la más predominante, y otra facies rica en bloques (20-30 %). La facies matriz es masiva y mal sorteada, de color gris claro, y con niveles de alteración de colores amarillentos y anaranjados, mientras que las facies de bloques, presentan un gran contenido de bloques lávicos de formas angulosas y subangulosas que miden entre 0.1 a 2 m de diámetro.

Figura 3.11 Depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza "Getccha", cubierto por un depósito de caída de lapilli de pómez, que aflora al noroeste del volcán Sara Sara (sector de Getccha). La picota está como escala a la derecha

Figura 3.12 Depósito de avalanchas de escombros "Renco", ubicado en el sector NE del volcán Sara Sara, que tiene hasta 200 m de espesor

En algunos sectores del depósito de avalancha, se distinguen colinas cónicas o "*hummocks*" (figura 3.13) que tienen alturas de 50-80 m, y diámetros de 250 a 300 m.

Al interior del depósito de avalancha, existen además fragmentos de un depósito de flujo de bloques y cenizas de composición riolítica (70.5-70.9 wt. % SiO_2), de colores grises claros. Los bloques juveniles presentan fenocristales de plagioclasa de hasta 5 cm, biotita, anfíbol y óxidos de Fe-Ti, todos ellos distribuidos dentro de una matriz microlítica a vítrea.

El depósito de avalancha cubre un área aproximada de 14 a 16 km^2, y corresponde a un volumen total de 2 a 2.5 km^3. Este depósito se encuentra infrayaciendo a un depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza.

Figura 3.13 Depósito de avalancha de escombros "Renco", contiene fragmentos de rocas bastante fracturadas y alteradas, de color amarillento y rojizo

Depósito de caída de lapilli de pómez "Basal"

Corresponde a un depósito de lapilli de pómez, masivo y sin gradación, de color blanquecino, que aflora entre 8 y 13 km al SE del volcán Sara Sara (figura 3.14). El depósito de lapilli de pómez mide 7.1 m de espesor. Las pómez son poco vesiculadas, livianas, y de color blanquecino. En este sector, las pómez alcanzan a medir hasta 10 cm en su eje más largo. Estas son empobrecidas en cristales, y presentan vesículas alargadas y redondeadas. Las pómez son de composición riolítica (72.5-70.5 wt. % SiO_2). Estas contienen cristales de plagioclasa, biotita y poco anfíbol.

También se distinguen fragmentos líticos lávicos de hasta 8 cm de diámetro, en su gran mayoría oxidados. El contenido de líticos disminuye hacia el tope del depósito. Este depósito de caída de lapilli de pómez es la base de una secuencia de caídas de lapilli de pómez que afloran al SE del volcán Sara Sara, sector de Llique.

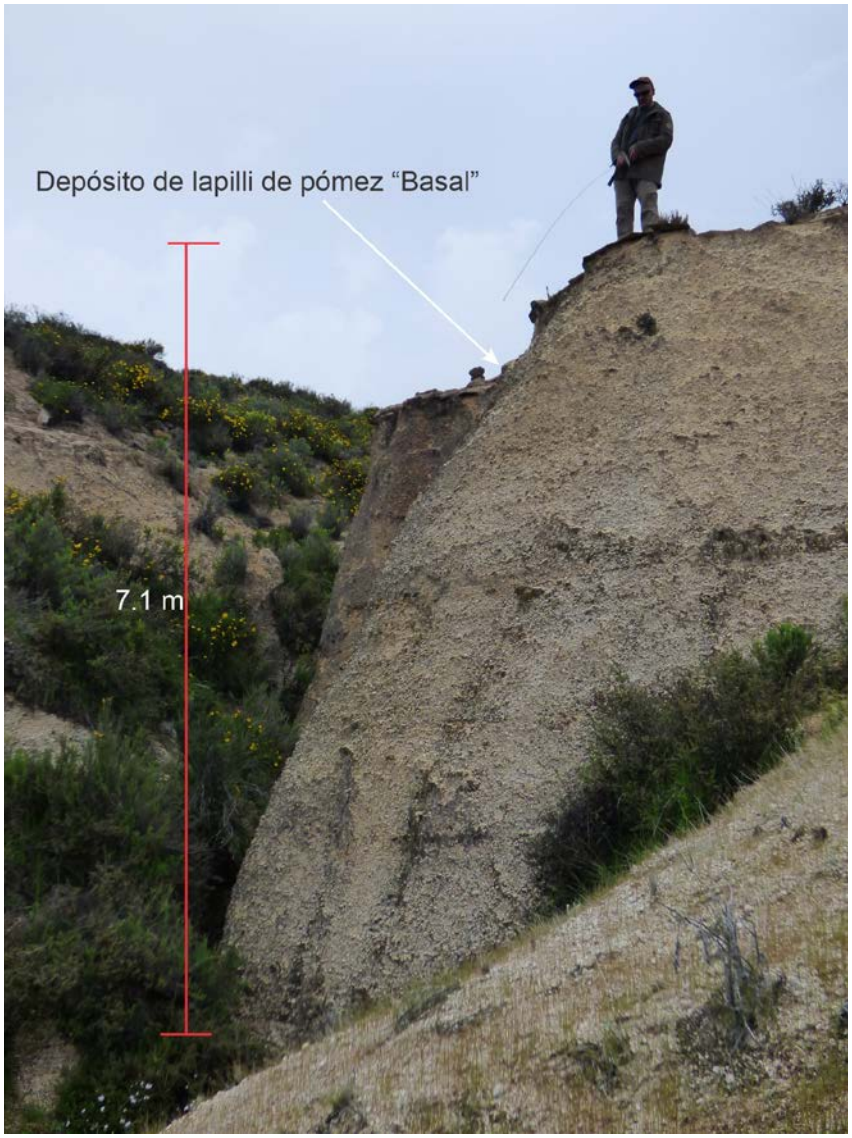


Figura 3.14 Depósito de caída de lapilli de pómez "Basal", que aflora a 13 km al SE del volcán Sara Sara

Depósito de flujo de pómez y ceniza riolítica "Jatunsora"

En la quebrada Jatunsora, entre 8 y 11 km al O y SO del volcán Sara Sara, en la base de una secuencia de depósitos de corrientes de densidad piroclástica, caídas de tefras y lahares, se ha identificado un depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza (figura 3.15). Este depósito es masivo, endurecido, que mide poco más de 25 m de espesor, a 9 km al oeste del volcán Sara Sara. Dicho depósito es de color gris blanquecino, con una pátina de color rosado claro, y de granulometría media a fina, casi homogénea. Los fragmentos juveniles corresponden a pómez, los cuales son de composición riolítica. Estas pómez miden menos de 6 cm (10-12% en volumen), y predominan las menores a un centímetro de diámetro. Las pómez son poco vesiculares y algunas densas, que contienen fenocristales de plagioclasa y biotita. Existen líticos lávicos, algunos grises y otros rojizos, en su mayoría son afaníticos y de tamaños menores a un centímetro.

Figura 3.15 Depósito de ignimbrita "Jatunsora", que aflora a 9 km al SO del volcán Sara Sara, en la quebrada Jatunsora

Depósito de caída de lapilli de pómez "Cayarac"

Corresponde a un depósito de caída de lapilli de pómez que aflora en el sector occidental del volcán Sara Sara, en inmediaciones de la localidad de Cayarac (figura 3.16) y algunas quebradas que drenan del flanco occidental del volcán Sara Sara. Dicho depósito presenta dos niveles separados por una capita delgada de lapilli fino.

El nivel inferior presenta una gradación inversa de las pómez, es decir, las pómez más grandes y densas están en el tope del depósito; mientras que el nivel superior presenta una gradación normal de las pómez, es decir, las pómez más grandes están en la base del depósito.

Las pómez son de color blanquecino y de composicón riolítica (70.1-71.1 wt. % SiO_2). Estas son poco vesiculadas, algo densas y presentan cristales de plagioclasa y biotita. Algunas miden hasta 11 cm de diámetro a 12 km del volcán. Asimismo, existe un contenido variable de fragmentos líticos lávicos. En efecto, hay una mayor proporción de fragmentos líticos (15-20 %) en el nivel inferior, respecto al nivel superior (10-15 %). Los líticos más grandes (<3 cm) están en el nivel superior. Los líticos son de naturaleza lávica, algunos son frescos y otros oxidados. Los líticos frescos tienen colores negros y grises, mientras que los líticos oxidados tienen tonalidades rojizas. El depósito en la zona de Cayarac, a 12.5 km del volcán, tiene 4 m de espesor.

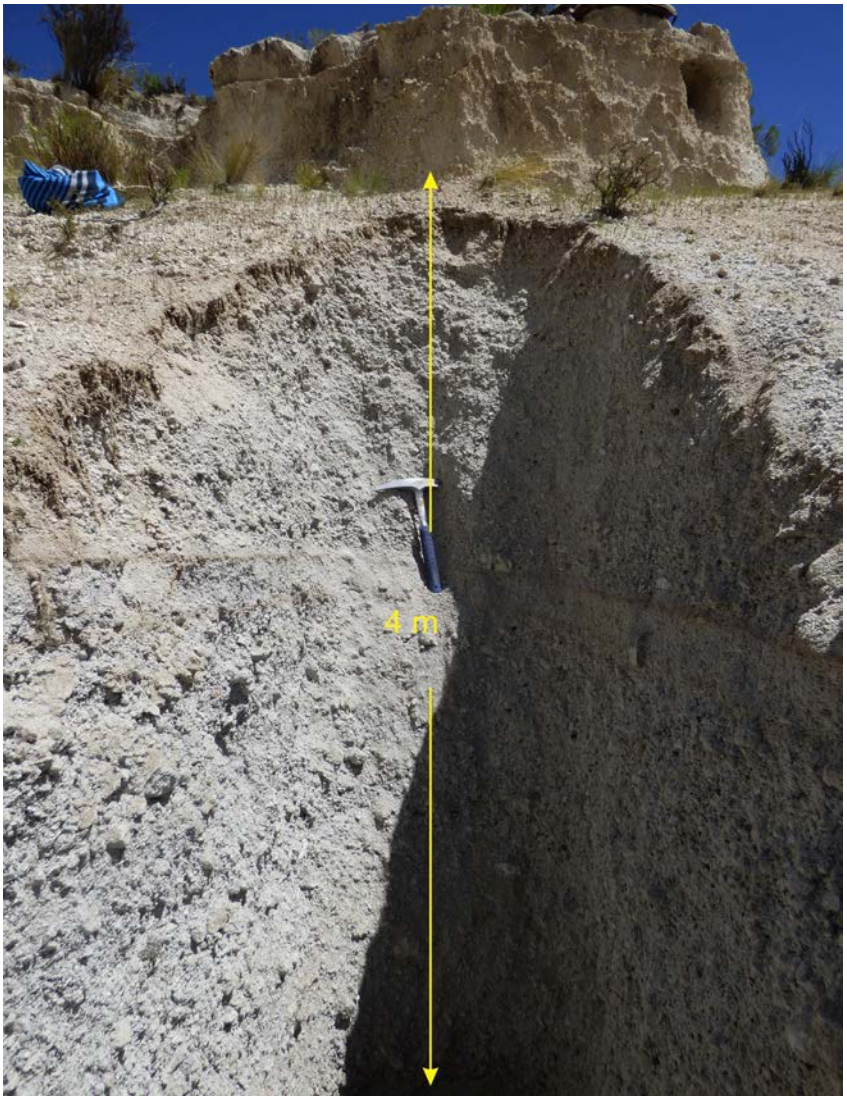


Figura 3.16 Depósito de caída de lapilli de pómez "Cayarac", que aflora a 12.5 km de la cima del volcán Sara Sara

Para elaborar un mapa de isópacas, se realizó un conjunto de mediciones del espesor del depósito (T) en ocho ubicaciones (figura 3.17). El mapa muestra que el depósito de lapilli de pómez "Cayarac" se emplazó hacia el O-SO del volcán (figura 3.18), y que el punto más alejado de la cumbre a la isópaca de 6 m estaría a 6 km del cráter, la de 5 m a 8 km, y la de 1 m a 12 km.

Con el fin de estimar el volumen del depósito de caída de lapilli de pómez "Cayarac", se utilizaron los datos del mapa de isópacas. Sobre la base de dicho mapa, una gráfica de T vs. $A^{1/2}$ (con T el espesor y A el área de la isópaca) revela una tasa de adelgazamiento bastante regular, cuyos puntos se ajustan a un solo segmento exponencial (línea discontinua).

Mediante el modelo de Pyle (1989), que se basa en la hipótesis de decaimiento exponencial, el volumen de tefra calculado es de 2×10^9 m^3. Se pudo obtener un resultado similar al enfoque de la regla trapezoidal de Fierstein & Nathenson (1992). A través del volumen total de los depósitos de caída de la erupción y otros parámetros calculados (altura de la columna, etc.), se infiere que la erupción tuvo un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) 5, que corresponde a una erupción de tipo pliniana.

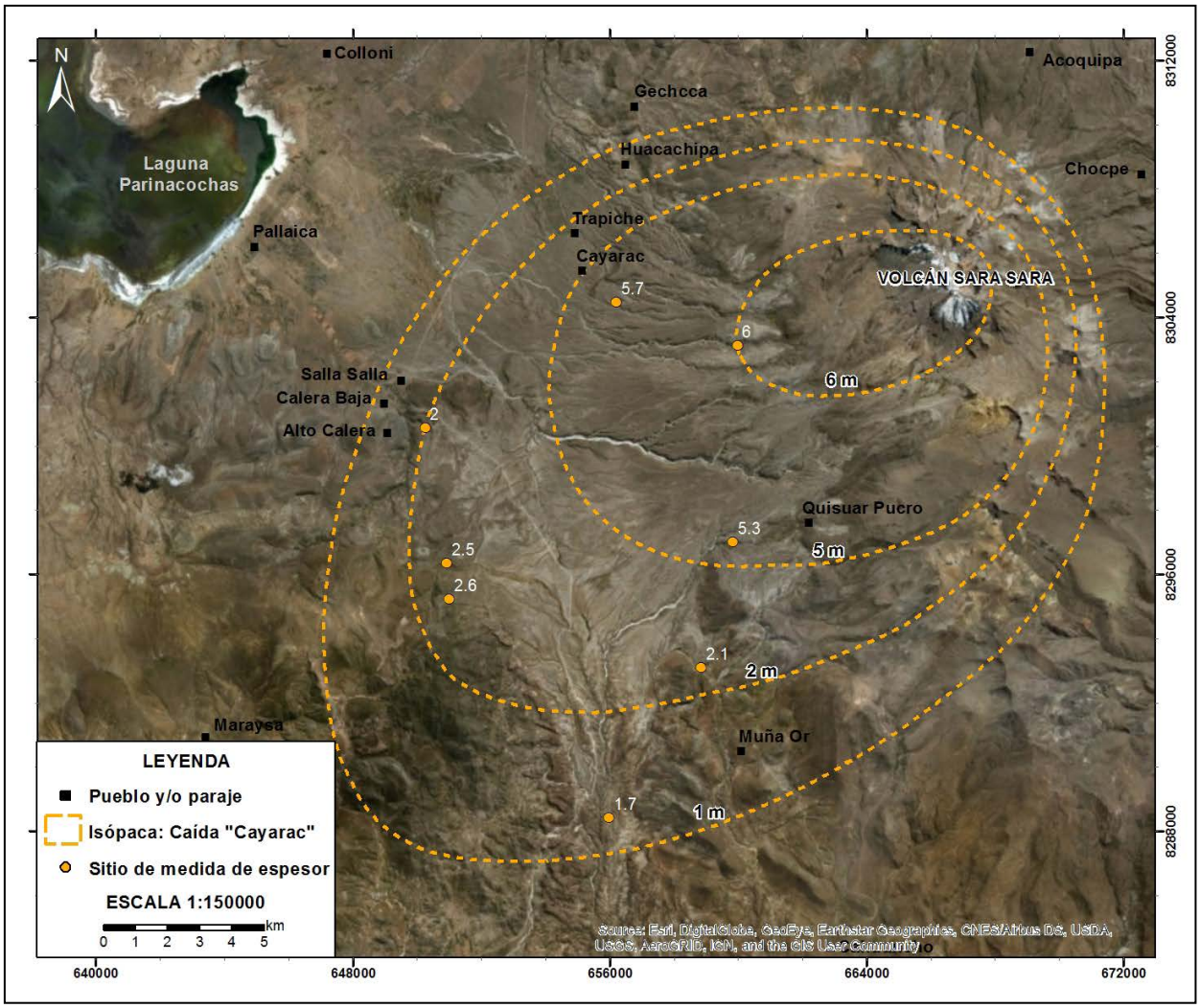


Figura 3.17 Mapa de isópaca de la caída de lapilli de pómez "Cayarac", donde se muestra la variación del espesor con la distancia al volcán

Depósito de flujo de pómez y ceniza "Huacachipa"

Este depósito aflora al sur del poblado de Huacachipa, a 9.5 km al NO del volcán Sara Sara (figura 3.18). Es un depósito masivo, ligeramente endurecido, de coloración blanquecina. Contiene pómez algo fibrosas, subredondeadas, algunas con bandas de color gris claro y gris oscuro. En la parte más clara, es más fibrosa, y se distinguen cristales de biotita, cuarzo y anfíbol, mientras que en la parte oscura es más afanítica, y presenta mayor contenido de biotita. En algunos sectores, el depósito presenta concentraciones de fragmentos líticos lávicos (5-8 % vol.). Su espesor varía entre 10 m a 20 m.

Las pómez miden hasta 20 cm en su eje máximo, y tienen entre 40 a 50 % en volumen. Predominan las pómez que tienen menos de un centímetro. Por otro lado, la proporción de los líticos es menor a 8 % en volumen.

Figura 3.18 Vista del depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza "Huacachipa", a 9 km al noroeste del volcán Sara Sara

Depósito de flujo de pómez y ceniza "Mirmaca" (Pl-Sall3)

En inmediaciones del sector de Ccaras Pampa, cerca de la localidad de Pausa, entre 9 km y 11 km al NE del volcán Sara Sara, se distingue un depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza de color gris claro, y de composición dacítica (68.7 - 70.7 wt. % SiO_2), como se aprecia en la fotografía 3.5. Este depósito es masivo, endurecido y moderadamente sorteado. A 11 km del Sara Sara, presenta aproximadamente 30 m de espesor y contiene pómez que alcanza a medir más de 20 cm de diámetro. Las pómez están en moderada proporción volumétrica (<30 %), las cuales contienen cristales de anfíbol, biotita y plagioclasa. Los fragmentos líticos están en poca proporción volumétrica (5-8 %). El depósito de flujo de pómez y ceniza descansa sobre las lavas andesíticas de la Formación Lampa.

Fotografía 3.5 Depósito de flujo de pómez y ceniza dacítica "Mirmaca", localizada en la margen derecha del río Mirmaca

Las pómez de este depósito de flujo de pómez y ceniza "Mirmaca" han sido datadas con el método $^{40}Ar/^{39}Ar$ en 500 ± 270 ka.

Depósitos lacustrinos (Pl-Sall4)

Al norte y noreste del poblado de Pausa, y entre 11 y 14 km al NE del volcán Sara Sara, sobre el depósito de flujo de pómez y ceniza descrito anteriormente, yace una secuencia de limos y arena fina de color beige, finamente estratificada, que en total tiene más de 24 m de espesor (figura 3.19). En algunos sectores, estos depósitos presentan ligera estratificación cruzada. Los sedimentos son poco endurecidos. Su origen se debe a la presencia de una laguna probablemente ocasionada por el embalse del río Huanca Huanca.

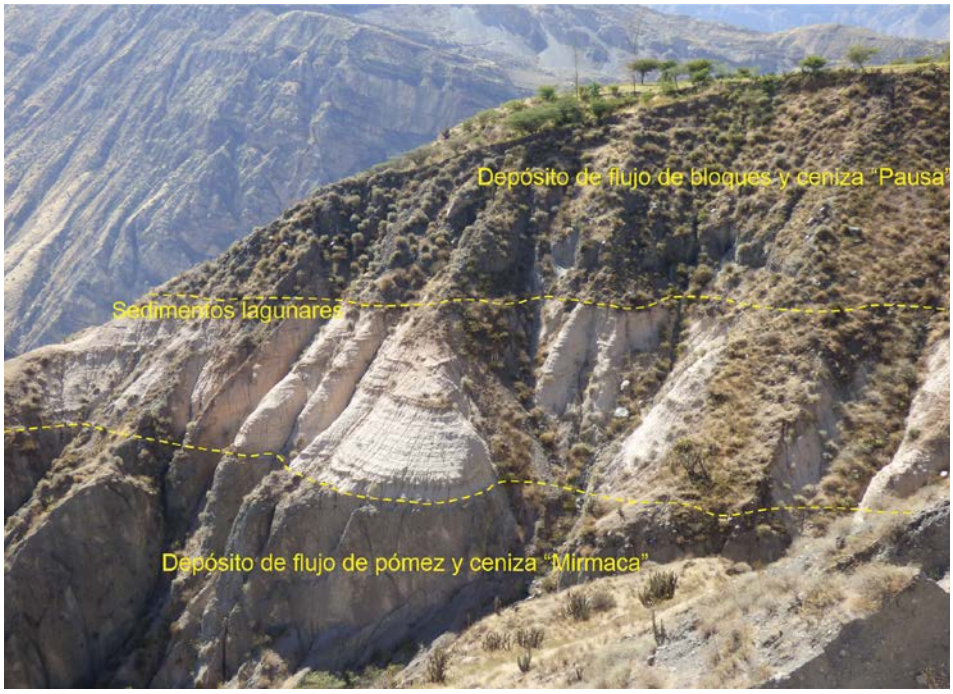


Figura 3.19 Depósito de flujo de pómez y ceniza "Mirmaca", cubierto por una secuencia de sedimentos lagunares y flujos piroclásticos de bloques y ceniza, localizado en la margen derecha del río Mirmaca

Depósito de flujo de pómez y ceniza riolítica "Ignimbrita Culicotomana" (Pl-Sall5)

En las quebradas Culé y Culicotomana, ubicadas entre 8 y 11 km al NO del volcán Sara Sara, se ha identificado un depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza (figura 3.20), de composición riolítica (70.5 - 71.3 wt. % SiO_2), masivo, ligeramente consolidado, que mide hasta 26 m de espesor. El depósito es de color gris blanquecino y de granulometría casi homogénea. La base del depósito está enriquecida en fragmentos líticos lávicos frescos y oxidados. En la parte media y superior del depósito, se distinguen al menos dos niveles delgados de concentración de pómez de tamaños centimétricos. El tope del depósito muestra incipiente disyunción columnar. Asimismo, se distinguen chimeneas de elutriación subverticales de 20 a 35 cm de ancho (figura 3.20).

Figura 3.20 Depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza, visible en la quebrada Culicotomana, localizada a 11 km al noroeste del volcán Sara Sara

Las pómez son ligeramente fibrosas, de color blanquecino, y miden hasta 15 cm de diámetro. Predominan las pómez de 3 a 6 cm de diámetro. Estas son porfiríticas, y contienen fenocristales de plagioclasa y biotita. Por su parte, los fragmentos líticos son angulosos, de naturaleza lávica, y tienen color gris y rojizo. La matriz del depósito está compuesta por ceniza, enriquecida con cristales de biotita.

Una muestra de pómez dacítica de este depósito de flujos de pómez y ceniza ha sido datado con el método $^{40}Ar/^{39}Ar$ en 370 ± 50 ka.

Depósito de flujo de pómez y ceniza "Angostura" (Pl-Sall6)

Corresponde a un depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza de composición riolítica (73.6 wt. % SiO_2), de color blanquecino, y de 6 m de espesor, que yace entre 6 a 8 km al pie del flanco oeste del volcán Sara Sara, al fondo de las quebradas Angostura y Ullacha (figura 3.21).

Está cubierto por un depósito de caída de lapilli de pómez riolítica y depósitos de flujos de pómez y ceniza. Este depósito presenta un sorteo moderado, con una gradación normal de las pómez. Las pómez son fibrosas, y alcanzan a medir en este sector hasta 5 cm de diámetro. Contienen fenocristales de plagioclasa, biotita y cuarzo, englobados dentro de una matriz vítrea vesiculada. Los fragmentos líticos son de naturaleza lávica y tienen formas angulosas y subangulosas. Algunas están alteradas, y miden hasta 9 cm de diámetro. Estas predominan en la base del depósito.

Figura 3.21 Depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza "Angostura", visible en la quebrada epónima, a 7 km al SO de la cima del volcán Sara Sara

Depósito de caída de lapilli de pómez "Angostura"

Corresponde a un depósito de caída de lapilli de pómez de 0.80 m de espesor que aflora en el sector occidental del volcán Sara Sara, por ejemplo, en la quebrada Angostura (figura 3.21). Este depósito descansa sobre un depósito de oleada piroclástica y sobre el depósito de flujo de pómez y ceniza "Angostura".

Dicho depósito es masivo, con ligera estratificación al tope. Las pómez son de color blanquecino, vesiculadas, y presentan cristales de plagioclasa, cuarzo y biotita. Los líticos son lávicos, frescos y oxidados. Los líticos frescos son de color negro y gris, mientras que los líticos oxidados son de color rojizo. El depósito presenta manchas rojizas de 5 a 10 cm de diámetro.

Depósito de flujo de pómez y ceniza

Corresponde a un depósito de flujo de pómez y ceniza de 2.4 m de espesor que aflora en el sector occidental del volcán Sara Sara, en la quebrada Angostura (figura 3.21). Este depósito de color blanquecino descansa sobre el depósito de caída de lapilli de pómez "Angostura", descrito anteriormente.

Dicho depósito es masivo y moderadamente sorteado. Las pómez son de color blanquecino, vesiculadas y presentan cristales de plagioclasa, cuarzo y biotita, similares a las pómez del depósito de caída descrito anteriormente. Los líticos son lávicos de colores negros y grises, mientras que los líticos oxidados tienen color rojizo. Dadas las características similares de las pómez en los dos depósitos de caída y flujo piroclástico descritos anteriormente, se sugiere que ambos han sido emitidos durante una misma erupción.

Depósito de caída de lapilli de pómez "Potrero"

Este depósito de caída de lapilli de pómez "Potrero" aflora en el sector de Llique, visible entre 6 y 8 km al SE del volcán Sara Sara (figura 3.22), sobre una secuencia de depósitos de flujos hiperconcentrados, constituidos de material fino. Consta de un nivel inferior y superior, cada uno de diferente granulometría. En la parte inferior, predominan las pómez de tamaño centimétrico, y en la parte superior, predominan las pómez de mayor diámetro (3 a 5 cm). El depósito tiene un espesor promedio de 1.3 m.

El depósito presenta aproximadamente 70 % de pómez y 20 % de fragmentos líticos lávicos. Las pómez son de tres tipos: de color blanco, gris y pómez bandeadas (textura *mingling*). Las pómez tienen vesículas redondeadas y alargadas; son pobres en cristales de biotita y plagioclasa. Los líticos son de naturaleza lávica y son de dos tipos: frescos y oxidados. Los líticos frescos presentan colores grises de manera predominante.

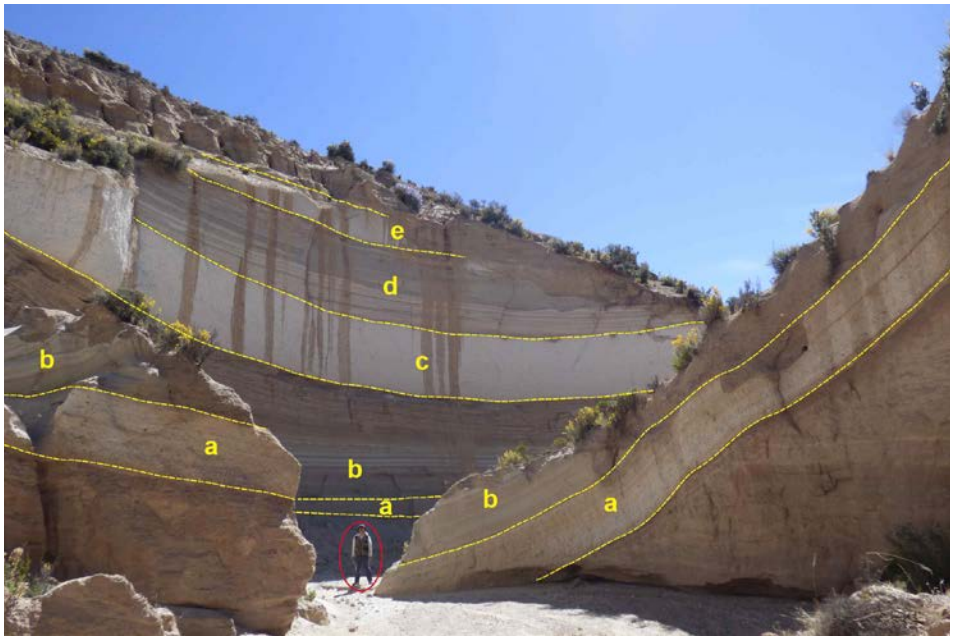


Figura 3.22 Depósitos de caída de lapilli de pómez que afloran a 8 km al sureste del volcán Sara Sara: a) depósito "Potrero"; b) depósito de oleada piroclástica "inferior"; c) depósito de caída "Llique I"; d) oleada piroclástica "superior"; y e) depósito de caída "Llique II"

Depósito de oleada piroclástica "inferior"

Corresponde a una intercalación subhorizontal de niveles de ceniza fina a gruesa, de color gris claro y gris oscuro (figura 3.22, nivel b; figura 3.23). Este depósito sobreyace al depósito de caída de lapilli de pómez "Potrero" descrito anteriormente. Las capas delgadas a veces presentan estratificación oblicua. Cada capa mide menos de 6 cm de espesor. Las cenizas están constituidas de vidrio, cristales de plagioclasa y biotita con muy poco contenido de fragmentos líticos lávicos, de tamaños centimétricos a milimétricos. Las capas de ceniza están sueltas. El espesor total del depósito es variable. En este sector "inferior", a 8 km de la cima del volcán, el depósito de oleada alcanza a medir 4 m de espesor.

Depósito de caída de lapilli de pómez "Llique I"

Este depósito aflora sobre el depósito de oleada piroclástica "inferior", visible en el sector de Llique, entre 6 y 8 km al SE del volcán Sara Sara (figura 3.22 y 3.23). Corresponde a un depósito de caída de lapilli de pómez riolítica (70.8-70.4 wt. % SiO_2) de color blanquecino, con ligera grano-clasificación inversa.

El depósito está compuesto de pómez (80-90 %), de fragmentos líticos (6-8 %) y de pocos cristales libres (<2 %). Los líticos corresponden a fragmentos de lavas y algunos a fragmentos de areniscas. Las pómez miden hasta 20 cm de diámetro, son vesiculadas y fibrosas, y contienen fenocristales de plagioclasa y biotita. La parte inferior del depósito, a 2 cm de la base, se encuentra enriquecida con fragmentos líticos. El depósito tiene un espesor de 2 a 5 m.

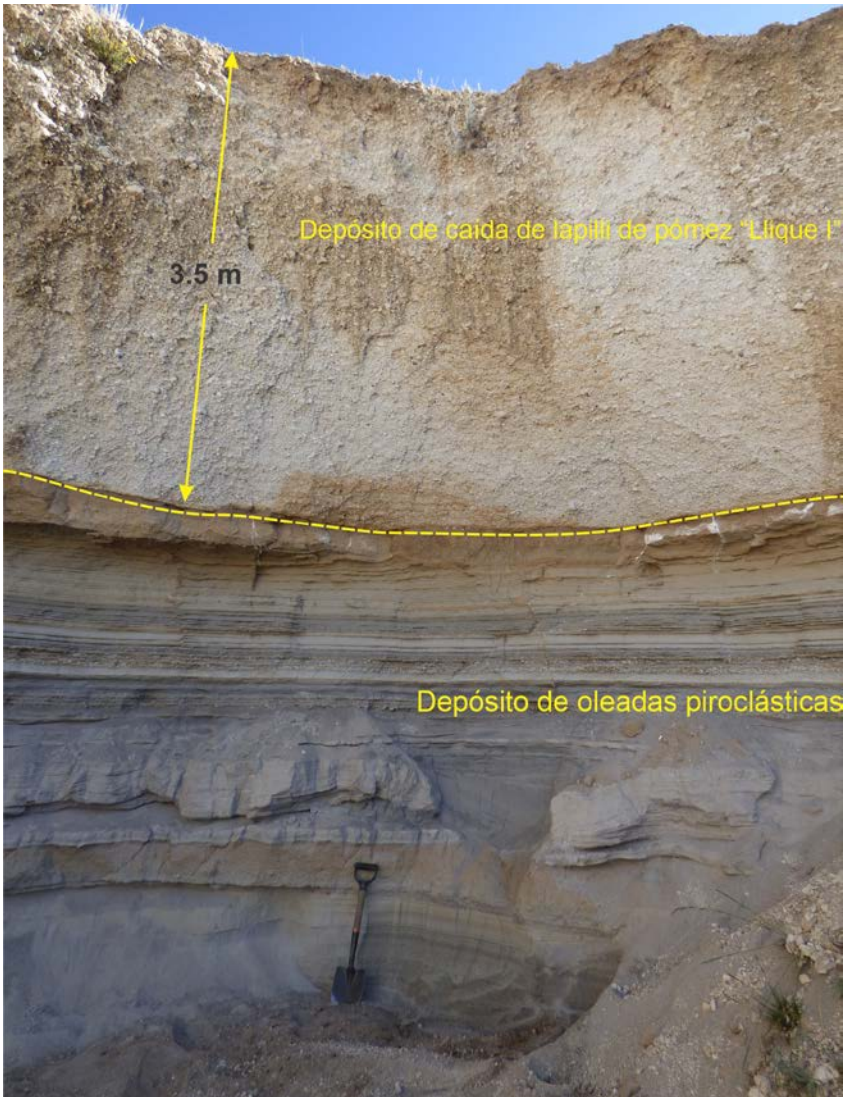


Figura 3.23 Depósito de caída de lapilli de pómez "Llique I", que aflora a 10 km al SE del volcán Sara Sara sobre el depósito de oleada piroclástica "inferior", descrito anteriormente

Para elaborar el mapa de isópacas de este estudio, se realizaron mediciones del espesor del depósito de lapilli de pómez "Llique I" (T) en 12 ubicaciones (figura 3.24). El mapa muestra que dicho depósito se emplazó hacia el SE del Sara Sara (figura 3.24). El punto más alejado de la cumbre para la isópaca de 4 m estaría a 6 km del cráter, la de 3 m estaría a 12 km, y la de 1 m a 16 km.

Con el fin de estimar el volumen del depósito de caída de lapilli de pómez "Llique I", se utilizaron los datos del mapa de isópacas. Sobre la base de este mapa de isópacas, una gráfica de T vs. $A^{1/2}$ (con T el espesor y A el área de la isopaca) revela una tasa de adelgazamiento bastante regular, cuyos puntos se ajustan a un solo segmento exponencial. Usando el modelo de Pyle (1989), que se basa en la hipótesis de decaimiento exponencial, el volumen de tefra calculado es de 2×10^9 m^3. Así, se obtuvo un resultado similar al enfoque de la regla trapezoidal de Fierstein & Nathenson (1992). Tomando en cuenta el volumen total de la erupción y otros parámetros calculados (altura de la columna, entre otros), se infiere que la erupción tuvo un Índice de Explosividad Volcánica-IEV 5, que corresponde a una erupción pliniana.

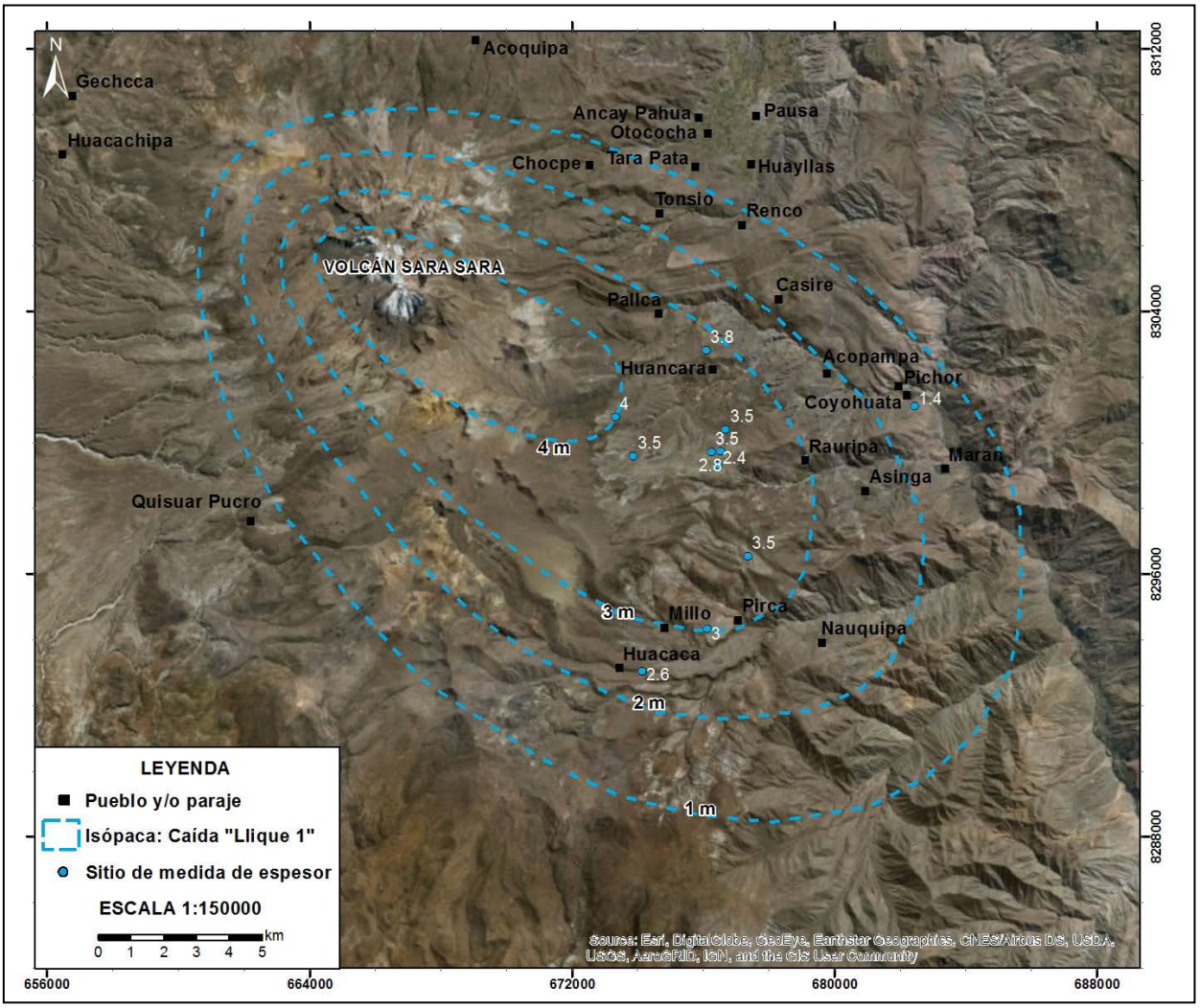


Figura 3.24 Mapa de isópaca del depósito de caída de lapilli de pómez "Llique I"

Depósito de oleada piroclástica "superior"

Corresponde a una intercalación subhorizontal de niveles de ceniza fina a gruesa, de colores beige a gris (figura 3.22, capa b y figura 3.25), con capas que miden menos de 8 cm de espesor. Las cenizas contienen cristales de plagioclasa y biotita, con muy poco contenido de fragmentos líticos de tamaños centimétricos a milimétricos. Las capas de ceniza están sueltas. El espesor total del depósito es variable; en el sector de Llique alcanza a medir 2 m de espesor (figura 3. 22).

Depósito de caída de lapilli de pómez "Llique II"

Corresponde a un depósito de lapilli de pómez de color blanquecino y de composición riolítica (68.8-69.9 wt. % SiO_2) que aflora en el sector de Llique, entre 8 y 10 km al SE del volcán Sara Sara (figura 3.22 y 3.25). Este depósito yace sobre el depósito de lapilli de pómez "Llique I", o en zonas proximales, sobre un depósito de oleada piroclástica "superior". El depósito alcanza a medir hasta 0.9 m de espesor, es masivo y moderamente sorteado.

El depósito contiene entre 80-90 % de pómez y 10-12 % de fragmentos líticos. Las pómez son ricas en cristales de plagioclasa y biotita. En la base del depósito, las pómez alcanzan hasta un centímetro de espesor, el depósito es enriquecido en fragmentos líticos lávicos frescos.

Los pocos afloramientos encontrados en el campo sugieren que este depósito se dispersó en dirección SE desde el volcán Sara Sara.

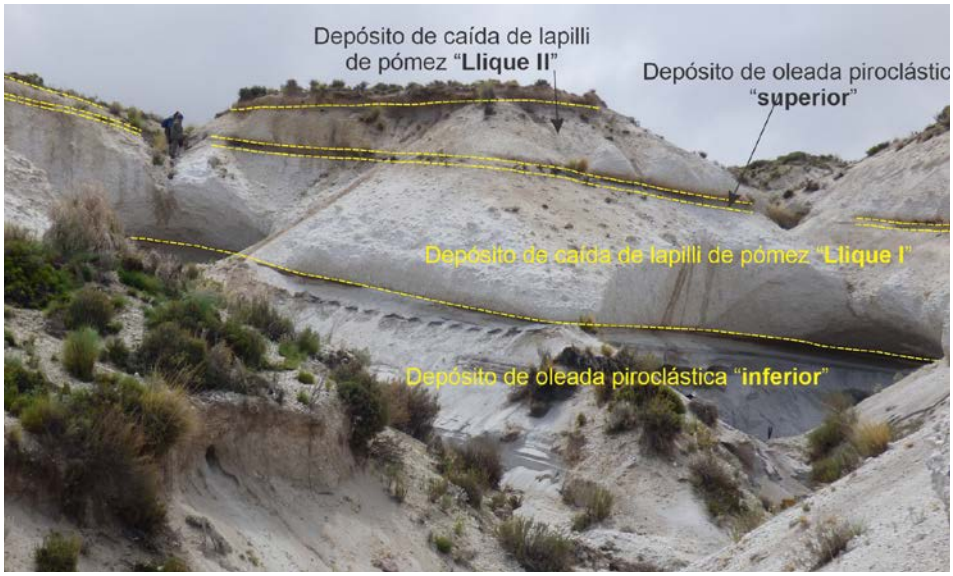


Figura 3.25 Depósitos de caída de lapilli de pómez "Llique I" y "Llique II", que afloran a 9 km al SE del volcán Sara Sara

Depósito de caída de lapilli de pómez "Huancara"

Este depósito es visible a 9.4 km al E-SE del volcán Sara Sara, en inmediaciones de la localidad de Huancara. El depósito corresponde a una capa de lapilli de pómez de grano medio a fino, y de un espesor homogéneo que mide 35 cm a 9 km al SE del Sara Sara. El depósito presenta una ligera gradación normal. Las pómez son de color gris claro, poco vesiculadas y miden hasta 5 cm de diámetro. De composición dacítica (67.2 wt. % SiO_2), contienen cristales de plagioclasa, anfíbol y biotita. La base del depósito presenta un enriquecimiento de fragmentos líticos lávicos ~25-30 % y en el techo del depósito se distingue un nivel de 5 cm de espesor, enriquecido con fragmentos líticos (figura 3.26).

Figura 3.26 Depósito de caída de lapilli de pómez "Huancara" que aflora a 9.4 km al SE del volcán Sara Sara

3.3.3 Sara Sara III (Pleistoceno superior)

En este periodo, se produjo principalmente el crecimiento y destrucción de domos de lava, que dieron lugar al emplazamiento de depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas, descritos a continuación.

