Análisis probabilístico de la amenaza por lahares del volcán Galeras en la Universidad de Nariño, sede Torobajo, mediante simulación en Titan2F

Jorge Vallejo[1], Ivan Solarte[2]

[1] Universidad de Nariño – jvallejomorillo@gmail.com

[2] Universidad de Nariño

Palabras clave: Lahares, Simulación, Titan2F.

INTRODUCCIÓN

La Universidad de Nariño (UdeNar) sede Torobajo es una de las sedes más concurridas, en donde se encuentra gran cantidad de estudiantes, docentes, y personal administrativo. Debido a su localización (Pasto, sobre la calle 18, en la Cuenca del Cuscungo, a aproximadamente 7,5 Km del volcán Galeras) presenta un gran riesgo para las personas que se encuentran en este establecimiento.

En este trabajo se estudia y evalúa la probabilidad de la amenaza por flujos de lodos provenientes de la cuenca del Cuscungo hacia la UdeNar sede Torobajo con ayuda de Modelos de Elevación Digital (DEM), donde se pueden calcular diferentes parámetros los cuales son requeridos para realizar simulaciones en Titan2F.

Titan2F es un programa el cual analiza flujos bifásicos - flujos de lodo- determinando la evolución espacial y temporal de este fenómeno considerado altamente destructivo, generando un resultado preciso (Guerrero et al., 2019).

Para lograr resultados estadísticamente válidos se hace uso de diferentes métodos de muestreo, tales como Muestreo de Hipercubos Latinos y Cuadratura del Caos Polinómico.

Zona de estudio

El volcán Galeras está ubicado en el Departamento de Nariño (Colombia), aproximadamente a 9 km al occidente de la capital del departamento, San Juan de Pasto, en las coordenadas 1° 13' 43,8" de latitud norte y 77° 21' 33,0" de longitud oeste, con una altura de 4276 m s.n.m., catalogado como uno de los volcanes más activos de Colombia.

La Universidad de Nariño es una institución universitaria, autónoma de carácter oficial (Universidad de Nariño, n.d.). La sede Torobajo se encuentra localizada en Pasto, sobre la calle 18, en la salida al municipio de Nariño. Según el Plan de Ordenamiento Territorial de Pasto (Alcaldía Municipal de Pasto, 2015) la UdeNar sede Torobajo se encuentra en un área expuesta a flujo de lodos provenientes del Río Pasto, sin embargo no se toma en cuenta la posibilidad de un flujo de lodos provenientes de la Cuenca del Cuscungo, tal como lo estudiado por Franco y Silva (2017).

Flujos de lodo (Lahares)

"Los lahares, también llamados flujos de lodo o flujos de escombros, son masas de lodo, roca y agua que se parecen mucho al hormigón fluyendo" (Vallance et al., 2001). El origen de estos fenómenos puede ser directa o indirectamente por actividad volcánica, siendo de tipo primario cuando ocurre la erupción y de tipo secundario cuando es posterior a la erupción, además de que permite la interacción del agua con materiales volcánicos y no volcánicos, las fuentes de agua pueden ser de cualquier tipo, desde derretimiento de nieve o hielo, así como de lluvias, corrientes fluviales o reservorios de agua existentes al interior del volcán. Uno de los lugares en donde podemos encontrar este fenómeno es en las laderas y cerca al nacimiento de quebradas, debido a la inclinación de sus laderas donde se presenta un alto grado de erosión (Guerrero et al., 2019).

El agua es el agente desencadenante, debido a que se genera una pérdida en la resistencia en los materiales cohesivos existentes (Franco y Silva, 2017). Este fenómeno se produce cuando el agua moviliza

grandes volúmenes de lodo suelto, roca y escombros volcánicos, los cuales pueden recorrer decenas de kilómetros por los valles a velocidades de decenas de kilómetros por hora (Vallance et al., 2001).

