

RIESGO

VOLCÁNICO PROBABILÍSTICO

CON EJEMPLO DE APLICACIÓN



Gustavo Córdoba, Antonio Costa,
Diana Rodríguez, Jean-Claude Thouret,
Alejandra Guerrero, Ruby Criollo.


Editorial
Universidad de Nariño

êditorial

Universidad de **Nariño**

**RIESGO
VOLCÁNICO PROBABILÍSTICO
CON EJEMPLO DE APLICACIÓN**

RIESGO VOLCÁNICO PROBABILÍSTICO CON EJEMPLO DE APLICACIÓN

Gustavo Córdoba Guerrero
Antonio Costa
Diana Marcela Rodriguez
Jean-Claude Thouret
Ruby Alicia Criollo
Alejandra Guerrero

editorial
Universidad de **Nariño**

Riesgo volcánico probabilístico : con ejemplo de aplicación / Gustavo Córdoba Guerrero ... [et al] —1ª. ed. -- San Juan de Pasto : Editorial Universidad de Nariño, 2024

196 páginas : ilustraciones, tablas, fotografías, mapas

Incluye referencias bibliográficas p. 168-187, glosario p. 18-21 y reseña de los autores p. 193-194

ISBN: 978-628-7771-03-1 Impreso

ISBN: 978-628-7771-04-8 Digital

1. Amenazas volcánicas 2. Desastres volcánicos 3. Riesgo de desastre 4. Volcanes—Corrientes de densidad piroclástica 5. Flujos de lava 6. Volcán Galeras—Nariño (Colombia). I. Córdoba Guerrero, Gustavo II. Costa, Antonio III. Rodríguez, Diana Marcela IV. Thouret, Jean-Claude V. Criollo, Ruby Alicia VI. Guerrero, Alejandra

363.3495 R561 – SCDD-Ed. 22



SECCIÓN DE BIBLIOTECA

Riesgo volcánico probabilista. Con ejemplo de aplicación

© Editorial Universidad de Nariño

© Gustavo Córdoba Guerrero

© Antonio Costa

© Diana Marcela Rodríguez

© Jean-Claude Thouret

© Ruby Alicia Criollo

© Alejandra Guerrero

ISBN: 978-628-7771-03-1 (impreso)

ISBN: 978-628-7771-04-8 (digital)

Primera edición

Corrección de estilo: Luz Elida Vera Hernández

Diseño de cubiertas: Miler Maigual

Diagramación: Luz Elida Vera Hernández. **Modificado por:** Nathaly Rivadeneira.

Fecha de publicación: Diciembre de 2024

San Juan de Pasto - Nariño - Colombia

Prohibida la reproducción total o parcial, por cualquier medio o con cualquier propósito, sin la autorización escrita de su Autor o de la Editorial Universidad de Nariño

Dedicatoria

Dedicado al Movimiento Social para la Defensa del Territorio Galeras.

Agradecimientos

Los resultados presentados son fruto del Convenio Interadministrativo 2017000277 celebrado entre la Universidad de Nariño y el municipio de La Florida, Nariño, Colombia. Las dataciones se realizaron gracias a la gestión de Jean Claude Thouret en la Universidad Clermont-Ferrand de Francia.

Se agradece a todo el equipo que participó en el desarrollo del Convenio 2017000277 y, en especial, al entonces Director de la Oficina de Gestión del Riesgo del municipio de La Florida, Juan Carlos Mora, gestor del convenio, quien siempre apoyó a nuestro equipo desde la municipalidad.

El Instituto de Geofísica de Bolonia, Italia, a través del proyecto Pianeta Dinamico, apoyó financieramente la visita del autor Gustavo Córdoba al Instituto en Bolonia, para, junto con Antonio Costa, dar los toques finales al primer borrador del libro.