Depósito de flujos de bloques y ceniza "Mirmaca" (Pl-SaIII1)

Al noreste del poblado de Pausa, a 14 km al NE del volcán Sara Sara, sobre un depósito de sedimentos lacustres descrito líneas arriba (figura 3.20), se identificó a un depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza (fotografía 3.6). Este depósito de aproximadamente 12 m de espesor tiene un tope de color rojizo y una base de color gris. El depósito es masivo y poco endurecido.

Los bloques juveniles dacíticos (65.6 wt. % SiO_2) son porfiríticos, y alcanzan a medir más de 14 cm de diámetro. Estos bloques contienen gruesos cristales de plagioclasa, anfíbol y biotita, y están en moderada proporción volumétrica (<50 %) respecto a la matriz de tamaño lapilli fino y ceniza gruesa. Los fragmentos líticos accidentales o accesorios están entre 6 % y 10 %.

Fotografía 3.6 Depósito de flujo de bloques y ceniza "Mirmaca" que aflora al extremo noreste de la localidad de Pausa, a 14 km al NE del volcán Sara Sara

El depósito de flujo de bloques y ceniza "Mirmaca" estaría ligado al crecimiento y destrucción de un domo de lava desarrollado en el volcán Sara Sara.

Depósito de flujos de bloques y ceniza "Pausa" (Pl-SaIII2)

En la localidad de Pausa, a 12 km al noreste del volcán Sara Sara, se distingue un depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza, de color blanquecino y a veces amarillento, de composición dacítica (63.4 wt. % SiO_2) (figura 3.27). Este depósito, que alcanza a medir 8 m de espesor, es poco endurecido y masivo. Contiene bloques densos, algunos juveniles y otros accidentales, accesorios oxidados y alterados. Los bloques juveniles miden hasta 35 cm, son de textura porfirítica y contienen fenocristales de plagioclasa y biotita. Los fragmentos están entre 30-40 % en volumen, mientras que la matriz de ceniza es de 60-70 %.

Figura 3.27 Depósito de flujo de bloques y ceniza "Pausa" que aflora al extremo sur de la localidad de Pausa, a 12 km al NE del volcán Sara Sara

Figura 3.27 Depósito de flujo de bloques y ceniza "Pausa" que aflora al extremo sur de la localidad de Pausa, a 12 km al NE del volcán Sara Sara.

Depósito de flujos de bloques y ceniza "Tonsio" (Pl-Salll3)

A 8 km al este del volcán Sara Sara, cerca al poblado de Tonsio, en ambas márgenes de las quebradas Papata, Chilcana y Achalani se distingue un depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza de color blanquecino, y a veces amarillento, de composición riolítica (70.5-69.2 wt. % SiO_2) (fotografía 3.7).

Este depósito que alcanza a medir 11 m de espesor es casi suelto y masivo. Contiene bloques densos, algunos juveniles, y otros accidentales o accesorios oxidados y alterados. Los bloques juveniles miden hasta 35 cm, son de textura porfirítica y contienen fenocristales de plagioclasa y biotita. Los fragmentos están entre 20-30 % en volumen, mientras que la matriz de ceniza es de 60-70 %.

Fotografía 3.7 Depósito de flujo de bloques y ceniza "Tonsio", de 11 m de espesor, que aflora a 8 km al este del volcán Sara Sara

Depósito de oleada piroclástica "Jatunsora"

Este depósito es visible entre 6 y 9 km al oeste del volcán Sara Sara, especialmente en las quebradas Ullacha Grande, Chaquihuayjo, Huaytayoc, Jatunsora y otros. El depósito de oleada está constituido de varios niveles delgados de ceniza y lapilli fino, son de color gris, y muestran una estratificación oblicua (figura 3.28 y 3.29). Cada capa mide menos de 6 cm de espesor. El espesor total fluctúa entre 6 y 8 m. Las cenizas contienen vidrio y cristales de plagioclasa y biotita, con muy poco contenido de fragmentos líticos de tamaños centimétricos a milimétricos. Las capas de ceniza están sueltas.

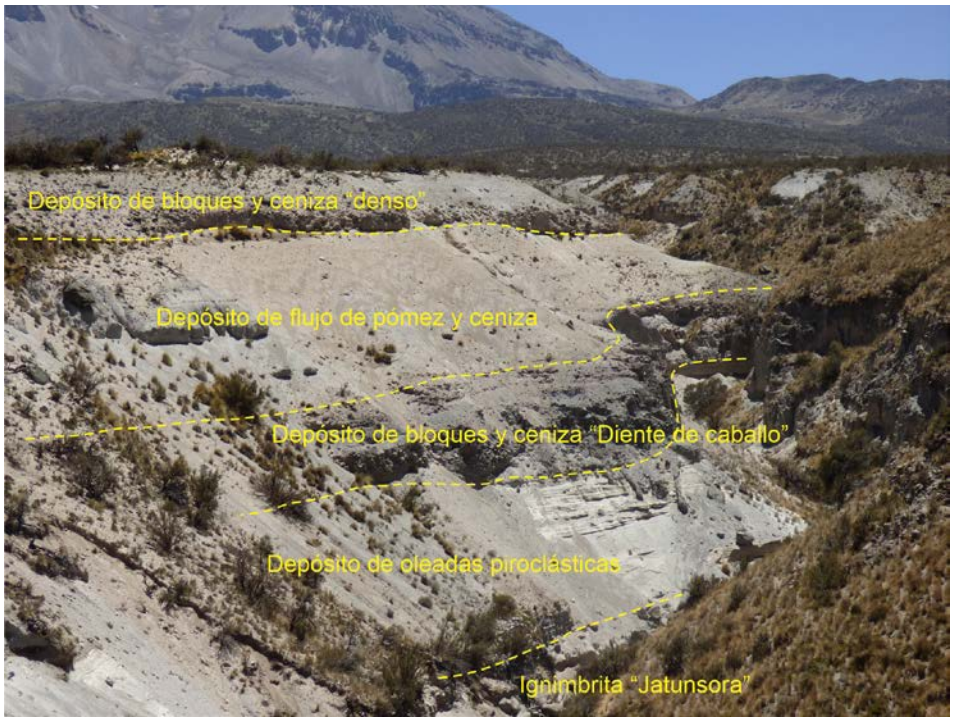


Figura 3.28 Secuencia de depósitos de corrientes de densidad piroclástica, visibles en la quebrada Jatunsora (8 km al oeste del volcán Sara Sara), donde se resalta el depósito de oleada piroclástica "Jatunsora

Depósitos de flujo de bloques y ceniza "Diente de caballo" (Pl-Sallll4)

En las diversas quebradas que drenan del flanco occidental del volcán Sara Sara, como Ullacha Grande, Chaquihuayjo, Huaytayoc, Jatunsora y otros (figura 3.28 y 3.29), se distingue un depósito de bloques y ceniza denominado "Diente de caballo", debido a que los bloques juveniles presentan cristales grandes de plagioclasa, de 0.5 a 4 cm de tamaño, parecidos a dientes de caballo. El depósito es masivo, poco endurecido, de color gris, y a veces tiene tonalidades rojizas. Los bloques juveniles se caracterizan por presentar gruesos cristales de plagioclasa —mayores a un centímetro—, biotita y cuarzo.

En las zonas proximales, aproximadamente a 7 km del volcán, el depósito alcanza a medir hasta 40 m de espesor. Este flujo se prolonga más de 18 km de distancia al oeste del volcán Sara Sara, en la zona de altiplanicie, en donde aún mide hasta 2 m de espesor.

Figura 3.29 Depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza "Diente de caballo", visible a 7 km al oeste del volcán Sara Sara (inmediaciones de la quebrada Chaquihuayjo)

El depósito presenta un nivel inferior y otro superior, separados por una capa de ceniza fina de 40-60 cm de espesor, de color beige (figura 3.29). El nivel inferior es de color gris y contiene bloques de rocas de hasta un metro de diámetro, y presenta una granoclasificación normal. Además, en algunos sectores se distinguen bloques o fragmentos de varios metros de diámetro, que corresponderían a fragmentos de avalanchas de escombros (figura 3.30). El nivel superior es de color gris con un tope rosado, y se caracteriza por presentar una granulometría casi homogénea, en la cual predominan los bloques densos, oxidados, respecto a los bloques grises frescos. En este nivel, los bloques juveniles riolíticos alcanzan a medir hasta 40 cm de diámetro, y están en moderada proporción volumétrica (30-40 %), respecto a una matriz de tamaño lapilli fino. En general, los bloques juveniles son de naturaleza riolítica (69.2-72.3 wt. % SiO_2), y contienen gruesos cristales de plagioclasa (<4 cm) y biotita.

Un fragmento de bloque juvenil del depósito "Diente de caballo" fue datado por el método $^{40}Ar/^{39}Ar$ en 162 ± 20 ka.

En algunos sectores, al suroeste del volcán Sara Sara, se aprecia fragmentos de rocas lávica dacíticas, de más de 20 m de diámetro y matriz de material fino.

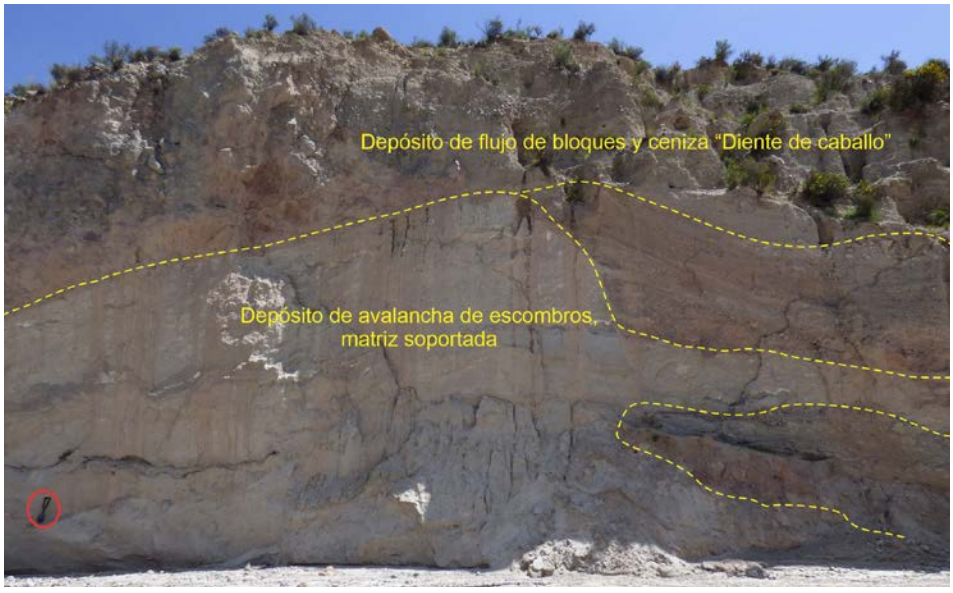


Figura 3.30 Facies de avalancha de escombros, que aflora a 10 km al SE del volcán Sara Sara, en la margen derecha de un afluente de la quebrada Quenchupa, donde mide 8 m de espesor

En áreas distales, a más de 12 km al O y SO del volcán Sara Sara (por ejemplo, quebrada Quenchupa), el depósito aflora al tope de una secuencia de corrientes de densidad piroclástica y caídas de tefras. En este sector, el depósito tiene más de 8 m de espesor (figura 3.31).

A 15 km al oeste del volcán Sara Sara, sobre el depósito de ignimbrita "Caravelí" —datado por Thouret *et al.* (2016) en 9.4-8.97 Ma—, aflora el depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza "Diente de caballo", que tiene más de 5 m de espesor (figura 3.32). Los bloques juveniles riolíticos alcanzan a medir más de 14 cm de diámetro, y están en moderada proporción volumétrica (<20 %). Estos contienen cristales de biotita y plagioclasa; los fragmentos líticos están en poca proporción volumétrica (5-8 %). El depósito es masivo y poco endurecido.

Figura 3.31 Secuencia piroclástica que aflora en la margen derecha del río Quenchupa (16 km al SO del Sara Sara), en cuyo tope se distingue el depósito de flujo de bloques y ceniza "Diente de caballo"

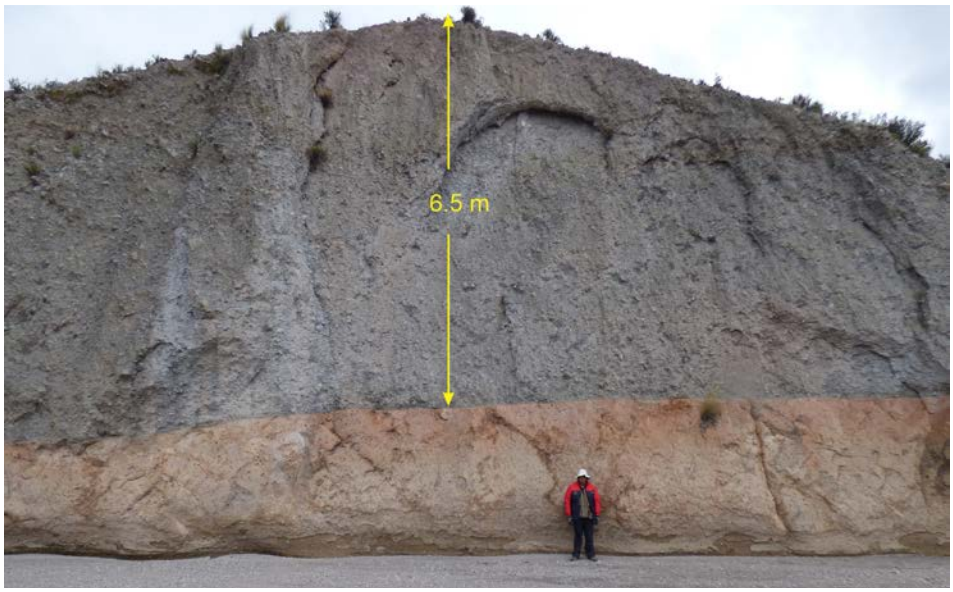


Figura 3.32 Depósito de flujo de bloques y ceniza "Diente de caballo" que aflora a 15 km al oeste del volcán Sara Sara, donde mide hasta 6.5 m de espesor

Dada la gran extensión de dispersión del depósito, se alega que este fue generado probablemente por una erupción lateral dirigida, que se despresurizó del sistema hidrotermal del volcán, y cuyos depósitos viajaron al oeste del volcán e incorporaron restos de avalancha de escombros.

Depósito de avalancha de escombros "Quilcata" (Pl-Salll5)

Entre 6 y 9 km al noreste del volcán Sara Sara, en inmediaciones de los poblados de Acoquipa y Quilcata, respectivamente, se distingue un depósito de avalancha de escombros, masivo y poco consolidado (figura 3.33), que tiene entre 10 y 40 m de espesor. Dicho depósito está cubriendo lavas del Grupo Barroso.

Presenta dos facies: facies matriz (figura 3.34) y facies bloques soportados. La facies matriz presenta fragmentos pequeños de rocas lávicas porfiríticas, dispersos en una matriz fina, limosa, endurecida y oxidada, de color rojizo; mientras, el depósito de facies de bloques está conformado por un aglomerado de bloques lávicos densos de composición andesítica y dacítica. Dichos bloques son angulosos y subangulosos.

En superficie de la zona, se observa gran cantidad de bloques de diversos tamaños, incluso de tamaños métricos, que están dispersos. Algunos bloques presentan fracturas tipo *jigsaw* o fracturas en forma de rompecabezas. También algunos bloques se encuentran oxidados e hidrotermalizados.

Figura 3.33 Depósito de avalancha de escombros sobre el cual se asienta el pueblo de Quilcata; presenta gran cantidad de bloques dispersos en superficie

Figura 3.34 Depósito de avalancha de escombros, en el cual se observa el contacto entre la facies rica en bloques y la facies matriz soportada

Los bloques sueltos dispersos en el poblado de Acoquipa y Quilcata miden hasta 5 m de diámetro. Estos muestran una superficie lustrosa y están constituidos por fenocristales de plagioclasa y anfíbol, englobados principalmente dentro de una matriz vítrea.

Depósito de caída de lapilli de pómez "Ullacha" (Pl-Salll6)

Este depósito es visible en varias quebradas que drenan del flanco oeste del volcán Sara Sara, y yace en medio de dos depósitos de corriente piroclástica de densidad, de composición riolítica (figura 3.5). El nivel medio de caída de lapilli de pómez analizado muestra una composición riolítica (71.6 wt. % SiO_2). El depósito corresponde a una sucesión de niveles de caídas de lapilli de pómez finos, y ceniza gruesa, con estratificación delgada. Los niveles tienen espesores centimétricos y una disposición horizontal a subhorizontal. Se distingue al menos cinco depósitos de lapilli de pómez finos que se intercalan con niveles de ceniza gruesa de color gris claro.

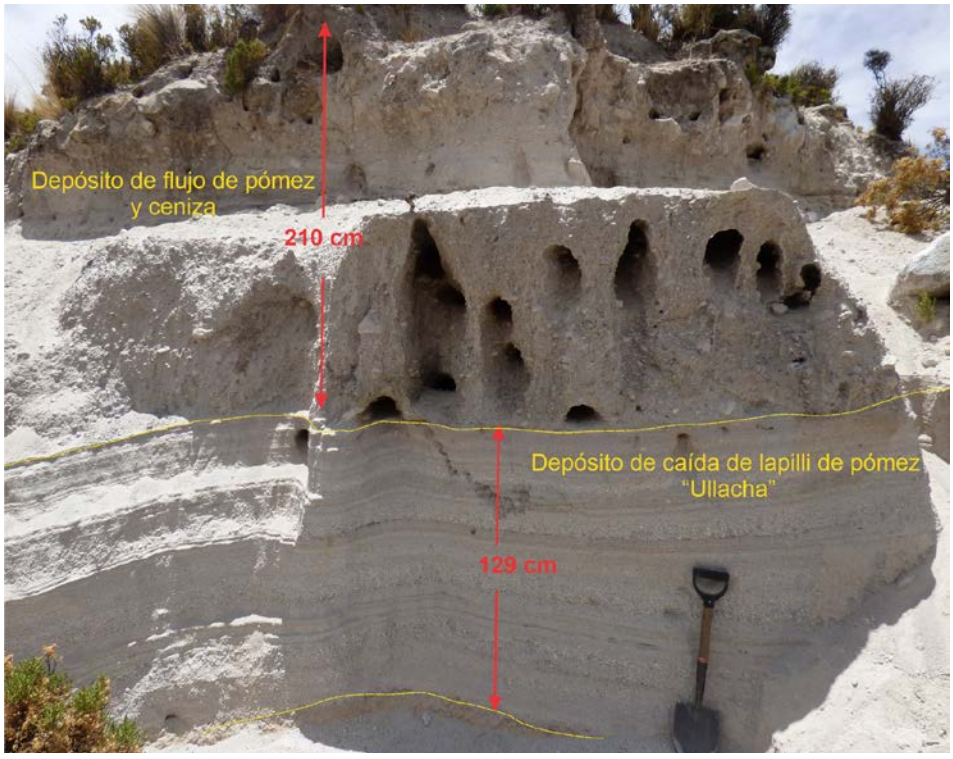


Figura 3.35 Vista del depósito de caída de lapilli de pómez "Ullacha" que aflora a 8.8 km al oeste del volcán Sara Sara, inmediaciones de la Quebrada Chaquihuayjo

Para elaborar el mapa de isópacas, se consideró un conjunto de mediciones del espesor total del depósito (T), obtenidas de ocho ubicaciones (figura 3.36). El mapa muestra que el depósito de lapilli de pómez "Ullacha" se emplazó hacia el O-SO del volcán (figura 3.36). El punto más alejado de la cumbre para la isópaca de 2 m estaría a 4 km del cráter, la de 1 m estaría a 6 km, y la de 0.3 m a 10 km.

Con el fin de estimar el volumen del depósito de caída de lapilli de pómez "Ullacha", se utilizaron los datos del mapa de isópacas. Sobre la base de dicho mapa, una gráfica de T vs. $A^{1/2}$ (donde T es el espesor y A es el área de la isópaca) revela una tasa de adelgazamiento bastante regular, cuyos puntos se ajustan a un solo segmento exponencial (línea discontinua).

Mediante el modelo de Pyle (1989) que se basa en la hipótesis de decaimiento exponencial, el volumen de tefra calculado es de 3.1×10^8 m^3. Se obtuvo un resultado similar del enfoque de la regla trapezoidal de Fierstein & Nathenson (1992). Al tomar en cuenta el volumen total de la erupción y otros parámetros calculados (altura de la columna, etc.), se llegó a inferir que la erupción tuvo un Índice de Explosividad Volcánica 4, que corresponde a una erupción subpliniana.

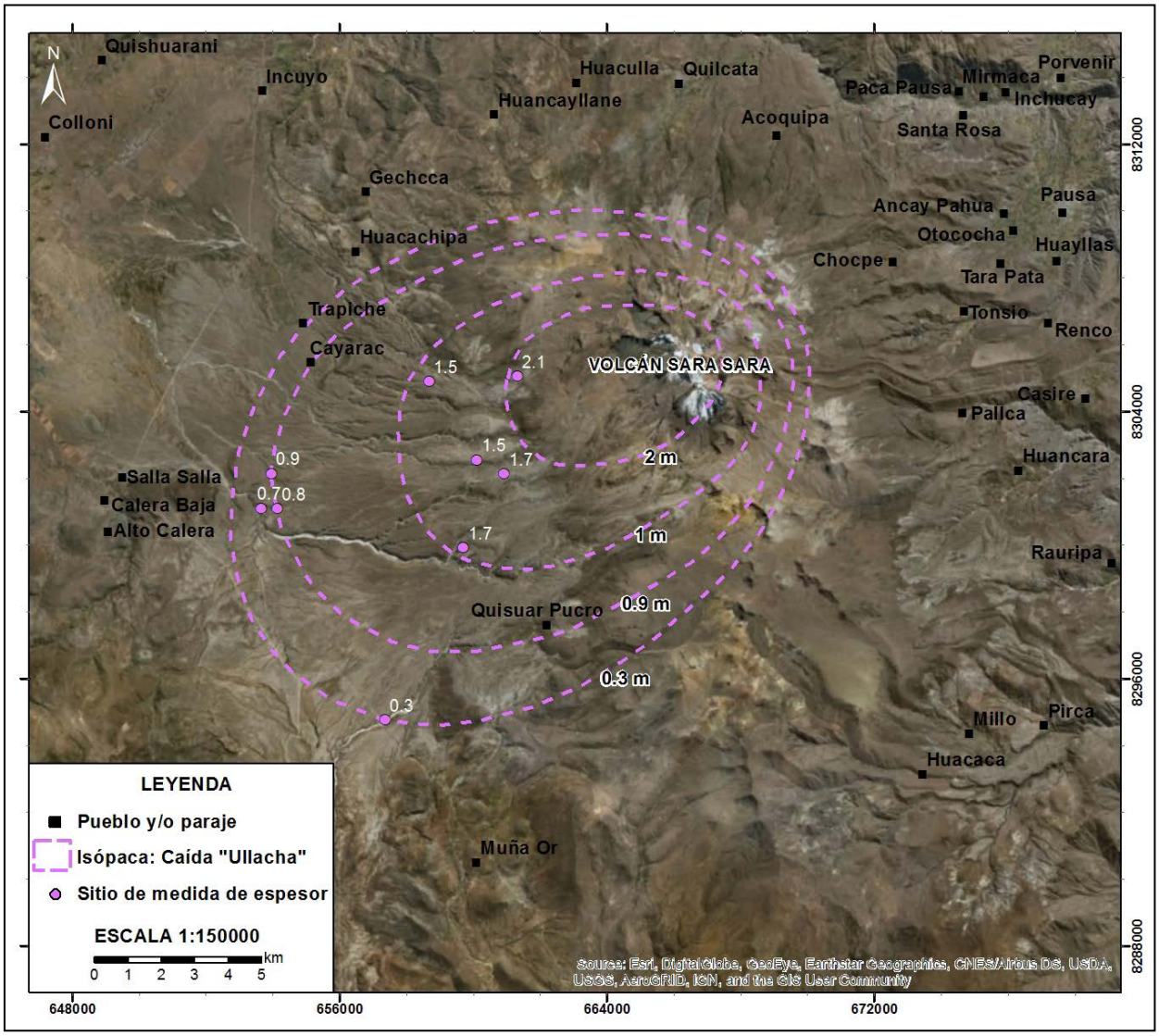
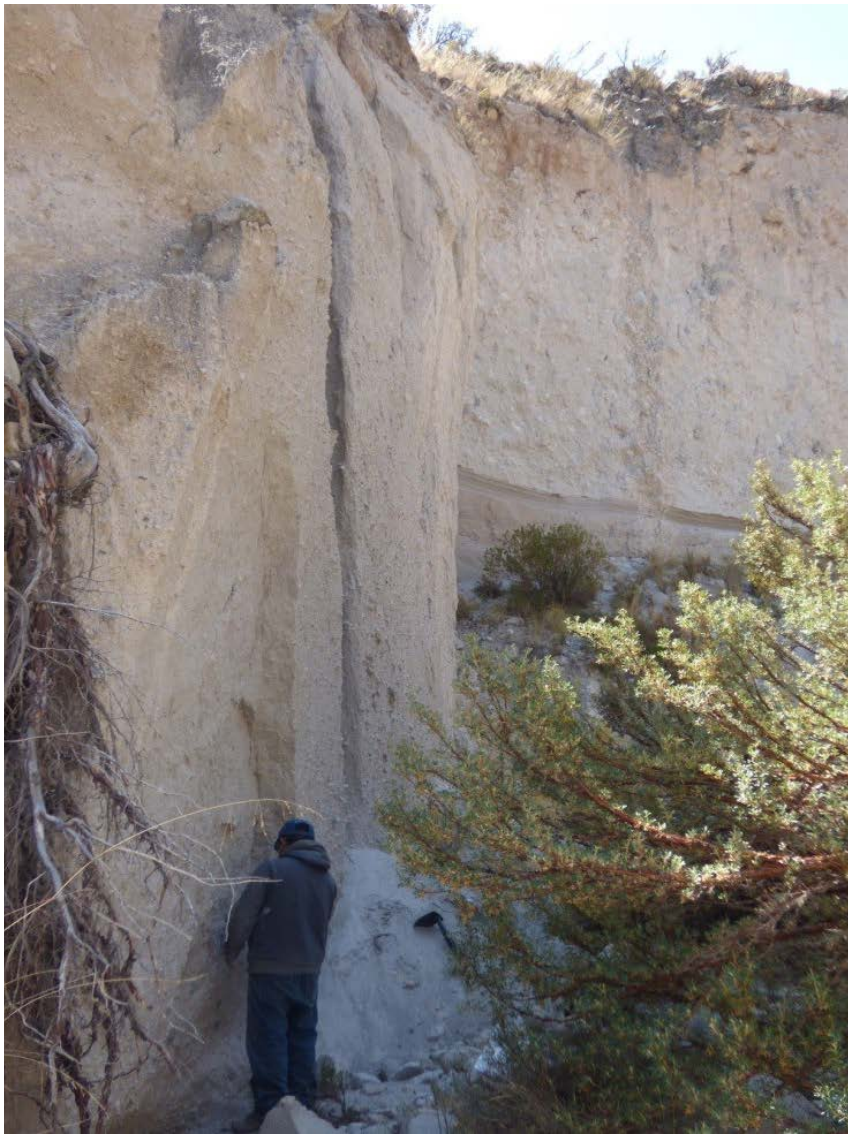


Figura 3.36 Mapa de isópaca del depósito de caída de lapilli de pómez "Ullacha"

Depósito de flujo de pómez y ceniza "Angostura superior"

En la quebrada Angostura, a 7.4 km al oeste del volcán Sara Sara, y quebradas aledañas, se distingue un depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza de color gris claro, de composición riolítica, al cual se le ha denominado "Angostura superior" (fotografía 3.8). Este depósito tiene entre 35 a 40 m de espesor y es algo endurecido. Las pómez alcanzan a medir más de 15 cm de diámetro, y están en moderada proporción volumétrica (30 %). El depósito es masivo, de granulometría relativamente homogénea. La matriz es de tamaño lapilli fino y ceniza, donde se distinguen trizas de vidrio, cristales de plagioclasa, biotita, y fragmentos líticos. Las pómez son poco vesiculadas, y contienen cristales de biotita y plagioclasa. Los fragmentos líticos están en poca proporción volumétrica (5-8 %).



Fotografía 3.8 Depósito de flujo de pómez y ceniza a 7.4 km al oeste del volcán Sara Sara, en la quebrada Angostura, donde mide hasta 35 m de espesor

El depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza "Angostura superior" aflora sobre el depósito de flujo de bloques y ceniza "Diente de caballo" y es cubierto por al menos dos depósitos de flujos de bloques y ceniza.

Depósito de flujos de bloques y ceniza "Ullacha" (Pl-Salll6)

Corresponde a un depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza de color gris claro que aflora aguas abajo de las quebradas Ullacha Chico y Ullacha Grande, entre 9 y 14 km al suroeste del volcán Sara Sara (figura 3.37), y sobreyace al depósito de bloques y ceniza "Dientes de caballo". Este depósito tiene 7 m de espesor y se encuentra ligeramente consolidado, con un mal sorteo y una granoclasificación inversa.

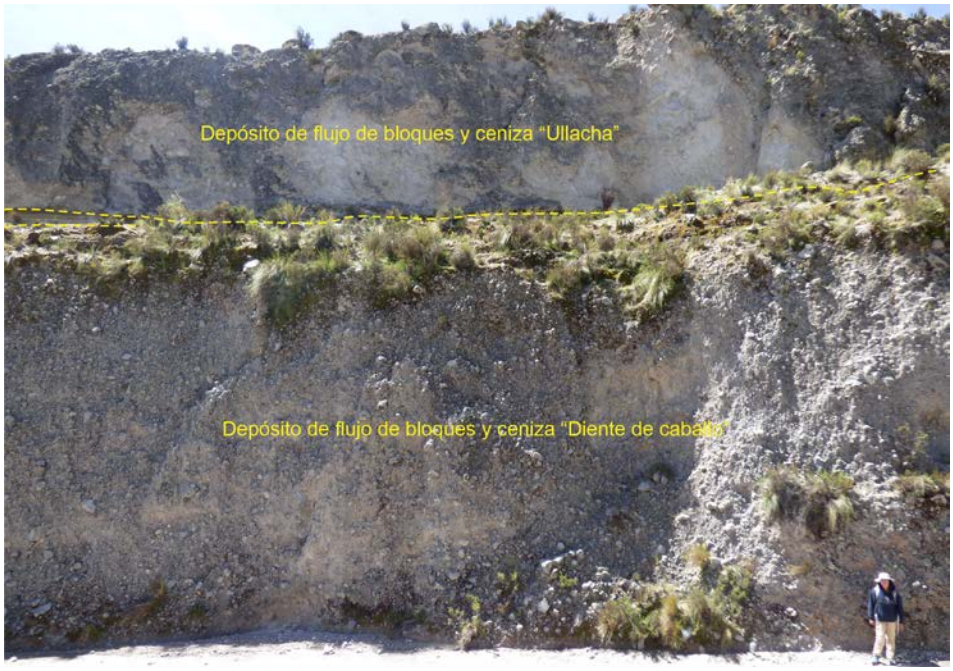


Figura 3.37 Depósitos de flujo de bloques y ceniza, a 13.5 km al oeste del volcán Sara Sara, en la confluencia del río Salla Salla y quebrada Ullacha Grande

El depósito es masivo y está constituido principalmente por bloques juveniles, accesorios y accidentales. Los bloques juveniles son densos, con vesículas alargadas y de composición dacítica (66.3 wt. % SiO_2). Dichos bloques en su gran mayoría tienen formas subangulosas a subredondeadas (figura 3.37).

Estos bloques están englobados dentro de una matriz de ceniza, friable y poco endurecida. Los bloques juveniles presentan cristales de plagioclasa (1 cm), biotita (1 mm), anfíbol (2 mm), y óxidos de Fe-Ti. Dichos bloques tienen una textura porfirítica y miden hasta 2 m de diámetro.

A continuación, se presentan columnas estratigráficas levantadas en las diversas quebradas al oeste del volcán Sara Sara, en las cuales se detallan los diversos depósitos descritos anteriormente (figura 3.38).

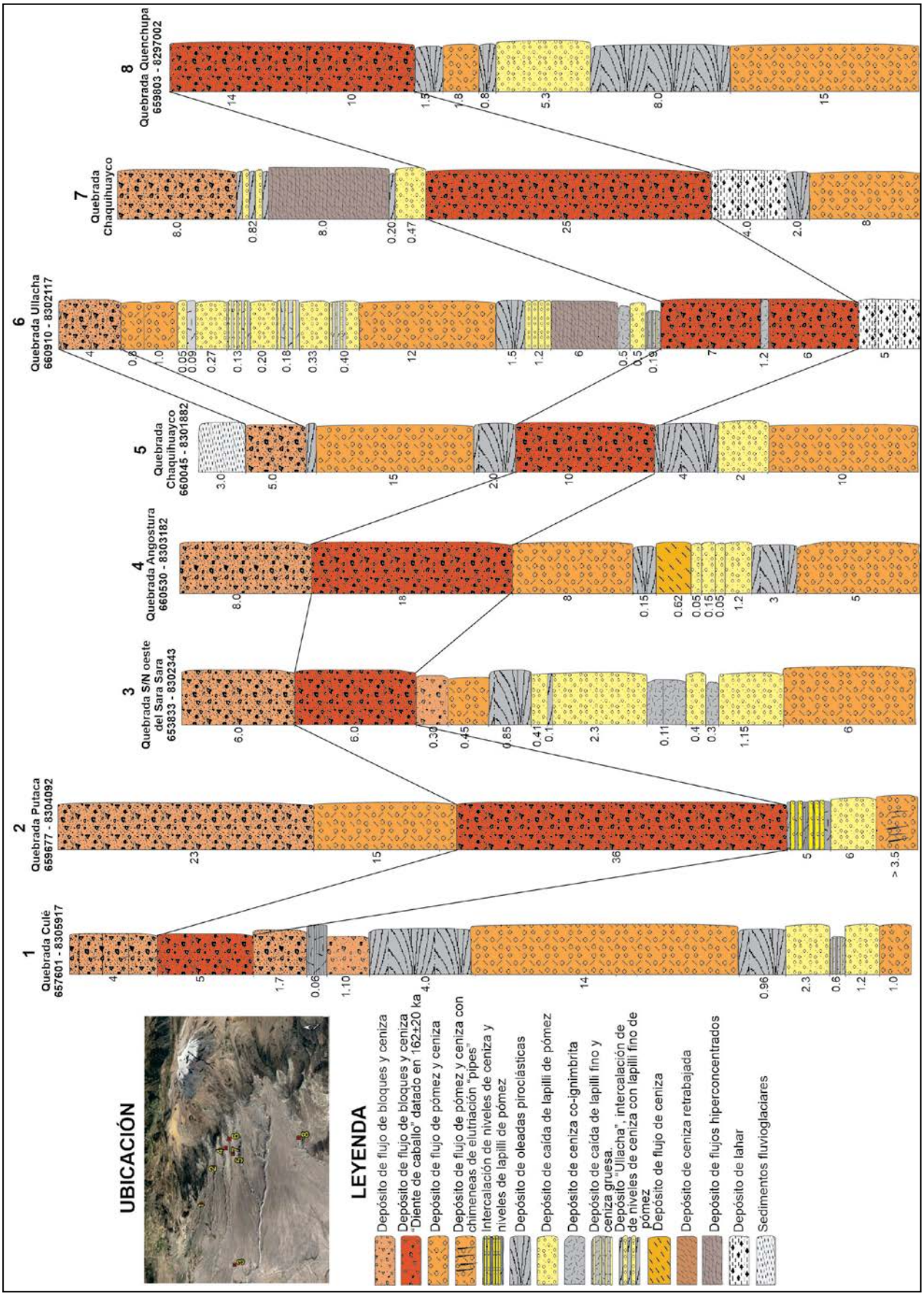


Figura 3.38 Correlación de columnas estratigráficas levantadas en quebradas, al oeste del volcán Sara Sara

3.3.4 Sara Sara IV (Pleistoceno superior)

Durante la última etapa "Sara Sara IV", se produjo el emplazamiento de flujos de lava que conforman el cono actual del volcán. También, al final de este periodo, fueron emitidas lavas por un vento localizado al pie del flanco este del volcán. A continuación, se describen estos eventos.

- Lavas dacíticas del estratocono superior (Pl-SaIV1)

Corresponden a un apilamiento de flujos de lavas en bloques de composición dacítica (65.1 - 67.8 wt. % SiO_2), ubicadas entre los 4617 y 5492 m s. n. m. Estas lavas conforman el actual edificio volcánico del Sara Sara (figura 3.39). Presentan pendientes menores de 40° y han recorrido una distancia máxima de 4.5 km con dirección radial al volcán.

Los flujos de lava son de color gris, masivos, y en su mayoría presentan fracturas. Algunos se encuentran bastante erosionados por la actividad glaciar ocurrida en el Pleistoceno superior-Holoceno. Asimismo, se observa algunos frentes de lavas verticales y escarpadas. Dichos flujos miden entre 40 y 80 m de espesor. Las lavas dacíticas son de textura porfirítica y presentan un ensamble mineralógico, en su mayoría conformado por gruesos fenocristales de plagioclasa a veces de hasta 5 cm, anfíbol de 1 cm, biotita de 1 cm, y óxidos de Fe-Ti de tamaños milimétricos. Los fenocristales se encuentran englobados dentro de una pasta de color gris oscuro a gris claro.

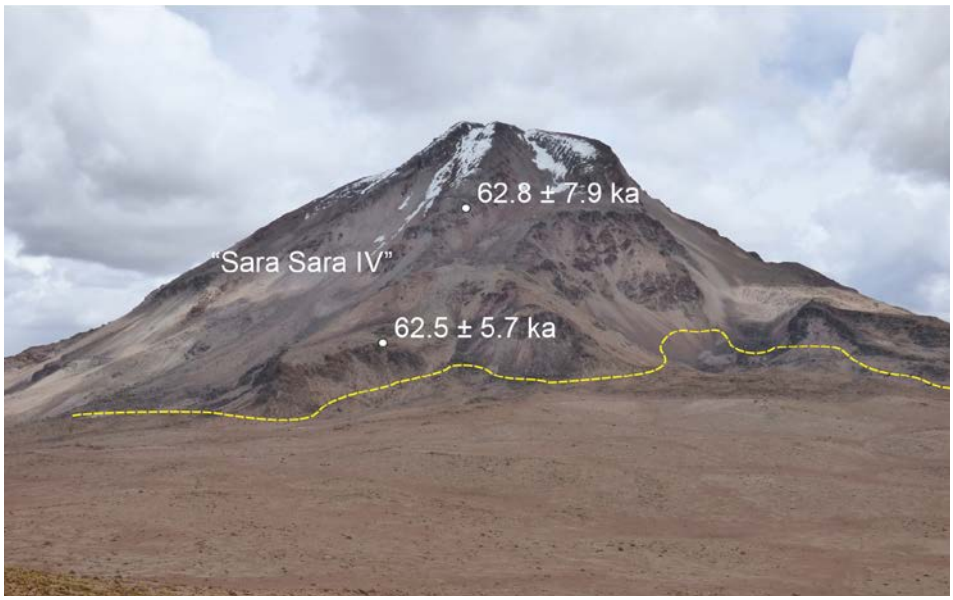


Figura 3.39 Vista del flanco sureste del volcán Sara Sara, donde se aprecia flujos de lavas asignados a la etapa "Sara Sara IV

Flujos de lava dacítica "reciente" (Pl-SaIV2)

Al pie del flanco este del volcán Sara Sara, en inmediaciones de los poblados de Casiri y Tonsio, se distingue una secuencia de flujos de lava en bloque (figura 3.40), de composición dacítica (65.2-66.1 wt. % SiO_2). Estos flujos fueron emitidos a través de un vento parásito localizado al pie del flanco este del volcán Sara Sara, desde donde recorrieron a más de 14 km de distancia del volcán, y se depositaron sobre secuencias volcánicas de los grupos Barroso y Tacaza. Una datación radiométrica K/Ar efectuada en dicha lava arroja una edad de 14 ± 4 ka.

Figura 3.40 Flujo de lava en bloque de un vento parásito de composición dacítica, con bordes de encauzamiento, al pie del flanco este del volcán Sara Sara

Estas lavas son de textura porfirítica y contienen fenocristales de plagioclasa, anfíbol, biotita, y eventualmente cuarzo, esfena, sanidina y clinopiroxeno. Los fenocristales de plagioclasa alcanzan a medir hasta 4 cm.

3.4 OTROS DEPÓSITOS

3.4.1 Depósito volcanoclástico (Qh-vol)

Corresponde a una secuencia interestratificada de lahares y flujos hiperconcentrados. Estos tipos de depósitos están ampliamente distribuidos al O y SO del volcán Sara Sara. A veces se hallan formando pequeños abanicos. Estos depósitos están dispuestos en niveles delgados, estratificados o con estratificación poco marcada, endurecidos, y son de color gris. Se encuentran rellenando paleo-quebradas. En total, la secuencia mide entre 5 y 12 m de espesor. Algunos niveles presentan concentración de bloques subredondeados.

3.4.2 Lahares (Qh-l)

Los depósitos de lahares se hallan a veces intercalados entre los depósitos de corrientes de densidad piroclástica, y a veces yacen en la parte superior de las secuencias volcánicas que afloran en los alrededores del volcán Sara Sara. Otros lahares recientes se hallan canalizados en las quebradas ubicadas al pie de los flancos sureste, oeste y suroeste del volcán Sara Sara (quebrada Cule, Angostura, etc.). Los lahares tienen espesores de 0.5 a 4 m, y en su mayoría son masivos, algo endurecidos y de color gris a marrón.

Estos depósitos están conformados principalmente por bloques lávicos polimícticos englobados en una matriz areno-limosa. Se originaron en periodos de lluvias fuertes, así como por el agua proveniente de la fusion de la nieve y hielo que permanece en la cumbre del volcán.

3.4.3 Depósitos morrénicos (Pl-Mo1; Pl-Mo2; H-Mo)

En inmediaciones del volcán Sara Sara se han identificado al menos tres generaciones de morrenas:

a) Las más antiguas (Pl-Mo1), corresponderían a las morrenas que se localizan en áreas alejadas al volcán, en los sectores E, SE, O y N del volcán (ver mapa geológico). Estas morrenas se emplazaron durante el Pleistoceno. Presentan superficies ovaladas y alargadas.

b) La segunda generación de morrenas (Pl-Mo2) estaría asociada al Pleistoceno superior o del último avance glaciar (LMG: 18-14 ka), estas se localizan en las laderas muy próximas al volcán.

c) La tercera generación (H-Mo) correspondería a las morrenas más recientes que afloran al pie de los flancos del volcán, sobre los 4500 m s. n. m. Estas presentan morfologías frescas, y probablemente estarían asociadas al periodo Neo-glaciar (últimos 5 ka).

Las morrenas presentes en inmediciaones del Sara Sara son producto de la intensa actividad glaciar, a la cual ha estado sometida esta parte de los Andes durante el Pleistoceno-Holoceno.

3.4.4 Depósitos coluviales (Qh-Cl)

Están conformados por una mezcla de bloques angulosos, heterogéneos y heterométricos, con materiales finos (arenas y limos), que generalmente se presentan muy sueltos, en forma de escombreras. Estos tipos de depósitos son visibles en las laderas del volcán Sara Sara y áreas aledañas.

3.4.5 Depósitos aluviales (Qh-Al)

Se emplazan en la parte noreste y este del área de estudio, en ambas márgenes de los lechos de los ríos Pararca y Huancabamba. Estos depósitos están conformados por niveles de arena, limolitas y niveles de bloques de lava y grava, englobados dentro de una matriz areno-limosa. Dichos depósitos son sueltos y están estratificados.