Los lahares destruyen o dañan todo lo que encuentran a su paso debido a que pueden enterrar o impactar generando grandes afectaciones, dejando grandes depósitos de arena y grava fangosa que pueden tener varios metros de espesor. Son especialmente peligrosos porque se desplazan más lejos de un volcán que cualquier otro fenómeno peligroso (Vallance et al., 2001). Es por eso que los lahares constituyen la amenaza más común relacionada con la actividad eruptiva de los volcanes, además que por el alto riesgo que presenta este tipo de flujo, los mapas de amenaza volcánica consideran una amenaza alta por la presencia de este fenómeno (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

MARCO TEÓRICO Y METODOLOGÍAS

► Probabilidad Condicional

La probabilidad condicional es la probabilidad de que ocurra un evento A dado que un evento B haya ocurrido. En general se define como: dado un evento y su espacio muestral, se requiere determinar cómo afecta la probabilidad de A con el hecho de saber que ha ocurrido un evento B. Tal que la P(B)>0, la probabilidad del evento A está condicionado a la ocurrencia de B es (Bianco y Martínez, 2004):

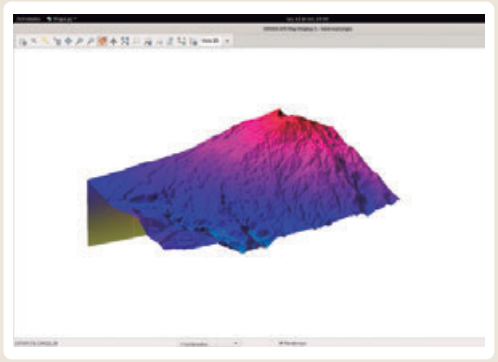
$$P(A|B) = (P(A>B)) / (P(B))$$

Dado un evento B fijo, tal que P(B)>0, P(|B) es una "probabilidad en el sentido que satisface los axiomas de probabilidad y por lo tanto todas las propiedades que se deducen a partir de ellos". (Bianco y Martínez, 2004)

Esta investigación está basada en el "peor escenario posible", es decir a que el flujo de lodos ocurra y llegue hasta el sitio de interés.

Modelos de Elevación Digital (DEM)

Un DEM es una representación digital de la altitud como variable continua sobre una superficie bidimensional de un área de estudio determinada, obteniendo características del relieve y elementos existentes en la zona a través de una red regular de valores NE referenciados a un datum común (e.g. Fig.1). Los DEM son usados especialmente para representar el relieve de un terreno (International Association of Assessing Officers, 2015) por lo cual un DEM representa las características topográficas de un paisaje determinado (Roa y Kamp, 2008).



► Fig. 1 – Mapa Ráster en 3D del Volcán Galeras.

► Cuadratura Del Caos Polinómico (PCQ)

PCQ tiene su origen en el Caos Polinómico (PC), este método fue estudiado principalmente por Xiu y Karniadakis (2003), en donde la función de distribución de la probabilidad de entrada se aproxima mediante una expansión en términos de un número finito de polinomios ortogonales (Sheridan et al., 2010).

El PC genera problemas para sistemas que se aproximan a modelos no lineales, puesto que su solución implica ecuaciones diferenciales parciales que se deben integrar en el tiempo para poder obtener los coeficientes (Sheridan et al., 2010).

Sheridan et al (2010), desarrollaron la variante de este método, conocido como PCQ Polynomic Chaos Quadrature, donde esencialmente se realiza una sustitución de una cuadratura numérica por una cuadratura gaussiana para obtener una solución más rápida al anterior problema.

► Titan2F

Titan2F (Titan 2-Fases) es un programa desarrollado en la Universidad SUNY, Buffalo (Córdoba et al., 2015) y después, mejorado en la Universidad de Nariño (Córdoba et al., 2018). La finalidad de este programa

es realizar simulaciones para flujos bifásicos, en el caso de esta investigación se estudian lahares (Córdoba et al., 2018).

Titan2F usa un marco similar al desarrollado en Pitman y Long Le (2005). Sin embargo, cuenta con un sistema de ecuaciones diferentes para cada fase. Existe un sistema de ecuaciones para la fase granular y otro sistema para la fase fluida. Se realiza un modelamiento para la interacción de las fases mediante un amplio rango de fracciones volumétricas sólidas. Además, con la profundidad media y los supuestos de cierre con los cuales se demuestra que el sistema matemático es hiperbólico en condiciones comunes por lo que se completa el modelo de derivación (Córdoba et al., 2018).

El programa tiene ciertas condiciones que se mantienen a lo largo de las simulaciones, tal como lo planteado por Córdoba et al. (2018): conservación de la masa y conservación del momento de la fase sólida y líquida.

La derivación, validación y verificación de lo contenido en Titan2F, está detallado en el artículo de Córdoba et al. (2018), además hay variedad de investigaciones que validan los resultados obtenidos por este programa como en Sheridan et al. (2010), Córdoba et al. (2015), Guerrero et al. (2019).