Contenido

Prólogo.....	10
Introducción.....	14
Glosario.....	18
Capítulo 1. Las amenazas volcánicas	23
Flujos de lava	23
Corrientes Piroclásticas de Densidad	24
Piroclastos de caída	30
Proyectiles balísticos.....	33
Onda de choque.....	36
Lahares	37
Caracterización de la amenaza	40
Análisis determinista de la amenaza	40
Análisis probabilista de la amenaza	42
Modelamiento computacional.....	60
Modelos de dispersión de cenizas	66
Modelos proyectiles balísticos	68
Modelos de lahares.....	71
Corrientes piroclásticas de densidad	74
Ondas de choque	78
Ejemplo de aplicación: caso volcán Galeras	79
Capítulo 2. La vulnerabilidad.....	113
Análisis de vulnerabilidad en el contexto volcánico.....	115
Exposición.....	117
Ejemplo de aplicación	120
Ejemplo de aplicación: caso municipio de La Florida, Nariño, Colombia	137
Capítulo 3. El riesgo.....	139
Análisis del riesgo	139
Conclusiones	166

Referencias.....	168
Lista de figuras.....	188
Lista de tablas	192
Acerca de los autores	193

Prólogo

Para evaluar el riesgo de desastres es fundamental considerar la naturaleza aleatoria de los sucesos y de sus efectos y obtener su probabilidad, es decir, su grado de verosimilitud. Esto significa que las intensidades de los sucesos tienen asociada una frecuencia y que se está en el ámbito de lo incierto. Esto permite indagar ¿cuáles efectos son más y menos frecuentes y con qué severidad?, ¿cuánto pueden ser las máximas pérdidas en diferentes lapsos? Es decir, ¿con qué frecuencia pueden suceder?, ¿cuánto sería la pérdida anual promedio? Y, sobre un territorio, saber ¿en dónde se concentran las pérdidas? Finalmente, responder acerca de qué medidas y acciones inmediatas y de mediano y largo plazo se deben tomar, considerando las implicaciones sociales, económicas y de desarrollo, y con fines de gestión del riesgo.

El principal propósito de la modelación probabilista del riesgo es revelar los desastres latentes; *i. e.*, es hacer explícito el riesgo. Un enfoque probabilista y estocástico permite involucrar a los interesados, que no necesariamente son expertos, para reflexionar sobre lo que se puede hacer para alcanzar un mayor grado de resiliencia y convivir con el riesgo que no puede eliminarse totalmente. Ningún modelo puede abarcar todas las variables, pero puede ser lo suficientemente robusto como para informar sobre el efecto de la incertidumbre. Para lograrlo, es indispensable utilizar la probabilidad en la medida de lo posible; no se debe simplificar en exceso y es crucial que los tomadores de decisiones aprecien la complejidad y comprendan las implicaciones. Teniendo en cuenta que las decisiones y acciones son lo que realmente importa, aunque no sean infalibles, los modelos probabilistas son la forma más eficaz de evaluar las amenazas, la vulnerabilidad y el riesgo. Permiten categorizarlo, no solo de la forma tradicional en alto, medio y bajo, con un criterio cuantitativo, sino también de otra forma, sin duda, mejor; *e. g.*, en inaceptable, considerable, limitado, mínimo y despreciable.

Este libro aborda el imperativo de evaluar el riesgo volcánico en forma probabilista, partiendo de describir los productos volcánicos y comentando los enfoques y las herramientas que más se utilizan para evaluar la amenaza volcánica.