CAPÍTULO IV
PETROGRAFÍA

Entre los años 2015 y 2017, se recolectaron 168 muestras de rocas del volcán Sara Sara para el estudio petrográfico, mineralógico y geoquímico (figura 4.1). Este muestreo representa las diferentes unidades volcánicas descritas anteriormente.

A continuación, se presenta una descripción detallada de las rocas provenientes de cada etapa eruptiva, con el fin de realizar una discriminación y determinar si las rocas presentan características similares o no.

4.1 SARA SARA I

Dacitas

Corresponden a flujos de lava de la base del volcán Sara Sara (Sar-17-41, 17-42), que presentan una textura porfirítica con una pasta intersertal. Estas lavas están constituidas por fenocristales de plagioclasa (<8 mm), anfíbol (<1.5 mm), biotita (<2 mm) y cuarzo (<2.1 mm). El contenido de cristales es de 30-40 % de fenocristales, 50-55 % de matriz y 1-5 % de vesículas (figura 4.2).

El fenocristal que más abunda es la **plagioclasa**, y constituye el 15-20 % de los fenocristales. Estos fenocristales miden hasta 8 mm. De acuerdo a su textura, se distinguen dos generaciones: la primera generación está constituida por fenocristales euhedrales y subhedrales que a veces contienen inclusiones de óxidos y biotitas en su interior. La segunda generación está constituida por fenocristales subhedrales, con una textura "tamiz" en los bordes de hasta 30 µm.

El **anfíbol** constituye el 5-7 % de los fenocristales del total de la muestra, y presenta tamaños de hasta 1.5 mm. Existen fenocristales subhedrales con bordes completamente oxidados de hasta 50 µm de grosor. La **biotita** constituye del 3-5 % de los fenocristales del total de la muestra, con tamaños de hasta 2 mm. Tienen hábitos euhedrales y subhedrales con inclusiones de óxidos de hasta 50 µm. El **cuarzo** constituye el 1-3 % de fenocristales, con tamaños de hasta 2.1 mm. Algunos fenocristales son anhedrales con bordes redondeados. Los minerales opacos constituidos por **óxidos de Fe-Ti** constituyen del 5-10 % de los fenocristales de la muestra.

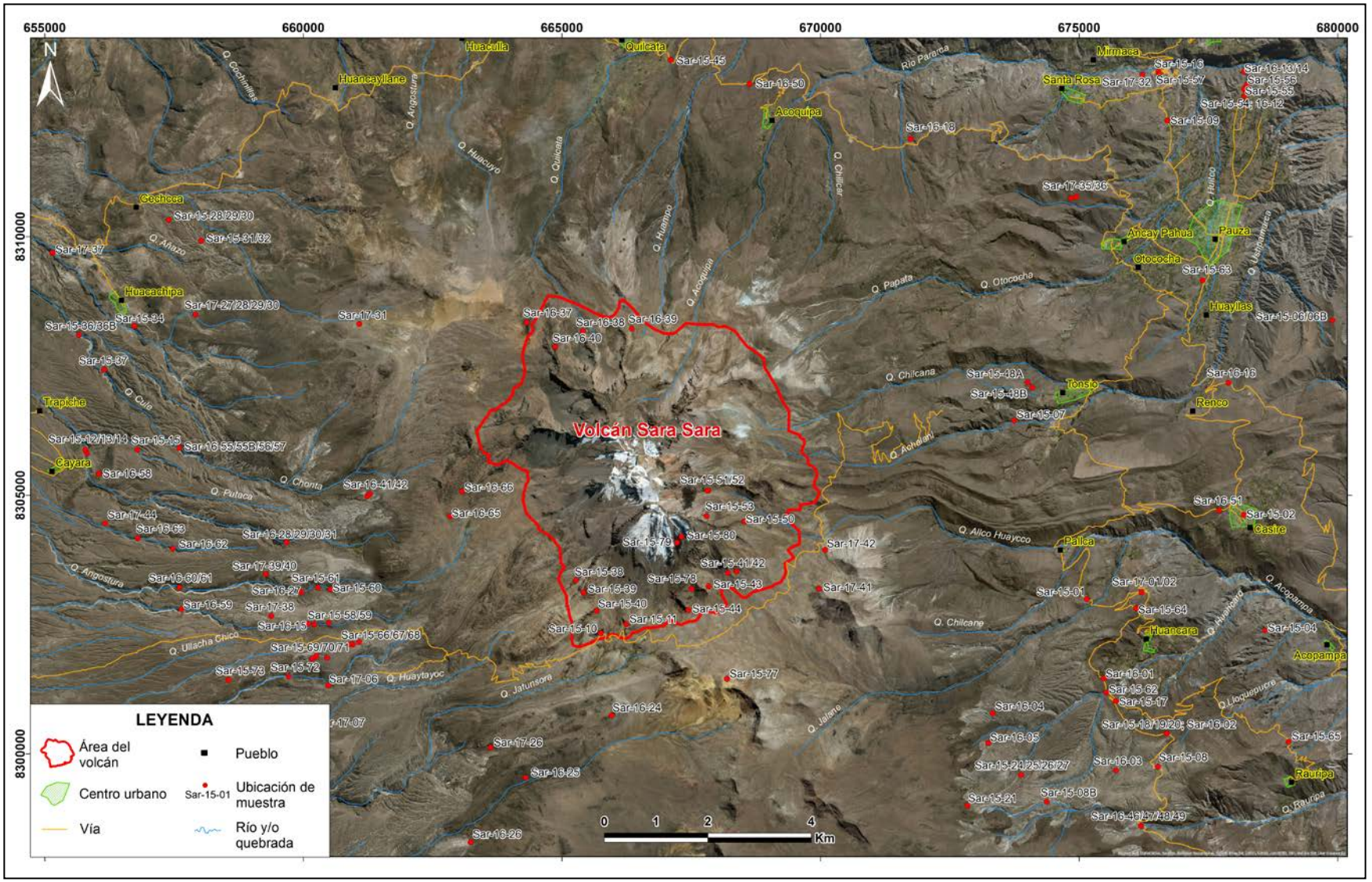


Figura 4.1 Mapa de ubicación de muestras tomadas en la zona de estudio del volcán Sara Sara

Riolitas

Corresponde a un depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza (Sar-16-09). Las pómez presentan una textura vesiculada y vitrofídica. Estas contienen entre 15-20 % de fenocristales, 40-45 % de matriz y 30-35 % de vesículas. El ensamble mineralógico está constituido por fenocristales de plagioclasa, biotita y anfíbol (figura 4.2). La pómez presenta vesículas de forma irregular.

La **plagioclasa** es el tipo de fenocristal más abundante (10-15 %) en la muestra, y presenta tamaños de hasta 5 mm; es de textura "tamiz" y bordes de reabsorción. Algunas plagioclasas están agrupadas en forma de aglomerados. Los fenocristales de biotita constituyen el 5-10 % de fenocristales, con tamaños de hasta 1.2 mm. La **biotita** tiene hábitos euhedrales y subhedrales, y además contiene inclusiones de óxidos de Fe-Ti en su interior, mientras que el **anfíbol** constituye el 3-5 % de los cristales del total de la muestra, con tamaños de hasta 0.3 mm. Los fenocristales son euhedrales y subhedrales con inclusiones de óxidos. Los **óxidos de Fe y Ti** constituyen del 4-6 %; se encuentran en la pasta, y como inclusión, en cristales de biotita y anfíbol.

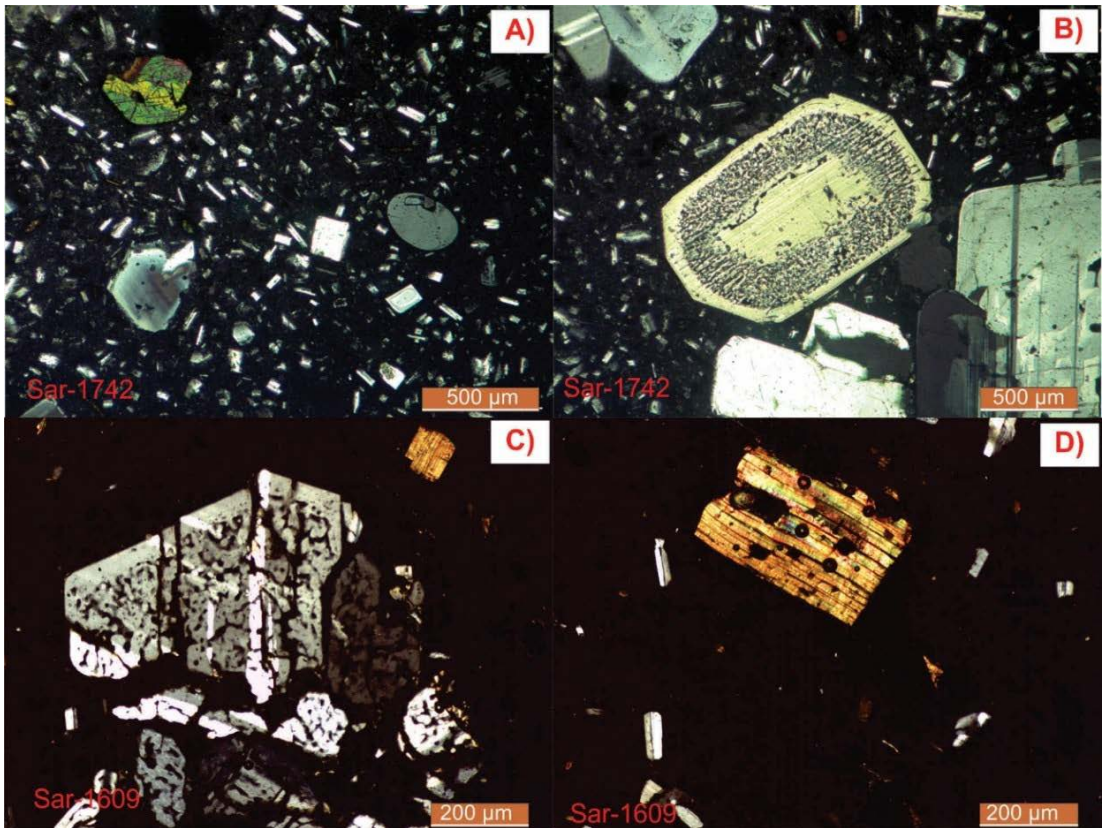


Figura 4.2 Fotografías de secciones delgadas de lavas "Sara Sara I" en luz polarizada: a) fenocristales de cuarzo, anfíbol y plagioclasa dentro de una matriz microlítica; b) fenocristal de plagioclasa con textura "tamiz" dentro de una matriz microlítica. Fotografías de una sección delgada de flujo de pómez y ceniza "Sara Sara I" en luz polarizada: c) fenocristal de plagioclasa dentro de una matriz vítrea; y d) fenocristal de biotita dentro de una matriz vítrea

4.2 SARA SARA II

Dacitas

Corresponden a depósitos de flujo piroclástico de pómez y ceniza (Sar-15-09; 15-16, 15-57, 16-13, 16-62) y depósitos de caída de lapilli de pómez (Sar-15-17, 15-27, 15-29, 15-30, 15-36, 15-47; 16-01, 16-04, 16-15, 16-17; 17-01, 17-02, 17-24).

Las pómez de los depósitos de **flujo piroclástico** de pómez y ceniza presentan una textura vesiculada, vitrofídica y microlítica, con un contenido de 15-20 % de fenocristales, 45-55 % de matriz y 25-30 % de vesículas. Las muestras están constituidas por fenocristales de plagioclasa, biotita y anfíbol.

El fenocristal más abundante es la **plagioclasa** (5-10 % en volumen), con tamaños de hasta 3.5 mm. De acuerdo a su textura, se puede diferenciar dos generaciones: la primera generación está constituida por fenocristales subhedrales, con caras limpias; mientras que la segunda generación presenta fenocristales euhedrales y subhedrales con textura "tamiz", con bordes de disolución de hasta de 150 µm. La **biotita** constituye el 5-7 % de los fenocristales del total de la muestra, con tamaños de hasta 1.5 mm. La biotita tiene hábito euhedral con inclusiones de óxidos de Fe-Ti.

El **anfíbol** constituye el 3-5 % de los fenocristales del total de la muestra, con tamaños de hasta 1 mm, de formas subhedrales. La mayoría de fenocristales de anfíbol presentan bordes completamente oxidados de hasta 20 µm. Los **óxidos de Fe-Ti** constituyen el 3-5 % de los fenocristales de la muestra. Algunos óxidos se encuentran en los bordes de los cristales o como inclusiones en los cristales.

Por su parte, las pómez de los depósitos de **caída de lapilli de pómez** de composición dacítica presentan una textura vesiculada y vitroclástica, con un contenido de 10-15 % de fenocristales, 45-50 % de matriz y 30-35 % de vesículas. Estas pómez están constituidas por fenocristales de plagioclasa, biotita y anfíbol.

La **plagioclasa** constituye entre el 5-10 % de los fenocristales del total de la muestra, con tamaños de hasta 2.8 mm; tiene hábitos subhedrales, algunas con textura sieve en sus bordes. La **biotita** forma parte en un el 3-5 % de los fenocristales, con tamaños que miden hasta 2.4 mm; tiene hábitos euhedrales y subhedrales, con inclusiones de óxidos en su interior. Algunas biotitas se encuentran en forma de microlitos en la matriz. El **anfíbol** constituye el 3-5 % de los fenocristales, con tamaños de hasta 2 mm. Los **óxidos de Fe-Ti** constituyen el 3-5 % de los fenocristales de la muestra.

Riolitas

Corresponden a depósitos de flujo piroclástico de pómez y ceniza (Sar-15-12, 15-15, 15-23, 15-28; 16-13, 16-42, 16-52; 17-11, 17-32, 17-37, 17-43) y depósitos de caída de lapilli de pómez (Sar-15-08, 15-08B, 15-14; 16-03, 16-05, 16-06, 16-18, 16-21, 16-26, 16-27, 16-47, 16-53, 16-55, 16-55B,16-63; 17-03, 17-04, 17-05, 17-10) que tienen composición riolítica.

Las pómez de los depósitos de **flujo piroclástico de pómez y ceniza** de composición riolítica presentan una textura vesiculada y vitrofídica. Estas contienen entre 15-20 % de fenocristales, 40-45 % de matriz y 35-40 % de vesículas. El ensamble mineralógico está constituido por fenocristales de plagioclasa, anfíbol, biotita y cuarzo (figura 4.3). Las pómez presentan vesículas alargadas y/o alongadas.

La **plagioclasa** es el fenocristal más abundante (10-15 % en vol.) y tienen tamaños de hasta 7 mm. De acuerdo a su textura, se distinguen dos generaciones: la primera generación está constituida por fenocristales euhedrales y subhedrales que a veces contienen algunos microcristales de óxidos y biotitas en su interior; la segunda generación está constituida por fenocristales subhedrales, con una textura "tamiz" en los bordes de hasta 30 µm. Algunas plagioclasas presentan un zonamiento o están agrupadas en forma de aglomerados.

La **biotita** constituye entre el 5-10 % de fenocristales del total de la muestra, con tamaños de hasta 1.8 mm. La biotita tiene un hábito euhedral y subhedral, y presenta además inclusiones de óxidos de Fe-Ti y apatito en su interior. Algunas biotitas presentan bordes de óxidos. Por otro lado, el **anfíbol** constituye el 3-5 % de los fenocristales, con tamaños de hasta 5.0 mm. Los fenocristales son euhedrales y subhedrales con delgados bordes de óxidos. A veces forman aglomerados.

El **cuarzo** constituye del 1-5 % de los fenocristales de la muestra, con tamaños de hasta 2.0 mm, y formas subhedrales a anhedrales; algunos tienen bordes redondeados. Por su parte, el **apatito** de forma subhedral y euhedral constituye menos del 2 % de los fenocristales de la muestra. Los **óxidos de Fe y Ti** constituyen el 1-5 % de los fenocristales de la muestra; se encuentran en la pasta y como inclusión en cristales de clinopiroxenos y biotita.

Los depósitos de **caída de lapilli de pómez** de composición riolítica presentan una textura vesiculada y vitroclástica, con un contenido de 10-15 % de fenocristales, 45-50 % de matriz y 30-35 % de vesículas. La muestra está constituida por fenocristales de **plagioclasa**, biotita, cuarzo, esfena y anfíbol. La plagioclasa constituye entre el 6-12 % de los fenocristales de la muestra, con tamaños de hasta 3.2 mm; tiene hábitos subhedrales, y algunas presentan una textura "sieve" o "tamiz" en sus bordes.

La **biotita** constituye el 5-7 % de los fenocristales, con tamaños que alcanzan hasta 2.1 mm; tiene hábitos euhedrales y subhedrales con inclusiones de óxidos de Fe-Ti en su interior. Algunas biotitas se encuentran en forma de microlitos en la matriz. El **anfíbol** constituye el 3-5 % de los fenocristales del total de la muestra, con tamaños de hasta 2 mm. El **cuarzo** constituye el 1-5

% de los fenocristales de la muestra, con tamaños de hasta 2.4 mm; tiene hábito subhedral y anhedral, con bordes redondeados y golfos de reabsorción.

El **apatito** constituye menos del 2 % de los fenocristales de la muestra y se encuentra como inclusión en la biotita. La **esfena** constituye menos del 2 %, con tamaños de hasta 0.4 mm, y se encuentra reemplazada en óxidos.

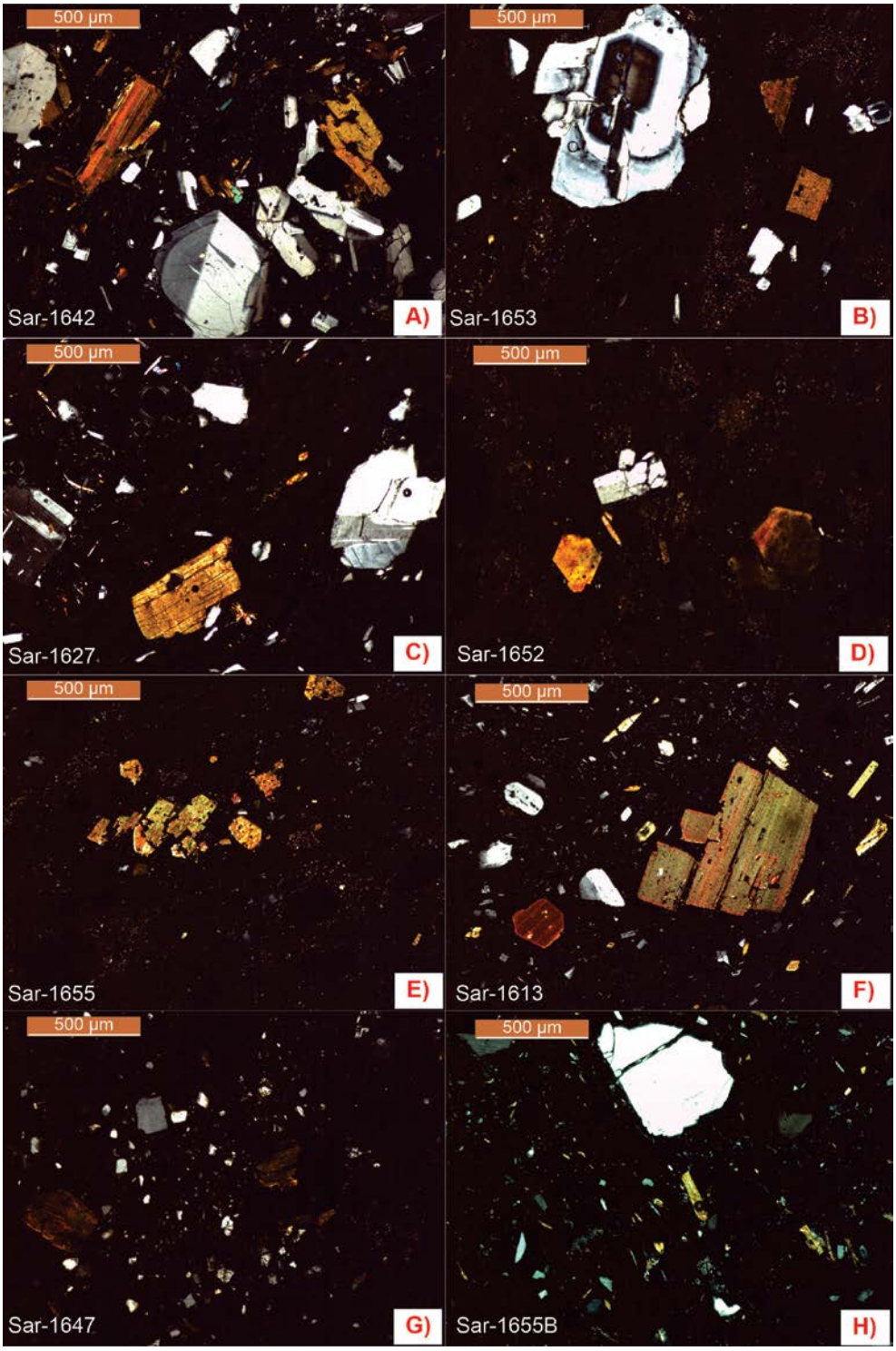


Figura 4.3 Fotografías de secciones delgadas de depósitos piroclásticos dacíticos del "Sara Sara II" en luz polarizada: a); b) y c) fenocristales de plagioclasa y biotita subhedrales y anhedrales en una matriz vitrea; d) fenocristales de biotita y plagioclasa en una matriz vítrea vesiculada; e) fenocristales de anfíbol subhedral y anhedral; f) fenocristales de plagioclasa y biotita subhedrales; g) y h) fenocristales y microcristales de plagioclasa y biotita subhedrales y anhedrales

Finalmente, en las riolitas, los óxidos de Fe-Ti constienen el 1-5 % de los fenocristales de la muestra, se encuentran en la pasta, y como inclusión en cristales de biotita y anfíbol.

4.3 SARA SARA III

Dacitas

Corresponden a bloques juveniles de depósitos de flujo piroclástico de bloques y ceniza (Sar-15-37, 15-45, 15-48A, 15-48B, 15-54, 15-63, 15-66, 15-71, 15-74, 15-76; 16-10B, 16-16, 16-59). Las muestras presentan una textura porfirítica, vitrofídica y microlítica, con un contenido de 25-30 % de fenocristales, 50-55 % de matriz y 10-15 % de vesículas. La muestra está constituida por fenocristales de plagioclasa, biotita, anfíbol, apatito, y eventualmente, de ortopiroxeno, cuarzo y esfena.

El fenocristal más abundante es la **plagioclasa** (15-20 % en volumen), con tamaños de hasta 1.2 cm. De acuerdo a su textura, se pueden reconocer dos generaciones: la primera generación está constituida por fenocristales euhedrales y subhedrales, que a veces presentan inclusiones de biotitas; la segunda generación consiste en fenocristales euhedrales y subhedrales, los cuales presentan bordes con textura “sieve” o tipo “tamiz”.

El **anfíbol** constituye el 10-15 % en volumen, con tamaños de hasta 2 mm. Algunos anfíboles presentan una textura opaca de reemplazo o tipo black, debido a que han sido reemplazados totalmente por los óxidos. La biotita contiene el 5-10 % de los fenocristales del total de la muestra, con tamaños de hasta 2.2 mm; también contiene fenocristales subhedrales, algunos totalmente reemplazados en óxidos y con inclusiones de plagioclasas.

El **clinopiroxeno** constituye el 1-5 %, se presenta en tamaños de hasta 0.6 mm, y está en forma de fenocristales euhedrales y subhedrales. El **cuarzo** constituye el 1-5 % de los fenocristales de la muestra, con tamaños de hasta 2.0 mm; tiene hábitos anhedrales a subhedrales, con bordes redondeados y golfos de reabsorción. También se puede encontrar **apatito**, el cual constituye menos del 2 % del total de la muestra, con tamaños de hasta 1.5 mm; tiene forma euhedral y también se presenta como inclusión en la biotita.

La **esfena** constituye menos del 2 % de los fenocristales de la muestra, con tamaños de hasta 0.8 mm. Los **óxidos de Fe-Ti** constituyen el 1-5 % de los fenocristales de la muestra, y se encuentran en los bordes o como inclusiones en los cristales.

En la pasta, se observa microlitos de plagioclasa de 100 μm en promedio, así como también aglomerados de microlitos de plagioclasa, anfíbol y óxidos de Fe-Ti.

Riolitas

Corresponde a bloques juveniles de depósitos de flujo piroclástico de bloques y ceniza (Sar-15-07, 15-13, 15-67, 15-75, 16-10A, 16-10C, 16-11, 16-12, 16-29, 16-30, 16-57, 16-60, 16-61; 17-06, 17-08, 17-09A, 17-09B, 17-12A, 17-12B, 17-38, 17-39, 17-40). Las muestras presentan una textura porfirítica, vitrofídica, microlítica, con un contenido de 20-25 % de fenocristales, 55-60 % de matriz y 10-15 % de vesículas.

Las riolitas están constituidas por fenocristales de plagioclasa, biotita y anfíbol. La matriz está constituida por abundante vidrio volcánico en una textura eutaxítica (figura 4.4).

En las riolitas, el fenocristal más abundante es la **plagioclasa** (10-15 % en volumen), con tamaños de hasta un centímetro. De acuerdo a su textura, se pueden reconocer tres tipos: la primera generación está constituida por fenocristales subhedrales y anhedrales que presentan una textura “tamiz”; la segunda generación está constituida por fenocristales de caras limpias con hábito subhedral; y la tercera generación está constituida por fenocristales subhedrales dispuestos en forma de aglomerados, con inclusiones de óxido en su interior.

La **biotita** constituye el 5-10 % de los fenocristales, con tamaños de hasta 2.4 mm; se presenta en forma de fenocristales euhedrales y subhedrales. El **anfíbol** constituye el 3-5 % de los fenocristales del total de la muestra, con tamaños de hasta 1.6 mm; tiene hábitos subhedrales y anhedrales. En determinadas muestras estos fenocristales presentan gruesos bordes de óxidos o son reemplazados totalmente por óxidos (textura opaca de reemplazo o tipo *black*).

La **sanidina** constituye el 1-5 % de los fenocristales del total de la muestra, con tamaños de hasta 4 mm y se presenta en forma de fenocristales euhedrales. El **cuarzo** constituye el 1-5 % de los fenocristales de la muestra, con tamaños de hasta 5 mm; tiene forma de fenocristales euhedrales a subhedrales, y a veces tiene bordes redondeados o golfos de reabsorción.

El **apatito** constituye menos del 2 % de los fenocristales del total de la muestra, con tamaños de hasta 0.5 mm; se presenta en la matriz y también como inclusiones en la sanidina y biotita. La **esfena** constituye menos del 2 % de los fenocristales de la muestra, con tamaños de hasta 1.2 mm. Además, se distinguen zeolitas con texturas concéntricas, que constituyen el 1-5 % de los fenocristales de la muestra. Estas esferulitas de sílice miden hasta 1.8 mm. Los **óxidos de Fe-Ti** constituyen el 3-5 % de los fenocristales de la muestra; se presentan como inclusión en fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita. La matriz es vítrea y muchas veces gobernada por vesículas alargadas.

Figura 4.4 Fotografías de secciones delgadas de rocas piroclásticas del "Sara Sara III" en luz polarizada: a) fenocristales de cuarzo y plagioclasa dentro de una matriz microlítica; b) fenocristales de plagioclasa y biotita en matriz vitrea; c) fenocristales de plagioclasa y biotita en matriz microlítica; d) cristales de plagioclasa y biotita; e) y f) fenocristales de plagioclasa y biotita; g) y h) fenocristales de plagioclasa, biotita y anfíbol

4.4 SARA SARA IV

Dacitas

Corresponden a flujos de lava del cono volcánico (Sar-15-38, 15-39, 15-40, 15-41, 15-42, 15-43, 15-44, 15-50, 15-51, 15-52, 15-53, 15-77, 15-78, 15-80; 16-38, 16-39, 16-40, 16-51, 16-65) y flujos de lava recientes (Sar-15-02; 15-04). Estos flujos de lava presentan una textura porfirítica con una matriz intersertal (figura 4.5). Las rocas están constituidas por cristales de plagioclasa (<6 mm), anfíbol (<2 mm), biotita (<2 mm), y eventualmente por clinopiroxeno (<0.6 mm), cuarzo (<3 mm), esfena (<1.8 mm) y sanidina (<2.5 mm). El contenido de fenocristales es de 30-40 %, el 45-50 % es de pasta y microcristales, y el 1-5 % es de vesículas.

En las dacitas al igual que las riolitas, el fenocristal más abundante es la **plagioclasa**, que constituye el 15-20 % de los fenocristales, con tamaños de hasta 6 mm. De acuerdo a su textura, se pueden reconocer tres tipos: el primer tipo está constituido por fenocristales subhedrales, los cuales presentan inclusiones de biotitas con tamaños de hasta 0.4 mm; el segundo tipo está constituido por fenocristales subhedrales y anhedrales, con textura *sieve* en los bordes; y el tercer tipo está constituido por fenocristales con caras limpias de plagioclasa.

El **anfíbol** constituye el 5-10 % de los fenocristales, con tamaños de hasta 2 mm. Los fenocristales son subhedrales, con bordes de óxidos de hasta 50 µm de grosor. Algunos anfíboles se encuentran como inclusión en las plagioclasas. La **biotita** constituye el 5-10 % de los fenocristales, con tamaños de hasta 2 mm; tiene hábitos euhedrales y subhedrales, con inclusiones de apatito de hasta 50 µm.

La **sanidina** constituye el 1-5 % de los fenocristales, con tamaños de hasta 2.5 mm; se presenta en forma de fenocristales euhedrales. El **cuarzo** constituye del 1-5 % de los fenocristales, con tamaños de hasta 3.0 mm. El cuarzo tiene hábito euhedral y subhedral, con bordes redondeados y golfos de reabsorción.

El **clinopiroxeno** (<2 % en volumen) presenta tamaños de hasta 0.6 mm, y tiene formas euhedrales y subhedrales. En las muestras, el clinopiroxeno no coexiste con el cuarzo ni la sanidina. La **esfena** constituye menos del 2 % de los fenocristales de la muestra, con tamaños de hasta 1.8 mm. Los minerales opacos conformados por **óxidos de Fe-Ti** constituyen el 3-5 %, y están en forma de inclusiones en la biotita y anfíbol, así como también dispersos en la pasta.

Figura 4.5 Fotografías de secciones delgadas de lavas del "Sara Sara IV" en luz polarizada: a) y b) fenocristales de plagioclasa y biotita dentro de una matriz microlítica; c) fenocristales de plagioclasa, biotita y clinopiroxeno en una pasta microlítica; d) fenocristales de plagioclasa en una pasta microlítica; e) cristales de plagioclasa y biotita; f) cristales de plagioclasa y cuarzo; g) y h) fenocristales de biotita, anfíbol y plagioclasa

Tabla 4.1

Resumen de las características petrográficas de productos de las diversas etapas del volcán Sara Sara. La abreviación que se utiliza en el texto y el cuadro es la siguiente: Pg = plagioclasa; Anf = anfíbol; Bt = biotita; Ap = apatito; Sa= sanidina; Qz = cuarzo; Sp = esfena; Cpx = clinopiroxeno

Etapa	Sara Sara I		Sara Sara II		Sara Sara III		Sara Sara IV
Tipo petrográfico	Dacita	Riolita	Dacita	Riolita	Dacita	Riolita	Dacita
Fenocristales (vol.%)	30-40	15-20	15-20	15-20	25-30	20-25	30-40
Matriz (vol.%)	50-55	40-45	50-55	40-45	50-55	55-60	45-50
Vesículas (vol.%)	1-May	30-35	25-30	35-40	Oct-15	Oct-15	1-May
Tamaño máximo de los cristales	8 mm	5 mm	3.5 mm	7 mm	6.5 mm	1 cm	4 cm
Textura	Porfirítica con una matriz microlítica a intersertal	Vesiculada, vitrofídica	Vesiculada, vitrofídica-microlítica	Vesiculada, vitrofídica-microlítica	Porfirítica con una matriz microlítica, vitrofídica	Porfirítica con una matriz microlítica, vitrofídica	Porfirítica con una matriz microlítica a intersertal
Ensamble mineralógico	Pg- Anf-Bt-Qz	Pg-Bt-Anf	Pg-Bt-Anf	Pg-Bt-Anf-Qz-Sp-Ap	Pg-Anf-Bt-Qz-Cpx-Sp-Ap	Pg-Bt-Anf-Sa-Qz-Sp-Ap	Pg-Bt-Anf-Sa-Qz-Cpx-Sp-Ap
Características texturales	Pg "tamiz"; Anf con corona de óxidos; Bt reemplazadas en óxidos; Qz con bordes redondeados	Pg "tamiz"+ aglomerados de plagioclasa; Bt y Anf con inclusiones de óxidos	Pg "tamiz"+ Pg con caras limpias; Anf reemplazados por óxidos, textura "black" + Bt y Anf con bordes oxidados.	Pg "tamiz"; Bt con bordes de óxidos; Anf textura *black*; Qz con golfos de corrosión; Cpx subhedrales; Sp reemplazada por óxidos.	Pg "tamiz"; Anf y Bt con textuta *black*; Qz con golfos de corrosión; Cpx subhedral; Sp con bordes de oxidación; Ap euhedral.	Pg "tamiz"; Anf *black*; Anf y Bt con bordes de óxidos; Sa euhedral; Qz con golfos de reabsorción; Sp euhedral; Ap como inclusiones en Sa y Bt	Pg "tamiz"; Anf con bordes de óxidos; Bt con inclusiones de apatito; Sa euhedral; Qz con golfos de corrosión; Sp con bordes de óxidos.

CAPÍTULO V
GEOQUÍMICA DE ROCAS

El estudio geoquímico tiene como objetivo identificar los diferentes procesos magmáticos que intervinieron en la génesis y evolución de magmas del volcán Sara Sara, así como relacionar el tipo de actividad volcánica presentada por dicho volcán durante su evolución, respecto a la química de las rocas. Todas las muestras fueron ordenadas en orden cronológico dentro de la secuencia estratigráfica previamente presentada en el capítulo 3.3.

5.1 MÉTODO ANALÍTICO

Entre los años 2015 y 2017, se realizaron 84 análisis químicos de elementos mayores y traza de rocas del volcán Sara Sara en la Universidad de Bretagne Occidental, Brest (Francia), bajo la dirección de la Dra. Céline Liorzou, y con apoyo del IRD. Las ochenta y cuatro muestras fueron trituradas con mortero de ágata y posteriormente fueron analizadas mediante el método de espectrometría de emisión atómica por acoplamiento inductivo de plasma (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy, ICP-AES), tal como indica el procedimiento analítico detallado por Cotten *et al*. (1995). El grado de incertidumbre relativa es de 2 % para elementos mayores y de 5 % para elementos trazas. Posteriormente, para el tratamiento respectivo, todos los análisis de elementos mayores fueron recalculados al 100 % en base anhidra, y la totalidad de hierro se expresa en forma de Fe_2O_3.

5.2 CLASIFICACIÓN DE LA SERIE

En la clasificación química internacional de rocas volcánicas, es decir, en el diagrama TAS ("Total de Alcalinos versus Sílice") de Le Bas *et al*. (1986), (figura 5.1), las rocas de la etapa "Sara Sara I" son de composición dacítica y riolítica (68.1-72.2 wt. % SiO_2). Por su parte, las rocas de la etapa "Sara Sara II", que corresponden también principalmente a corrientes de densidad piroclástica y caídas de tefras, son de composición dacítica y riolítica (66.2–73.6 wt. % SiO_2).

Las rocas del "Sara Sara III", que corresponden principalmente a flujos piroclásticos de bloques y cenizas, son de composición dacítica y riolítica (63.9–73.1 wt. % SiO_2), mientras que las rocas de la etapa "Sara Sara IV", que corresponden a rocas del cono volcánico, son de composición dacítica (63.3-67.8 wt. % SiO_2). Se resalta que los productos de la etapa "Sara Sara III" son los que tienen un rango relativamente más amplio en composición.

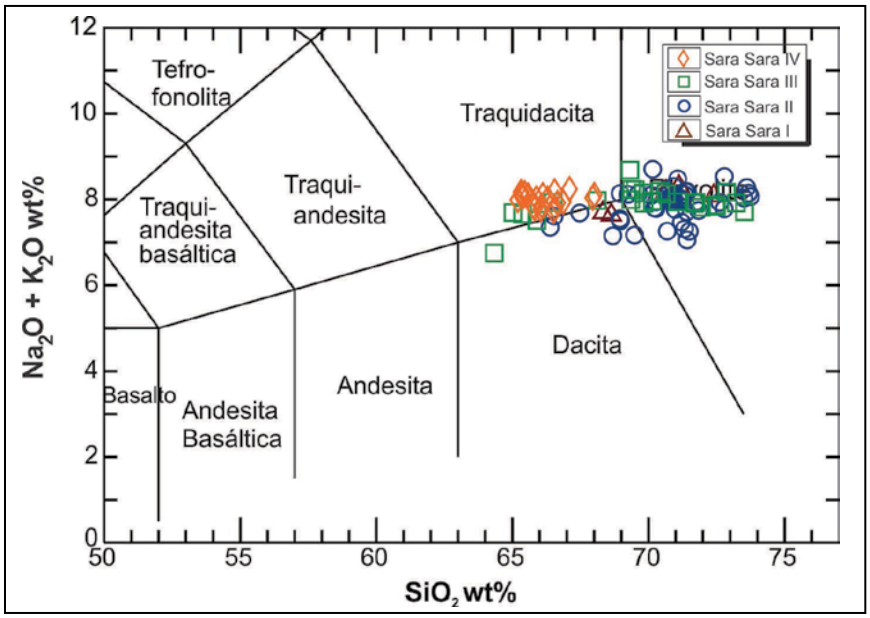


Figura 5.1 Diagrama de clasificación de rocas "Total de alcalinos vs. sílice" (TAS) de Le Bas *et al.* (1986), de las diferentes etapas evolutivas del volcán Sara Sara

En el diagrama triangular AFM de Kuno, (figura 5.2), se distingue que las rocas del volcán Sara Sara pertenecen a la serie calco-alcalina, típico de las rocas volcánicas de la Zona Volcánica Central (CVZ) de los Andes.

Según el diagrama K_2O vs. SiO_2 de Peccerillo & Taylor (1976), las muestras de las distintas etapas del volcán Sara Sara corresponden a la serie calco-alcalina, con alto contenido de K (2.9 - 4.8 wt. % K_2O) desde dacitas a riolitas (figura 5.3).

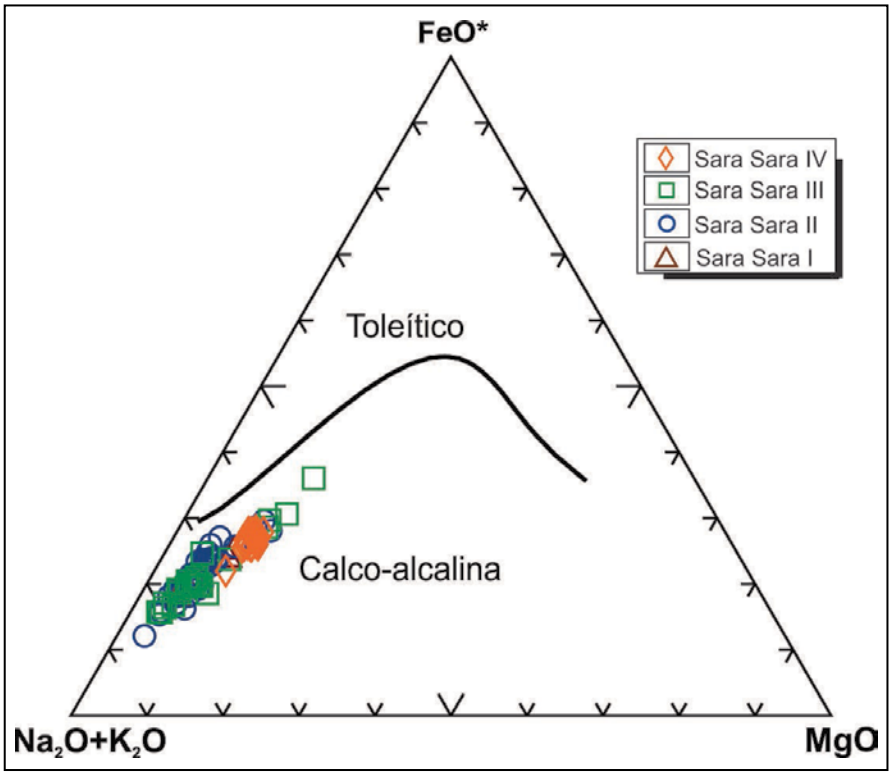


Figura 5.2 Composición de las rocas del volcán Sara Sara en el diagrama AFM de Kuno (1968)

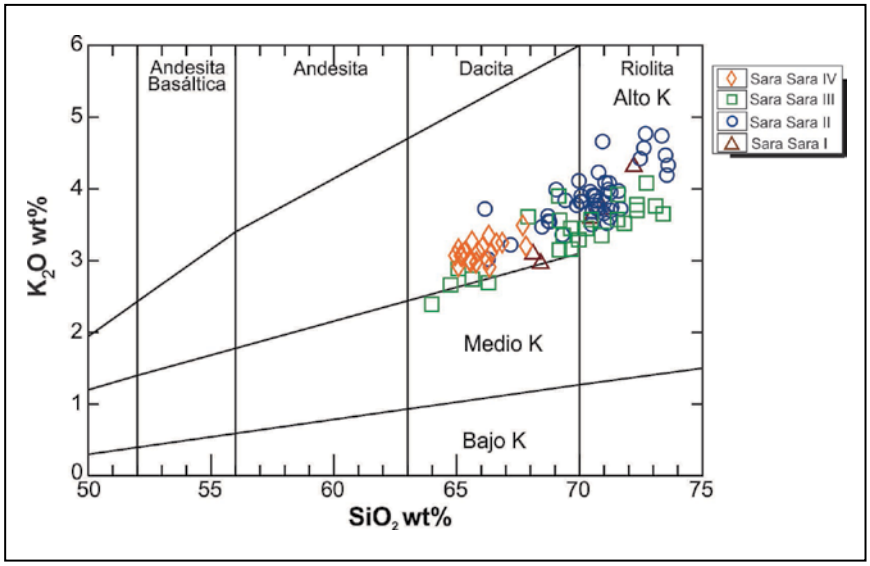


Figura 5.3 Diagrama K_2O vs. SiO_2 de Peccerillo &Taylor, de rocas del volcán Sara Sara, que muestra tendencia moderada a fuertemente potásica.

En conclusión, las rocas emitidas por el volcán Sara Sara son muy diferenciadas, respecto a los otros volcanes del arco volcánico Plio-Cuaternario (Rivera *et al*., 2018; Rivera *et al*., 2017; Samaniego *et al*., 2016; Delacour *et al*., 2006; Thouret *et al*., 2005).

5.3 EVOLUCIÓN DE LOS ELEMENTOS MAYORES

Los elementos mayores (SiO_2, Na_2O, Al_2O_3, K_2O, Fe_2O_3, TiO_2, MgO, P_2O_5) son aquellos que se encuentran en mayor abundancia en las rocas con respecto a los elementos traza, y corresponden <1 % en peso (Mason & Moore, 1982). Mediante diagramas binarios también conocidos como diagramas de Harker, se grafica al óxido con respecto a la SiO_2 que generalmente es usado como un indicador de fraccionamiento. Con los elementos mayores es posible conocer el modo de evolución magmática como la cristalización fraccionada o mezcla de magmas.