Titan2F proporciona resultados de altura del flujo, velocidad, presión y concentración del flujo, así como sus coordenadas Norte y Oeste, y la altura topográfica. Indirectamente se puede calcular el tiempo de llegada del flujo hasta el punto de interés.

► Relación de la presión dinámica y el daño en estructuras

La presión dinámica está asociada con movimiento del flujo, esta se define mediante la ecuación de Bernoulli para fluidos, sin embargo, la presión dinámica para lahares o flujos de lodo cambia debido a la presencia de la fase sólida, la cual modifica las propiedades del flujo. La fase sólida en un lahar aumenta considerablemente la densidad; además de la velocidad que suelen llevar este tipo de flujos, los hace altamente destructivos (Moriano et al., 2017).

La presión dinámica sobre una estructura se comporta como "una presión horizontal uniformemente distribuida" sobre el área de impacto (Moriano et al., 2017; Zuccaro et al., 2012).

Es así que, presiones dinámicas de 10 kPa, son capaces de arrastrar a una persona, a 35 kPa, en cambio, la mampostería no reforzada y muros empiezan a verse afectados. A 55 kPa, se ven afectadas las estructuras de concreto reforzado y a 80 kPa cualquier estructura es vulnerable a daños graves.

► Metodología aplicada al caso de estudio

En primer lugar se realizan correcciones al DEM de la zona en estudio, eliminando obstáculos o vacíos del archivo ráster que puedan afectar en los resultados de las simulaciones. Con ayuda de herramientas de los programas GIS (Geographic Information System), se calculan los parámetros morfométricos de la cuenca y finalmente se añade la infraestructura de la Universidad de Nariño.

Con los resultados de los parámetros morfométricos obtenidos, se realiza el cálculo de los volúmenes máximos y mínimos de los flujos de lodo. Para el cálculo del volumen de la fase líquida, se acude a tres métodos para cálculo del caudal máximo: método racional, método Creager y el Hidrograma Unitario Triangular. Con estos métodos obtenemos indirectamente el volumen total de agua para la cuenca de estudio.

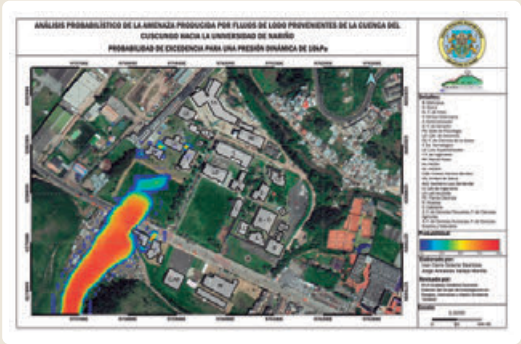
Debido a que no se puede determinar la concentración de sólidos en un flujo de lodo, se establece un rango de concentración, el cual está sustentado por los mapas de probabilidad de caída de ceniza durante una erupción en la cuenca de estudio. La concentración varía entre lodo fangoso (20% de concentración de sólidos), a flujos hiperconcentrados (45% de concentración de sólidos) (Guerrero et al., 2019).

Cuando se han calculado los volúmenes máximos y mínimos, así como el rango de concentración de la fase sólida; se realiza la parte probabilística de la investigación. Para ello, se realiza un muestreo estadísticamente representativo para el rango de las variables calculadas anteriormente. Con ayuda de PCQ se obtienen 32 resultados, los cuales van a ser simulados en Titan2F, obteniendo un error de 10-4 comparado con los resultados que proporciona un MCS (Muestreo de Montecarlo) el cuál necesitaría 106

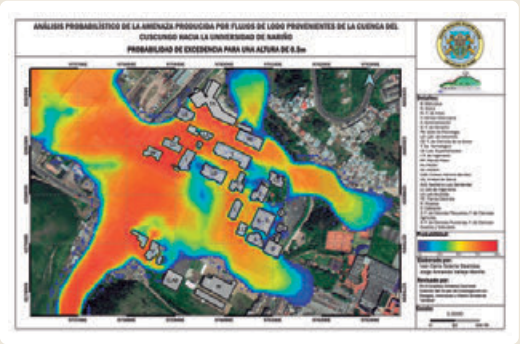
muestras para obtener la misma media que el generado por PCQ.