Finalmente, describe los criterios del estado del arte para establecer la aceptabilidad o no del riesgo con fines de toma de decisiones. Los autores hacen una descripción que no es común en la literatura, destacando el enfoque multidisciplinario que esta tarea exige, teniendo en cuenta la exposición, la vulnerabilidad y las implicaciones de la evaluación del riesgo con fines, por ejemplo, de ordenamiento territorial. Se concluye claramente que, aunque la información y conocimiento desde la geología es sin duda relevante, en realidad es solo un insumo en un proceso donde los enfoques de otras disciplinas son determinantes y fundamentales; por ejemplo, desde la física, las matemáticas, el análisis financiero, el ordenamiento territorial, el urbanismo, la ingeniería desde diferentes ámbitos y perspectivas, al igual que desde la sociología, la antropología, la psicología y la ciencia política, para mencionar algunas. El riesgo volcánico sólo visto como un problema de geología, con enfoque determinista, como se ha sido lo usual, deriva fácilmente en una visión que puede ser incompleta y conducir a decisiones inapropiadas, cuando se ve el problema del riesgo desde una perspectiva integral.

Los autores, con quienes tuve la oportunidad de discutir sobre la relevancia de realizar este libro, logran ilustrar, al llevar a cabo una evaluación probabilista del riesgo volcánico para el municipio de La Florida en el volcán Galeras, que los resultados obtenidos por ellos sobre amenaza y riesgo difieren sustancialmente de los que se establecieron en el área de influencia del volcán utilizando el contorno de la zona de amenaza volcánica alta (ZAVA) del mapa de amenaza del Servicio Geológico Colombiano en 2015. Mapa que se realizó con un enfoque determinista, representando lo que sería el evento máximo o la superposición de eventos ocurridos a lo largo del tiempo, sin considerar su frecuencia o probabilidad. La decisión de restringir el desarrollo territorial y plantear la reubicación o reasentamiento de las comunidades en toda el área de dicho contorno, ha sido una decisión excesiva a la luz del enfoque probabilista aquí descrito y de otro estudio similar al que se hace referencia. En dichos estudios se considera la probabilidad de perder la vida por fenómenos volcánicos o se hace un análisis de costo-beneficio, como el que en este libro se ilustra. Desde mi perspectiva personal, es importante señalar, que comparto en general la visión de los autores, considerando que utilizar el contorno del mapa de amenaza vigente del volcán Galeras ha tenido, innecesariamente, considerables implicaciones económicas y sociales, debido a su enfoque determinista, y debido a que se ha restringido la inversión pública, no ha sido posible realizar operaciones

inmobiliarias –excepto las definidas por el Estado– y el desarrollo ha sido restringido o congelado, durante casi dos décadas, desde cuando se declaró la situación de desastre; desastre que, además, no se presentó.

Las comunidades en el área de influencia del volcán Galeras, incluidas comunidades indígenas, que tienen otra cosmovisión, durante todo este tiempo han controvertido y polemizado, principalmente, las decisiones en materia de ordenamiento territorial. Han solicitado la realización de nuevos estudios con enfoque probabilista y siguiendo las determinaciones al respecto de la Corte Constitucional y el Juzgado Promiscuo Municipal del municipio de La Florida y como resultado de la problemática social e institucional en que han derivado las determinaciones oficiales. Aunque el contorno de la ZAVA se realizó con la mejor información posible y como resultado de un cuidadoso trabajo de geología y del monitoreo del volcán desde el Observatorio Vulcanológico de Pasto, los mapas de amenaza volcánica que se han realizado desde los años 90, no han sido de la mayor pertinencia y eficacia para tomar decisiones altamente sensitivas de ordenamiento territorial; lo que posiblemente siempre debería abordarse desde una perspectiva probabilista y con un enfoque interdisciplinario, como es lo usual con otras amenazas, como las inundaciones, las avenidas torrenciales, los deslizamientos, los ciclones tropicales, los tsunamis e incluso los sismos; estos últimos, cuyo enfoque normalmente no es restrictivo sino prescriptivo.