En los diagramas de Harker (figura 5.4), se observa que la mayoría de tendencias químicas son lineares y continuas. En efecto, se aprecia un empobrecimiento en las concentraciones de Fe_2O_3, MgO, Al_2O_3, TiO_2, CaO y P_2O_5 a medida que la SiO_2 va aumentando, hasta formar así una correlación negativa. Cabe mencionar que existe una pequeña ventana de composición de 67 a 68.5 wt. % SiO_2.

En el diagrama Al_2O_3 vs. SiO_2, se observa aparentemente dos tendencias lineales negativas a medida que la SiO_2 aumenta. La presencia de un grupo de lavas dacíticas del cono del volcán no sigue el mismo trend de diferenciación respecto a los productos del Sara Sara I, II y III. La disminución puede estar asociada al fraccionamiento de la plagioclasa.

El TiO_2 y Fe_2O_3 (figura 5.4) presentan una correlación linear negativa, que puede estar asociada al fraccionamiento de la titano-magnetita y de la biotita durante la diferenciación de la serie.

La disminución de la concentración en MgO (figura 5.4) respecto a un aumento en la concentración de SiO_2 podría estar asociada a la cristalización del anfíbol.

El CaO disminuye a medida que aumentan los valores en SiO_2 (figura 5.4). Esto puede sugerir el fraccionamiento de la plagioclasa.

En el diagrama de K_2O respecto a la SiO_2, se observa un incremento de este óxido; a medida que la sílice va en aumento presenta una correlación positiva. En el caso del Na_2O, pese a mostrar una considerable dispersión de los valores, va en disminución a medida que los valores de sílice aumentan.

En general, los diagramas muestran correlaciones lineares que son principalmente compatibles con un modelo de evolución de la serie por procesos de cristalización fraccionada.

5.4 DIAGRAMAS DE VARIACIÓN DE ELEMENTOS TRAZA

Se correlacionan algunos elementos traza con respecto al SiO_2, tomado como índice de diferenciación (figura 5.5). En esos diagramas se aprecian que los elementos de gran radio iónico (LILE), caso del Rb y Th, a pesar de mostrar una gran dispersión de los valores, presentan correlaciones positivas con respecto a SiO_2. Esto último sugiere que esos elementos no son incorporados en las fases que fraccionan. Asimismo, el Ba presenta una estabilidad durante la diferenciación de la serie.

El Sr presenta una correlación negativa a medida que el SiO_2 aumenta. Este comportamiento puede ser el resultado del fraccionamiento de la plagioclasa en el magma en proceso de diferenciación.

Por otro lado, las tierras raras ligeras (LREE), como es el caso del La y Ce, muestran una ligera correlación negativa a medida que el SiO_2 aumenta. Las tierras raras medianas (MREE), como el Sm, presentan una ligera correlación negativa; esta disminución puede representar el fraccionamiento del anfíbol. Respecto a las tierras raras pesadas (HREE), como es el caso del Yb y Dy, a pesar de su dispersión en los diagramas, muestran una estabilidad de los valores durante la diferenciación.

Los elementos de gran potencial iónico (HFSE), como el Nb (no presentado aquí), muestran una ligera estabilidad de los valores. Los elementos de transición, tales como V, Cr y Sc muestran correlaciones negativas con respecto a SiO_2. El empobrecimiento de V está ligado al fraccionamiento de los óxidos de Fe-Ti (ilmenita-titanomagnetita).

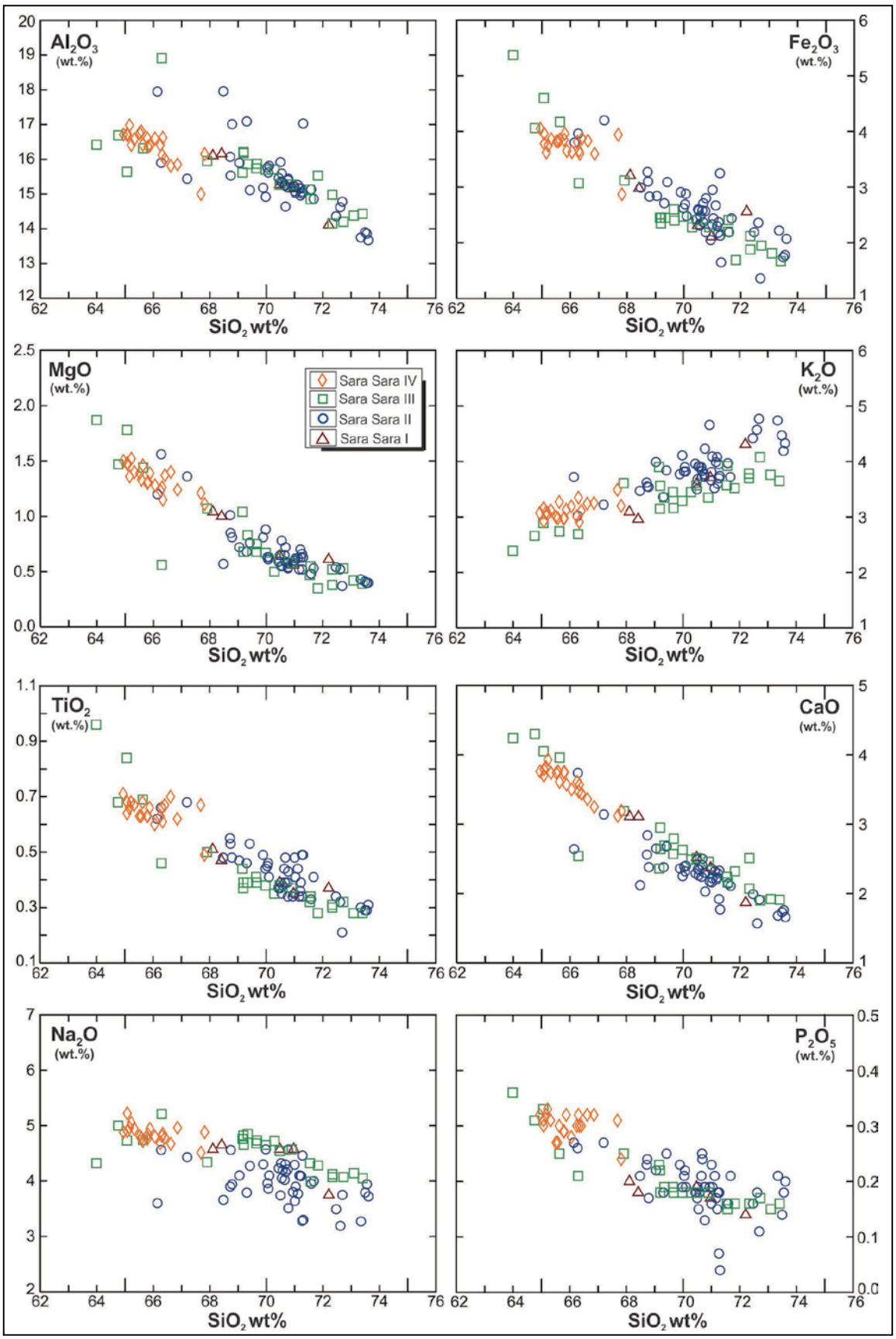
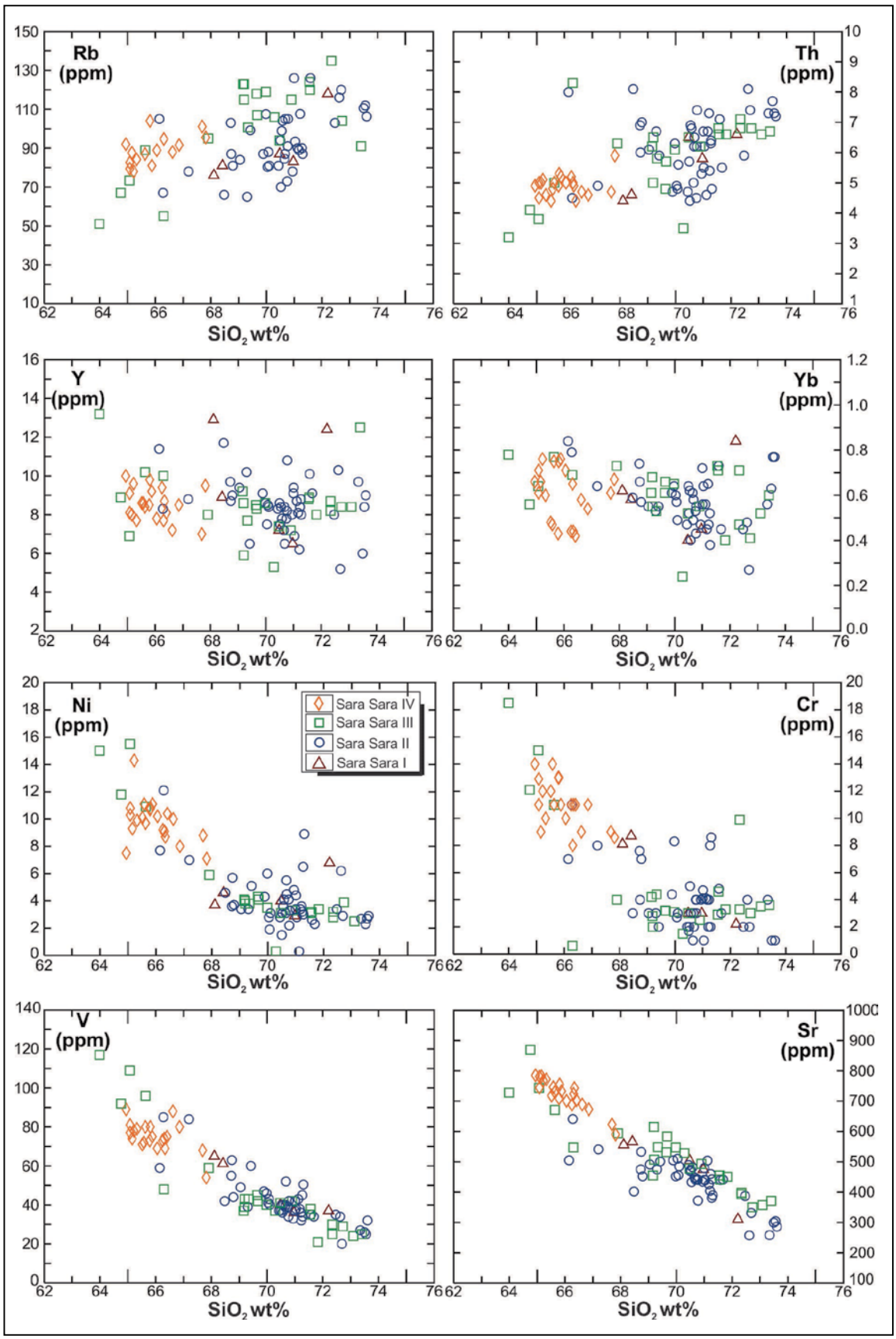


Figura 5.4 Diagramas de variación de elementos mayores versus el porcentaje en peso de sílice


Rb (ppm)
Th (ppm)
Y (ppm)
Yb (ppm)
Ni (ppm)
Cr (ppm)
V (ppm)
Sr (ppm)
SiO2 wt%
Sara Sara IV
Sara Sara III
Sara Sara II
Sara Sara I

Continuación...

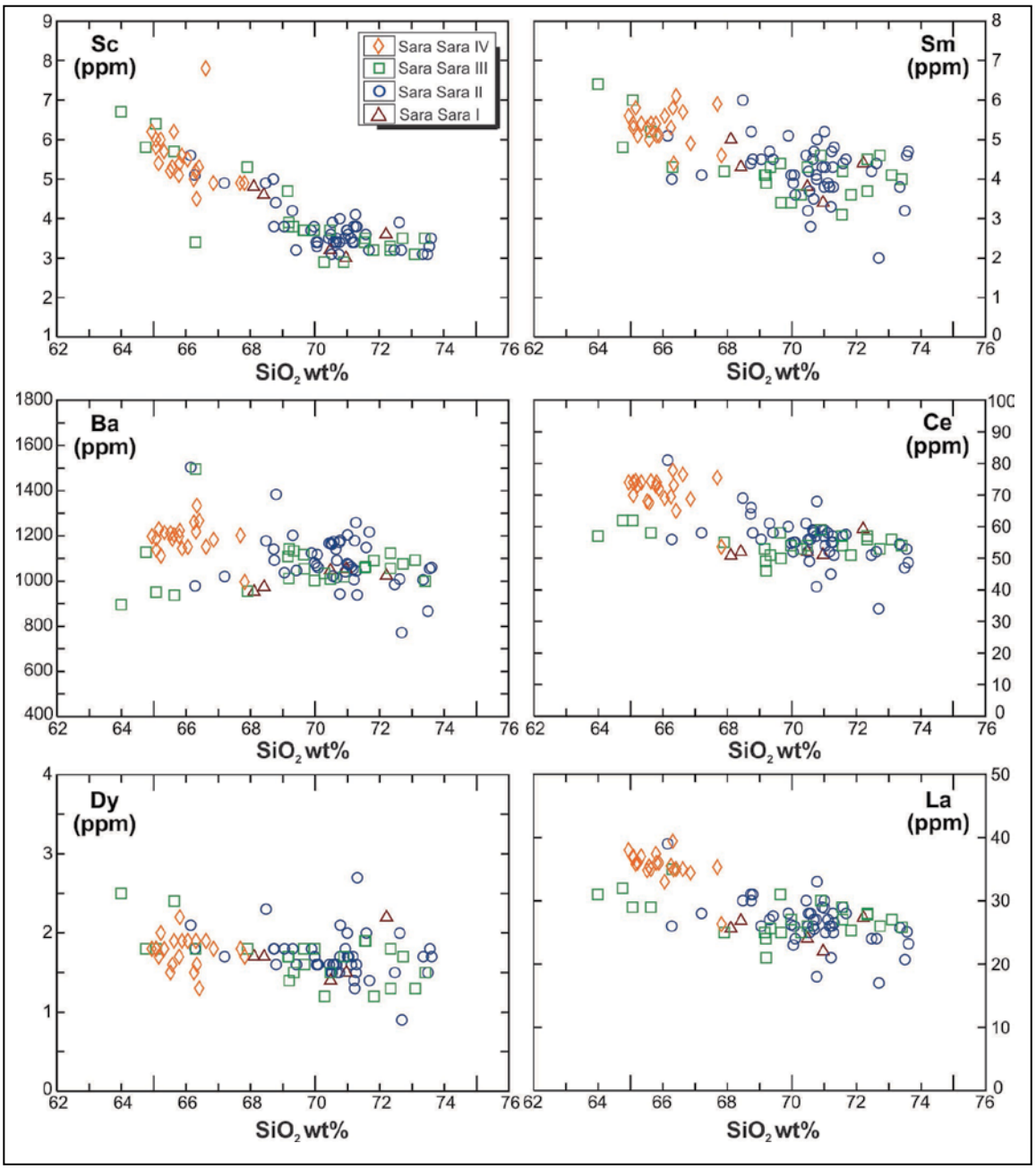


Figura 5.5 Diagramas de variación de elementos traza versus el porcentaje en peso de sílice

En general, los diagramas de elementos trazas confirman que en las etapas Sara Sara I, II y III predominan las dacitas y riolitas, mientras que en la etapa Sara Sara IV (rocas del cono volcánico) predominan las dacitas. Además, se resalta la falta de composición entre 67-68.5 wt. % SiO_2.

5.5 DIAGRAMAS DE MULTIELEMENTOS

Se realizaron cuatro diagramas multielementos pertenecientes a las distintas etapas evolutivas del volcán Sara Sara, estas fueron normalizadas con respecto al manto primitivo (Sun & McDonough, 1989), con el fin de facilitar la comparación entre dichas etapas y ver probables evoluciones (figura 5.6).

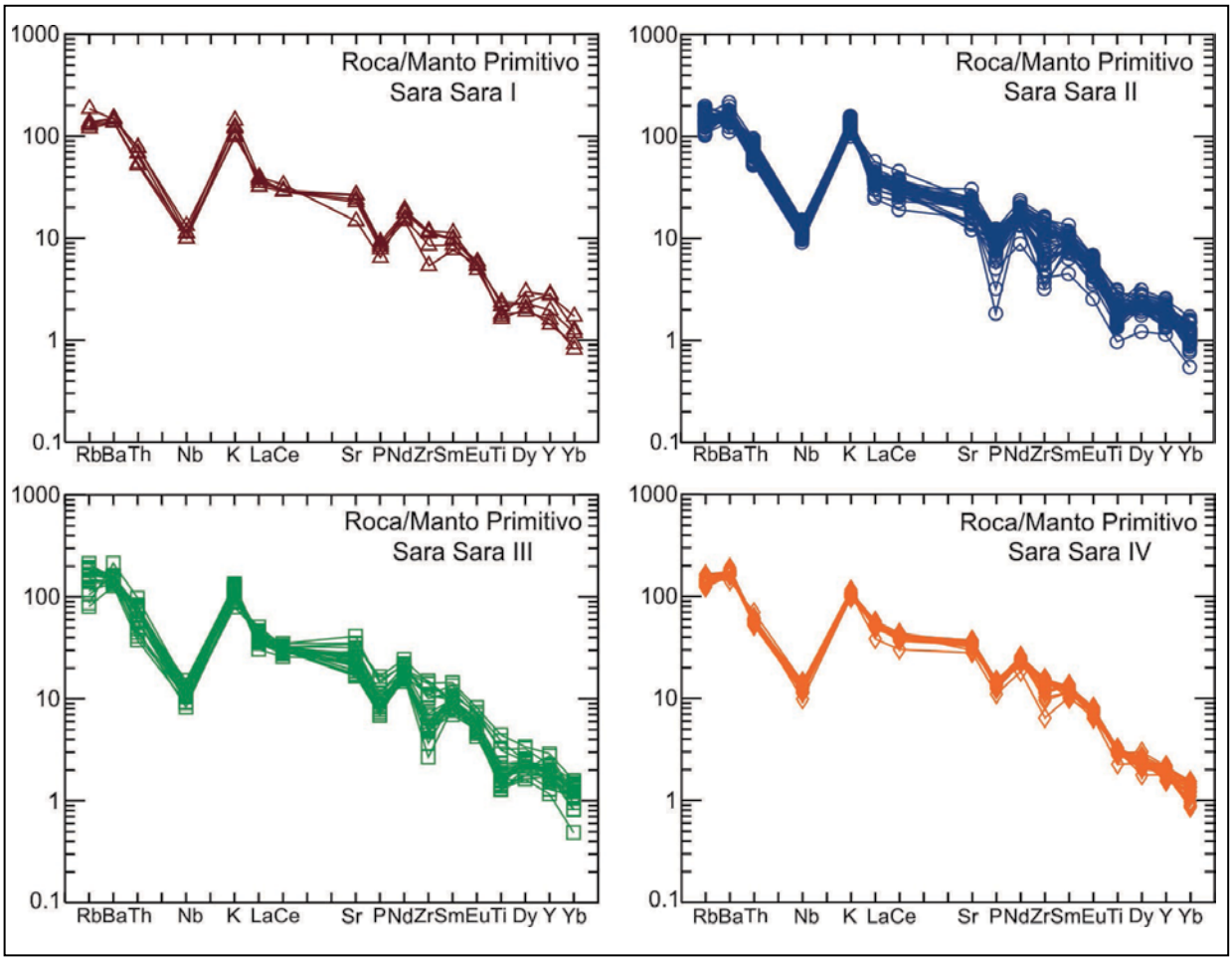


Figura 5.6 Diagramas multielementales de rocas de las distintas etapas evolutivas del volcán Sara Sara, normalizados respecto al manto primitivo (Sun & McDonough, 1989)

En los diagramas multielementales, se puede observar que en general las rocas de las distintas etapas volcánicas presentan un enriquecimiento marcado en elementos de gran radio iónico (LILE: Rb, K, Ba), Th y tierras raras ligeras (LREE: La, Ce). Los elementos de fuerte potencial iónico (HFSE) como el Nb presentan una fuerte anomalía negativa.

Es necesario resaltar que todas las rocas del Sara Sara tienen bajas concentraciones en tierras raras pesadas, entre ellos el Dy e Yb, así como en Y.

Otra característica propia de las rocas del volcán Sara Sara es la ligera anomalía negativa en P que puede deberse al fraccionamiento del apatito. Asimismo, presentan una anomalía en Zr asociada probablemente al fraccionamiento del zircón, así como a una anomalía en Ti por el fraccionamiento de los óxidos de Fe-Ti. Cabe señalar que todas estas características mencionadas son típicas de magmas de márgenes continentales activas, ligadas a procesos de subducción, tal como es debajo de la Zona Volcánica Central de los Andes - CVZ (Wilson, 1989).

5.6 DIAGRAMAS DE TIERRAS RARAS

En los diagramas de tierras raras de rocas del volcán Sara Sara (figura 5.7), normalizadas a la condrita, se puede observar patrones muy similares entre las distintas etapas volcánicas. De manera general, las rocas presentan un enriquecimiento en tierras raras ligeras-LREE (21.7<LaN<49.5) y un ligero empobrecimiento en tierras raras pesadas - HREE (2.5<YbN<8.1).

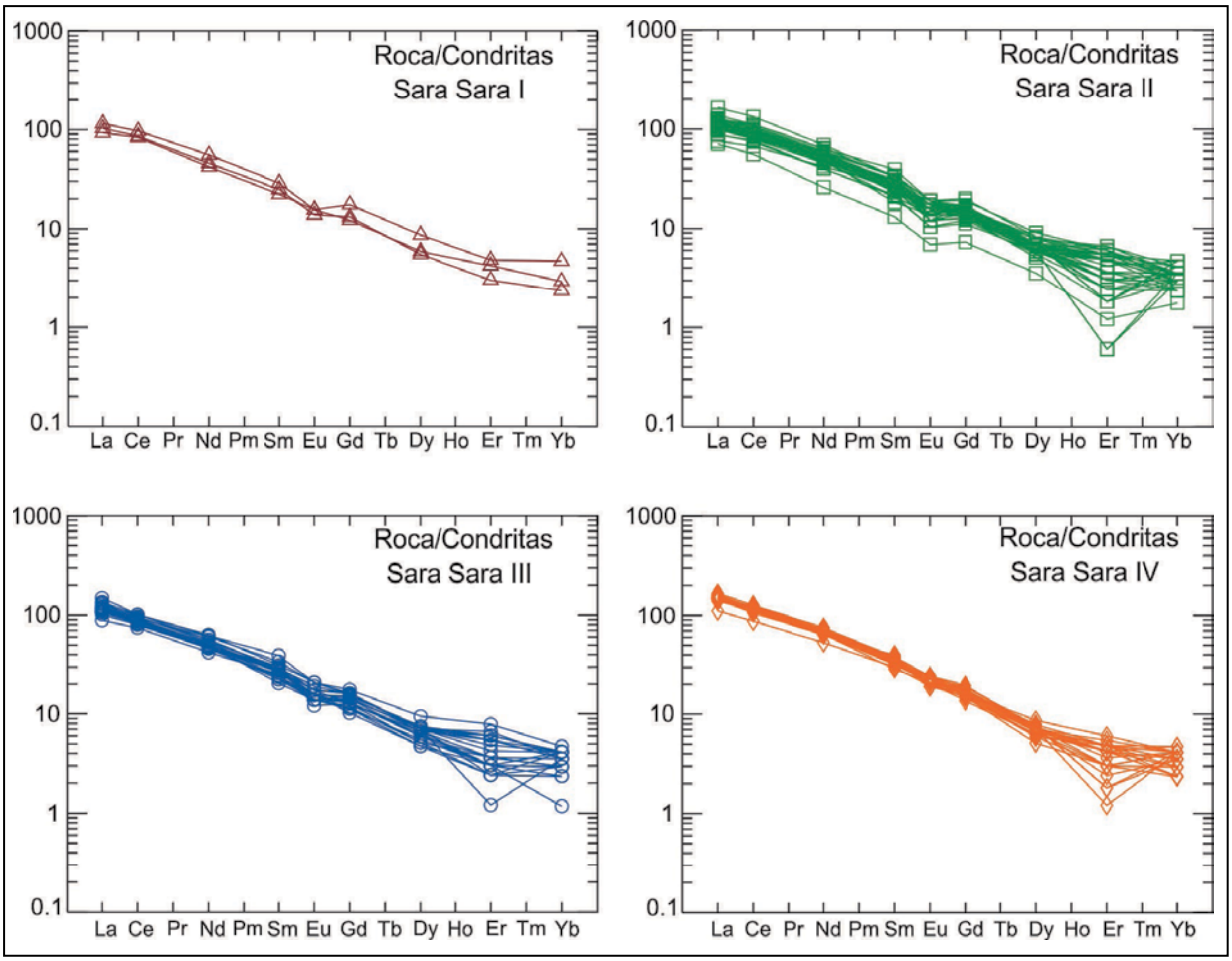


Figura 5.7 Diagrama de tierras raras normalizada a la condrita (Sun & McDonough, 1989)

Todas las rocas del volcán Sara Sara muestran espectros de magmas calco-alcalinos clásicos de márgenes continentales activas (Wilson, 1989).

En los diagramas de tierras raras de las etapas Sara Sara I, II y III, se observa una ligera y casi imperceptible anomalía negativa en Eu, esto a pesar del fraccionamiento de la plagioclasa observado en algunos elementos mayores durante la diferenciación (figura 5.4). Es posible que este comportamiento se deba a que el Eu no ha sido incorporado en la plagioclasa y puede reflejar altas condiciones de oxidación, donde el Eu está en forma de Eu^{3+} (Davidson *et al*., 1990).

5.7 DIAGRAMAS DE RATIOS

Los diagramas de ratios representan diferentes procesos de diferenciación, y pueden aclarar mejor el modo de evolución seguida por los magmas del volcán Sara Sara. Las ligeras estabilidades de los valores en los diagramas Dy/Yb, Sm/Yb, La/Yb vs. SiO_2 sugieren el fraccionamiento dominado por la plagioclasa y el piroxeno, y en menor medida el fraccionamiento del anfíbol en la fase residual, mientras que, en el diagrama Sr/Y versus SiO_2, las muestras definen una correlación negativa. En tal sentido, se observa que las muestras del volcán Sara Sara siguen una tendencia asociada a un importante fraccionamiento de la plagioclasa, del piroxeno, y en menor medida del anfíbol.

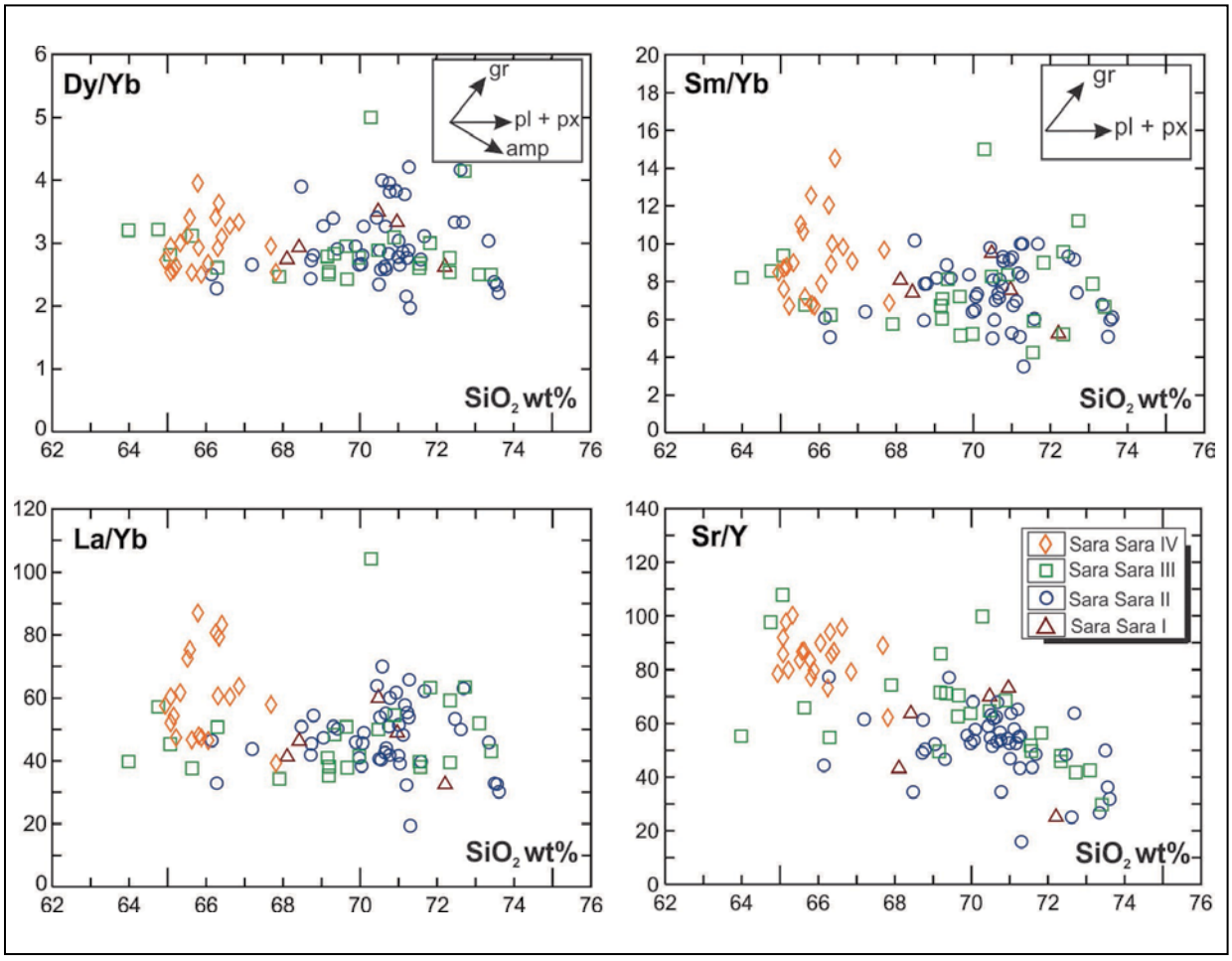


Figura 5.8 Diagramas de ratios Dy/Yb, Sm/Yb, La/Yb y Sr/Y vs. SiO_2 de rocas del volcán Sara Sara, (gr) granate, (pl) plagioclasa, (px) piroxenos, (amp) anfíbol

5.8 EVOLUCIÓN PETROGENÉTICA

El análisis geoquímico de los elementos mayores de las rocas del volcán Sara Sara evidencia el carácter calco-alcalino del conjunto de rocas, similar a otros magmas de la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC), ligados al proceso de subducción.

Además, es necesario mencionar la presencia exclusiva de riolitas y dacitas en la evolución magmática del Sara Sara. Por otro lado, cabe mencionar que en los volcanes activos Ampato-Sabancaya, Misti, Ubinas, Yucamane, Tutupaca, etc. son muy comunes las andesitas.

El estudio geoquímico de los elementos mayores y trazas de rocas del Sara Sara muestra que la evolución magmática es principalmente controlada por la cristalización fraccionada, como lo había dejado entrever la petrografía.

Los argumentos a favor de una evolución por cristalización fraccionada son: la relación directa que existe entre el orden de aparición de los minerales en los magmas de la serie, y las variaciones de los elementos químicos correspondientes en los líquidos residuales.

La cristalización fraccionada es también puesta en evidencia por las buenas correlaciones lineares existentes entre los elementos incompatibles (relaciones de SiO_2 en función de Rb, Th) y compatibles (relaciones de SiO_2 en función de Sr, Co, Ni). Los productos del volcán Sara Sara siguen una misma línea de diferenciación que sugiere que los productos tuvieron un proceso de generación y diferenciación magmática similar.

Una característica notable del conjunto de rocas del volcán Sara Sara es la baja concentración en tierras raras pesadas (HREE) y el fuerte fraccionamiento entre las tierras raras ligeras (LREE) y HREE. Estudios efectuados sobre ciertos volcanes de la ZVC, como los volcanes Ubinas, Yucamane, Misti, Huaynaputina (Davidson, *et al.*, 1990; Thouret *et al.*, 2005; Delacour *et al.*, 2006; Rivera *et al.*, 2017), muestran la presencia de magmas pobres en Y y HREE, con relaciones Sr/Y elevados, similares a la serie del volcán Sara Sara.

El empobrecimiento en Y y HREE en magmas de la ZVC es generalmente atribuido a la asimilación y contaminación de magmas provenientes del manto con aquellos magmas generados en la base de la corteza continental, en presencia del granate en una zona MASH (por sus siglas en inglés: *melting-assimilation-storage-homogenization*) de Hildreth & Moorbath (1988), Davidson *et al*. (1990).

Estudios geoquímicos e isotópicos de rocas del volcán Sara Sara efectuados por Mamani *et al*. (2010) muestran que la razón $^{87}Sr/^{86}Sr$ (0.7059) es elevada, y la razón 143Nd/144Nd (0.51246 – 051247) es baja, con lo cual se sugiere que los magmas del volcán Sara Sara han sido contaminados o han asimilado porciones de corteza continental durante su ascenso o evolución. Por otro lado, los valores de isótopos de Pb ($18.631<^{206}Pb/^{204}Pb<18.678$; $15.640<^{207}Pb/^{204}Pb<15.696$, y $38.734<^{208}Pb/^{204}Pb<38.939$) obtenidos por dichos autores son similares a los reportados para el basamento del "Dominio Paracas" (Mamani *et al*., 2008; Mamani *et al*., 2010).

Un proceso de asimilación crustal o diferenciación prolongada de los magmas podría explicar la ausencia de andesitas en la serie del volcán Sara Sara.

CAPÍTULO VI
EVALUACIÓN DE LOS PELIGROS VOLCÁNICOS

Una erupción volcánica dependiendo de su magnitud puede ser considerada catastrófica si se produce cerca a zonas pobladas, ya que los productos actúan directa e indirectamente sobre dichas zonas. Estos provocan daños materiales y muchas veces víctimas. En un primer momento, los estudios geológicos-vulcanológicos en torno al volcán Sara Sara constituyeron la base para descifrar el comportamiento eruptivo pasado, y luego, por medio de la extrapolación, se pudo predecir, a través de escenarios, el comportamiento futuro de dicho volcán. Desde luego, el punto de partida para la mitigación de los peligros y riesgos volcánicos es una comprensión global de los procesos eruptivos presentados por dicho volcán.

El INGEMMET, dentro de su ámbito de competencia, realiza principalmente la evaluación del peligro volcánico. El **peligro** volcánico es la posible ocurrencia de una erupción, que puede manifestarse en un sitio o un volcán, durante un tiempo determinado. Para poder cuantificar la posibilidad de que se presente una erupción de una u otra magnitud, es necesario contar con información completa y detallada acerca del número de eventos que han ocurrido en el pasado, sobre la intensidad que tuvieron los mismos, y también acerca de los datos de monitoreo volcánico.

Por su parte, el **riesgo** es la probabilidad de pérdidas (vida, propiedad, capacidad productiva) dentro de un área sometida a un peligro (Tilling, 1989). Se obtiene de relacionar el peligro con la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Cabe mencionar que la **vulnerabilidad** es una medida del costo susceptible de ser perdido en un evento peligroso dado, o la incapacidad de resistencia cuando se presenta un peligro. En el Perú, el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastre-CENEPRED es la institución oficial encargada de realizar estudios de estimación de riesgos.

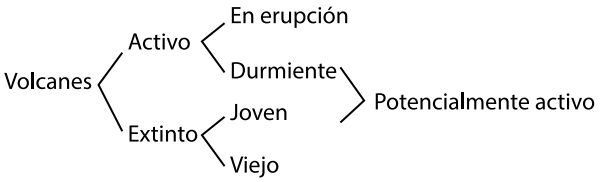
La evaluación de los peligros volcánicos que se presenta a continuación está basada en el estudio estratigráfico, en el cartografiado geológico de los depósitos volcánicos del Sara Sara, en los estudios geoquímicos de rocas, en el modelamiento de procesos volcánicos y en los datos sobre direcciones y velocidades de vientos.

Para evaluar los peligros volcánicos del volcán Sara Sara, se estableció un registro estratigráfico de los productos emitidos a lo largo de su historia eruptiva y se determinó, en forma relativa, la frecuencia de erupciones, la magnitud, y el sitio de erupción (ejemplo: vento lateral). Desde luego, es de suponer que una próxima erupción no diferirá mucho de las anteriores en sus características y que el área afectada también será similar.

En un radio de 20 km alrededor del volcán Sara Sara, se localizan más de diecinueve poblados donde viven poco más de 20 000 personas, que están dedicadas principalmente a la actividad agrícola y ganadera (INEI, 2018). También existen obras viales (carreteras afirmadas) que son las principales vías de comunicación en la zona (por ejemplo: Incuyo-Coracora, Incuyo-Pausa-Marcabamba-Lampa; Incuyo-Salla Salla-Cháparra-Chala;) y otras vías secundarias de penetración. Estos y otros elementos de orden socio-económico están sujetos no solo al peligro volcánico, sino también a otros peligros geológicos como deslizamientos, huaicos y/o lahares, sismos, entre otros.

6.1 VOLCÁN POTENCIALMENTE ACTIVO

A través del siguiente esquema de Szakács (1994), se puede apreciar una posible clasificación de los volcanes, en concordancia con su estado de actividad actual.



En esta clasificación, “volcán activo” y “volcán extinto” son términos mutuamente excluyentes, y su uso se remite a la función de si erupciona o no en un tiempo específico. Los volcanes activos, según su estado actual, podrían subdividirse en volcán “en erupción” y “durmiente”. A su vez, los volcanes extintos podrían subdividirse en “jóvenes” (o “recientes”) o “viejos”, teniendo en cuenta criterios convenientes, tales como la extensión de la erosión y/o la edad del volcán (por ejemplo, Cuaternario para volcanes extintos jóvenes). El estado de muchos volcanes de apariencia fresca, que carecen tanto de erupciones documentadas como de datación radiométrica confiable, podría permanecer indeterminado. Por lo tanto, el término “potencialmente activo” se preserva como designación de conocimiento ambiguo o insuficiente. A medida que continúan las investigaciones, los volcanes potencialmente activos podrían convertirse en “volcanes activos durmientes” o “volcanes extintos jóvenes”.

La percepción de la población sobre los peligros volcánicos está más centrada en volcanes con intervalos cortos de recurrencia eruptiva, y la mayoría no reconoce las amenazas de los volcanes latentes con tiempos de reposo más prolongados. La reactivación de estos últimos puede ser mucho más peligrosa debido a la posible acumulación de magma nuevo.

El Sara Sara es un caso extremo de un volcán con baja recurrencia eruptiva, pues los estudios geológicos acerca de su actividad ocurrida en los últimos 500 mil años indican la ocurrencia de erupciones escasas y altamente irregulares en frecuencia; sin embargo, catastróficas.

En base a la edad de la última erupción del volcán Sara Sara ocurrida hace 14 ka, se sigue catalogando como volcán potencialmente activo. En efecto, existen algunos depósitos que todavía no han logrado ser fechados. Estudios posteriores pemitirán clasificarlo como volcán activo o extinto joven.

6.2 TIPOS DE PELIGROS VOLCÁNICOS

Diversos estudios vulcanológicos efectuados a nivel global han compilado los principales peligros volcánicos. Estoscorresponden a caídas de ceniza y pómez, la ocurrencia de flujos de lava, corrientes de densidad piroclástica, flujos de escombros (lahares), avalanchas de escombros, y gases volcánicos (Blong, 1984; Tilling, 1989; Blong, 2000; Bignami *et al*., 2012), tal como puede apreciarse en la figura 6.1.

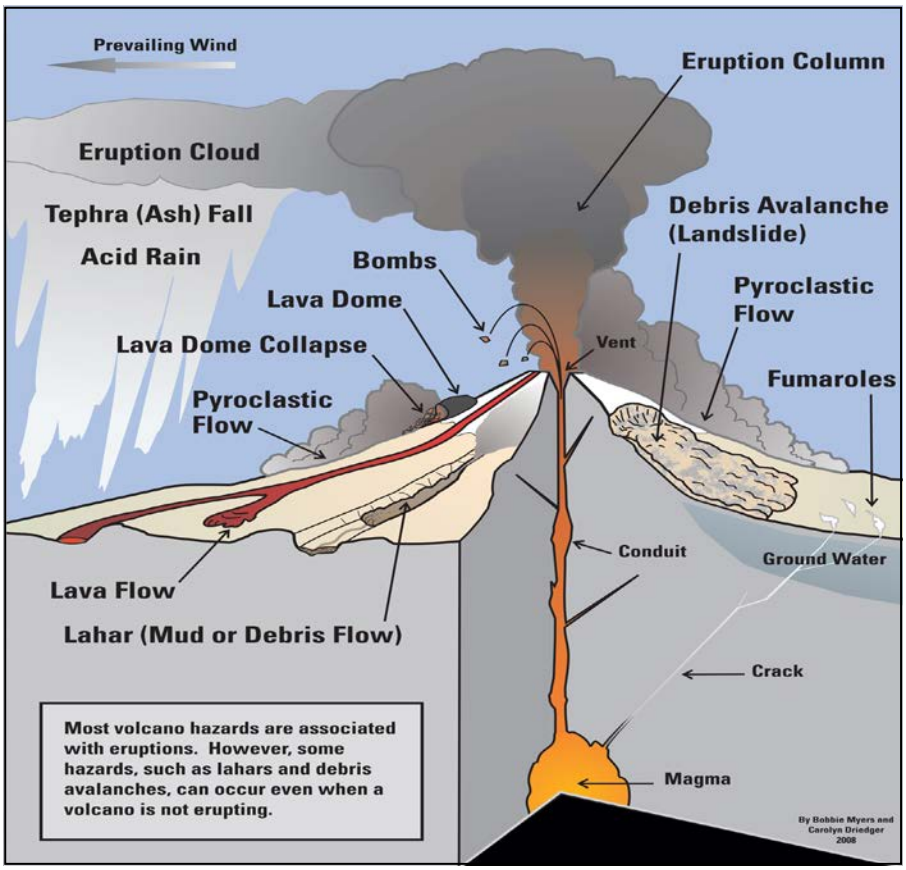


Figura 6.1 Tipos de peligros volcánicos que podría presentar un estratovolcán como el volcán Sara Sara (Fuente USGS)

A continuación, se describen estos fenómenos volcánicos para el caso del volcán Sara Sara, el cual puede eventualmente reactivarse.

6.2.1 Peligros por caídas de tefras

Constituyen el peligro directo de mayor alcance ligado a erupciones explosivas de tipo estromboliana, vulcaniana, subpliniana y pliniana. Las tefras están constituidas por pómez, escoria, ceniza y fragmentos líticos de diversos tipos (accidentales, accesorios, etc.). Durante las erupciones, las tefras son expulsadas hacia la atmósfera por medio de columnas eruptivas, y luego por efecto de la gravedad caen sobre la superficie del terreno. Los elementos más livianos (ceniza y lapilli) permanecen más tiempo en el aire y viajan más lejos respecto al volcán. Los más gruesos caen más rápido y cercanos al cráter del volcán. La altura de la columna eruptiva está determinada por la tasa y velocidad de emisión, por el contenido de gases en el magma, por el diámetro del conducto volcánico, entre otros. Los factores citados y la dirección del viento controlan el transporte de las tefras a grandes distancias (Bignami *et al*., 2012; Tilling, 1989; Blong, 1984).

Fotografía 6.1 Caídas de ceniza y pómez-escoria en la ciudad de Puerto Montt (Chile), a raíz de la erupción del volcán Calbuco (al fondo), ocurrida el 22 de abril de 2015 (fotografía de Barria C.)

En un radio de 6 a 15 km alrededor del volcán Sara Sara (en mayor proporción al sureste), se han identificado varios depósitos de caídas de lapilli de pómez de composición riolítica del Pleistoceno superior, la mayoría de los cuales mide más de 0.8 m de espesor, habiéndose desplazado a más de 30 km de distancia respecto al volcán. El caso de los depósitos de caída de tefra denominados “Llique I”, “Cayarac”, “Ullacha”, etc, se encuentra descrito en la sección 3.3.2.