Después, se modelan los parámetros requeridos en Titan2F, tales como altura de la pila, velocidad inicial, posición de la pila, y otros parámetros generales, los cuales corroboran la información (proceso de calibración del modelo), para obtener simulaciones precisas para la ocurrencia de este fenómeno.

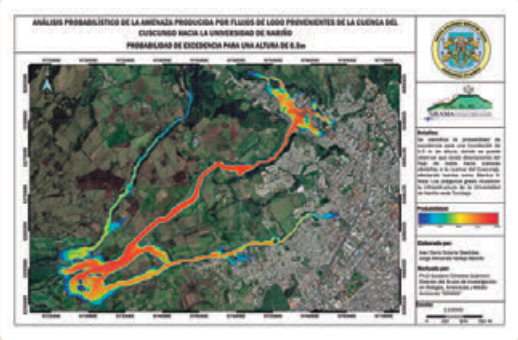
Una vez realizadas las simulaciones, se obtienen las probabilidades de ocurrencia para presiones dinámicas de 10 kPa (Fig. 2), 35 kPa, 55 kPa y 80 kPa, además de probabilidades de excedencias de alturas de 0.5 m (Figs. 3 y 4), 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m y 2.5 m, con el fin de obtener mapas detallados de los daños que podría generar el flujo de lodos "en el peor de los casos" a la Infraestructura de la UdeNar sede Torobajo.



► Fig. 2 – Probabilidad de excedencia para una presión dinámica de 10 kPa.



► Fig. 3 – Probabilidad de excedencia para una altura de 0.5 m



► Fig. 4 – Probabilidad de excedencia para una altura de 0.5 m (Mapa General)

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La probabilidad de excedencia de una inundación para la altura de flujo de 0.50 metros alcanzaría la mayor parte de la universidad (Fig. 3), lo que implica costos elevados en cuestión de limpieza y bloqueo de desagües.

La infraestructura más expuesta a una inundación por flujo de lodos es la Clínica Veterinaria, en donde la probabilidad de inundación para una altura de 2.5 m llega hasta el 70%, y para una altura de 1 m esta probabilidad aumenta llegando al 100%.

La Facultad de Ingeniería, Laboratorios de Ingeniería y la Planta Piloto son otras de las estructuras gravemente afectadas por inundación, donde la probabilidad máxima para una altura de 2.5 m es de aproximadamente 50%.

Ante una probabilidad de impacto de una presión dinámica de 10 kPa, la probabilidad de daño no es despreciable para la Clínica Veterinaria, Laboratorios de Ingeniería y la Planta Piloto ; por lo tanto, se debe tener un especial cuidado a los equipos especializados que se encuentran en estas estructuras, ya que con una altura superior a 1 m el flujo podría filtrarse por las ventanas ocasionando la pérdida de estos equipos.

Debido a que no se tiene en cuenta la incorporación de material a través de todo el recorrido del flujo sobre la cuenca; el impacto esperado sobre estructuras y personas podría verse incrementado, invitando a realizar medidas de información sobre el riesgo que presentaría un posible flujo de lodos.

En las visitas de campo, se han observado distintas estructuras, las cuales están presentes a lo largo del recorrido del flujo de lodos simulado, mostrando en las simulaciones que dichas estructuras presentan una probabilidad muy alta de ser afectadas por este fenómeno. Se recomienda realizar una reubicación para los habitantes de esta zona, pues se presentan probabilidades de inundación del 100% para alturas de 2.5 m y un 80% de probabilidades de una presión dinámica superior a 80 kPa, por lo que estas estructuras serían afectadas en su totalidad, puesto que una presión dinámica superior a 80 kPa implica la destrucción total de cualquier tipo de infraestructura.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial a todas las personas que han hecho posible el desarrollo de la Investigación, al grupo GRAMA de la Universidad de Nariño.