En una posible reactivación del volcán Sara Sara y dependiendo de la magnitud de la erupción, las tefras expelidas causarían impacto en los poblados, en el ganado, en las tierras de cultivo, en las construcciones (viviendas, colegios, centros de salud, etc.), en las obras de infraestructura (reservorios de agua, canales de agua, carreteras, etc.) de las provincias de Páucar del Sara Sara, Parinacochas (Ayacucho), Caravelí y La Unión (Arequipa). Desde luego, el tamaño de las erupciones antiguas de este volcán, que tuvieron IEV 4-5, hoy en día implicaría destrucción casi completa en zonas cercanas, es decir, aquellas localizadas entre 5-15 km del vento eruptivo. Este último dependerá de la dirección del viento predominante.

Los escenarios de este tipo de peligro ligados a la emisión de las tefras serán descritos más adelante.

6.2.2 Peligros por corrientes de densidad piroclástica (flujos piroclásticos)

En el posible escenario de una reactivación del volcán Sara Sara, las corrientes de densidad piroclástica pueden ser generadas por las siguientes razones:

a) Por el colapso de una columna eruptiva durante una erupción vulcaniana, sub-pliniana o pliniana, lo que puede generar flujos de pómez y ceniza, flujos de escorias o flujos de ceniza.

b) Por el colapso de domos en crecimiento que genera flujos piroclásticos de bloques y ceniza.

c) Por las explosiones freatomagmáticas.

d) Por la explosión lateralmente dirigida que generan los flujos de ceniza o flujos de pómez y ceniza de alta velocidad en sectores limitados del volcán.

Las corrientes de densidad piroclástica o flujos piroclásticos están conformados por fragmentos de roca, ceniza y gases que descienden por los flancos de un volcán y tienden a canalizarse dentro de los valles o quebradas. Se movilizan a ras del suelo, a velocidades que pueden superar los 100 km/h y alcanzar altas temperaturas (de 300 a 800°C) (Nakada, 2000). Estos flujos representan los eventos volcánicos más peligrosos y letales. Como ejemplo de su poder destructivo, se puede citar lo ocurrido en el año 1902, durante la erupción del volcán Montaña Pelée (Isla de Martinica), donde flujos piroclásticos causaron la muerte de más de 30 mil personas en pocos minutos (Fisher & Heiken, 1982).

Fotografía 6.2 Corriente piroclástica de densidad que descendió por el volcán Mayon (Filipinas) en septiembre de 1984 (fotografía C. Newhall, USGS)

También durante erupciones explosivas violentas podrían generarse oleadas piroclásticas, como las que ha presentado el Sara Sara, durante los periodos Sara Sara II y III. Las oleadas estarían generalmente confinadas a las corrientes de densidad piroclástica que tenderían a desplazarse a grandes velocidades, hasta una distancia de poco más de 12 km desde su centro eruptivo; estas llegan a tener más de 200-300 °C de temperatura hasta zonas distales. Los depósitos generados estarían compuestos principalmente por ceniza y lapilli, con líticos de lavas antiguas. El desplazamiento no estaría necesariamente confinado a la topografía, y pueden traspasar las barreras topográficas (valles, cerros, etc).

Los daños que causan son incineración, enterramiento, asfixia, intoxicación por gases, etc. Estos tipos de depósitos de corrientes de densidad piroclástica se observan cerca a los pueblos de Cayarac, Huacachipa y Salla Salla, localizados al oeste del volcán Sara Sara. Los depósitos de corrientes de densidad piroclásticas también son observados en inmediaciones del poblado de Tonsio, Pausa y valle del río Mirmaca, localizados a más de 8 km al E y NE del volcán. Las corrientes de densidad piroclástica son imposibles de controlar y evadir, por lo que el único remedio sería una evacuación previa.

6.2.3 Peligros por flujos de barro (lahares)

Lahares o flujos de barro son mezclas de fragmentos volcánicos, removilizados por el agua, que fluyen rápidamente por las quebradas o valles que surcan los flancos de un volcán. Estos son controlados por la gravedad y se canalizan por los valles, donde pueden alcanzar velocidades de decenas de kilómetros por hora. Estos tienden a aumentar su volumen por incorporación de más material y agua, y arrasan todo lo que encuentran a su paso. Provocan una destrucción total, valle abajo, por abrasión y/o enterramiento. Los lahares pueden desencadenarse durante o después de una erupción volcánica.

Fotografía 6.3 Flujo de lodo (lahar) en el río Ubinas, registrado en febrero de 2007. En aquel entonces, el lahar afectó algunas áreas de cultivo y varios tramos de la carretera Huarina-Ubinas-Arequipa (fotografía: Macedo y Taipe, 2010)

Lahares sin-eruptivos (generados durante una erupción) podrían ser producidos por la explosión de una napa freática al interior del cráter, así como por fuertes lluvias que removilizan todo el material volcánico que yace en las laderas de un volcán y/o por la interacción de un flujo de lava o flujo piroclástico que funde la nieve o hielo que permanece en la cumbre o en los flancos de un volcán. Un ejemplo de este último ocurrió en Armero (Colombia), el 13 de noviembre de 1985, donde una erupción explosiva moderada (IEV 3, Pierson *et al.*, 1990) fundió la cobertura de hielo que permanecía en la cima de este volcán, lo que ocasionó la muerte de más de 23 mil personas (fotografía 6.4).

Fotografía 6.4 Lahar que llegó a la ciudad de Armero, localizada a 70 km de distancia del cráter del volcán Nevado del Ruiz. Provocó la muerte de ~23 000 personas y la destrucción de la ciudad

En varias quebradas que nacen en las cumbres del volcán Sara Sara, se distinguen lahares de diferentes espesores. Es el caso de las quebradas del flanco oeste de los volcanes Ushpamarca, Ullacha Grande, Jatunsora, Cule, Angostura, etc., que muestran que los lahares han recorrido distancias mayores a 8 km. Es decir, muchos de ellos llegaron hasta la laguna Parinacochas.

6.2.4 Peligros por avalanchas de escombros

Las avalanchas de escombros se generan por el colapso de un sector del volcán debido a varios factores: a) erupciones explosivas de gran magnitud; b) intrusión de domos en el flanco del volcán; c) por la poca resistencia de las rocas del basamento debido al peso del volcán; d) pendiente elevada del volcán; e) grado de alteración hidrotermal de sus rocas internas; f) sismo violento de gran magnitud (sin necesidad de erupción), etc. (Ui *et al*., 2000). A mayor volumen, las avalanchas de escombros se desplazarían a mayor velocidad y a mayor distancia. En el caso del monte St. Helens (USA), la avalancha generada se desplazó a una velocidad que variaba entre 113 y 240 km/h (Brantley & Myers, 1997).

A 12 km al noreste del volcán Sara Sara, en inmediaciones de la localidad de Pausa, afloran depósitos de avalanchas de escombros que tienen más de 200 m de espesor, ligados al colapso del sector oriental del volcán Sara Sara. Así mismo, en el distrito de Sara Sara (Quilcata), localizado a 7 km al norte del volcán Sara Sara, afloran depósitos de avalanchas de escombros sobre los cuales se ha asentado dicha localidad.

En caso de una reactivación del volcán Sara Sara, podría ocurrir un colapso parcial del volcán, cuyos depósitos descenderían por sus diversas quebradas o flancos. Las avalanchas de escombros, entierran y destruyen todo lo que encuentran a su paso. Adicionalmente, pueden generar lahares y crecientes, a partir del desagüe de agua represada por la avalancha (Tilling, 1989).

6.2.5 Flujos de lavas

Los flujos de lava son corrientes de roca fundida, que son emitidos por cráteres o fracturas en la cumbre o flancos de un volcán. En una eventual reactivación del volcán Sara Sara, este podría emitir flujos de lava que podrían fluir lentamente (por sus altas viscosidades) por el fondo de los valles y quebradas, y alcanzar distancias de más de 12 km respecto al centro de emisión, hasta cubrir grandes extensiones, y a altas temperaturas (mayores a 600 °C). Esto se basa en que, durante su última fase de evolución, el Sara Sara emitió varios flujos de lava dacíticos que viajaron a poco más de 14 km en dirección oriental, es decir, hacia el río Marán.

Fotografía 6.5 Ejemplo de flujo de lava andesítica descendiendo del flanco SE del volcán Sinabung (Sumatra), 25 de enero de 2014 (fotografía de S. Nakada)

Los flujos de lava calcinan, destruyen y entierran todo a su paso. Pese a esto, no representan un peligro mayor para las personas, pues debido a su baja velocidad (Tilling, 1989), dan tiempo para evacuar o escapar. Sin embargo, si interaccionaran con la nieve que permanece en la cima del volcán, podrían generar lahares o flujos de lodo, y estos descenderían por los flancos del volcán.

6.3 ESCENARIOS ERUPTIVOS ANTE UNA POSIBLE REACTIVACIÓN DEL VOLCÁN SARA SARA

El cartografiado geológico y estudio estratigráfico del volcán Sara Sara han puesto en evidencia la variada actividad explosiva y efusiva que ha mostrado dicho volcán durante el Pleistoceno y probablemente inicios del Holoceno.

A continuación, se presentan los posibles escenarios eruptivos futuros del volcán Sara Sara generadores de peligros. Para la elaboración de los escenarios eruptivos, se ha considerado la presencia de los depósitos en la estratigrafía, y otros aspectos que se describen a continuación:

- Los tipos de dinamismos eruptivos reconocidos en el Sara Sara, los cuales podrían volver a repetirse.
- La magnitud o IEV de las erupciones del volcán Sara Sara, inferida en función del volumen de material emitido, y los parámetros de las erupciones obtenidos a partir del estudio sedimentológico y granulométrico.
- El comportamiento de otros volcanes peruanos u otros de la zona volcánica central de los Andes, considerados como «análogos», en ciertos aspectos, al volcán Sara Sara.

Se definieron cuatro escenarios eruptivos ante una posible erupción del volcán Sara Sara; estos se detallan a continuación.

6.3.1 Primer escenario: erupción efusiva con emisión de lavas

Una erupción efusiva consiste en la emisión lenta de flujos de lava desde la cima o laderas de un volcán. El volcán Sara Sara, durante su evolución y sobre todo durante los últimos 60 000 años, ha emitido principalmente lavas de composición dacítica, es decir, lavas moderadamente viscosas, cuyas velocidades de efusión o desplazamiento posiblemente no superaron las pocas decenas de metros por hora. Algunos de estos flujos de lava alcanzaron distancias de poco más de 14 km respecto al centro de emisión, como aquellos flujos de lava “recientes” visibles en el sector de Casire que fueron emitidos a través de un vento localizado al extremo oriental del volcán. Pero la mayoría de lavas alcanzaron solo unos 4 km de distancia de la cima.

Actualmente, si se produjera una actividad efusiva, las lavas serían similares a las emitidas en épocas anteriores, es decir, de composición dacítica. Las lavas podrían recorrer hasta más de 12 km del volcán, dependiendo del volumen de magma disponible. Debido a su poca velocidad de solamente varios metros por hora, su curso predeciblemente depende de la topografía encontrada. Las lavas recorrerían libremente por los flancos del volcán, para luego canalizarse por las quebradas que drenan de dicho volcán. Las quebradas a ser rellenadas estarían supeditadas al punto desde donde las lavas se emiten.

En suma, los flujos de lava causan daños por incendio, impacto e incineración, y consecuentemente entierran todo lo que encuentran a su paso. Sin embargo, rara vez amenazan la vida de los pobladores, ya que dan tiempo (días o semanas) para realizar la evacuación de pobladores que habitan en áreas próximas al volcán.

Asociado a cualquier erupción efusiva puede presentarse el descongelamiento de la nieve que se encuentra eventualmente entre los meses de diciembre a marzo en la cumbre del volcán, lo que puede dar lugar a la formación de flujos de lodo o lahares. Estos flujos de barro, al recorrer las partes bajas, serían más peligrosos que las lavas.

6.3.2 Segundo escenario: erupción vulcaniana (iev 1-2)

En caso de una reactivación del volcán Sara Sara, es probable que esta sea una erupción vulcaniana (IEV 1-2), es decir, erupciones explosivas discretas que emiten ceniza y bloques incandescentes, que eventualmente generan corrientes de densidad piroclástica o flujos piroclásticos poco voluminosos (Sigurdsson, 2000). Aunque según los tipos de depósitos encontrados en sus alrededores, estos tipos de erupciones han sido poco comunes en la historia eruptiva del Sara Sara. En efecto, en el Sara Sara no hemos reconocido depósitos ligados a ese tipo de erupciones, probablemente porque fueron fácilmente erosionados; sin embargo, otros volcanes activos del sur peruano, como Ubinas (actividad 2005-2009; 2013-2016) y Sabancaya (actividad 1990-1996; 2016-2019) han presentado recientes erupciones vulcanianas con IEV 2 (Rivera *et al*., 2014; Samaniego *et al*., 2016; Gerbe & Thouret, 2004).

En el supuesto de que el Sara Sara presentara una erupción vulcaniana con IEV 2 en la estación de verano (noviembre a marzo), las cenizas viajarían a distancias de más de 40 km, preferencialmente al O-SO, por lo que afectarían a poblados como Cayarac, Salla Salla, Pullo, entre otros. Si una erupción vulcaniana ocurriera entre los meses de abril a octubre, las cenizas viajarían preferencialmente al E y SE, y afectarían al poblado de Pausa, Tonsio, Huancara, Pirca, Casire, Marán y otros poblados menores localizados entre 8 y 30 km del Sara Sara.

Igualmente, pueden generarse corrientes de densidad piroclástica, las cuales debido a las fuertes pendientes podrían alcanzar distancias de hasta 7-8 km del cráter, como se observó en la erupción de 2006 del volcán Tungurahua (Ecuador) que tuvo un IEV 2 (Hall *et al*., 2013). Las corrientes de densidad piroclástica podrían causar víctimas o afectar la salud de los pobladores que habitan en áreas cercanas al volcán, así como afectar las tierras de cultivos y fuentes de agua.

Las erupciones vulcanianas (IEV 2), también podrían generar lahares, especialmente si las corrientes de densidad piroclástica caliente se emplazaran sobre la cobertura de hielo o nieve. Una erupción vulcaniana (IEV 2) del Sara Sara durante la temporada de lluvias podría generar lahares; estos descenderían por las diversas quebradas que surcan los flancos del volcán, sobre todo por aquellos ubicados al O, SO, E y SE. Toda esta versión expuesta está basada en la presencia de los diversos depósitos que se encuentran en las quebradas del flanco oeste del volcán Sara Sara (quebradas Putaca, Angostura, Cule, Ullacha, etc.).

6.3.3 Tercer escenario: erupción subpliniana o pliniana (iev 3-5)

Si el volcán Sara Sara se reactivara, es probable que sea una erupción subpliniana o pliniana (IEV 3 hasta 5); es decir, erupciones explosivas que emitirían ceniza y bloques incandescentes, y generarían corrientes de densidad piroclástica o flujos piroclásticos. Según los tipos de depósitos encontrados en sus alrededores y descritos en la estratigrafía, se asume que este tipo de erupciones han sido comunes en la historia eruptiva de dicho volcán.

A continuación, se detallan las características de los procesos o productos que serían emitidos en cada tipo de erupción:

a) Durante erupciones **sub-plinianas con IEV 3**, las columnas de ceniza alcanzarían entre 3 km y más de 15 km de altura sobre el cráter, y generarían depósitos de caída de ceniza y corrientes de densidad piroclástica (Sigurdsson, 2000). La ceniza podría dispersarse a algunas decenas de kilómetros de distancia, e incluso sobrepasar fácilmente los 50 km, como ocurrió durante la erupción del volcán Nevado del Ruiz en 1985, que tuvo un IEV 3, donde las isópacas de 1 cm alcanzaron hasta 35 km de distancia de la fuente (Naranjo *et a*l., 1986). Las corrientes de densidad piroclástica, oleadas piroclásticas, etc. descenderían por los flancos del volcán y eventualmente se canalizarían en quebradas y valles aledaños al volcán. En inmediaciones del Sara Sara se ha reconocido más de tres depósitos ligados a erupciones subplinianas, cuyos depósitos han sido en parte erosionados, lo cual hace difícil estimar el área de emplazamiento y volumen.

   La mayoría de volcanes activos del sur peruano han presentado este tipo de erupciones. Por ejemplo, el volcán Yucamane (Tacna) hace ~3270 años AP ha presentado una erupción subpliniana con IEV 3 (Rivera *et al*., 2018). Esta erupción ha emplazado un depósito de caída de lapilli de pómez de 50 cm de espesor, a 2 km al pie del flanco SE y este del volcán. También generó un depósito de flujo de pómez y ceniza esparcido a 7 km al oeste y este de dicho volcán.

Si el Sara Sara presentase una erupción subpliniana con IEV 3 en verano (noviembre a marzo), las cenizas viajaríann preferencialmente al O-SO, y afectarían a poblados como Cayarac, Salla Salla, Pullo, Cahuacho, entre otros. Por otro lado, si una erupción vulcaniana o subpliniana ocurriera entre los meses de abril a octubre, las cenizas viajarían preferencialmente al E y SE, y afectarían al poblado de Pausa, Marcabamba, Tonsio, Huancara, Pirca, Casire, Marán y otros poblados menores localizados entre 8 y 40 km del Sara Sara.

b) De reactivarse el volcán Sara Sara, también podría presentar una erupción de **tipo pliniana con IEV 4 o 5**. Estas corresponden a erupciones explosivas violentas, debido a que el magma en la mayoría de los casos es ácido y posee alto contenido de volátiles o gases. En este tipo de erupciones, las columnas eruptivas constituidas por ceniza, lapilli de pómez y gases suelen alcanzar alturas mayores a los 20 km, y los materiales emitidos pueden afectar más de 800 km^2 (Cas & Wright, 1987). Durante estas erupciones, se generan voluminosas caídas de lapilli de pómez y ceniza, así como corrientes de densidad piroclástica, y oleadas piroclásticas. También es frecuente encontrar flujos de barro o lahares asociados a este tipo de erupciones, que alcanzan decenas a cientos de kilómetros.

   Las corrientes de densidad piroclástica o flujos pioclásticos en erupciones plinianas con IEV 4 pueden viajar a poco más de 15 km del cráter, tal como ha sucedido, por ejemplo, en la erupción pliniana del año 1913 del volcán Colima (México) que tuvo un IEV 4, y generó corrientes de densidad piroclástica que viajaron a casi 15 km del cráter (Luhr *et al*., 2006). Desde luego, hay otros casos en los cuales las corrientes de densidad piroclástica solo alcanzaron algunos kilómetros de distancia, como el volcán Calbuco (Chile); la erupción de este volcán en el año 2015 tuvo un IEV 4, y las corrientes de densidad piroclástica llegaron a poco más de 6 km del cráter (Castruccio *et al*., 2016).

   Si el Sara Sara presentara una erupción **pliniana con IEV 4**, podría generar corrientes de densidad piroclásticas que viajarían a poco más de 12 km de distancia del cráter (área naranja del mapa de peligros). Desde luego, en áreas distales, las corrientes de densidad piroclástica tienden a canalizarse en valles y quebradas. Estas corrientes podrían afectar poblados como Cayarac, Huachipa, Quilcata, Acoquipa, Pausa, Tonsio, Casire, Huancara, Marán y otros poblados menores localizados entre 6 y 12 km del Sara Sara.

   En el Sara Sara, varios depósitos de flujos de pómez y ceniza emitidos durante erupciones plinianas son visibles a más de 10 km al pie del flanco oeste (quebradas Jatunsora, Angostura, Putaca) y este del volcán (Tonsio, Pirca, Pausa).

c) El volcán Sara Sara podría presentar una erupción pliniana con IEV 5, tal como sucedió hace más de 100 000 años AP. Voluminosos depósitos de corrientes de densidad piroclásticas y depósitos de caída de lapilli de pómez son actualmente visibles al oeste, noroeste, este y sureste del volcán.

   En tal sentido, en caso de que ocurriera una erupción pliniana con IEV 5, las tefras expelidas viajarían a más de 80 km de distancia, principalmente al este (diciembre-marzo) o al este, NE y SE (abril a noviembre) del volcán, y causarían impacto en los poblados, ganados, tierras de cultivo, obras de infraestructura, entre otros (reservorios de agua, canales de agua, etc.). Los poblados más afectados por caída de ceniza y lapilli de pómez serían aquellos localizados en las provincias de Páucar del Sara Sara, Puyusca (Ayacucho) y Castilla (Arequipa).

   Asimismo, durante dicha erupción, podrían generarse corrientes de densidad piroclástica que recorrerían distancias mayores de 15 km del volcán, igual a lo sucedido durante pasadas erupciones plinianas del volcán Sara Sara. Estos flujos podrían afectar centros poblados cercanos al volcán como Cayarac, Huacachipa, Tonsio, Huancara, Pausa, Quilcata y otros, así como obras de infraestructura (canales de agua, carreteras, etc.) y terrenos de cultivos, localizados cerca del volcán.

   En el sur del Perú, los volcanes como Misti, Ubinas, Ticsani, Huaynaputina y Ampato han presentado erupciones plinianas (Thouret *et al*., 2001, Rivera *et al*., 2014; Mariño & Thouret, 2003; Harpel *et al*., 2011; Samaniego *et al*., 2016). La erupción explosiva de hace 2000 años AP del volcán Misti fue de tipo pliniana (IEV 5; Harpel *et al*., 2011), emplazó un depósito de caída de lapilli de pómez, cuyo volumen aproximado es de 1.4 km^3. Este depósito tiene entre 10 a 20 cm de espesor en toda el área de Arequipa (a más de 12 km de distancia del cráter del volcán).

   Asimismo, la erupción generó flujos piroclásticos de pómez y ceniza, cuyo volumen total es de 0.01 km^3. Estos depósitos poseen espesores métricos a más de 11 km de distancia del cráter. Además, la erupción generó depósitos de lahares que alcanzaron más de 20 km de distancia (Harpel *et al*., 2011). En el volcán Ubinas, la última erupción pliniana ocurrió hace 980 años AP, y emplazó depósitos de caída de ceniza de hasta 25 cm de espesor a más de 40 km de distancia del cráter (Rivera *et al*., 1998).

   Las erupciones subplinianas o plinianas (IEV 3-5), también podrían generar lahares o flujos de barro, especialmente si las corrientes de densidad piroclástica calientes se emplazaran sobre la cobertura de hielo o nieve, como ocurrió durante la erupción del volcán Nevado del Ruiz en Colombia en 1985, que tuvo un IEV 3 (Thouret *et al*., 2007; Pierson *et al*., 1990).

Una erupción subpliniana o pliniana (IEV 3-5) del Sara Sara ocurrida en temporada de lluvias podría generar lahares que descenderían por las diversas quebradas que surcan los flancos del volcán, sobre todo por aquellos ubicados al O, SO, E y SE, y causarían graves daños en terrenos de cultivo, carreteras, puentes, etc. Durante una erupción pliniana, el alcance de los lahares sería mayor de 20 km.

Esta versión está basada en la presencia de los diversos depósitos que se encuentran en las quebradas localizadas en el flanco oeste del volcán Sara Sara (Quebradas Putaca, Angostura, Cule, Ullacha, etc.).

6.3.4 Cuarto escenario: crecimiento y colapso de domo

Un domo se forma cuando el magma es demasiado viscoso para fluir al exterior de un volcán y aparece en forma de una protuberancia en la cima o en el flanco de un volcán (Francis, 1993). Durante el crecimiento, los flancos de dicho domo son inestables y pueden colapsar o explotar, lo que da lugar a la formación de corrientes de densidad piroclásticas o flujos piroclásticos. Estos flujos pueden desplazarse a ras del suelo, a velocidades mayores de 50 m/s, y alcanzan distancias mayores a 10 km de su fuente (Miller, 1989).

En el volcán Sara Sara, es probable también el crecimiento de un domo, ya que en inmediaciones de este volcán existen más de cinco depósitos voluminosos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza riolíticos a dacíticos, ligados al crecimiento y destrucción de domos producidos por dicho volcán hace más de 70 ka. Esta afirmación se basa en las dataciones radiométricas efectuadas. En efecto, al pie del flanco oeste del volcán Sara Sara (quebradas Putaca, Cule, Angostura, Ullacha), así como al pie del flanco este y NE, en inmediaciones de las localidades de Pausa y Tonsio, existen depósitos de flujos de bloques y ceniza ligados al crecimiento y destrucción de domos, generados por dicho volcán, hace más de 70 ka AP. Un nuevo proceso de crecimiento de domo en el volcán Sara Sara podría generar flujos incandescentes de bloques y cenizas que se emplazarían en las diversas quebradas aledañas a dicho volcán. Estos alcanzarían distancias de hasta 15 km alrededor del volcán, y afectarían a los terrenos de cultivo, carreteras, puentes, etc.

También, el crecimiento de un domo de lava al interior de este volcán podría desencadenar el colapso del edificio volcánico y/o una explosión lateral dirigida *(blast)*, que podría producir corrientes de densidad piroclástica y/o avalanchas de escombros a más de 10 km de distancia. Esto basado en la existencia de un depósito de flujo piroclástico de bloques y cenizas denominado "Diente de caballo", originado por una explosión lateral dirigida, cuyos depósitos alcanzaron distancias de más de 18 km al SO y O del volcán Sara Sara, hace aproximadamente 162 ± 20 ka AP. Dicho depósito mide 20 m de espesor a más de 12 km al oeste del volcán.

6.4 MAPA DE PELIGROS DEL VOLCÁN SARA SARA

Se han elaborado tres mapas de peligros del volcán Sara Sara que consideran una erupción potencial de dicho volcán. Estos mapas muestran una integración de dos o más tipos de peligros volcánicos. En efecto, se presenta un **mapa principal para peligros múltiples de la zona proximal** que integra mapas de peligros por corrientes de densidad piroclástica, flujos de lava y eyección de proyectiles balísticos del volcán Sara Sara. Asimismo, se presenta un segundo **mapa de peligros por lahares y avalanchas de escombros** para áreas mediales y distales, y un tercer **mapa de peligros por caídas piroclásticas o tefras.** Para una mejor visualización e interpretación de los peligros, estos tres mapas son presentados en un poster formato A0 (ver mapa de peligro).

Para delimitar las zonas de alcance de las corrientes de densidad piroclástica, lahares y avalanchas de escombros, se utilizó el programa LAHARZ_py (Iverson *et al*., 1998; Schilling, 1998) y datos de campo sobre áreas cubiertas en erupciones pasadas. El programa LAHARZ_py se ejecuta dentro de un Sistema de Información Geográfica (GIS) y un modelo de elevación digital (DEM). El DEM empleado ha sido elaborado en base a imágenes de satélite georreferenciadas a escala 1/1000. También se considera para los lahares, varios escenarios de volúmenes previamente establecidos; y para las corrientes de densidad piroclásticas y avalanchas de escombros, se utilizan estimaciones de las relaciones H/L (H: altura; L: distancia horizontal), que corresponden a la movilidad de un flujo o avalancha respecto a la distancia (Malín & Sheridan, 1982).

A continuación, se describen dichos mapas:

6.4.1 Mapa proximal de peligros múltiples

La zonificación de peligros (alto, moderado y bajo) en el mapa principal se realizó para el emplazamiento de corrientes de densidad piroclásticas, flujos de lava y eyección de proyectiles balísticos. El mapa está a una escala 1/75 000.

Las zonas de alto, moderado y bajo peligro fueron el resultado de una integración de las zonas donde se presume se emplazarían las corrientes de densidad piroclástica, flujos de lava y proyectiles balísticos, producto del cual se tiene el mapa principal que considera peligros múltiples (ver mapa de peligro).

Zonificación de peligros de la zona proximal

Para la delimitación del alcance de las corrientes de densidad piroclástica, se empleó la metodología denominada "cono de energía" (Malin & Sheridan, 1982), que ha sido frecuentemente utilizada para definir las zonas de peligro alrededor de un volcán. Este método postula que el alcance horizontal (L) de un flujo piroclástico es función de la diferencia de alturas (H) entre el punto de generación del flujo o la cima de un volcán y el punto de alcance del flujo (figura 6.2). La relación H/L es un indicador de la movilidad del flujo. Así, para una relación H/L cercano a 0.1, los flujos poseen gran movilidad, y por tanto, alcanzan mayor distancia, mientras que para una relación H/L cercana a 0.3, poseen poca movilidad. Los alcances de los flujos piroclásticos fueron delimitados con el programa LAHARZ_py (Schilling, 1998).

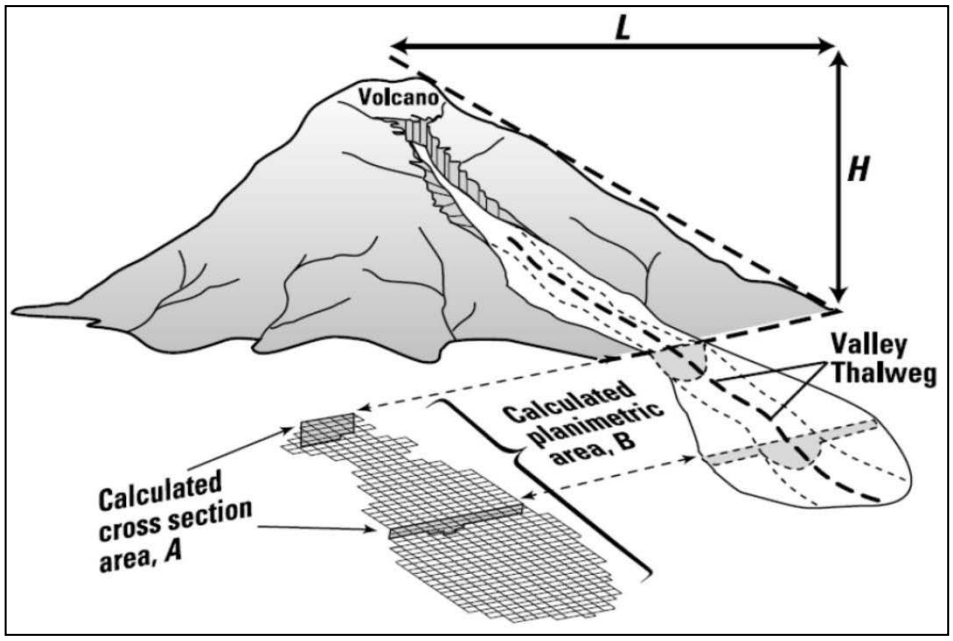


Figura 6.2 Relaciones entre la distancia (L) y la altura (H) por donde recorrerán los lahares, así como las áreas en sección transversal (A) y planimétrica (B), inundadas por un evento lahárico (Schilling, 1998)

Para realizar el modelamiento con el *software* LAHARZ_py, se introdujeron valores de distancia "L" (distancia a recorrer por la corriente piroclástica) y una altura "H" (distancia tomada a partir de la cumbre del volcán desde donde descienden las corrientes de densidad piroclástica hasta el fondo del valle), y se calculó la relación H/L.

Zona de alto peligro (rojo)

Para delimitar la zona de alto peligro, se utilizó el valor 0.29 para la relación H/L, calculado a partir de nuestros datos de campo. Este valor obtenido es frecuentemente utilizado para calcular distancias alcanzadas por corrientes de densidad piroclástica de pequeño volumen, generadas durante erupciones con IEV 2, como en el caso de un **Escenario 2 (erupción vulcaniana)**. Se consideró como centro de emisión la parte superior del volcán Sara Sara. Como se ha mencionado anteriormente, la probabilidad de ocurrencia de erupciones vulcanianas a subplinianas es moderada en el Sara Sara, debido a que ocurrió durante el Pleistoceno superior.

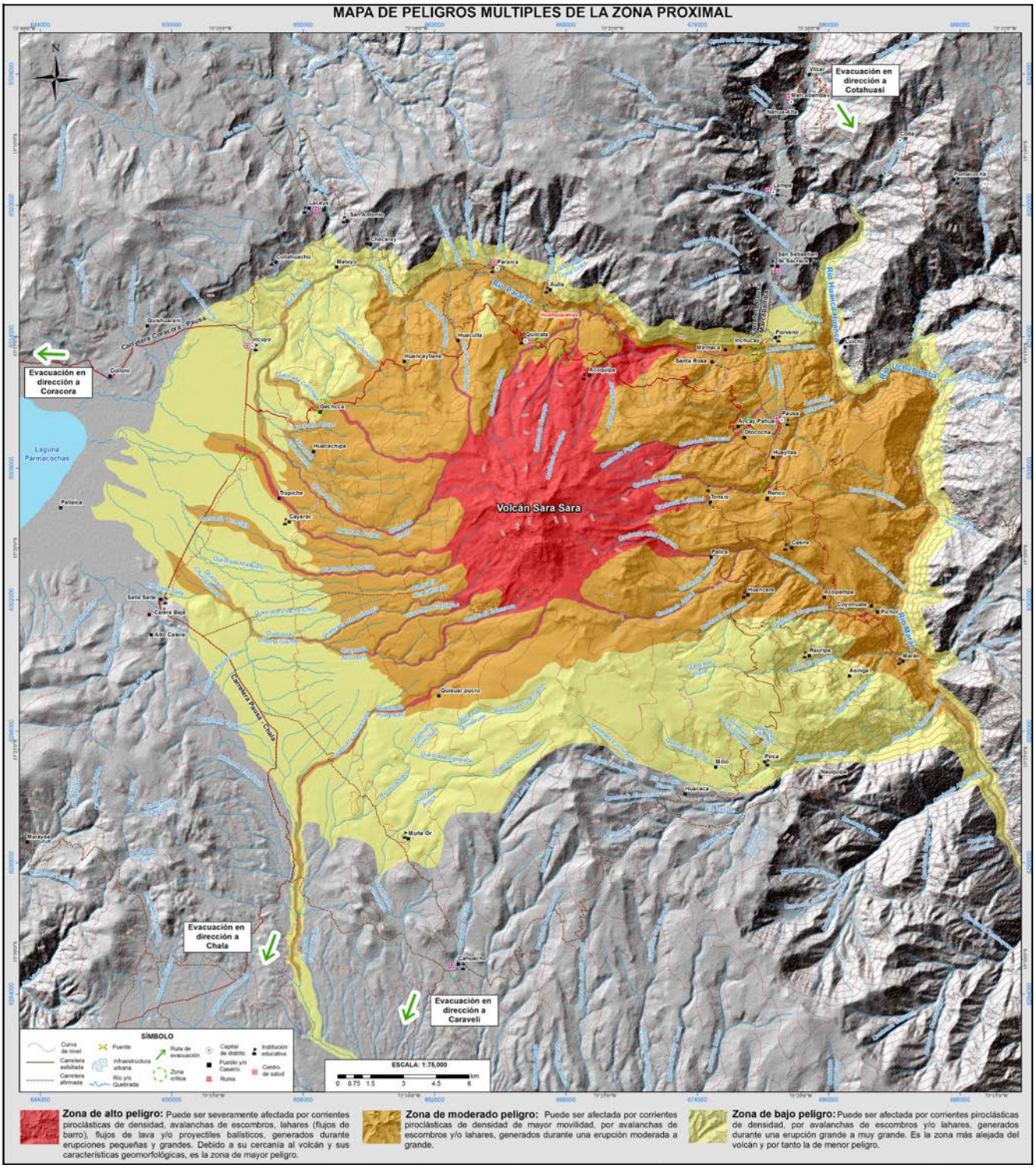


Figura 6.3 Mapa de peligro proximal del volcán Sara Sara

Los límites de las corrientes de densidad piroclástica de volumen moderado se encuentran entre 3 y 8 km de distancia de la cima del Sara Sara. En efecto, las mayores distancias (4-8 km del cráter) se encuentran en los sectores norte, noreste y este del volcán Sara Sara, mientras que las menores distancias (3-7 km del cráter) están al pie de los flancos sur, suroeste y oeste. Desde luego, en zonas distales, los flujos tenderán a canalizarse en valles y quebradas.

Los alcances bajos son frecuentes en erupciones vulcanianas pequeñas, caso de erupciones con IEV 2. Por ejemplo, durante la erupción del volcán Tungurahua (Ecuador) en el 2006, se generaron flujos piroclásticos de escoria que se emplazaron por las quebradas de los flancos sur y sureste, y recorrieron distancias de hasta 8 km del volcán, ayudados por la fuerte pendiente (Hall *et al*., 2013).

Los límites de la zona de alto peligro del mapa también coinciden con el alcance de un gran número de flujos de lavas del Sara Sara (**Escenario 1** de la presente investigación), que se encuentran en promedio hasta 5.5 km de distancia desde su punto de emisión (figura 3.1). Por otro lado, los proyectiles balísticos generados durante erupciones vulcanianas (IEV 1-2) pueden alcanzar distancias limitadas a las zonas muy proximales al cráter, típicamente menores a 3 km, como se ha visto en varios volcanes del sur peruano. Por ejemplo, durante la erupción del volcán Ubinas en el año 2006-2009, el alcance máximo de proyectiles balísticos fue cercano a 2.5 km (Rivera *et al*., 2010), y durante la última erupción del volcán Sabancaya en el año 1990-1998, alcanzó hasta 1 km del cráter (Thouret *et al*., 1994).

En resumen, la zona de alto peligro (rojo) se encuentra aproximadamente entre 3 y 8 km de distancia de la cima del volcán, esta puede ser afectada por corrientes de densidad piroclástica y proyectiles balísticos, generados durante erupciones explosivas leves a moderadas con IEV 2. Asimismo, puede ser afectada por flujos de lava.

Zona de moderado peligro (naranja)

En el gráfico de Sigurdsson (2000), que relaciona la altura "H" versus distancia recorrida (L) para varias corrientes de densidad piroclástica, el valor de H/L para corrientes densas se encuentra entre 0.2 y 0.5. Para delimitar la zona de moderado peligro, se consideró el valor 0.2 para la relación H/L. Estos valores son frecuentes para flujos piroclásticos de pómez y ceniza, y flujos de escoria de volumen moderado y grande, generados durante erupciones subplinianas (IEV 3) o plinianas (IEV 4), como es el caso del **Escenario 3**.

En el **Escenario 3**, también se consideró como centro de emisión la cima del volcán Sara Sara, ya que al pie de los flancos NE, SE y O de dicho volcán, se encuentran voluminosos depósitos de flujos piroclásticos de pómez y ceniza, y flujos de bloques y ceniza emitidos en el Pleistoceno superior.

Por otro lado, como se mencionó anteriormente, en caso de erupciones subplinianas con IEV 3, las corrientes de densidad piroclástica pueden viajar a más de 6 km de distancia. Por ejemplo, el volcán Yucamane (Tacna) presentó una erupción subpliniana con IEV 3 ocurrida hace ~3270 años AP (Rivera *et al*., 2018), que emplazó a 6 km del volcán un depósito de flujo de pómez y ceniza de 6 m de espesor.

También corrientes de densidad piroclástica generadas durante erupciones plinianas con un IEV 4 pueden viajar a distancias mayores a 15 km del cráter, como ha sucedido, por ejemplo, en la erupción pliniana del año 1913 del volcán Colima (México). Esta tuvo un IEV 4, donde se generaron corrientes de densidad piroclástica que viajaron a casi 15 km del cráter (Luhr *et al*., 2006).

En caso de que el Sara Sara presentara estos tipos de erupciones subplinianas (IEV 3) o plinianas (IEV 4), los límites aproximados de alcance de las corrientes de densidad piroclástica se encontrarían entre 6 y 14 km de distancia de dicho volcán (zona de color naranaja en el mapa de peligros).

Los límites de la zona de moderado peligro también coinciden con los alcances de algunos flujos de lava emitidos en la última etapa del volcán Sara Sara. Estos se encuentran alrededor de 14 km de distancia desde su punto de emisión.

Por otro lado, en el caso de las erupciones subplinianas con un IEV 3 a 4, el alcance máximo de proyectiles balísticos se encuentra dentro de un radio menor a 5 km, según datos tomados de Blong (1984). Además, en erupciones recientes se ven que los proyectiles balísticos pueden alcanzar distancias de hasta 5 km, como es el caso, por ejemplo, de la erupción del volcán Calbuco (Chile), en el año 2015. También los proyectiles balísticos pueden alcanzar hasta 7 km de distancia del cráter, como se ha observado en la erupción subpliniana de Mount Spurr en Alaska, en el año 1992 (Neal *et al*., 1995). Estas distancias se encuentran dentro de los límites de la zona de moderado peligro.

En resumen, la zona de moderado peligro (naranja) se encuentra entre 3 y 16 km de distancia al este, entre 3 y 10 km al norte, y entre 3 a 11 km de distancia al oeste respecto a la cima del volcán Sara Sara. La zona podría afectarse por corrientes de densidad piroclástica generadas por flujos de lavas voluminosas y por proyectiles balísticos durante erupciones explosivas con un IEV 3-4.

Zona de bajo peligro (amarillo)

Los valores de coeficiente H/L cercanos a 0.1 son frecuentes para corrientes de densidad piroclástica originadas durante erupciones volcánicas violentas, de tipo plinianas (IEV 5), o de aquellass originadas por explosión de un criptodomo, y colapso de un domo en crecimiento como en los Escenarios 3 y 4. Para delimitar la zona de bajo peligro, se consideró el valor 0.13 para la relación H/L, debido a que este valor es típico de corrientes de densidad piroclástica que poseen alta movilidad. Para este escenario, el centro de emisión considerado fue la cumbre del volcán Sara Sara.

En caso de que las corrientes de densidad piroclástica fueran originadas por una erupción pliniana del volcán Sara Sara con IEV 5, las distancias a recorrer estarían en función de la pendiente del terreno, morfología de los valles o las quebradas, entre otros aspectos. En tal sentido, el modelamiento muestra que las corrientes piroclásticas recorrerían entre 10 y 18 km al noreste, oeste y suroeste de dicho volcán; asimismo, recorrerían menos de 12 km en el sector norte y sur del Sara Sara, y menos de 16 km en el sector este del Sara Sara.

A lo largo de la actividad pasada del volcán Sara Sara, sobre todo hace más de 100 000 años, se han generado erupciones plinianas y crecimiento y destrucción de domos que han empleado voluminosos depósitos de corrientes de densidad piroclástica en las inmediciones de dicho volcán. Por ejemplo, el depósito de bloques y ceniza "Diente de caballo" de hace aproximadamente 162 ± 20 años mide 2 m de espesor a 18 km al oeste del volcán Sara Sara.

También varias erupciones plinianas con un IEV 5 que presentaron algunos volcanes del sur del Perú generaron corrientes de densidad piroclástica que han recorrido distancias similares. Por ejemplo, los flujos piroclásticos de pómez y ceniza emplazados hace 2050 años AP por la erupción del volcán Misti alcanzaron distancias de alrededor de 12 km del cráter (Thouret *et al*., 2001).

Por otro lado, según la literatura, comúnmente los depósitos de flujos de una explosión lateral dirigida pueden recorrer distancias menores de 10 kilómetros. Por ejemplo, el depósito de una erupción de tipo *lateral blast* del volcán Chachimbiro (Ecuador), ocurrido entre 3640 y 3510 años AP (Bernard *et al*., 2014), viajó poco más de 8 km de distancia de dicho volcán. Sin embargo, existen algunos otros ejemplos que muestran que los flujos pueden llegar a distancias mayores. Por ejemplo, en el caso del volcán Mount Saint Helens (EEUU), los flujos de la explosión lateral dirigida en la erupción de 1980 recorrieron entre 30 y 35 km de distancia (Tilling *et al*., 1990).

En resumen, la zona de bajo peligro (amarillo) está localizada entre 6 y 18 km de distancia de la cima del volcán Sara Sara. Esta zona puede ser afectada por corrientes de densidad piroclástica generadas durante erupciones plinianas (IEV 4 a 5) o por depósitos de *blast* durante erupciones lateralmente dirigidas. Según el registro histórico, la probabilidad de ocurrencia de este tipo de erupciones es muy baja.

6.4.2 Mapa de peligros por caídas piroclásticas

En el mapa de peligros por caídas piroclásticas del volcán Sara Sara, se han representado tres zonas: zona de alto peligro en rojo, zona de moderado peligro en naranja y zona de bajo peligro en amarillo, cuyo foco de emisión podría estar en la cima del volcán Sara Sara.

Para la zonificación de peligros, se consideraron tres escenarios: a) erupciones vulcanianas con un IEV 1-2; b) vulcanianas y sub-plinianas con un IEV 3; y c) erupciones plinianas con IEV 4 - 5. En el volcán Sara Sara, se han encontrado depósitos piroclásticos asociados a erupciones vulcanianas, subplinianas y plinianas, como han presentado varios volcanes activos del sur del Perú (Thouret *et al*., 2001; Harpel *et al*., 2011; Rivera *et al*., 2014; Mariño & Thouret, 2003; Samaniego *et al*., 2016).

También se tuvo en cuenta las direcciones predominantes de vientos, ya que estas controlan la dirección preferente de dispersión de las tefras durante las erupciones. Para la zonificación de este tipo de peligro se consideraron los resultados del modelamiento de dispersión de ceniza con ayuda del programa FALL 3D y datos de direcciones predominantes de vientos a 3000, 6000, 12 000, 20 000 m sobre la cima del volcán Sara Sara, proporcionados por SENAMHI. Para el escenario vulcaniano con IEV 1-2, se utilizaron direcciones de vientos a 3000 y 6000 m sobre la cima del volcán Sara Sara, y para escenarios vulcaniano y sub-pliniano (IEV 3), así como pliniano (IEV 4-5), se utilizaron velocidades y direcciones de vientos a 12 000 y 20 000 m s. n. m. Asimismo, se tuvo en cuenta distancias alcanzadas por las cenizas en erupciones similares de otros volcanes del sur peruano como el Ubinas y el Misti.

Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro es el área proximal y se halla aproximadamente dentro de un radio de 20 y 30 km de distancia del volcán Sara Sara. Dependiendo del tipo de erupción, esta área puede ser afectada de diversa manera. En tal sentido, se presentan tres escenarios:

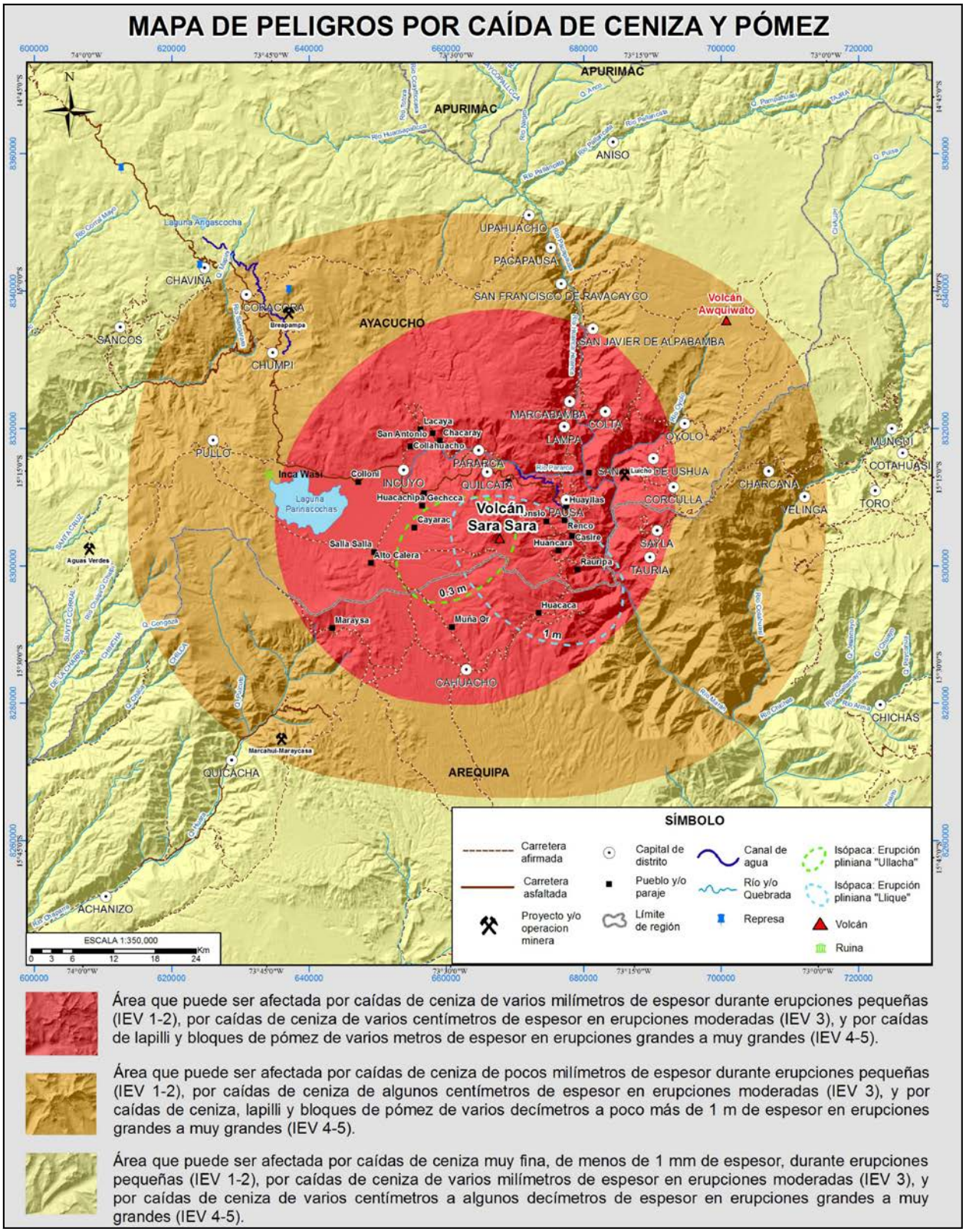


Figura 6.4 Mapa de peligros por caídas piroclásticas del volcán Sara Sara

a) Durante erupciones vulcanianas con IEV 2, el área podría ser afectada por caídas de tefras de algunos centímetros de espesor. Esta hipótesis se basa en la dispersión de ceniza de erupciones vulcanianas de los volcanes Sabancaya, Ubinas y Misti. En efecto, durante la erupción del volcán Sabancaya de los años 1990-1998 (IEV 2), se emplazaron caídas de ceniza de un centímetro de espesor hacia el este, en un recorrido de 8 km de distancia (Thouret *et al*., 1994). En la erupción del volcán Ubinas de los años 2013-2015 (IEV 2), a 6 km de distancia, se emplazaron caídas de ceniza de entre 0.5 cm y 1 cm de espesor. En la erupción vulcaniana del volcán Misti del siglo XV (IEV 2), a 10 km de distancia se emplazaron caídas de ceniza de aproximadamente 4 cm de espesor (Suni, 1999; Thouret *et al*., 2001).

b) En caso de erupciones vulcanianas o sub-plinianas con IEV 3, el área de alto peligro podría ser afectada por caídas de ceniza y lapilli pómez de varios centímetros de espesor. Esta hipótesis está basada en el mapa de isópacas de la erupción del volcán Nevado del Ruiz de 1985 (IEV 3, Naranjo *et al*., 1986), el cual muestra que a 10 km de distancia de dicho volcán se emplazaron caídas de ceniza de 7 cm de espesor. También durante la erupción de hace 3270 años AP del volcán Yucamane, a 6 km de distancia se emplazaron caídas de ceniza de al menos 40 cm de espesor (Rivera *et al*., 2018). En el caso del volcán Tungurahua (Ecuador), en la erupción de agosto de 2006, de IEV 3, se reportaron espesores de caídas de ceniza de entre 4 y 5 cm a 10 km de distancia del cráter (Eychenne *et al*., 2012).

c) En caso de erupciones plinianas con IEV 4-5, el área de alto peligro podría ser afectada por caídas de lapilli y bloques de pómez de varios decímetros a algunos metros de espesor. Esta hipótesis se basa en la dispersión de caídas piroclásticas de erupciones plinianas (IEV 4-5) de los volcanes Misti, Ubinas y Ticsani. La erupción del volcán Misti de 2000 años AP (IEV 5), a 10 km de distancia emplazó caídas de lapilli de pómez de entre 30 y 40 cm de espesor (Thouret *et a*l., 2001; Harpel *et al*., 2011). La erupción del volcán Ticsani de 11 000 años AP (IEV 4) emplazó caídas de ceniza de alrededor de 3 m de espesor a 10 km del cráter (Mariño &Thouret, 2003).

   En resumen, la zona de alto peligro está localizada hasta los 20 km (norte y sur del volcán Sara Sara) y los 30 km (al este y oeste del volcán). Esta zona podría ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor durante erupciones pequeñas a moderadas (IEV 1-2), por caídas de ceniza de varios centímetros de espesor en erupciones moderadas (IEV 3), y por caídas de lapilli y bloques de pómez de varios decímetros a algunos metros de espesor en erupciones violentas y voluminosas (IEV 4-5).

Zona de moderado peligro (naranja)

Los límites de la zona de moderado peligro por alcance de caída de tefras se hallan aproximadamente a los 70 km al oeste, 60 km al este, y entre 40 y 50 km al norte y sur del volcán Sara Sara, respectivamente.

Dependiendo del tipo de erupción, esta área puede ser afectada de diversa manera. En tal sentido, se presentan tres escenarios:

a) Durante erupciones vulcanianas con IEV 1-2, la zona de moderado peligro podría ser afectada por caídas de ceniza de algunos milímetros de espesor. Esto se basa en la dispersión de cenizas de la erupción vulcaniana del volcán Ubinas de los años 2005-2009 (IEV 2), donde caídas de ceniza de 1 mm alcanzaron cerca de 30 km de distancia del cráter en dirección este (Rivera *et al*., 2014).

b) Durante erupciones vulcanianas o sub-plinianas con IEV 3, esta área podría ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor. Esto se basa en el mapa de isópacas de las erupciones de los volcanes Nevado del Ruiz en noviembre de 1985 (IEV 3, Naranjo *et al*., 1986) y Tungurahua en agosto de 2006 (Eychenne *et al*., 2012). El volcán Nevado del Ruiz, a 30 km de distancia, emplazó caídas de tefras de cerca de 2 cm de espesor, y en el caso del volcán Tungurahua, se reportaron espesores de 0.7 a 0.8 cm a la misma distancia. Asimismo, esto se basa en la erupción subpliniana de hace 3270 años AP del volcán Yucamane, que a 20 km de distancia tiene menos de 1 cm de espesor.

c) Durante erupciones plinianas con IEV 4-5, el área podría ser afectada por caídas de ceniza, lapilli y fragmentos de pómez, de varios centímetros a decímetros de espesor. Esta hipótesis se basa en la dispersión de caídas piroclásticas ligadas a erupciones plinianas (IEV 4-5) de los volcanes Misti, Ubinas y Ticsani. La erupción pliniana (IEV 5) del volcán Misti de hace 2050 años AP emplazó caídas de lapilli de pómez de 4 y 5 cm de espesor a 30 km de distancia (Suni, 1999; Thouret *et al*., 2001; Harpel *et al*., 2011). La erupción del volcán Ticsani de 11 000 años AP (IEV 4) emplazó caídas de ceniza de alrededor de 40 cm de espesor a 30 km del cráter (Mariño & Thouret, 2003).

   En resumen, la zona de moderado peligro, podría ser afectada por caídas de ceniza de algunos milímetros de espesor durante erupciones pequeñas o leves (IEV 1-2), por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor en erupciones moderadas (IEV 3), y por caídas de ceniza, lapilli y bloques de pómez del orden de varios centímetros a decímetros de espesor en erupciones grandes o violentas (IEV 4-5).

Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro se halla a más de 50 km al norte y sur del volcán Sara Sara y a más de 80 km de distancia en dirección este y oeste. Durante erupciones vulcanianas con IEV 1-2, esta área sería mínimamente y temporalmente afectada por caídas de ceniza.

Durante erupciones vulcanianas o sub-plinianas con IEV 3, esta área podría ser afectada por caídas de ceniza de algunos milímetros de espesor. Esta hipótesis se basa en el mapa de isópacas de las erupciones de los volcanes Nevado del Ruiz en noviembre de 1985 y Tungurahua en agosto de 2006 (IEV 3, Naranjo *et al*., 1986; Eychenne *et al*., 2012). En efecto, en el caso del volcán Nevado del Ruiz, esteemplazó caídas de ceniza de entre 2 y 3 mm de espesor, a 50 km de distancia, mientras que en el caso del volcán Tungurahua se reportaron espesores de 6 mm a la misma distancia.

Durante erupciones plinianas con IEV 4-5, el área podría ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros o varios milímetros de espesor. Esta hipótesis se basa, por ejemplo, en la erupción pliniana del volcán Hudson (Chile) del año 1991 que tuvo un IEV 4. Durante esta erupción, se emplazaron depósitos de tefras de hasta 10 cm de espesor a 120 km al sureste de dicho volcán (Naranjo *et al*., 1993). Asimismo, esta hipótesis se basa en la erupción pliniana del volcán Chaiten, en el año 2008, y que tuvo un IEV 4. Esta erupción emitió cenizas que alcanzaron a medir un centímetro de espesor a 150 km al SE de dicho volcán (Watt *et al*., 2009). En nuestro medio, un ejemplo es el volcán Ticsani de 11000 años AP (IEV 4), que ocasionó caídas de ceniza de alrededor de un centímetro de espesor a 50 km del cráter (Mariño &Thouret, 2003).

En resumen, la zona de bajo peligro sería muy poco afectada por caídas de ceniza durante erupciones pequeñas o leves (IEV 1-2), pero sí sería temporalmente afectada por caídas de ceniza de algunos milímetros de espesor en erupciones moderadas (IEV 3), y por caídas de ceniza de pocos centímetros o varios milímetros de espesor en erupciones grandes (IEV 4-5).

6.3.3 Mapa de peligros por lahares y avalanchas de escombros

Para la zonificación de las áreas de inundación por flujos de lodo (lahares) del volcán Sara Sara, se utilizó el programa LAHARZ_py (Iverson *et al*., 1998; Schilling, 1998). Este programa correlaciona el volumen de un lahar y el área planimétrica y la sección transversal inundada por un lahar.

En el sur del Perú, se han realizado pocas estimaciones de volúmenes de lahares. Solo se tienen cálculos para quebradas que descienden por los flancos del volcán Misti, además del río Chili que discurre entre los volcanes Misti y Chachani (Delaite *et al*., 2005). En dicho volcán, volúmenes máximos de lahares del orden de 1.5 a 4 millones de m^3 son frecuentes, ocurren cada 300 a 1000 años, aproximadamente, y estarían asociados a erupciones explosivas pequeñas (IEV 1-2). En el caso del volcán Ubinas (Moquegua) que ha estado presentando erupciones vulcanianas con IEV 2 en los años 2005-2009 y 2013-2016, los volúmenes de lahares obtenidos por Mariño *et al*. (2018)varían entre 25 000 y 160 000 m^3 durante lluvias intensas.

Para lahares de poco volumen del volcán Sara Sara, se escogió un volumen de 300 000 m3, similares a volúmenes de lahares que se generaron en otros volcanes. Este es el caso, por ejemplo, de lluvias extremas en el Ubinas, Misti, Sabancaya y de los que se estima son más frecuentes. Además, se eligió un volumen aproximado de 5 millones de m^3, para lahares importantes o voluminosos que son menos frecuentes, pero que podrían ocurrir cuando el volcán Sara Sara presentara erupciones subplinianas. En las quebradas y ríos de interés se ubicaron las celdas de inicio, es decir, se las ubicó dentro de la zona proximal (cono de energía), mientras que el final de la distancia se calculó por el programa LAHARZ_py.

Las imágenes de satélite del Sara Sara muestran que el área de cobertura de hielo y nieve en época de invierno es de aproximadamente 0.01 km^3, con un promedio de 2 m de espesor. Si asumimos que durante una erupción subpliniana del volcán Sara Sara se fundiera entre 20 y 40 % de hielo y nieve, en dicho complejo volcánico podrían generarse lahares con un volumen total aproximado de 5 millones de m^3. En tal sentido, se escogió un volumen de 5 millones de m^3, para los lahares de volumen moderado. La posibilidad de que ocurran este tipo de eventos es muy baja.

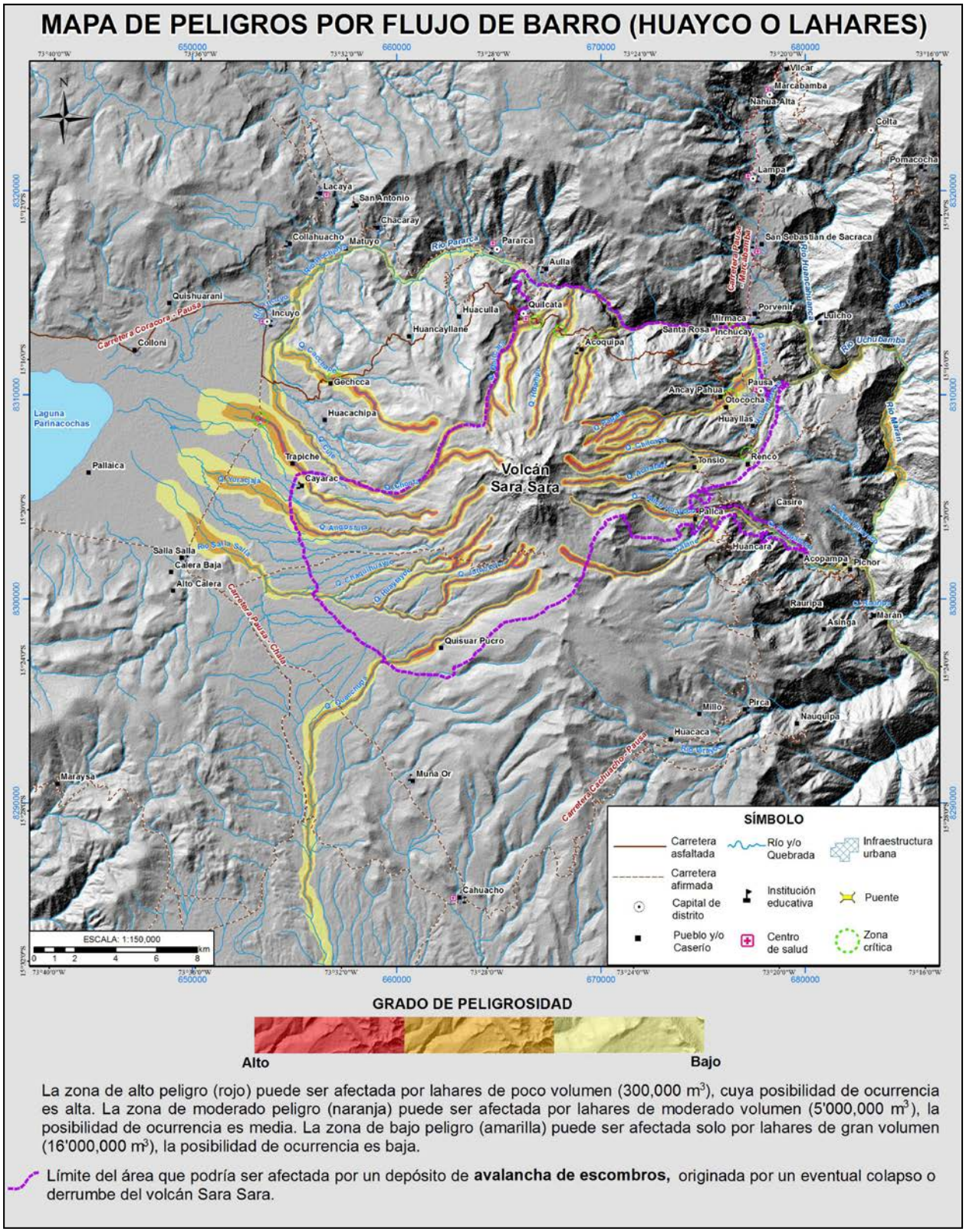


Figura 6.5 Mapa de peligros por lahares o flujos de lodo del volcán Sara Sara

Debido a que las erupciones explosivas del volcán Sara Sara han emplazado depósitos piroclásticos en zonas proximales y distales, el modelamiento se realizó sobre las principales quebradas ubicadas en los flancos del volcán Sara Sara. Se escogió la cabecera de cada quebrada, es decir, la zona proximal roja del mapa de peligros, pero el objetivo de esta etapa es la delimitación de las zonas de inundación por lahares en las zonas distales.

En el mapa de peligros por lahares (ver mapa de peligros), la zona roja es considerada la zona de alto peligro, y corresponde a las áreas que podrían ser afectadas por lahares de hasta 300 000 m^3, y que podrían estar asociadas a erupciones de magnitud leve (IEV 1-2). La zona naranja, denominada de moderado peligro, podría ser afectada por lahares de hasta 5 millones de m^3. La zona amarilla es considerada de bajo peligro, y puede ser afectada por lahares de 16 millones de m^3. Los lahares de 5 y 16 millones de m^3, podrían estar asociados a erupciones explosivas de gran magnitud (IEV ≥ 3), debiéndose recalcar que la posibilidad de ocurrencia de tales erupciones es baja a muy baja.

En este mapa también se presenta el área que podría ser afectada por un colapso del volcán (línea morada), desencadenado por el crecimiento de un domo sobre el volcán Sara Sara.

Para delimitar el alcance de la avalancha de escombros, se empleó el programa LAHARZ_py, que aplica el concepto de "cono de energía" (Malin & Sheridan, 1982), cuya metodología ha sido explicada en el acápite 6.4.1. Para ello, se consideró el valor 0.20 para la relación H/L. Según Hayashi & Self (1992), valores de 0.05 a 0.21 del coeficiente H/L son característicos de avalanchas de escombros de origen volcánico que se generan en el continente.

Bajo estos parámetros, el límite de la avalancha de escombros alcanza su mayor distancia hacia el sector noreste del volcán Sara Sara, donde recorre hasta 13.5 km. Hacia el oeste, alcanza hasta los 9 km de distancia, mientras que al norte alcanza los 10 km de distancia, aproximadamente. Al sur, recorre entre 4 y 6 km de distancia respecto al volcán Sara Sara.

CONCLUSIONES

- El volcán Sara Sara es un volcán potencialmente activo, cuya última actividad eruptiva probablemente ocurrió hace poco más de 14 000 años AP.
- El estudio geológico realizado muestra que la actividad del volcán Sara Sara está dividido en cuatro etapas: **"Sara Sara I"**, durante el cual presentó una actividad efusiva que emplazó secuencias de flujos de lava dacíticos que yacen al extremo SE del volcán. Posteriormente, ocurrió el crecimiento y colapso de domos que genera depósitos de flujos de bloques y cenizas. Luego, el volcán colapsa y genera depósitos de avalanchas de escombros que alcanzan distancias de hasta 15 km al este del volcán (poblado de Pausa), en donde miden hasta 200 m de espesor. El **"Sara Sara II"** corresponde al periodo durante el cual se produjeron erupciones explosivas plinianas y subplinianas, con emplazamiento de voluminosos depósitos de flujos piroclásticos de pómez y cenizas riolíticas y dacíticas; así como depósitos de caídas de lapilli de pómez riolíticos que afloran al oeste y sureste del volcán. El **"Sara Sara III"** corresponde a un periodo durante el cual ocurre un prolongado crecimiento y colapso de domos que depositan al menos cinco depósitos de flujos de bloques y cenizas, que afloran al pie del flanco este y oeste del volcán Sara Sara. Entre ellos destaca un depósito de flujo de bloques y ceniza riolítico denominado "Diente de caballo" que recorrió hasta más de 18 km al oeste del volcán, en donde mide 2 m de espesor. Este depósito ha sido datado en 162 ± 20 ka. El **"Sara Sara IV"**, durante el cual se edifica el cono del volcán, ligado principalmente a la emisión de flujos de lava dacíticos que forman el actual cono del volcán. En una última etapa, hace 14 ka ocurre la emisión de flujos de lava dacíticos, a través de un cráter adventicio localizado al extremo este del volcán, los cuales recorrieron una distancia mayor de 14 km.
- Las rocas del volcán Sara Sara varían en composición desde dacitas a riolitas (64.8 - 73.6 wt. % SiO_2), altamente potásicas (2.7 – 4.2 wt. % K_2O), siendo el único centro volcánico riodacítico de la ZVC. Las rocas pertenecen a la serie calco-alcalina.
- En base al comportamiento de elementos mayores y trazas, y datos de isótopos se atribuye que principalmente unos procesos de cristalización fraccionada (FC), contaminación y/o asimilación por la corteza durante su ascenso y evolución intervienen en la diferenciación de la serie magmática del volcán Sara Sara.
- Considerando las características geoquímicas de las rocas del volcán Sara Sara (bajo valores en Y y HREE) y el contexto geodinámico peruano, se asume que los magmas del volcán Sara Sara provendrían del manto, que habrían interaccionado con magmas generados en la base de la corteza continental, donde está presente el anfíbol o granate, según modelo propuesto por Davidson *et al*. (1990).
- El estudio geológico y la distribución de los depósitos volcánicos muestran cinco tipos principales de peligros volcánicos del volcán Sara Sara en caso de una eventual reactivación: peligros por caídas de tefras, por emplazamiento de corrientes de densidad piroclástica (flujos piroclásticos), por lahares, por avalanchas de escombros y por flujos de lava.
- Se ha identificado cuatro escenarios eruptivos en caso de una reactivación del volcán Sara Sara. Los escenarios de **mayor a menor posibilidad a ocurrir** son los siguientes: 1) erupción efusiva, con emisión de flujos de lavas; 2) erupción explosiva tipo vulcaniana (IEV 1-2); 3) erupción explosiva subpliniana (IEV 3) o pliniana (IEV 4 - 5); y 4) crecimiento y colapso de domo. En cualquiera de los casos, los productos emitidos pueden afectar a los más de nueve poblados, terrenos de cultivo y obras de infraestructura, localizados en inmediaciones del volcán Sara Sara.
- En base a los estudios efectuados, el mapa de peligros volcánicos incluye los peligros múltiples como los flujos de lava, flujos piroclásticos y caídas de fragmentos piroclásticos. Este mapa muestra una zona de alto peligro (rojo) que se encuentra entre 1 y 8 km de distancia de la cima del volcán Sara Sara; la zona de moderado peligro (naranja) se encuentra entre 3 y 16 km de distancia del volcán; y la zona de bajo peligro (amarillo) está entre 6 y 18 km del volcán.

- En el **mapa de peligros por caídas piroclásticas**, la zona de alto peligro (rojo) se halla dentro de los 20 y 30 km de distancia del volcán Sara Sara. Esta es la zona que puede ser afectada por erupciones leves (IEV 1-2), así como por erupciones muy explosivas. La zona de moderado peligro (naranja) se ubica entre 40 y 70 km de distancia; esta zona puede ser afectada en erupciones moderadas (IEV 3). La zona de bajo peligro (amarillo) se ubica entre 50 y 80 km de distancia; esta última zona puede ser afectada durante erupciones explosivas moderadas a muy violentas.
- En el **mapa de peligros por lahares**, la zona roja, considerada de alto peligro, puede ser afectada por lahares de poco volumen (de hasta 300 000 m^3); la zona naranja, de moderado peligro, puede ser afectada por lahares de hasta 5 millones de m^3; mientras que la zona amarilla, de bajo peligro, puede ser afectada por lahares de hasta 16 millones de m^3. Por otro lado, el límite de alcance de una eventual avalancha de escombros está entre 6 y 13 km del volcán Sara Sara.

RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio sedimentológico detallado de las tefras emitidas durante erupciones pasadas que corresponden a depósitos de caída de lapilli de pómez que yacen al sureste del volcán Sara Sara, en cuanto a su distribución, volumen y edad de emplazamiento. Por la distribución de los afloramientos y espesores de los depósitos, estas erupciones podrían corresponder a erupciones plinianas.
- Realizar dataciones radiométricas K/Ar o Ar/Ar en lavas y diversos productos volcánicos para precisar mejor la evolución magmática y dinámica del volcán Sara Sara.
- Realizar un mayor número de análisis químico y análisis isotópicos de rocas del volcán Sara Sara para precisar el proceso de génesis y evolución de magmas.
- Realizar un monitoreo periódico de la actividad volcánica, mediante el empleo de técnicas y equipos sísmicos, de geodesia, geoquímica, visual, etc., que permita conocer el grado de actividad del volcán y alertar ante una eventual reactivación.
- Se recomienda coordinar entre autoridades del Gobierno Regional de Arequipa y Ayacucho, autoridades municipales y distritales, Defensa Civil e investigadores de instituciones científicas, como es el caso de INGEMMET, la elaboración de planes de contingencia, tendientes a mitigar los efectos de una eventual erupción volcánica. Estos planes comprenderían campañas de educación y sensibilización a los escolares, docentes, técnicos de salud, y la sociedad en su conjunto. La finalidad es dar a conocer diferentes aspectos sobre el volcán y enseñarles medidas de seguridad en caso de una eventual erupción volcánica; de esto dependerá el comportamiento y la colaboración de las comunidades. Estas medidas deberán incluir planes de evacuación.
- Realizar el mantenimiento periódico de las rutas de acceso a los diversos poblados de la provincia de Páucar del Sara Sara y Parinacochas, asentados muy próximos al volcán Sara Sara, con el fin de facilitar eventuales evacuaciones en caso se activarán las erupciones volcánicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcalá, J.; Palacios, D. & Vázquez, L. (2017) - A preliminary investigation of the timing of the local last glacial maximum and deglaciation on Hualca Hualca volcano – Patapampa Altiplano (arid Central Andes, Peru). *Quaternary International*, 449: 149-160.

Alley, R.B. (2000) - The Younger Dryas cold interval as viewed from central Greenland. *Quaternary Science Reviews*, 19(1-5): 213-226.

Benavides, V. (1999) - Orogenic evolution of the Peruvian Andes: the andean cycle. En: Skinner, B.J., ed. *Geology and ore deposits of the Central Andes*. Littleton, CO: Society of Economic Geologists, Special Publication 7, p. 61-107.

Bernard, B.; Hidalgo, S.; Robin, C.; Beate, B. & Quijozaca, J. (2014) - The 3640-3510 BC rhyodacite eruption of Chachimbiro compound volcano, Ecuador: a violent directed blast produced by a satellite dome. *Bulletin of Volcanology*, 76: 849, 20 p.

Bignami, C.; Bosi, V.; Costantini, L.; Cristiani, C.; Lavigne, F. & Thierry, P., eds. (2012) - *Handbook for volcanic risk management: prevention, crisis management, resilience*. Orleans: MIAVITA team, 198 p.

Blong, R.J. (1984) - *Volcanic hazards: A sourcebook on the effects of eruptions*. Sydney: Academic Press, 424 p.

Blong, R.J. (2000) - Volcanic hazard and risk management. En: Sigurdsson, H.; Houghton, B.F.; McNutt, S.R., Rymer, H. & Stix, J., eds. *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, p. 1215-1228.

Brantley, S.R. & Myers B. (1997) - Mount St. Helens - From the 1980 eruption to 1996. *U.S. Geological Survey Fact Sheet,* 070-97, 2 p.

Cas, R.A.F. & Wright, J.V. (1987) - *Volcanic successions modern and ancient*. London: Chapman & Hall, 528 p.

Castruccio, A.: Clavero, J.; Segura, A.; Samaniego, P.; Roche, O., et al. (2016) - Eruptive parameters and dynamics of the April 2015 sub-Plinian eruptions of Calbuco volcano (southern Chile). *Bulletin of Volcanology*, 78: 62, 19 p.

Clapperton, C.M. (1983) - The glaciation of the Andes. *Quaternary Science Reviews*, 2(2-3): 83-155.

Cotten, J.; Le Dez, A.; Bau, M.; Caroff, M.; Maury, R.C., et al. (1995) - Origin of anomalous rare-earth element and yttrium enrichments in subaerially exposed basalts: Evidence from French Polynesia. *Chemical Geology*, 119(1-4): 115–138.

Cueva, K. (2016) – *Estudio geológico, petrográfico y geoquímico del volcán Sara Sara (Ayacucho)*. Tesis Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, 137 p.

Davidson, J.P.; McMillan, N.J.; Moorbath S.; Wörner, G.; Harmon, R.S. & López, L. (1990) - The Nevados de Payachata volcanic region (18°S/69°W, N. Chile) II. Evidence for widespread crustal involvement in Andean magmatism. *Contributions to Mineralogy and Petrology,* 105(4): 412-432.

Davidson, J.P.; Harmon, R.S. & Wörner, G. (1991) - The source of central Andean magmas; some considerations. En: Harmon, R.S. & Rapela, C.W., eds. *Andean magmatism and its tectonic setting*. Boulder, CO: Geological Society of America, Special Paper 265, p. 233-243.

Delacour, A.; Gerbe, M.-C.; Thouret, J.-C.; Wörner, G. & Paquereau, P. (2007) - Magma evolution of Quaternary minor volcanic centres in southern Peru, Central Andes. *Bulletin of Volcanology*, 69(6): 581-608.

Delaite, G.; Thouret, J.-C.; Sheridan, M.F.; Labazuy, P.; Stinton, A., et al. (2005) - Assessment of volcanic hazard of El Misti and in the city of Arequipa, Peru, based on GIS and simulations, with emphasis on lahars. *Zeitschrift für Geomorphology N.F., supplement,* 140: 209-231.

De Silva, S.L. & Francis, P.W. (1991) - *Volcanoes of the Central Andes.* Berlin: Springer-Verlag, 216 p.

De Silva, S.L.; Davidson, J.P.; Croudace, I.W. & Escobar A. (1993) - Volcanological and petrological evolution of volcan Tata Sabaya, SW Bolivia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 55(3-4): 305-335.

Eychenne, J.; Le Pennec, J-L.; Troncoso, L.; Gouhier, M. & Nedelec, J-M. (2012) - Causes and consequences of bimodal grain-size distribution of tephra fall deposited during the August 2006 Tungurahua eruption (Ecuador). *Bulletin of Volcanology* 74(1): 187-205.

Feeley, T.C. & Hacker, M.D. (1995) - Intracrustal derivation of Na-rich andesitic and dacitic magmas: an example from volcan Ollagüe, Andean Central Volcanic Zone. *Journal of Geology*, 103(2): 213–225.

Fierstein, J. & Nathenson, M. (1992) - Another look at the calculation of fallout tephra volumes. *Bulletin of Volcanology*, 54(2): 156-167.

Fisher, R.V. & Heiken, G. (1982) - Mt. Pelée, Martinique: May 8 and 20, 1902, pyroclastic flows and surges. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 13(3-4): 339-371.

Francis, P.W. (1993) – *Volcanoes: a planetary perspective*. New York: Oxford University Press, 443 p.

Gerbe, M.-C. & Thouret, J.-C. (2004) - Role of magma mixing in the petrogenesis of lavas erupted during the 1990-98 explosive activity of Nevado Sabancaya, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 66(6): 541-561.

Guevara, C. & Dávila, D. (1983) - Estratigrafía y tectónica terciaria del área de Cora Cora - Pacapausa. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, (71): 281-289.

Hall, M.L.; Steele, A.L.; Mothes, P.A. & Ruiz, M.C. (2013) - Pyroclastic density currents (PDC) of the 16-17 August 2006 eruptions of Tungurahua volcano, Ecuador: Geophysical registry and characteristics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 265: 78-93.

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.

Hayashi, J.N. & Self, S. (1992) - A comparison of pyroclastic flow and debris avalanche mobility. J*ournal of Geophysical Research*, 97(B6): 9063-9071.

Hildreth, W. & Moorbath, S. (1988) - Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of Central Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98(4): 455-489.

Instituto Nacional de Estadística e Informática (2008) - *Censos Nacionales 2007: XI de Población y VI de Vivienda. Perú: resultados definitivos*. Lima: INEI, 6 t.

Instituto Nacional de Estadística e Informática (2018a) – *Resultados definitivos de los Censos Nacionales 2017: Arequipa* (en línea). Lima: INEI, 14 t. (consulta: 9 junio 2019). Disponible en: <https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1551/>

Instituto Nacional de Estadística e Informática (2018b) – *Resultados definitivos de los Censos Nacionales 2017: Ayacucho* (en línea). Lima: INEI, 15 t. (consulta: 9 junio 2019). Disponible en: <https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1568/>

Instituto Nacional de Recursos Naturales. Intendencia de Recursos Hídricos & Administración Técnica del Distrito de Riego Ocoña-Pausa (2007) - *Evaluación de los recursos hídricos de la cuenca del río Ocoña: estudio hidrológico.* Lima: INRENA, 163 p.

Iverson, R.M.; Schilling, S.P. & Vallance, J.W. (1998) - Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin*, 110(8): 972-984.

Kuno, H., (1968) - Differentiation of basalt magmas. En: *Hess, H.H. & Poldervaart, A. eds. Basalts: the Poldervaart treatise on rocks of basaltic composition.* New York: Interscience Publishers, vol. 2, p. 623-688.

Le Bas, M.J.; Le Maitre, R.W.; Streckeisen, A. & Zanettin, B. (1986) - A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27(3): 745-750.

Le Pennec, J.L.; Rivera, M.; Rupelle, A.; Cueva, K.; Soncco, Y.& Vela, J. (2016) - Discovery of a large resurgent caldera at Incahuasi, southern Ayacucho Province, Peru. En: Congreso Peruano de Geología, 18, Lima, 2016. *Resúmenes*. Lima: Sociedad Geológica del Perú, 4 p.

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: 51-53.

Luhr, J.F.; Navarro, C.; Connor, C.B. & Connor, L. (2006) - The 1913 VEI-4 Plinian eruption of Volcan de Colima (Mexico): tephrochronology, petrology and plume modeling. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 87(52) Fall Meet. Suppl., Abstract V43B-1786.

Macedo, O. & Taipe, E. (2011) - Observaciones del lahar ocurrido el 17 enero de 2007. En: Mariño, J.; Rivera, M.; Macedo, O.; Masias, P. & Antayhua, Y. Gestión de la crisis eruptiva del volcán Ubinas 2006-2008. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 45: 71-79.

Major, J.J. & Newhall, C.G. (1989) - Snow and ice perturbation during historical volcanic eruptions and the formation of lahars and floods. *Bulletin of Volcanology*, 52(1): 1-27.

Malin, M.C. & Sheridan, M.F. (1982) - Computer-assisted mapping of pyroclastic surges. *Science*, 217(4560): 637-640.

Mamani, M.; Tassara, A. & Wörner, G. (2008) - Composition and structural control of crustal domains in the Central Andes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(3): 13 p. Doi: 10.1029/2007GC001925.

Mamani, M.; Wörner, G. & Sempere, T. (2010) - Geochemical variation in igneous rocks of the Central Andean orocline (13ºS to 18ºS): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space. *Geological Society of America Bulletin*, 122(1-2): 162-182.

Mariño, J. & Thouret, J.C. (2003) - Geología, historia eruptiva y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú). *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, (95): 7-31.

Mariño, J.; Valdivia, D.; Soncco, Y.; Miranda, R. & Machaca, R. (2018) – Estudio de lahares emplazados en el valle de Ubinas (sur del Perú) en febrero del 2016. En: *Hazard and risk mapping – The Arequipa-El Misti case study and other threatened cities*. Clermont-Ferrand: Presses Universitaires Blaise Pascal, Territoires, Hors Série 1, p. 93-98.

Martínez, W. & Cervantes, J. (2001) – *Mapa geológico del cuadrángulo de Pausa*, hoja 31-p, cuadrante III, escala 1:50000. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.

Mason, B. & Moore, C.B. (1982) - *Principles of geochemistry*. 4a. ed. New York: John Wiley & Sons, 344 p.

Mayle. F.E.; Beerling. D.J.; Gosling. W.D. & Bush, M.B. (2004) - Responses of Amazonian ecosystems to climatic and atmospheric carbon dioxide changes since the last glacial maximum. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 359(1443): 499–514.

Miller, C.D. (1989) - Potencial hazards from future volcanic eruptions in California. *U.S. Geological Survey Bulletin*, 1847, 17 p.

Morche, W. & Núñez, S. (1998) - Estudio del riesgo geológico del volcán Sara Sara. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 21, 65 p.

Nakada, S. (2000) - Hazards from pyroclastic flows and surges. En: Sigurdsson, H.; Houghton, B.F.; McNutt, S.R.; Rymer, H. & Stix, J., eds. *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, p. 945-955.

Naranjo, J.; Sigurdsson, H.; Carey, S.N. & Fritz, W. (1986) - Eruption of the Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, on 13 November 1985: tephra fall and lahars. *Science*, 233(4767): 961-963.

Naranjo, J.; Moreno, H. & Banks, N.G. (1993) - La erupción del volcán Hudson en 1991 (46°S), Región XI, Aisén, Chile. *Boletín Servicio Nacional de Geología y Minería*, 44, 50 p.

Neal, C.A.; McGimsey, R.G.; Gardner, C.A.; Harbin, M.L. & Nye, C.J. (1995) - Tephra-fall deposits from the 1992 eruptions of Crater Peak, Mount Spurr Volcano, Alaska: a preliminary report on distribution, stratigraphy, and composition. En: Keith, T.E.C. The 1992 eruptions of Crater Peak vent, Mount Spurr Volcano, Alaska. *U.S. Geological Survey Bulletin,* 2139, p. 65-79.

Norabuena, E.; Dixon, T.H.; Stein, S. & Harrison, C.G.A. (1999) - Decelerating Nazca-South America and Nazca-Pacific plate motions. *Geophysical Research Letters*, 26(22): 3405-3408.

Olchauski, E. (1980) - Geología de los cuadrángulos de Jaqui, Coracora, Chala y Chaparra, Hojas 31-ñ, 31-o, 32-ñ, 32-o. *INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional*, 34, 69 p.

Peccerillo, A. & Taylor, S.R. (1976) - Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area. Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63-81.

Pecho, V. (1983) - Geología de los cuadrángulos de Pausa y Caravelí. *INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional*, 37, 125 p.

Pierson, T.C.; Janda, R.J.; Thouret, J.-C. & Borrero, C.A. (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(1-4): 17-66.

Rivera, M.; Thouret, J.-C. & Gourgaud, A. (1998) - Ubinas, el volcán más activo del sur del Perú desde 1550: geología y evaluación de las amenazas volcánicas. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, (88): 53-71.

Rivera, M. & Mariño, J. (2004) - Volcán Yucamane (sur del Perú): geología, petrología y evaluación preliminar de las amenazas volcánicas. *Boletín Sociedad Geológica del Perú,* (98): 67-84.

Rivera, M. (2010) - *Genèse et évolution des magmas andésitiques à rhyodacitiques récents des volcans Misti et Ubinas (Sud du Pérou)*. Thése Docteur, Université Blaise Pascal-Clermont Ferrand II, 407 p.

Rivera, M.; Thouret, J.-C.; Samaniego, P. & Le Pennec, J.-L. (2014) - The 2006-2009 activity of the Ubinas volcano (Peru): Petrology of the 2006 eruptive products and insights into genesis of andesite magmas, magma recharge and plumbing system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 270: 122-141.

Rivera, M.; Martin, H.; Le Pennec J.-L.; Thouret, J.-C.; Gourgaud, A. & Gerbe, M.C. (2017) - Petro-geochemical constraints on the source and evolution of magmas at El Misti volcano (Peru). *Lithos*, 268 -271: 240-259.

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.

Samaniego, P.; Rivera, M.; Mariño, J.; Guillou, H.; Liorzou, C., et al. (2016) - The eruptive chronology of the Ampato-Sabancaya volcanic complex (Southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research,* 323: 110-128.

Sandeman, H.A.; Clark, A.H. & Farrar, E. (1995) - An integrated tectono-magmatic model for the evolution of the southern Peruvian Andes (13º-20ºS) since 55 Ma. *International Geology Review*, 37(12): 1039-1073.