REFERENCIAS

- Alcaldía Municipal de Pasto. (2015). PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL 2014-2027. Pasto Territorio Con-Sentido. Documento Técnico de Soporte.
- Bianco, A. M., Martínez, E. J. (2004). Probabilidades y Estadística (Computación).
- Córdoba, G. A., Sheridan, M. F., Pitman, B. (2018). Titan2F code for lahar hazard assessment: Derivation, validation and verification. Boletin de La Sociedad Geologica Mexicana, 70(3), 611–631. https://doi.org/10.18268/BSGM2018v70n3a3
- Córdoba, G., Villarosa, G., Sheridan, M. F., Viramonte, J. G., Beigt, D., Salmuni, G. (2015). Secondary lahar hazard assessment for Villa la Angostura, Argentina, using Two-Phase-Titan modelling code during 2011 Cordon Caulle eruption. Natural Hazards and Earth System Sciences, 15(4), 757–766. https://doi.org/10.5194/nhess-15-757-2015.
- Córdoba, G.Villarosa, G., Guerrero, A. (2018). Probabilistic lahar hazard assesment by modeling: the case of Villa La Angostura, provincia de Neuquén, Argentina. Hazard and Risk Mapping The Arequipa-El Misti Case Study and Other Threatened Cities, 1, 79–82.
- Franco, O., Silva, J. (2017). Determinación preliminar de la amenaza por flujo de lodo provenientes de la quebrada cuscungo y del rio pasto en la universidad de nariño sede torobajo mediante modelamientos numéricos y analíticos.
- Guerrero, A., Criollo, R., Córdoba, G., Rodríguez, D. (2019). A Modeling Approach for Lahar Hazard Assessment: the Case of Tamasagra Sector in the City of Pasto, Colombia. Ingeniería y Ciencia, 15(30), 53–77. https://doi.org/10.17230/ingciencia.15.30.1
- International Association of Assessing Officers. (2015). Standard on Digital Cadastral Maps and Parcel Identifiers. International Association of Assessing Officers. http://www.iaao.org

- Moriano Tello, D. E., Paredes Ruiz, P. A., Córdoba Guerrero, G., Delgado Granados, H., Moriano Tello, D. E., Paredes Ruiz, P. A., Córdoba Guerrero, G., Delgado Granados, H. (2017). Evaluación de la vulnerabilidad de edificaciones ante la génesis de lahares: Caso de estudio en la población de Santiago Xalitzintla, en el flanco NE del volcán Popocatépetl (México). Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana, 69(1), 223–241. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222017000100223&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Pitman, E. B., Long Le. (2005). A two-fluid model for avalanche and debris flows. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 363(1832), 1573–1601. https://doi.org/10.1098/rsta.2005.1596
- Roa Lobo, J., Kamp Ulrich. (2008). Modelos de elevación digital (MED) a partir de sistemas satelitales. Una introducción y análisis comparativo en la cordillera de Mérida-Venezuela. Revista Geográfica Venezolana, 49(1), 11–42.
- Servicio Geológico Colombiano. (2015). ACTUALIZACIÓN DEL MAPA DE AMENAZA VOLCÁNICA DEL VOLCÁN GALERAS-COLOMBIA MEMORIA En cumplimiento a la Sentencia de la Corte Constitucional T-269 de 2015. https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanGaleras/PDF/Memoria_Actualizacion_Mapa_Amenaza_Volcanica_Volcan_Galeras_2015.pdf
- Sheridan, M. F., Patra, A. K., Dalbey, K., Hubbard, B. (2010). Probabilistic digital hazard maps for avalanches and massive pyroclastic flows using TITAN2D. Special Paper of the Geological Society of America, 464(14), 1–12. https://doi.org/10.1130/2010.2464(14)
- Universidad de Nariño. (n.d.). Sobre la Universidad – Universidad de Nariño. Retrieved January 9, 2022, de https://www.udenar.edu.co/naturaleza/
- Vallance, J. W., Schilling, S. P., Devoli, G., Howell, M. M. (2001). Lahar Hazards at Concepción Volcano, Nicaragua. U.S. Geological Survey, 01(457), 1-14. https://webserver2.ineter.gob.ni/geofisica/vol/concepcion/doc/lahar-hazards-concepcion-vallance-2001.pdf
- Xiu, D., Karniadakis, G. E. (2003). Modeling uncertainty in flow simulations via generalized polynomial chaos. Journal of Computational Physics, 187(1), 137–167. https://doi.org/10.1016/S0021-9991(03)00092-5
- Zuccaro, G., Santo, A., Cacace, F., de Gregorio, D., di Crescenzo, G. (2012). Building vulnerability assessment under landslides actions: Castellammare di Stabia case study. Rendiconti Online Societa Geologica Italiana, 21, 470–472.
- https://www.researchgate.net/publication/256486032_Building_vulnerability_assessment_under_landslides_actions_Castellammare_di_Stabia_case_study/citations