Schilling, S.P. (1998) - LAHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones. *U.S. Geological Survey, Open File-Report* 98-638, 79 p.

Sébrier, M.; Lavenu, A.; Fornari, M. & Soulas, J.P. (1988) - Tectonics and uplift in Central Andes (Peru, Bolivia and northern Chile) from Eocene to present. *Géodynamique*, 3(1-2): 85-106.

Sigurdsson, H.; Houghton, B.F.; McNutt, S.R.; Rymer H. & Stix, J., eds. (2000) - *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, 1442 p.

Smith, J.A.; Mark, B.G. & Rodbell, D.T. (2008) - The timing and magnitude of mountain glaciation in the tropical Andes. *Journal of Quaternary Science*, 23(6-7): 609-634.

Soncco, Y. (2017) - *Evaluación de peligros volcánicos del volcán Sara Sara.* Tesis Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, 137 p.

Sun, S. & McDonough, W.F. (1989) - Chemical and isotopic systematics of oceanics basalts: implications for mantle composition and processes. En: Saunders, A.D. & Norry, M.J., eds. *Magmatism in the ocean basins*. London: Geological Society, Special Paper 42, p. 313-345.

Szakács A. (1994) - Redefining active volcanoes: a discussion. *Bulletin of Volcanology*, 56(5): 321-325.

Tepley, F.J.; De Silva, S.L. & Salas, G. (2013) - Magma dynamics and petrological evolution leading to the VEI 5 2000 bp eruption of El Misti volcano, southern Peru. J*ournal of Petrology*, 54(10): 2033-2065.

Thouret, J.-C.; Guillande, R.; Huamán, D.; Gourgaud, A.; Salas, G. & Chorowicz, J. (1994) - L'activité actuelle du Nevado Sabancaya (Sud Pérou): reconnaissance géologique et satellitaire, évaluation et cartographie des menaces volcaniques. *Bulletin Société Géologique de France,* 165(1): 49-63.

Thouret, J.-C.; Dávila, J. & Eissen, J.P. (1999) - Largest explosive eruption in historical times in the Andes at Huaynaputina volcano, A.D. 1600, southern Peru. *Geology*, 27(5): 435-438.

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.

Thouret, J.-C.; Juvigné, E.; Mariño, J.; Moscol, M.; Loutsch, I., et al. (2002) - Late Pleistocene and Holocene tephro-stratigraphy and chronology in southern Peru. *Boletín Sociedad Geológica del Perú,* (93): 45-61.

Thouret, J.-C.; Rivera, M.; Wörner, G: Gerbe, M.C.; Finizola, A., et al. (2005) - Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 67(6): 557-589.

Thouret, J.-C.; Ramírez, J.; Gibert, B.; Vargas, C.; Naranjo, J., et al. (2007) – Volcano-glacier interactions on composite cones and lahar generation: Nevado del Ruiz, Colombia, case study. *Annals of Glaciology*, 45(1): 115-127.

Thouret, J.-C.; Jicha, B.R; Paquette, J.L. & Cubukcu, E.H. (2016) - A 25 myr chronostratigraphy of ignimbrites in south Peru: implications for the volcanic history of the Central Andes. *Journal of the Geological Society,* 173(5): 734-756.

Tilling, R.I.; Topinka, L.; & Swanson, D.A. (1990) - *Eruptions of Mount St. Helens: past, present, and future.* Reston, VA: U.S. Geological Survey, 59 p., General Interest Publication.

Tilling, R.I., ed. (1993) - *Apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos,* Santa Fé, Nuevo México, 2-3 julio 1989. [s.l.]: Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos, 125 p.

Tosdal, R.M.; Farrar, E. & Clark, A.H. (1981) - K-Ar geochronology of the late Cenozoic volcanic rocks of the Cordillera Occidental, southernmost Peru. *Journal of Volcanology and Geothermal research*, 10(1-3): 157-173.

Ui, T.; Takarada, S. & Yoshimoto, M. (2000) - Debris avalanches. En: Sigurdsson, H.; Houghton, B.F.; McNutt, S.R., Rymer, H. & Stix, J., eds. *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, p. 617-626.

Valderrama, P.; Roche, O.; Samaniego, P., Van Wyk de Vries, B.; Bernard, K. & Mariño, J. (2016) - Dynamic implications of ridges on a debris avalanche deposit at Tutupaca volcano (southern Peru). *Bulletin of Volcanology,* 78(2): 11 p. doi: 10.1007/s00445-016-1011-x.

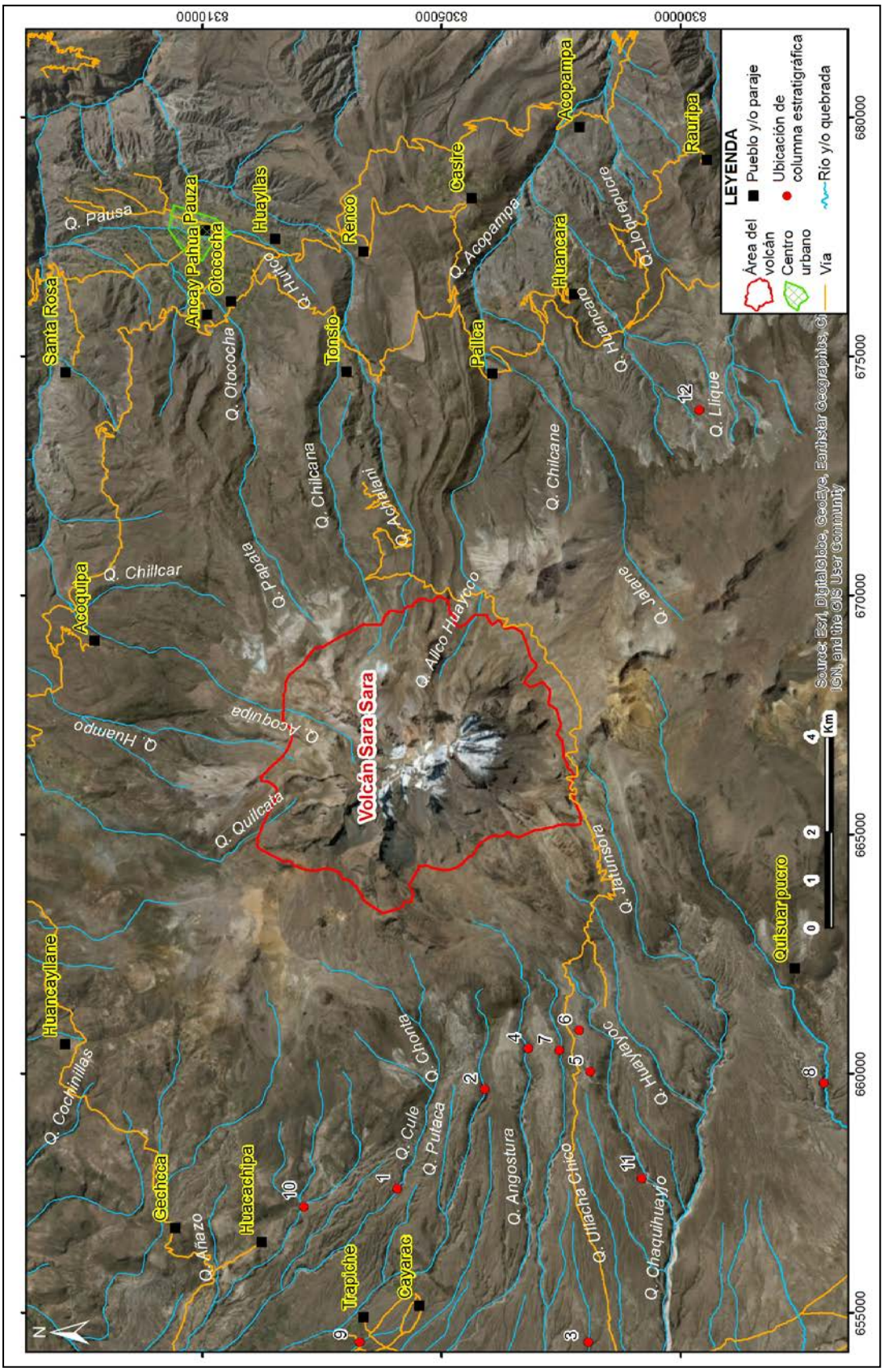
Wasteneys, H.A.H.P. (1990) - *Epithermal silver mineralization with a mid-Tertiary diatreme: Santa Bárbara, Santa Lucía district, Puno, Peru*. PhD thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, 367 p.

Wilson, M. (1989) - *Igneous petrogenesis. a global tectonic approach*. London: Unwin Hyman, 466 p.

Zech, R.; Kull, Ch.; Kubik, P.W. & Viet, H. (2007) - Exposure dating of Late Glacial and pre-LGM moraines in the Cordon de Doña Rosa, Northern/Central Chile (~31ºS). *Climate of the Past*, 3(1): 1-14.

Zech, R.; Smith J. & Kaplan M.R. (2009) - Chronologies of the Last Glacial Maximum and its termination in the Andes (~10-55°S) based on surface exposure dating. En: Vimeux, F.; Sylvestre, F. & Khodri, M., eds. *Past climate variability in South America and surrounding regions: from the Last Glacial Maximum to the Holocene.* Berlin: Springer, Developments in Paleoenvironmental Research 14, p. 61-87.

ANEXOS

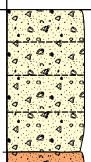
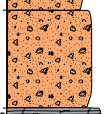
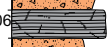
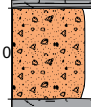
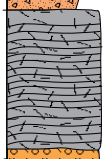
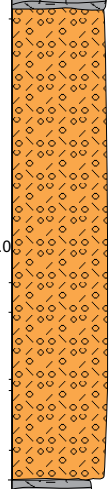
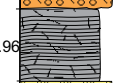
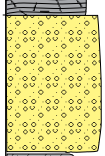
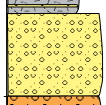
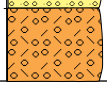


Mapa de ubicación de zonas alrededor del volcán Sara Sara donde se levantaron columnas estratigráficas

Columna Estratigráfica N° 1

Columna estratigráfica de la quebrada Cule

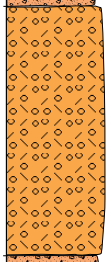
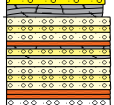
Coordenadas UTM: N 8305917 E 657601 3639 m s. n. m.

ESPESOR(m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
4		Secuencia de depósitos de flujo de bloques y ceniza retrabajados de color ocre amarillento, dispuestos en capas delgadas, algo endurecidos.
5		Depósito de flujo de bloques y ceniza **"Diente de caballo"**, de color gris en la base y rojizo al tope. Los bloques de mayor diámetro de hasta 2 m están en la parte media y superior del depósito. Los bloques contienen cristales de plagioclasa y biotita. La matriz es de tamaño lapilli fino a medio. Sar-16-57
1.7		Depósito de flujo de bloques y ceniza de color gris poco endurecido. En la parte inferior, se distingue un alineamiento de los bloques. Los bloques juveniles presentan cristales de plagioclasa (<1 cm), biotita (<0.5 cm). Contiene líticos lávicos menores de 8 cm.
0.06		Seis capas pequeñas de ceniza fina y gruesa de color ocre y gris.
1.10		Depósito de flujo de bloques y ceniza con fragmentos tamaño lapilli fino, masivo, de color gris. Los bloques juveniles son de textura porfirítica y contienen cristales de plagioclasa y biotita.
4.0		Depósito de capitas de ceniza gris estratificadas de color ocre claro, tipo oleadas piroclásticas. Los niveles son casi sueltos.
14.0		Depósito de flujo de pómez y ceniza "**Culicotomana"** de color ocre claro, bastante endurecida. Las pómez miden menos de 6 cm y están en ~70 %, mientras que los fragmentos líticos miden menos de 3 cm y están en ~15 % en volumen. Las pómez son livianas y contienen cristales de plagioclasa y biotita. El tope está enriquecido con pómez. Sar-16-56
0.96		Intercalación de niveles de ceniza y lapilli fino con apariencia de oleadas piroclásticas.
2.3		Depósito de caída de lapilli de pómez **"Cayarac"**, nivel superior, el cual está medianamente sorteado. Las pómez son livianas, y miden menos de 12 cm. Estas contienen cristales de plagioclasa y biotita. Hay matriz constituida de cristales de plagioclasa, biotita y lapilli fino. También contiene fragmentos líticos oxidados menores de 6 %, y algunos pocos hidrotermalizados.
0.6		Intercalación de niveles finos de lapilli de pómez fino y ceniza.
1.2		Depósito de caída de lapilli de pómez **"Cayarac"**, nivel inferior, el cual es masivo y poco sorteado. Las pómez son livianas, poco vesiculadas, y miden menos de 7 cm. Estas pómez contienen cristales de plagioclasa y biotita. Hay matriz constituido de cristales de plagioclasa, biotita y lapilli fino. También se distinguen líticos lávicos oxidados menores de 6 %, y algunos líticos hidrotermalizados (2 %).
1.0		Depósito de flujo de pómez y ceniza **"Jatunsora"**, de color ocre, rico en fragmentos líticos y pómez. Las pómez son redondeadas y miden menos de 8 cm. El depósito tiene una matriz tamaño ceniza, y es endurecida.

Columna Estratigráfica N° 2

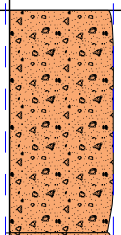
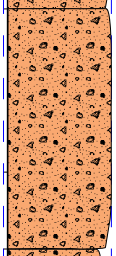
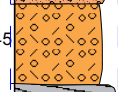
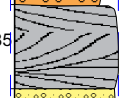
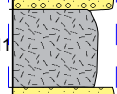
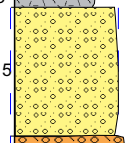
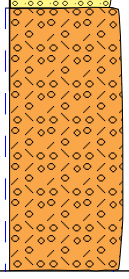
Columna estratigráfica de la quebrada Putaca (sector oeste del Sara Sara)

Coordenadas UTM: N 8304092 E 659677

ESPESOR(m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
23		Depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza **"Ullacha"** de color gris claro, que contiene dos tipos de bloques juveniles. Los primeros corresponden a bloques densos de color gris claro(~20 %). Los otros corresponden a bloques menos densos de color blanquecinos, vesiculados tipo "pómez" (~30 %). Los bloques contienen cristales de plagioclasa y biotita. La matriz es de ceniza de grano medio. Muestras (SAR-16-29 y SAR-16-30).
15		Depósito de **flujo piroclástico de pómez y ceniza "Angostura superior".** El depósito es masivo, de color blanquecino y se encuentra ligeramente endurecido. (Muestra SAR-16-31)
36		Depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza "**Diente de caballo**". El depósito es masivo, de color gris claro y contiene bloques muy grandes de hasta 2 m. Los bloques juveniles son porfiríticos y densos. La matriz de ceniza de grano medio.
5		Intercalación de niveles de ceniza de grano fino y niveles de lapilli de pómez. En el tope, los niveles de lapilli de pómez se encuentran oxidados. Los niveles de pómez tienen espesores de hasta 10 cm, mientras que los niveles de ceniza tienen hasta 30 cm de espesor.
6		Depósito de **caída de lapilli de pómez**, ligeramente endurecido, de color amarilllo. El depósito presenta intercalación con algunos niveles de ceniza y lapilli fino oxidados. Muestra (SAR-16-28)
> 4		Depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza **"Culicotoma"**. Las pómez son vesiculadas y miden hasta 3 cm. Los fragmentos líticos son frescos y oxidados y se encuentran en ~20 %, mientras que los fragmentos líticos oxidados se encuentran en ~5 % y son de color vino. Las pómez contienen cristales de plagioclasa y biotita. El depósito presenta un enriquecimiento de líticos al tope y también presenta chimeneas de elutriación.

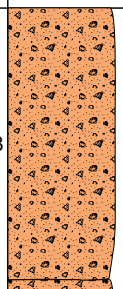
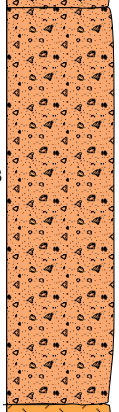
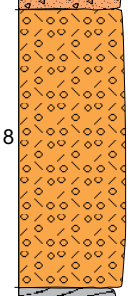
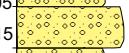
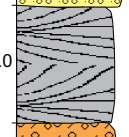
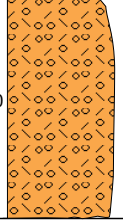
Columna Estratigráfica N° 3

Columna estratigráfica en quebrada S/N al oeste del volcán Sara Sara
Coordenadas UTM: N 8302343 E 653833 3464 m s. n. m.

ESPESOR(m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
6.0		Depósito de flujo de bloques y ceniza “**Ullacha**” de color ocre, con bloques juveniles que miden hasta 40 cm de diámetro. Los bloques son porfiríticos de color ocre claro. El depósito está ligeramente endurecido con gradación inversa. Algunos líticos lávicos se encuentran oxidados. (Muestra Sar-16; 10a, 10b, 10c)
6.0		Depósito de flujo de bloques y ceniza “**Diente de caballo**” con pocos fragmentos líticos lávicos porfiríticos. Los bloques juveniles contienen cristales de plagioclasa y biotita. Los líticos están incluidos dentro de una matriz fina ligeramente endurecida.
0.30		Depósito de flujo de bloques y ceniza. Los bloques son bastante pequeños.
0.45		Depósito de flujo de pómez y ceniza de color gris, algo endurecido. Depósito rico en líticos y cristales. Los líticos miden menos de 1 cm.
0.85		Depósito de oleada piroclástica, con niveles delgados de ceniza gruesa y lapilli fino, el cual presenta estratificación oblicua.
0.41		
0.1		Capitas de ceniza gris verdosa.
2.3		Depósito de caída de lapilli de pómez **“Cayarac”** con gradación normal. El depósito está bien sorteado. Las pómez miden hasta 9 cm de diámetro. Los fragmentos líticos están entre 8-10 %. En la base se distingue una capa de lapilli muy fino con cristales y fragmentos líticos lávicos.
0.11		Depósito de ceniza co-ignimbrítica que contiene pómez fibrosas hasta 6 cm
0.4		Depósito de caída de lapilli de pómez fino. Las pómez miden hasta 2 cm de diámetro. Los fragmentos líticos están entre 20-25 % de concentración.
0.3		Capa de ceniza fina gris con algunas pómez riolíticas de hasta 2 cm de diámetro.
1.15		Depósito de caída de lapilli de pómez con líticos lávicos frescos, pocos fragmentos oxidados y algunos hidrotermalizados. Las pómez son ligeramente fibrosas y presentan vesículas alargadas. Estas contienen cristales de plagioclasa y biotita.
6		Depósito de flujo de pómez y ceniza “**Jatunsora**” de color ocre, consolidado y masivo. Contiene pómez poco densas y algo fibrosas. Las pómez son subangulosas y subredondeadas que miden hasta 5 cm de diámetro, y contiene cristales de plagioclasa y biotita. Asimismo, el depósito contiene fragmentos liticos lávicos de hasta 8 cm de diámetro. Las pómez están entre 20-25 %, mientras que los fragmentos líticos están entre 10-15 %, y 60-65 % de matriz.

Columna Estratigráfica N° 4

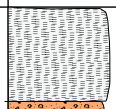
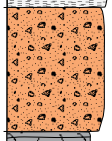
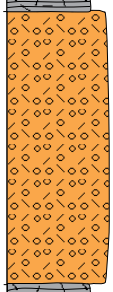
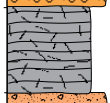
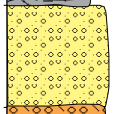
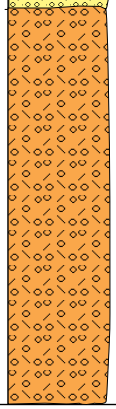
Columna estratigráfica de la quebrada Angostura
Coordenadas UTM: N 8303182 E 660530 3887 m s. n. m.

ESPESOR(m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
8		Depósito de flujo de bloques y ceniza "**Ullacha**" de color gris, masivo y endurecido. Los bloques juveniles son densos, porfiríticos y miden hasta 0.8 m de diámetro.
18		Depósito de flujo de bloques y ceniza "**Diente de caballo**" de color gris, masivo, endurecido y mal sorteado. Los bloques juveniles son densos, porfiríticos y miden hasta 1 m de diámetro. La matriz esta conformada por ceniza.
		.
8		Depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza "**Angostura superior"**, endurecido y de color gris claro. La matriz es de tamaño ceniza y lapilli fino. Los fragmentos líticos son menores de 8 cm y predominan los de 2 cm. En la parte inferior del depósito existe una concentración de pómez que miden hasta 15 cm y líticos de hasta 10 cm de diametro de colores grises y de textura porfirítica.
0.15		Depósito de oleada piroclástica, seudoestratificado, con niveles de lapilli de pómez finos y líticos.
0.62		Depósito de flujo de ceniza masivo, con algunas pómez. Las pómez son menores a 6 cm de diametro. Ellas son redondeadas, mientras que los líticos son subredondeadas.
0.05		Depósito de caída de lapilli de pómez de color café.
0.15		Depósito de caída de lapilli de pómez. Las pómez miden hasta 10 cm de diámetro. Existen escasos fragmentos líticos, algunos están oxidados.
0.05		Depósito de caída de lapilli de pómez fino de color café.
1.2		Depósito de caída de lapilli de pómez, el cual contiene dos familias de pómez, unas que miden entre 3 a 11 cm y otras de tamaños milimétricos a centimétricos. Los líticos predominan en la base (15-20 %). La pómez contiene biotita, anfíbol y plagioclasa. En la base se distingue un nivel rico en líticos grises porfiríticos y afaníticos, de composición andesítica y algunos están oxidados. Sar-15-60
3.0		Depósito de oleada piroclástica, con intercalación de capas de ceniza y lapilli de pómez finos. Las pómez son de color blanquecino, ligeramente fibrosas y contiene cristales (60-70 %) de plagioclasa < 0.4 cm , anfíbol< 1mm y biotita < 1.5 mm.
5.0		Depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza "**Jatunsora"**, masivo, gris y de granulometría fina. La matriz está constituida de ceniza gruesa. El depósito contiene pocos fragmentos líticos oxidados (< 8 cm). Sar-15-61

Columna Estratigráfica N° 5

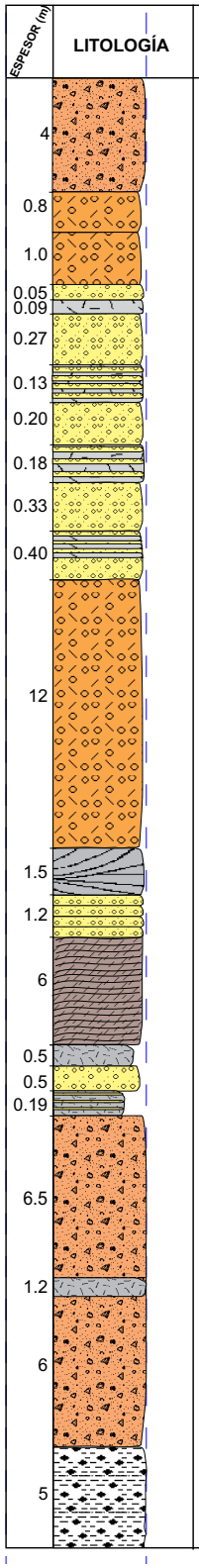
Columna estratigráfica del norte de la quebrada Chaquihuayco

Coordenadas UTM: N 8301882 E 660045 3891 m s. n. m.

ESPESOR(m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
3.0		Sedimentos fluvioglaciares
5.0		Depósito de flujo de bloques y ceniza “Ullacha”. Depósito ligeramente endurecido de color ocre a rosado. Los bloques juveniles son densos, blanquecinos que miden hasta 2 m diámetro. Hay una gran concentración de fragmentos líticos (50-60%).
		Depósito de oleada piroclástica, caracterizada por presentar una intercalación de capas delgadas de lapilli de pómez fino y ceniza gruesa.
15		Depósito de flujo de pómez y ceniza **“Angostura superior”**, de composición riolítica y de color gris claro. Depósito masivo, casi granular, que contiene pómez densos poco vesiculados (Sar-17-40). El depósito está moderadamente sorteado y bastante endurecido.
2.0		Depósito de oleada piroclástica, caracterizada por una intercalación de capas delgadas de lapilli de pómez fino, con estratificación delgada
10		Depósito de flujo de bloques y ceniza “Diente de caballo”, con matriz de color gris claro. El depósito es algo endurecido y presenta dos niveles superior e inferior. El nivel superior del depósito presenta facies más finas con pocos bloques que miden hasta 60 cm. El nivel inferior contiene mayor cantidad de bloques lávicos porfiríticos.
4		Depósito de oleada piroclástica, con estratificación subhorizontal y cruzada
2		Depósito de caída de lapilli de pómez de composición riolítica
12		Ignimbrita “Jatunsora” de color ocre claro, con un tope de color rosáceo (Sar-15-72). El depósito contiene pómez de color blanquecino, que mide hasta 10 cm de diámetro, son vesiculadas y porfiríticas. La matriz es granular, enriquecida de cristales de plagioclasa y biotita.

Columna Estratigráfica N° 6

Columna estratigráfica quebrada Ullacha
Coordenadas UTM: N 8302117, E 660910, 3975 m s. n. m.



ESPESOR (m)	DESCRIPCIÓN
4	Depósito de flujo de bloques y ceniza **"Ullacha"**. Los bloques juveniles son ligeramente densos y vesiculados. Estos son subredondeados y miden de hasta 2 m de diámetro. El depósito es pobre en fragmentos líticos lávicos, tiene una matriz de ceniza gruesa de color ocre. Sar-16-67
0.8	Depósito de flujo de pómez y ceniza de color gris, masivo y algo homogéneo. Se caracteriza por contener menos del 10 % de pómez. Las pómez contienen cristales de biotita y plagioclasa. En la base, es poco más enriquecido en fragmentos líticos lávicos de tamaños centimétricos.
1.0	Depósito de flujo de pómez y ceniza de color gris claro. Presenta una matriz de ceniza media a gruesa. Contiene algunos líticos lávicos oxidados <1.5 cm.
0.05	Caída de lapilli de pómez color gris claro con líticos oxidados de color rojizo. Las pómez miden hasta 1 cm.
0.09	Depósito de ceniza gruesa rica en cristales de color ocre con tope rojizo.
0.27	Depósito de caída de lapilli de pómez de color rojizo. Las pómez miden hasta 4 cm de diámetro, y contienen cristales de biotita y plagioclasa. Presenta ligera gradación normal.
0.13	Ocho niveles delgados de ceniza y lapilli fino de tamaño centimétrico de color marrón. Presentan cristales libres de biotita y plagioclasa.
0.20	Depósito de caída de lapilli de pómez con una capita de ceniza gruesa, presenta una grano-clasificación normal, rico en líticos lávicos grises (20 - 30 %). Sar-15-68
0.18	Cinco niveles de ceniza gruesa y lapilli fino de color gris, los cuales tienen espesores centimétricos, y presentan buen sorteo.
0.33	Depósito de caída de lapilli de pómez con líticos lávicos grises. El depósito presenta grano-clasificación inversa. Las pómez miden hasta 2.2 cm y contienen cristales de biotita y plagioclasa.
0.40	Depósito de caída de lapilli de pómez con niveles delgados de ceniza de color ocre. Las pómez miden hasta 3 cm. El depósito es rico en líticos lávicos frescos y oxidados.
12	Depósito de flujo de pómez y ceniza de color ocre y masivo. Presenta poco porcentaje de pómez (10-15 %) que miden entre 2 a 6 cm de diámetro. Las pómez contienen cristales de plagioclasa, anfibol, biotita. Además presenta fragmentos líticos lávicos grises que están entre 10 a 20 %, de tamaño centimétrico, algunos están oxidados. Presenta una matriz de lapilli fino a ceniza gruesa. Las pómez son subangulosas, poco vesiculadas y otras son fibrosas. Los fragmentos líticos miden hasta 10 cm de diámetro. Algunos son afaníticos y otros porfiríticos. Sar-15-69
1.5	Depósito de flujo de pómez y ceniza dispuesto en capas delgadas. Presenta bloques de pómez poco vesiculadas.
1.2	Depósito de caída de lapilli de pómez fino estratificados
6	, Depósito fluvioglaciar constituido de arenas sueltas, seudoestratificados, dispuestas en niveles delgados
0.5	Depósito de caída de lapilli de pómez fino, ligeramente estratificado
0.5	Depósito de caída de lapilli de pómez, enriquecido en fragmentos líticos lávicos
0.19	Niveles de ceniza gris y lapilli fino
6.5	Depósito de flujo de bloques y ceniza **"Diente de caballo"**. Los bloques juveniles son ligeramente densos y poco vesiculados. Estos son subangulosos y miden de hasta 1 m de diámetro. El depósito es pobre en fragmentos líticos lávicos, y está constituido de una matriz de ceniza gruesa de color ocre.
1.2	
6	
5	Depósito de flujos hiperconcentrados dispuesto en niveles delgados. El depósito es estratificado y suelto.

Columna Estratigráfica N° 7

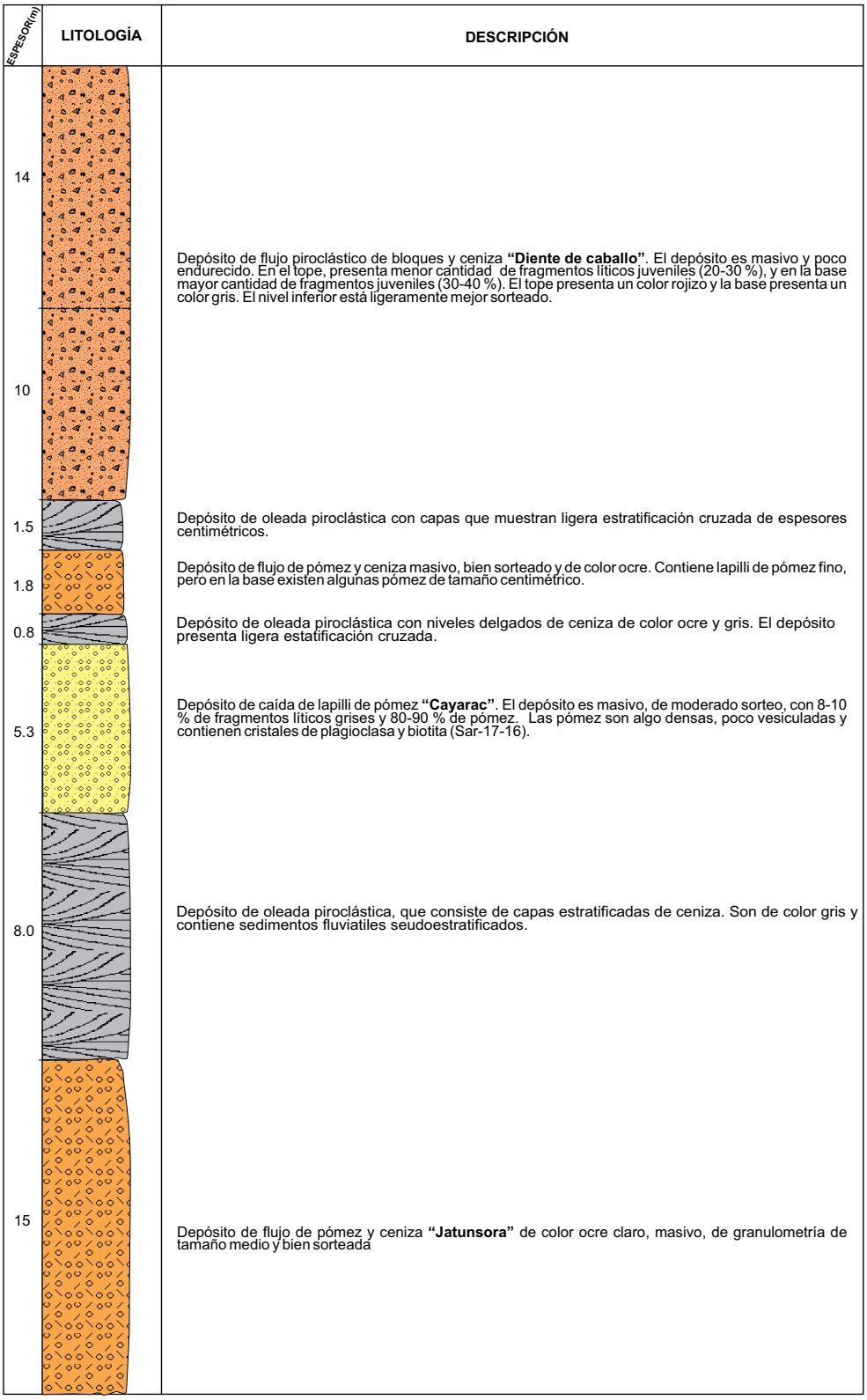
Columna estratigráfica quebrada Chaquihuayco

Coordenadas UTM: N 8296809 E 659172 3618 m s. n. m.

ESPESOR (m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
8.0		Depósito de flujo de bloques y ceniza "**Ullacha**", de color gris. En la base, se distingue un alto contenido de bloques juveniles subangulosos a subredondeados de hasta 45 cm de diámetro. Dichos bloques son fibrosos y contienen cristales de plagioclasa y biotita. Los líticos son lávicos y miden menos de 15 cm. Sar-15-58.
0.82		Depósito de caída de lapilli de pómez "**Ullacha**", que consiste en una Intercalación de niveles de ceniza gruesa de color gris con capas de lapilli de pómez fino de color gris claro.
8.0		Depósito de flujos hiperconcentrados, seudoestratificados, que contienen pómez de color gris claro y grava y arena.
0.20		Capa de lapilli fino a ceniza gruesa de color gris
0.47		Depósito de caída de lapilli de pómez. La pómez contienen fenocristales de plagioclasa y biotita. El depósito es rico en líticos lávicos porfiríticos. Algunos líticos están oxidados e hidrotermalizados. Sar-16-15
25		Depósito de flujo de bloques y ceniza "**Diente de caballo**" de tonalidad rojiza. El depósito es poco endurecido y masivo. La matriz es de grano fino a grueso, y contiene bloques juveniles grises de textura porfirítica que miden hasta 3 m. Los bloques más grandes predominan en la parte media y la base del depósito.
4.0		Depósito de lahar con bloques dispersos en una matriz fina. Algunos bloques miden más de 60 cm.
2.0		Depósito de oleada piroclástica, caracterizada por presentar una intercalación de niveles centimétricos de ceniza fina de color gris
8		Depósito de flujo de pómez y ceniza **"Jatunsora"**, ligeramente consolidado de color ocre claro. El depósito presenta un buen sorteo y tiene un aspecto sacaroso. En la parte inferior se distingue un alto contenido de fragmentos líticos lávicos. Los líticos son porfiríticos y afaníticos. Algunos miden hasta 13 cm de diámetro. Existen fragmentos líticos oxidados y alterados (menos de 1 %). Las pómez miden hasta 6 cm de diámetro, estas contienen cristales de plagioclasa y biotita. Predominan las pómez de 3 a 6 mm. El depósito presenta una gradación normal. Sar-15-59 .

Columna Estratigráfica N° 8

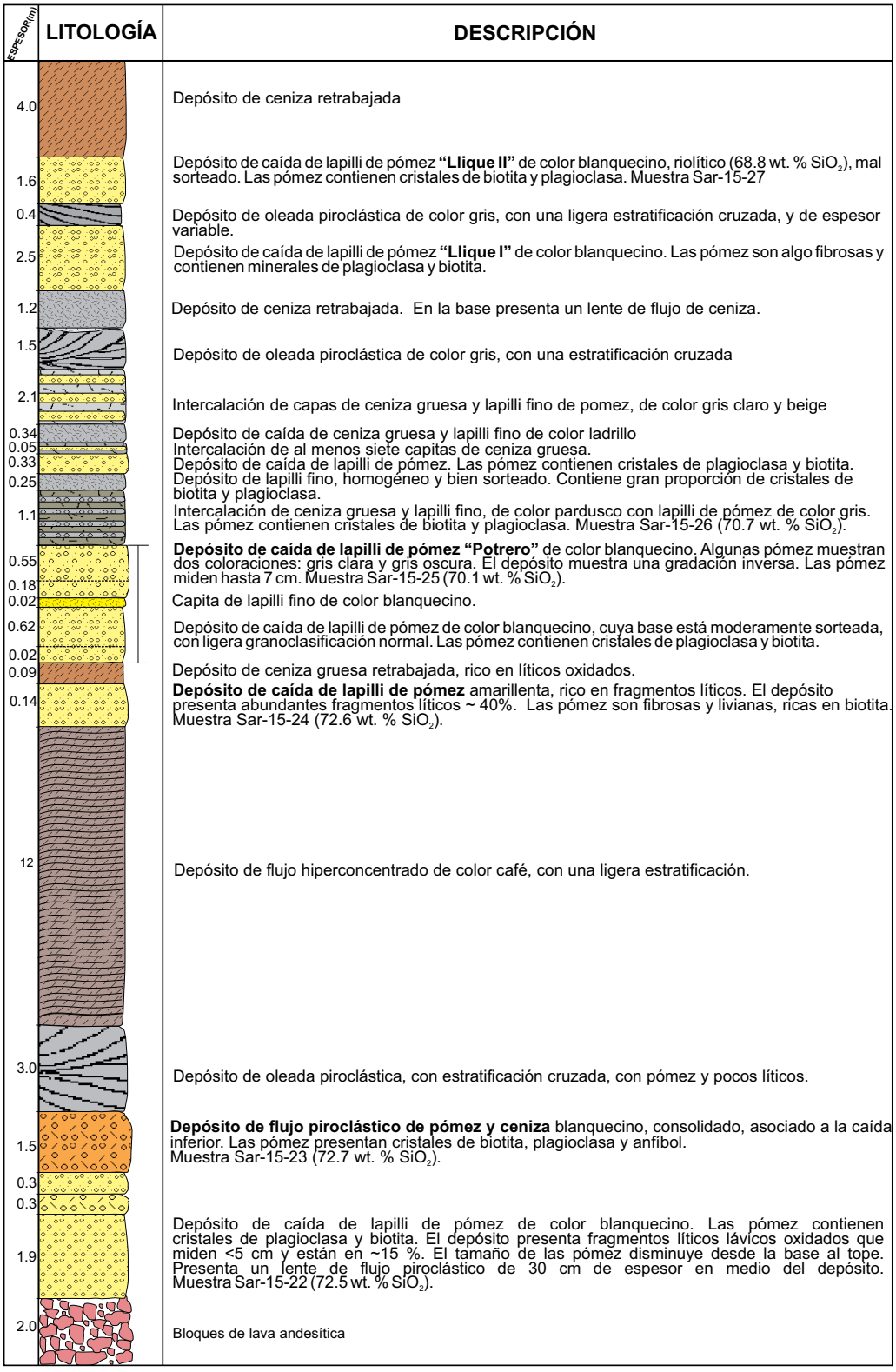
Columna estratigráfica de la quebrada Quenchupa
Coordenadas UTM: N 8297002 E 659803 3663 m s. n. m.



ESPESOR(m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
14		Depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza **"Diente de caballo"**. El depósito es masivo y poco endurecido. En el tope, presenta menor cantidad de fragmentos líticos juveniles (20-30 %), y en la base mayor cantidad de fragmentos juveniles (30-40 %). El tope presenta un color rojizo y la base presenta un color gris. El nivel inferior está ligeramente mejor sorteado.
10		
1.5		Depósito de oleada piroclástica con capas que muestran ligera estratificación cruzada de espesores centimétricos.
1.8		Depósito de flujo de pómez y ceniza masivo, bien sorteado y de color ocre. Contiene lapilli de pómez fino, pero en la base existen algunas pómez de tamaño centimétrico.
0.8		Depósito de oleada piroclástica con niveles delgados de ceniza de color ocre y gris. El depósito presenta ligera estatificación cruzada.
5.3		Depósito de caída de lapilli de pómez **"Cayarac"**. El depósito es masivo, de moderado sorteo, con 8-10 % de fragmentos líticos grises y 80-90 % de pómez. Las pómez son algo densas, poco vesiculadas y contienen cristales de plagioclasa y biotita (Sar-17-16).
8.0		Depósito de oleada piroclástica, que consiste de capas estratificadas de ceniza. Son de color gris y contiene sedimentos fluviatiles seudoestratificados.
15		Depósito de flujo de pómez y ceniza **"Jatunsora"** de color ocre claro, masivo, de granulometría de tamaño medio y bien sorteada

Columna Estratigráfica N° 9

Columna del Sector de Huancara, Sureste del Sara Sara
Coordenadas UTM: N 8299594 E 673880; 4061 m s. n. m.



Base de datos geoquímicos

Periodo	L. TACAZA	L. TACAZA	L. TACAZA	L. TACAZA	C.V. QUIHUAR	L. TACAZA	L. TACAZA	SS I	SS I	SS I	SS I	SS I	SS I	SS I	SS I	SS I	SS I	SS I	SS II	SS II
Edad	Paleógeno	Paleógeno	Pleistoceno	Pleistoceno	Paleógeno	Paleógeno	Paleógeno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno
Localización	Flanco SE	Flanco NE	Flanco S	Flanco S	Flanco SE	Flanco NO	Flanco SE	Flanco E	Flanco E	Flanco SO	Flanco SO	Flanco SO	Flanco SE	Flanco SE	Flanco SE	Flanco SE	Flanco E	Flanco E	Flanco E	Flanco NO
N	8302994	8310233	8302334	8302512	8298999	8313268	8301188	8308379	8308379	8303352	8303121	8302767	8303528	8303241	8302781	8304491	8305090	8305086	8304600	8306446	8307923
E	675150	675781	665749	666247	672846	654316	675520	679898	679898	665270	665418	665675	668375	667838	667442	668526	667829	667813	667800	673745	653190
Tipo de roca	Lava andesítica	Lava andesítica	Lava andesítica	Lava andesítica	Lava andesítica	Subvolcánica andesítica	Lava andesítica	P.F de bloques y ceniza riolítica (Avalancha)	P.F de bloques y ceniza riolítica (Avalancha)	Lava dacítica	Lava dacítica	Lava dacítica	Lava dacítica	Lava dacítica	Lava dacítica	Lava dacítica	Lava dacítica	Lava dacítica	Lava dacítica	P. F. de bloques y ceniza riolítica	P. F. de pómez y ceniza riolítica
	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	INGEMMET	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA
Muestra	**Sar-15-01**	**Sar-15-03**	**Sar-15-10**	**Sar-15-11**	**Sar-15-21**	**Sar-15-33**	**Sar-15-62**	**Sar-15-06**	**Sar-15-06B**	**Sar-15-38**	**Sar-15-39**	**Sar-15-40**	**Sar-15-41**	**Sar-15-43**	**Sar-15-44**	**Sar-15-50**	**Sar-15-51**	**Sar-15-52**	**Sar-15-53**	**Sar-15-07**	**Sar-35**
SiO_2	59.7	55.7	61.2	61.0	57.1	56.1	54.8	70.5	70.1	63.6	63.7	65.3	66.7	64.5	64.5	65.1	64.4	66.0	67.0	69.6	67.3
Al_2O_3	16.7	17.6	17.2	17.1	18.3	17.2	17.8	15.0	15.2	16.3	16.1	15.9	15.9	16.6	16.8	16.3	15.3	15.6	14.8	15.1	14.2
Fe_2O_3	6.1	6.0	5.5	5.2	7.2	6.9	6.6	2.1	2.3	3.9	3.8	3.6	2.8	3.7	3.6	3.8	3.7	3.6	3.9	2.4	2.3
MgO	2.59	2.73	2.24	2.35	3.07	3.17	3.33	0.55	0.64	1.44	1.36	1.24	1.09	1.47	1.35	1.45	1.35	1.22	1.19	0.61	0.59
CaO	5.67	4.92	5.48	5.60	6.59	7.33	8.53	2.35	2.50	3.61	3.64	3.42	3.14	3.75	3.78	3.58	3.25	3.21	3.09	2.48	2.10
Na_2O	4.24	3.90	4.23	4.33	4.22	3.60	4.26	4.53	4.55	4.79	4.81	4.74	4.80	5.18	4.91	4.69	4.51	4.90	4.46	4.48	3.70
K_2O	2.41	2.06	2.33	2.23	1.69	2.16	1.83	3.68	3.58	3.09	3.04	3.30	3.14	2.89	3.04	3.24	3.13	3.21	3.46	3.53	3.88
TiO_2	0.91	0.72	0.72	0.68	1.13	0.93	1.01	0.35	0.38	0.66	0.65	0.65	0.49	0.64	0.65	0.67	0.68	0.62	0.66	0.37	0.39
P_2O_5	0.337	0.271	0.201	0.212	0.344	0.242	0.340	0.172	0.189	0.300	0.306	0.315	0.237	0.300	0.313	0.302	0.310	0.316	0.305	0.178	0.180
MnO	0.129	0.072	0.093	0.068	0.117	0.101	0.120	0.042	0.045	0.059	0.057	0.052	0.050	0.056	0.057	0.058	0.054	0.049	0.055	0.040	0.046
LOI	1.13	5.52	0.90	1.40	1.30	1.54	0.70	0.37	0.32	0.86	0.86	0.21	0.19	0.82	0.89	1.28	1.62	0.38	0.10	0.54	3.91
H_2O PF(1000°)																					
H_2O (110°)																					
TOTAL	99.96	99.55	100.11	100.15	101.08	99.35	99.34	99.66	99.82	98.64	98.29	98.67	98.53	99.88	99.89	100.52	98.35	99.06	99.04	99.30	98.64
Suma sin H2O	98.82	94.03	99.22	98.75	99.79	97.82	98.64	99.29	99.50	97.78	97.43	98.46	98.35	99.06	99.00	99.23	96.73	98.68	98.94	98.75	94.73
SiO_2	60.39	59.25	61.66	61.77	57.22	57.36	55.56	70.97	70.48	65.08	65.33	66.31	67.82	65.08	65.16	65.63	66.62	66.86	67.69	70.48	71.04
Al_2O_3	16.94	18.76	17.36	17.31	18.33	17.63	18.06	15.15	15.27	16.69	16.57	16.12	16.15	16.73	16.98	16.42	15.81	15.85	15.00	15.27	15.03
Fe_2O_3	6.18	6.38	5.56	5.26	7.26	7.07	6.70	2.11	2.31	3.96	3.86	3.65	2.87	3.78	3.62	3.85	3.83	3.60	3.94	2.41	2.44
MgO	2.62	2.90	2.25	2.38	3.08	3.24	3.38	0.56	0.64	1.47	1.40	1.26	1.11	1.48	1.36	1.46	1.40	1.24	1.21	0.62	0.62
CaO	5.74	5.23	5.52	5.67	6.60	7.50	8.65	2.37	2.52	3.70	3.74	3.47	3.19	3.79	3.82	3.61	3.36	3.25	3.12	2.51	2.22
Na_2O	4.29	4.15	4.26	4.38	4.23	3.68	4.32	4.57	4.57	4.90	4.94	4.81	4.88	5.22	4.96	4.72	4.67	4.96	4.51	4.54	3.90
K_2O	2.44	2.19	2.35	2.26	1.69	2.21	1.86	3.71	3.59	3.16	3.12	3.35	3.20	2.92	3.07	3.27	3.24	3.25	3.49	3.57	4.09
TiO_2	0.92	0.77	0.73	0.69	1.14	0.95	1.02	0.35	0.39	0.68	0.67	0.66	0.49	0.64	0.66	0.68	0.70	0.62	0.67	0.38	0.41
P_2O_5	0.34	0.29	0.20	0.21	0.34	0.25	0.34	0.17	0.19	0.31	0.31	0.32	0.24	0.30	0.32	0.30	0.32	0.32	0.31	0.18	0.19
MnO	0.13	0.08	0.09	0.07	0.12	0.10	0.12	0.04	0.04	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.04	0.05
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
ppm																					
Rb	61	46	62	61	29	74.4	47	83	87	82.6	84.2	94.7	95.5	79.4	87.6	87.0	88.0	91.6	101.1	94	93.4
Sr	686	580	606	613	784	658	706	475	504	744	772	724	590	781	782	730	689	673	623	478	439
Y	14.5	16.4	15.2	16.0	20.7	29.0	14.0	6.5	7.2	8.1	7.7	7.7	9.5	9.1	8.0	8.4	7.2	8.5	7.0	7.4	6.9
Zr	137	157	65	61	129	87	132	60	95	157	162	173	72	141	155	169	150	159	126	67	103
Nb	7.8	7.4	4.8	3.8	8.6	5.4	6.4	7.1	9.4	8.8	9.9	9.5	10.3	8.1	9.7	8.3	10.0	9.7	10.2	9.0	8.6
Ba	851	863	717	723	870	692	671	1053	1048	1187	1215	1219	996	1138	1229	1203	1152	1183	1202	1008	1073
La	28	25	20	21	36	42.7	35	22	24	37.0	37.5	39.4	26.3	36.8	35.8	35.0	35.0	34.4	35.3	26	24.6
Ce	61	51	44	41	61	47.3	53	51	52	73.8	73.9	77.8	53.6	69.9	74.5	74.3	76.5	68.7	75.5	54	54.1
Nd	29	24	21	23	36	40.7	26	20	21	33.3	33.4	35.2	24.8	30.5	33.0	32.4	33.9	30.0	32.2	22	23.6
Sm	5.1	4.3	4.7	4.6	7.1	7.7	4.8	3.4	3.8	5.4	5.4	5.8	4.6	5.3	5.8	5.4	5.7	4.9	5.9	4.3	4.3
Eu	1.48	1.16	1.05	1.06	1.84	1.68	1.30	0.93	0.82	1.16	1.36	1.37	1.08	1.29	1.24	1.27	1.32	1.23	1.35	0.85	0.84
Gd	4.2	3.9	3.9	4.1	5.9	6.9	3.8	2.5	2.7	3.5	3.2	4.0	3.3	3.4	3.7	3.9	3.6	3.7	3.7	2.7	2.7
Dy	2.7	3.1	2.9	3.0	3.9	4.6	3.0	1.5	1.4	1.8	1.8	1.9	1.7	1.8	1.7	1.9	1.9	1.8	1.8	1.5	1.7
Er	1.7	1.4	1.1	1.3	1.7	2.2	1.5	0.7	0.5	0.2	0.8	0.6	0.8	0.7	0.5	0.3	0.3	0.8	0.4	0.6	1.1
Yb	1.25	1.25	1.09	1.03	1.48	1.86	1.20	0.45	0.40	0.71	0.60	0.65	0.67	0.61	0.66	0.75	0.58	0.54	0.61	0.52	0.64
Sc	10.3	11.9	14.9	14.6	14.8	14.7		3.0	3.2	6.0	5.7	5.2	4.9	5.8	5.4	6.2	7.8	4.9	4.9	3.7	3.6
V	134	138	136	129	166	185	145	36	40	81	79	74	54	77	74	80	88	80	68	41	38
Cr	12	19	24	27	40	30	<1	3	3	11	10	8	8.6	12.9	9	11	9	11.0	9	3	1
Co	16.9	13.9	17.7	14.7	22.1	22.1	20.0	3.4	4.4	9.3	8.9	7.5	5.7	7.9	8.6	9.2	8.7	7.5	9.1	5.3	3.7
Ni	19	13	23	27	23	29	24	3	4	11	10	9	7.1	10.3	9	10	10	8.0	9	3	3
Th	7.1	7.2	6.6	6.4	7.7	10.3	5.5	5.8	6.5	5.0	4.6	5.0	5.9	4.5	5.0	5.0	4.7	4.6	4.7	6.5	6.2
Pr							6.6														

Base de datos geoquímicos

Continuación...

Periodo	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II
Edad	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno
Localización	Flanco O	Flanco O	Flanco O	Flanco NE	Flanco NO	Flanco NO	Flanco NO	Flanco NO	Flanco O	Flanco NO	Flanco O	Flanco N	Flanco E	Flanco E	Flanco NE	Flanco NE	Flanco NE	Flanco O	Flanco NO	Flanco O	Flanco O	Flanco O
N	8305883	8305848	8305883	8313191	8310323	8310323	8310323	8309920	8305805	8308269	8308099	8313418	8307182	8307082	8312720	8312937	8313140	8302535	8309920	8303213	8302503	8303182
E	655788	655800	656788	676532	657396	657396	657396	658023	655817	656739	655663	667100	674007	674093	678191	678247	676552	660492	658023	660286	660215	660530
Tipo de roca	Caida de pómez riolítica	P. F. de bloques y ceniza riolítica	P. F. de pómez y ceniza riolítica	P. F. de pómez y ceniza dacítica	P. F. de pómez y ceniza riolítica	Caida de pómez dacítica	Caida de pómez dacítica	Caida de pómez riolítica	P. F. de pómez y ceniza riolítica	P. F. de pómez y ceniza riolítica	P. F. de pómez y ceniza dacítica	P. F. de pómez y ceniza dacítica	P.F de bloques y ceniza dacítica	P.F de bloques y ceniza dacítica	P.F de bloques y ceniza dacítica	P. F. de pómez y ceniza riolítica	P. F. de pómez y ceniza dacítica	P. F. de pómez y ceniza riolítica	P. F. de pómez y ceniza riolítica	P. F. de pómez y ceniza riolítica	P. F. de pómez y ceniza riolítica	Caída de pómez riolítica
	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA
Muestra	**Sar-15-14**	**Sar-15-13**	**Sar-15-15**	**Sar-15-16**	**Sar-15-28**	**Sar-15-29**	**Sar-15-30**	**Sar-32**	**Sar-15-12**	**Sar-34**	**Sar-36**	**Sar-45**	**Sar-48A**	**Sar-48B**	**Sar-54**	**Sar-56**	**Sar-57**	**Sar-58**	**Sar-31**	**Sar-61**	**Sar-59**	**Sar-60**
SiO_2	69.0	70.7	68.5	68.1	68.0	64.0	64.9	66.2	69.7	69.7	67.6	67.8	66.1	68.6	63.5	69.5	67.4	70.9	70.6	70.6	68.7	67.1
Al_2O_3	14.7	13.8	14.8	15.4	14.8	16.8	16.0	14.9	14.7	13.2	14.4	15.3	15.5	16.0	15.3	14.4	14.7	13.7	13.1	13.3	14.4	14.5
Fe_2O_3	2.2	1.9	2.3	3.1	2.7	2.8	2.5	2.5	2.1	1.7	2.5	2.4	3.0	2.4	4.5	2.7	3.0	1.8	2.0	1.7	2.1	2.4
MgO	0.50	0.51	0.57	0.84	0.52	0.53	0.63	0.59	0.51	0.39	0.85	1.02	1.04	0.68	1.74	0.71	0.74	0.43	0.38	0.38	0.68	0.62
CaO	2.13	1.85	2.33	2.82	1.95	1.98	2.23	2.26	2.28	1.64	2.17	2.31	3.10	2.62	3.95	2.45	2.60	1.81	1.59	1.69	2.15	2.12
Na_2O	3.98	3.95	4.17	4.52	3.37	3.42	3.54	3.74	4.36	3.59	4.42	4.67	4.22	4.61	4.62	4.10	4.14	3.97	3.57	3.78	3.95	3.82
K_2O	3.86	3.96	3.62	3.52	4.07	3.24	3.14	3.61	3.62	4.23	3.97	3.82	3.51	3.53	2.82	3.76	3.72	3.87	4.15	4.02	3.94	3.70
TiO_2	0.33	0.31	0.38	0.53	0.41	0.45	0.43	0.42	0.34	0.27	0.42	0.43	0.48	0.39	0.82	0.47	0.52	0.30	0.29	0.27	0.34	0.42
P_2O_5	0.163	0.161	0.242	0.239	0.178	0.195	0.165	0.198	0.174	0.131	0.184	0.221	0.248	0.183	0.324	0.236	0.245	0.160	0.188	0.176	0.142	0.200
MnO	0.046	0.047	0.047	0.050	0.052	0.050	0.048	0.046	0.047	0.044	0.049	0.052	0.055	0.046	0.061	0.048	0.048	0.046	0.049	0.045	0.046	0.049
LOI	3.08	2.52	2.39	1.33	4.12	6.31	5.85	4.37	2.03	3.33	3.31	1.46	1.38	0.60	0.89	1.25	1.74	2.75	3.06	2.78	2.47	4.29
H_2O PF(1000°)																						
H_2O (110°)																						
TOTAL	99.97	99.71	99.30	100.40	100.19	99.76	99.43	98.84	99.86	98.12	99.96	99.51	98.70	99.78	98.54	99.60	98.84	99.71	98.92	98.76	98.99	99.21
Suma sin H2O	96.90	97.19	96.91	99.07	96.07	93.45	93.58	94.47	97.83	94.79	96.66	98.05	97.32	99.18	97.65	98.35	97.10	96.96	95.86	95.98	96.51	94.92
SiO_2	71.17	72.73	70.67	68.74	70.78	68.48	69.31	70.04	71.28	73.50	69.98	69.16	67.91	69.20	65.07	70.68	69.42	73.17	73.61	73.56	71.21	70.65
Al_2O_3	15.17	14.20	15.24	15.53	15.44	17.96	17.09	15.76	15.01	13.90	14.92	15.62	15.95	16.18	15.64	14.64	15.11	14.09	13.67	13.86	14.96	15.26
Fe_2O_3	2.30	1.95	2.37	3.10	2.80	2.99	2.71	2.69	2.13	1.74	2.62	2.45	3.12	2.45	4.60	2.71	3.09	1.83	2.07	1.78	2.18	2.58
MgO	0.52	0.53	0.59	0.85	0.54	0.57	0.68	0.63	0.52	0.41	0.88	1.04	1.07	0.68	1.78	0.72	0.76	0.45	0.40	0.40	0.70	0.65
CaO	2.20	1.90	2.41	2.84	2.03	2.12	2.38	2.39	2.33	1.73	2.25	2.36	3.19	2.64	4.05	2.50	2.68	1.86	1.66	1.76	2.23	2.24
Na_2O	4.10	4.07	4.30	4.56	3.51	3.66	3.79	3.96	4.46	3.79	4.57	4.76	4.34	4.65	4.73	4.16	4.27	4.09	3.72	3.94	4.09	4.02
K_2O	3.99	4.08	3.73	3.55	4.23	3.47	3.36	3.82	3.70	4.47	4.11	3.90	3.61	3.56	2.89	3.83	3.84	3.99	4.33	4.19	4.08	3.90
TiO_2	0.34	0.32	0.39	0.53	0.43	0.48	0.46	0.45	0.34	0.29	0.44	0.44	0.50	0.39	0.84	0.48	0.53	0.30	0.31	0.29	0.36	0.44
P_2O_5	0.17	0.17	0.25	0.24	0.19	0.21	0.18	0.21	0.18	0.14	0.19	0.23	0.25	0.18	0.33	0.24	0.25	0.17	0.20	0.18	0.15	0.21
MnO	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
ppm																						
Rb	89	104	87	87	105	66	65	80.3	90	110.6	107.5	123.0	95.4	123.2	73.4	105.0	99.2	105.3	106.3	111.9	107.6	84.5
Sr	426	350	447	533	372	402	475	510	442	299	452	455	594	507	744	441	501	341	286	304	404	449
Y	8.1	8.4	8.4	8.7	10.8	11.7	10.2	7.5	8.0	6.0	8.6	9.2	8.0	5.9	6.9	6.5	6.5	7.1	9.0	8.4	6.2	7.2
Zr	62	60	73	125	159	171	128	139	55	71	124	41	157	76	123	120	134	64	62	62	41	139
Nb	8.1	9.8	8.1	7.1	10.6	10.2	10.5	9.0	7.7	9.5	9.5	10.8	8.7	8.6	7.8	8.7	8.7	9.1	10.3	10.0	9.5	9.5
Ba	1052	1076	1015	1092	1181	1178	1202	1069	1044	867	1080	1109	955	1143	951	1091	1046	1119	1061	1055	1006	1142
La	26	26	27	30	33	30	27	23.2	25	20.7	26.2	25.3	25.2	21.0	28.6	25.5	27.6	25.5	23.2	25.1	21.2	25.9
Ce	52	53	58	66	68	69	61	51.9	55	47.0	54.7	52.8	55.3	45.7	62.4	58.7	58.1	53.4	48.6	52.9	45.3	59.3
Nd	23	23	25	28	30	30	26	23.7	22	18.6	23.2	22.5	24.6	19.7	29.0	24.8	26.0	23.2	23.6	23.8	18.5	25.6
Sm	3.8	4.6	3.5	5.2	5.0	6.0	4.7	3.9	3.8	3.2	4.1	4.1	4.2	3.9	6.0	4.7	4.5	4.1	4.7	4.6	3.3	4.5
Eu	0.79	0.71	1.00	1.14	0.89	1.12	0.72	0.89	0.71	0.60	0.95	0.88	1.02	0.93	1.24	1.05	1.05	0.81	0.80	0.84	0.64	0.93
Gd	2.8	2.6	3.1	3.3	3.3	3.9	3.4	2.9	2.9	2.3	2.9	3.0	3.3	2.3	3.2	2.9	3.3	2.9	3.5	3.4	2.5	3.2
Dy	1.7	1.7	1.6	1.8	2.1	2.3	1.8	1.6	1.6	1.5	1.7	1.7	1.8	1.4	1.8	1.5	1.6	1.6	1.7	1.8	1.4	1.6
Er	0.4	0.5	0.9	0.3	1.0	1.0	1.0	0.6	0.5	0.1	0.9	0.6	0.4	0.5	0.2	0.5	0.8	0.4	0.7	0.3	0.4	0.8
Yb	0.45	0.41	0.49	0.66	0.55	0.59	0.53	0.60	0.38	0.63	0.64	0.61	0.73	0.55	0.64	0.58	0.55	0.59	0.77	0.77	0.65	0.61
Sc	3.4	3.5	3.5	3.8	4.0	4.9	4.2	3.4	3.8	3.1	3.8	4.7	5.3	3.9	6.4	3.4	3.2	3.2	3.5	3.3	3.8	3.4
V	38	29	40	63	42	42	39	41	34	26	46	37	59	43	109	52	60	28	32	25	36	39
Cr	4	3	3	4	4	3	3	0	2	1	8.3	4.2	4	2	15	2	2	1	1	0	2	1
Co	3.9	3.6	4.1	5.5	4.7	5.6	5.5	2.9	2.9	2.1	5.2	5.2	6.1	4.7	11.7	5.3	5.4	3.2	3.7	2.2	4.6	3.6
Ni	3	4	6	6	3	5	3	3	3	2	6.0	4.1	6	4	16	5	5	3	3	3	4	3
Th	6.7	6.8	6.2	6.0	7.4	8.1	6.7	4.9	6.4	7.7	6.3	6.2	6.3	6.5	3.8	6.5	5.9	7.0	7.2	7.3	7.3	5.0
Pr																						

Base de datos geoquímicos

Continuación...

Periodo	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS II	SS III	SS III	SS III	SS III
Edad	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno	Pleistoceno
Localización	Flanco NE	Flanco O	Flanco O	Flanco O	Flanco O	Flanco O	Flanco O	Flanco O	Flanco O	Flanco SO	Flanco O	Flanco NO	Flanco SO	Flanco SE	Flanco SE	Flanco SE	Flanco SE
N	8309153	8307425	83020159	8302113	8301844	8301495	8301853	8301428	8300533	8300514	8299957	8310735	8302125	8299752	8299077	8312250	8301025
E	677389	656148	661080	660964	660174	659716	660464	658554	657631	657637	657057	653979	653936	676526	674376	676706	675711
Tipo de roca	P. F. de bloques y ceniza dacítica	P. F. de bloques y ceniza dacítica	P. F. de bloques y ceniza dacítica	P. F. de bloques y ceniza riolítica	P. F. de bloques y ceniza dacítica	P. F. de pómez y ceniza dacítica	P. F. de pómez y ceniza dacítica	P. F. de pómez y ceniza dacítica	P. F. de bloques y ceniza dacítica	P. F. de bloques y ceniza dacítica	P. F. de bloques y ceniza dacítica	P. F. de pómez y ceniza riolítica	P. F. de bloques y ceniza riolítica	Caída de pómez riolítica	Caída de pómez riolítica	Surge dacítico	Caída de pómez dacítica
	INGEMMET	FRANCIA	INGEMMET	INGEMMET	INGEMMET	INGEMMET	INGEMMET	INGEMMET	INGEMMET	INGEMMET	INGEMMET	INGEMMET	INGEMMET	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA	FRANCIA
Muestra	**Sar-15-63**	**Sar-37**	**Sar-15-66**	**Sar-15-67**	**Sar-15-71**	**Sar-15-72**	**Sar-15-69**	**Sar-15-73**	**Sar-15-74**	**Sar-15-75**	**Sar-15-76**	**Sar-16-09**	**Sar-16-11**	**Sar-15-08A**	**Sar-15-08B**	**Sar-15-09**	**Sar-15-17**
SiO_2	62.71	68.8	68.33	68.70	64.53	66.88	67.14	67.15	66.36	66.94	64.47	69.88	72.32	67.1	67.3	66.5	63.9
Al_2O_3	16.7	15.7	15.8	15.0	16.0	15.2	14.9	15.9	16.1	16.3	16.0	13.2	14.2	14.6	14.4	15.3	15.3
Fe_2O_3	3.9	2.4	2.3	1.8	2.3	2.1	2.1	2.0	2.3	2.4	2.7	2.6	2.2	2.5	2.4	2.7	3.8
MgO	1.54	0.83	0.71	0.41	0.80	0.58	0.65	0.46	0.79	0.75	0.91	0.70	0.41	0.53	0.55	0.70	1.50
CaO	5.19	2.67	3.56	2.63	5.17	3.13	3.49	3.01	3.38	4.25	5.62	1.95	2.12	2.24	2.19	2.55	3.60
Na_2O	5.17	4.82	4.98	4.32	4.69	3.89	4.55	4.01	5.12	5.30	4.63	3.11	3.41	4.11	4.01	3.95	4.40
K_2O	2.68	3.32	3.45	3.67	3.78	4.21	3.54	3.76	3.17	3.27	3.16	3.88	3.56	3.50	3.58	3.85	2.91
TiO_2	0.65	0.38	0.36	0.27	0.36	0.32	0.32	0.29	0.36	0.37	0.35	0.36	0.32	0.38	0.37	0.46	0.64
P_2O_5	0.300	0.192	0.170	0.010	0.010	0.010	0.010	0.230	0.230	0.250	0.100	0.110	0.200	0.176	0.184	0.207	0.249
MnO	0.060	0.044	0.040	0.040	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.040	0.040	0.060	0.050	0.044	0.045	0.048	0.057
LOI	0.3	0.55	<0.01	2.67	1.64	2.87	2.5	3.11	1.4	0.1	1.62	3.47	0.85	4.08	4.40	2.89	4.03
H_2O PF(1000°)																	
H_2O (110°)																	
TOTAL	99.22	99.84	99.65	99.56	99.40	99.22	99.25	99.91	99.29	99.91	99.61	99.27	99.69	99.19	99.48	99.19	100.47
Suma sin H2O	98.92	99.28	99.65	96.89	97.76	96.35	96.75	96.80	97.89	99.81	97.99	95.80	98.84	95.11	95.09	96.29	96.44
SiO_2	63.39	69.34	68.57	70.91	66.01	69.41	69.40	69.37	67.79	67.07	65.79	72.94	73.17	70.52	70.75	69.05	66.28
Al_2O_3	16.92	15.86	15.84	15.52	16.41	15.76	15.37	16.40	16.46	16.28	16.37	13.77	14.40	15.36	15.19	15.90	15.90
Fe_2O_3	3.92	2.45	2.28	1.86	2.38	2.18	2.20	2.02	2.37	2.39	2.72	2.67	2.25	2.58	2.57	2.84	3.96
MgO	1.56	0.83	0.71	0.42	0.82	0.60	0.67	0.48	0.81	0.75	0.93	0.73	0.41	0.55	0.58	0.72	1.56
CaO	5.25	2.69	3.57	2.71	5.29	3.25	3.61	3.11	3.45	4.26	5.74	2.04	2.14	2.35	2.30	2.65	3.74
Na_2O	5.23	4.85	5.00	4.46	4.80	4.04	4.70	4.14	5.23	5.31	4.72	3.25	3.45	4.32	4.21	4.10	4.56
K_2O	2.71	3.35	3.46	3.79	3.87	4.37	3.66	3.88	3.24	3.28	3.22	4.05	3.60	3.68	3.77	3.99	3.02
TiO_2	0.66	0.39	0.36	0.28	0.37	0.33	0.33	0.30	0.37	0.37	0.36	0.38	0.32	0.39	0.39	0.47	0.66
P_2O_5	0.30	0.19	0.17	0.01	0.01	0.01	0.01	0.24	0.23	0.25	0.10	0.11	0.20	0.19	0.19	0.22	0.26
MnO	0.06	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
ppm																	
Rb	59	100.6	58	75	97	85	80	100	106	88	69	93	101	70	73	84	67
Sr	656	548	475	398	440	367	404	340	481	452	442	340	461	473	442	491	641
Y	8	7.7	8	9	8	9	8	9	7	7	8	16	9	7.5	7.8	9.4	8.3
Zr	189	122	221	185	170	189	188	193	166	185	160	211	211	174	172	134	138
Nb	7.5	8.6	8.9	10.7	8.8	9.2	9.1	9.8	8.7	8.6	9.2	6.8	6.5	7.9	7.4	9.0	6.5
Ba	842	1133	1004	936	884	826	908	977	912	896	926	1003	1055	1162	1171	1037	979
La	33	25.6	32	31	26	27	30	30	27	29	27	44	50	28	27	26	26
Ce	52	50.6	59	58.8	46.7	49.1	57	60.9	49.2	53.8	51.3	46.4	44.7	56	57	56	56
Nd	24.7	22.6	24.7	25.1	20.3	20.4	23.1	26.4	21.6	23.7	22.4	26.7	23.8	25	24	26	25
Sm	4.3	4.3	4	4.2	3.4	3.6	3.7	4.3	3.7	3.8	3.5	4.5	3.9	4.2	4.1	4.5	4.0
Eu	1.1	0.78	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	1	0.86	0.85	1.02	1.11
Gd	3.1	2.9	2.6	2.8	2.3	2.3	2.5	2.9	2.4	2.6	2.6	3.9	2.9	2.8	2.7	3.5	3.0
Dy	2	1.5	1.8	2	1.6	1.7	1.8	2	1.7	1.8	1.7	2.7	1.9	1.5	1.5	1.8	1.8
Er	0.9	0.5	0.9	1	0.8	0.9	0.8	1	0.8	0.8	0.9	1.4	0.9	0.6	0.1	0.8	0.3
Yb	0.7	0.53	0.7	0.9	0.7	0.8	0.8	0.9	0.7	0.7	0.8	1.2	0.9	0.52	0.53	0.55	0.79
Sc		3.8												3.1	3.1	3.8	5.1
V	82	43	34	25	34	29	27	24	35	38	36	36	33	40	39	49	85
Cr	<1	4.4	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	13	11	2	4	3	11
Co	12	4.5	7	5	6	7	5	6	7	7	7	13	4	3.9	4.1	4.7	9.0
Ni	9	3.8	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	19	<5	3	4	3	12
Th	4.3	5.8	6.1	6.9	5.6	6.4	6.5	7.4	5.4	6.4	6.1	6	6.4	4.4	4.5	6.1	4.5
Pr	6.4		7	7.1	5.6	5.7	6.6	7.4	5.9	6.6	6.2	6.8	6.4				

RELACIÓN DE MAPAS E ILUSTRACIONES

Mapas

Mapa 1 Mapa Geológico del volcán Sara Sara

Mapa 2 Mapa de Peligros del volcán Sara Sara

Figuras

Figura 1.1 (a) Mapa de localización de las zonas volcánicas de Sudamérica: Norte (ZVN), Central (ZVC), Sur (ZVS) y Austral (ZVA), modificado de Stern (2004); (b) Sector norte de la ZVC en el sur del Perú. El volcán Sara Sara está localizado en el extremo norte de la cadena volcánica plio-cuaternaria del sur peruano

Figura 1.2 Mapa de ubicación del volcán Sara Sara y los poblados aledaños a dicho volcán

Figura 1.3 Mapa de cuencas hidrográficas localizadas alrededor del volcán Sara Sara

Figura 1.4 Mapa de atractivos turísticos e infraestructura hotelera localizados alrededor del volcán Sara Sara

Figura 2.1 Mapa geomorfológico del volcán Sara Sara y áreas aledañas

Figura 2.2 Mapa de pendientes del volcán Sara Sara y áreas aledaña

Figura 2.3 Vista del flujo de lava reciente y domo de lava dacítica visible al extremo oriental del volcán Sara Sara

Figura 2.4 Vista de la zona del depósito de avalancha de escombros, al pie del flanco este del volcán Sara Sara (sector cerro Negro)

Figura 2.5 Ladera de depósitos de ignimbritas del Mioceno cubierta por flujos de lavas andesíticas

Figura 2.6 Vista de la quebrada Jatunsora y de la zona de piedemonte, al oeste del volcán Sara Sara

Figura 2.7 Vista del poblado de Pausa, asentado sobre una meseta semiplana disectada por quebradas relativamente profundas en forma de "V"

Figura 2.8 Vista de la zona de colina, constituida de una secuencia de lavas dacíticas, al este del volcán Sara Sara

Figura 2.9 Vista de la zona de piedemonte al suroeste del volcán Sara Sara, constituida de una secuencia de depósitos volcanoclásticos

Figura 2.10 Vista de zonas de ladera constituidas de una intercalación de sedimentos y corrientes de densidad piroclástica asignada como Formación Chocolate

Figura 2.11 Circo glaciar visible en el flanco suroeste del volcán Sara Sara

Figura 2.12 Vista aguas abajo de la quebrada Jatunsora, que corresponde a uno de los tres valles glaciares distinguidos en inmediaciones del volcán Sara Sara

Figura 2.13 Morrenas del Holoceno que afloran al pie del flanco oeste del volcán Sara Sara.

Figura 2.14 Zona de colina observada en el sector de Luicho, al NE del volcán Sara Sara

Figura 3.1 Imagen satelital Aster 2006, resalta las estructuras volcánicas y tectónicas aledañas al volcán Sara Sara.

Figura 3.2 Secuencias de flujos piroclásticos de bloques y cenizas y lahares pertenecientes al Grupo Tacaza, a 10 km al este del volcán Sara Sara

Figura 3.3 Ignimbritas riolíticas pertenecientes a la Formación Alpabamba, en inmediaciones de la localidad de Santa Ana (Pausa)

Figura 3.4 Vista de flujos de lavas subhorizontales del Grupo Barroso sobre los cuales yace el volcán Sara Sara.

Figura 3.5 Vista de una intercalación de depósitos de lahares (flujos de escombros y flujos hiperconcentrados), con algunos niveles de corrientes de densidad piroclástica, a 2 km al NE de la localidad de Quilcata

Figura 3.6 Vista de lavas andesíticas con prismación vertical que afloran en la margen izquierda del río Mirmaca, sector de Mirmaca (norte del poblado de Pausa).

Figura 3.7 Columna estratigráfica generalizada del volcán Sara Sara

Figura 3.8 Imagen satelital con la ubicación de las fotografías tomadas en campo

Figura 3.9 Depósito de flujo de pómez y ceniza, intercalado con secuencias de depósitos volcanoclásticos, al NO del volcán Sara Sara

Figura 3.10 Secuencia de sedimentos volcanoclásticos, lahares y un depósito de flujos de pómez y ceniza, al NO del volcán Sara Sara

Figura 3.11 Depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza "Getccha", cubierto por un depósito de caída de lapilli de pómez, que aflora al noroeste del volcán Sara Sara (sector de Getccha). La picota está como escala a la derecha

Figura 3.12 Depósito de avalanchas de escombros "Renco", ubicado en el sector NE del volcán Sara Sara, que tiene hasta 200 m de espesor.

Figura 3.13 Depósito de avalancha de escombros "Renco", contiene fragmentos de rocas bastante fracturadas y alteradas, de color amarillento y rojizo

Figura 3.14 Depósito de caída de lapilli de pómez "Basal", que aflora a 13 km al SE del volcán Sara Sara.

Figura 3.15 Depósito de ignimbrita "Jatunsora", que aflora a 9 km al SO del volcán Sara Sara, en la quebrada Jatunsora.

Figura 3.16 Depósito de caída de lapilli de pómez "Cayarac", que aflora a 12.5 km de la cima del volcán Sara Sara.

Figura 3.17 Mapa de isópaca de la caída de lapilli de pómez "Cayarac", donde se muestra la variación del espesor con la distancia al volcán

Figura 3.18 Vista del depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza "Huacachipa", a 9 km al noroeste del volcán Sara Sara

Figura 3.19 Depósito de flujo de pómez y ceniza "Mirmaca", cubierto por una secuencia de sedimentos lagunares y flujos piroclásticos de bloques y ceniza, localizado en la margen derecha del río Mirmaca

Figura 3.20 Depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza, visible en la quebrada Culicotomana, localizada a 11 km al noroeste del volcán Sara Sara.

Figura 3.21 Depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza "Angostura", visible en la quebrada epónima, a 7 km al SO de la cima del volcán Sara Sara

Figura 3.22 Depósitos de caída de lapilli de pómez que afloran a 8 km al sureste del volcán Sara Sara: a) depósito "Potrero"; b) depósito de oleada piroclástica "inferior"; c) depósito de caída "Llique I"; d) oleada piroclástica "superior"; y e) depósito de caída "Llique II".

Figura 3.23 Depósito de caída de lapilli de pómez "Llique I", que aflora a 10 km al SE del volcán Sara Sara sobre el depósito de oleada piroclástica "inferior", descrito anteriormente

Figura 3.24 Mapa de isópaca del depósito de caída de lapilli de pómez "Llique I"

Figura 3.25 Depósitos de caída de lapilli de pómez "Llique I" y "Llique II", que afloran a 9 km al SE del volcán Sara Sara.

Figura 3.26 Depósito de caída de lapilli de pómez "Huancara" que aflora a 9.4 km al SE del volcán Sara Sara

Figura 3.27 Depósito de flujo de bloques y ceniza "Pausa" que aflora al extremo sur de la localidad de Pausa, a 12 km al NE del volcán Sara Sara

Figura 3.28 Secuencia de depósitos de corrientes de densidad piroclástica, visibles en la quebrada Jatunsora (8 km al oeste del volcán Sara Sara), donde se resalta el depósito de oleada piroclástica “Jatunsora

Figura 3.29 Depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza “Diente de caballo”, visible a 7 km al oeste del volcán Sara Sara (inmediaciones de la quebrada Chaquihuayjo)

Figura 3.30 Facies de avalancha de escombros, que aflora a 10 km al SE del volcán Sara Sara, en la margen derecha de un afluente de la quebrada Quenchupa, donde mide 8 m de espesor

Figura 3.31 Secuencia piroclástica que aflora en la margen derecha del río Quenchupa (16 km al SO del Sara Sara), en cuyo tope se distingue el depósito de flujo de bloques y ceniza “Diente de caballo”

Figura 3.32 Depósito de flujo de bloques y ceniza “Diente de caballo” que aflora a 15 km al oeste del volcán Sara Sara, donde mide hasta 6.5 m de espesor

Figura 3.33 Depósito de avalancha de escombros sobre el cual se asienta el pueblo de Quilcata; presenta gran cantidad de bloques dispersos en superficie

Figura 3.34 Depósito de avalancha de escombros, en el cual se observa el contacto entre la facies rica en bloques y la facies matriz soportada

Figura 3.35 Vista del depósito de caída de lapilli de pómez “Ullacha” que aflora a 8.8 km al oeste del volcán Sara Sara, inmediaciones de la Quebrada Chaquihuayjo

Figura 3.36 Mapa de isópaca del depósito de caída de lapilli de pómez “Ullacha”

Figura 3.37 Depósitos de flujo de bloques y ceniza, a 13.5 km al oeste del volcán Sara Sara, en la confluencia del río Salla Salla y quebrada Ullacha Grande

Figura 3.38 Correlación de columnas estratigráficas levantadas en quebradas, al oeste del volcán Sara Sara

Figura 3.39 Vista del flanco sureste del volcán Sara Sara, donde se aprecia flujos de lavas asignados a la etapa “Sara Sara IV

Figura 4.1 Mapa de ubicación de muestras tomadas en la zona de estudio del volcán Sara Sara

Figura 4.2 Fotografías de secciones delgadas de lavas “Sara Sara I” en luz polarizada: a) fenocristales de cuarzo, anfíbol y plagioclasa dentro de una matriz microlítica; b) fenocristal de plagioclasa con textura “tamiz” dentro de una matriz microlítica. Fotografías de una sección delgada de flujo de pómez y ceniza “Sara Sara I” en luz polarizada: c) fenocristal de plagioclasa dentro de una matriz vítrea; y d) fenocristal de biotita dentro de una matriz vítrea

Figura 4.3 Fotografías de secciones delgadas de depósitos piroclásticos dacíticos del “Sara Sara II” en luz polarizada: a); b) y c) fenocristales de plagioclasa y biotita subhedrales y anhedrales en una matriz vitrea; d) fenocristales de biotita y plagioclasa en una matriz vítrea vesiculada; e) fenocristales de anfíbol subhedral y anhedral; f) fenocristales de plagioclasa y biotita subhedrales; g) y h) fenocristales y microcristales de plagioclasa y biotita subhedrales y anhedrales

Figura 4.4 Fotografías de secciones delgadas de rocas piroclásticas del “Sara Sara III” en luz polarizada: a) fenocristales de cuarzo y plagioclasa dentro de una matriz microlítica; b) fenocristales de plagioclasa y biotita en matriz vitrea; c) fenocristales de plagioclasa y biotita en matriz microlítica; d) cristales de plagioclasa y biotita; e) y f) fenocristales de plagioclasa y biotita; g) y h) fenocristales de plagioclasa, biotita y anfíbol

Figura 5.1 Diagrama de clasificación de rocas “Total de alcalinos vs. sílice” (TAS) de Le Bas *et al*. (1986), de las diferentes etapas evolutivas del volcán Sara Sara

Figura 5.2 Composición de las rocas del volcán Sara Sara en el diagrama AFM de Kuno (1968)

Figura 5.3 Diagrama K_2O vs. SiO_2 de Peccerillo &Taylor, de rocas del volcán Sara Sara, que muestra tendencia moderada a fuertemente potásica.

Figura 5.4 Diagramas de variación de elementos mayores versus el porcentaje en peso de sílice.

Figura 5.5 Diagramas de variación de elementos traza versus el porcentaje en peso de sílice

Figura 5.6 Diagramas multielementales de rocas de las distintas etapas evolutivas del volcán Sara Sara, normalizados respecto al manto primitivo (Sun & McDonough, 1989).

Figura 5.7 Diagrama de tierras raras normalizada a la condrita (Sun & McDonough, 1989).

Figura 5.8 Diagramas de ratios Dy/Yb, Sm/Yb, La/Yb y Sr/Y vs. SiO_2 de rocas del volcán Sara Sara, (gr) granate, (pl) plagioclasa, (px) piroxenos, (amp) anfíbol

Figura 6.1 Tipos de peligros volcánicos que podría presentar un estratovolcán como el volcán Sara Sara (Fuente USGS)

Figura 6.2 Relaciones entre la distancia (L) y la altura (H) por donde recorrerán los lahares, así como las áreas en sección transversal (A) y planimétrica (B), inundadas por un evento lahárico (Schilling, 1998).

Figura 6.3 Mapa de peligro proximal del volcán Sara Sara

Figura 6.4 Mapa de peligros por caídas piroclásticas del volcán Sara Sara

Fotografías

Fotografía 1.1 Vista del flanco sur del volcán Sara Sara donde turistas dedicados al ascenso de montañas o trekking podrían acampar.

Fotografía 1.2 Vista de la zona arqueológica de Huampupampa (Sara Sara- Quilcata)

Fotografía 1.3 Vista del sector de Lacaya (Incuyo)

Fotografía 1.4 Vista del baño termal de Mirmaca, al fondo del valle del río Mirmaca

Fotografía 1.5 Vista de la laguna Parinacochas, donde existe una variada fauna silvestre, entre ellos, parihuanas y patos.

Fotografía 2.1 Vista del sector sureste del volcán Sara Sara

Fotografía 2.2 Vista de depósitos de caída de lapilli de pómez, intercalados con oleadas piroclásticas, al pie del flanco sureste del volcán Sara Sara

Fotografía 2.3 Vista de la zona de ladera al NO del volcán Sara Sara, constituida principalmente de una secuencia de depósitos volcanoclásticos

Fotografía 2.4 Vista de zona de ladera constituida de flujos de lava en la margen izquierda del río Mirmaca

Fotografía 2.5 Vista aguas abajo del valle del río Huanca Huanca, al noreste del volcán Sara Sara

Fotografía 2.6 Pampa de Parinacochas, localizada al oeste del volcán Sara Sara

Fotografía 3.1 Vista de la Formación Chocolate, margen izquierda del río Uchubamba

Fotografía 3.2 Secuencia de areniscas cuarzosas de la Formación Hualhuani, en el sector de Luicho, a 10 km al noreste de la localidad de Pausa

Fotografía 3.3 Vista de las ignimbritas Caravelí, en inmediaciones de la localidad de Cahuacho, SO del volcán Sara Sara

Fotografía 3.4 Vista de lavas dacíticas que afloran en el cerro Sullcaymarca, a 4 km al este del volcán Sara Sara.

Fotografía 3.5 Depósito de flujo de pómez y ceniza dacítica “Mirmaca”, localizada en la margen derecha del río Mirmaca

Fotografía 3.6 Depósito de flujo de bloques y ceniza “Mirmaca” que aflora al extremo noreste de la localidad de Pausa, a 14 km al NE del volcán Sara Sara

Fotografía 3.7 Depósito de flujo de bloques y ceniza “Tonsio”, de 11 m de espesor, que aflora a 8 km al este del volcán Sara Sara

Fotografía 3.8 Depósito de flujo de pómez y ceniza a 7.4 km al oeste del volcán Sara Sara, en la quebrada Angostura, donde mide hasta 35 m de espesor

Fotografía 6.1 Caídas de ceniza y pómez-escoria en la ciudad de Puerto Montt (Chile), a raíz de la erupción del volcán Calbuco (al fondo), ocurrida el 22 de abril de 2015 (fotografía de Barria C.)

Fotografía 6.2 Corriente piroclástica de densidad que descendió por el volcán Mayon (Filipinas) en septiembre de 1984 (fotografía C. Newhall, USGS)

Fotografía 6.3 Flujo de lodo (lahar) en el río Ubinas, registrado en febrero de 2007. En aquel entonces, el lahar afectó algunas áreas de cultivo y varios tramos de la carretera Huarina-Ubinas-Arequipa (fotografía: Macedo y Taipe, 2010)

Fotografía 6.4 Lahar que llegó a la ciudad de Armero, localizada a 70 km de distancia del cráter del volcán Nevado del Ruiz. Provocó la muerte de ~23 000 personas y la destrucción de la ciudad

Fotografía 6.5 Ejemplo de flujo de lava andesítica descendiendo del flanco SE del volcán Sinabung (Sumatra), 25 de enero de 2014 (fotografía de S. Nakada)

INGEMMET

Av. Canadá 1470 - San Borja, Lima 41, Perú
Teléfono: 051 - 1- 618 9800
Fax: 051-1-225-3063 I 051-1-225-4540
www.ingemmet.gob.pe
comunicacion@ingemmet.gob.pe