Omar Darío Cardona A., IC Ph. D.
Asesor, investigador y profesor titular UNC
Laureado, Naciones Unidas, 2004

Ese solitario monstruo es tan perfecto como la luz que lo despierta cada mañana y lo pone a tambalear entre la ceniza que lo sube por los cielos. Esa máquina distante siempre vuela en un quejido de colina triangular y sus huesos tropiezan al bajar por las laderas... A veces parece una enorme piedra silenciosa amarrada a la sombra que lo besa a las seis en punto de la tarde... Desde el sur de la nada, y solo desde el sur nos erguimos para señalar su invasión en ese telón anónimo del Universo. Su plumiza existencia circunda el inmortal océano encadenado a la sábana negra de la noche, donde una sustancia de vino lo reinventa. El Galeras esconde su cabeza en una materia envenenada y parte chorreando fuego hacia una nueva dialéctica de acero que aúlla por los aires.

C. H. L., 20 de enero de 1892. Celícola. En: *Un Esbozo Sonámbulo*, de Jesus Ernesto Hoyos Ordoñez (2012), Compilador

Introducción

Según el Instituto Smithsoniano (Smithsonian Institution, 2023) desde el holoceno existen más de 1.300 volcanes activos a lo largo del mundo, cerca de los cuales proliferan asentamientos humanos, por ejemplo, a menos de 10 km de distancia se encuentra cerca del 1 % de la población mundial (unos 70 millones de personas), mientras que dentro de un radio de 50 km se encuentra más del 8 % de esa población (Freire et al., 2019), es decir, cerca de 600 millones de personas. Una fracción sumamente importante de personas está expuesta a ser afectada tanto en sus vidas como en sus bienes por la eventualidad de una erupción volcánica que los pueda impactar.

Considerando esta circunstancia y, en especial, después del desastre de Fukushima (National Research Council, 2014), las Naciones Unidas optaron por dar un giro de una visión del manejo del desastre hacia el manejo del riesgo de desastres, estipulado en el Acuerdo de Sendai (United Nations Office for Disaster Risk Reduction [UNISDR], 2015), firmado por la mayoría de los países miembros de la ONU. En consecuencia, la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres instaura una guía general para el análisis del riesgo de desastres (UNISDR, 2017a), en la cual se recomienda una visión probabilista del riesgo, incluso al campo volcánico, reconociendo que en el contexto del riesgo volcánico, también es aplicable y preferible un análisis cuantitativo probabilista del riesgo volcánico.

El objeto de este libro es proporcionar una metodología que facilita el análisis probabilista del riesgo volcánico, considerando cada una de las amenazas volcánicas por separado, para luego unirlas en un concepto del riesgo que unifica toda la información resultante de combinar la amenaza probabilista con las vulnerabilidades respectivas.

El libro sigue los pasos necesarios para el análisis probabilista del riesgo volcánico. El Capítulo 1 se encarga del análisis probabilista de la amenaza volcánica, donde se indica la metodología usada para tal efecto y cómo avocar la dificultad de, que en la mayoría de los casos, los registros geológicos no serían suficientes como para proporcionar un muestreo estadísticamente significativo que pueda llegar a cubrir las incertidumbres involucradas. En el Capítulo 2 se aborda

la identificación de los elementos expuestos y su vulnerabilidad o nivel de daño esperado ante cada una de las amenazas volcánicas. Como elementos expuestos se consideran los asentamientos humanos y sus edificaciones, donde para cada tipo de edificación se define una curva de nivel de impacto o carga contra el daño esperado. El Capítulo 3 vincula la amenaza probabilista con la vulnerabilidad de cada elemento expuesto, lo que resulta en un nivel de riesgo que, en términos de pérdidas económicas esperadas, permite integrar toda la información en un único mapa de riesgo, indicando la tolerabilidad del riesgo a la que están expuestos los elementos.

En cada capítulo se ilustra la metodología con un ejemplo de aplicación de un caso real en el que los autores llegaron a un diagnóstico del riesgo probabilista para el municipio de La Florida, Nariño, Colombia (Cordoba et al., 2019), ubicado en las inmediaciones del volcán Galeras, el cual tiene un porcentaje alto de su población en la zona de amenaza alta volcánica del Galeras (SGC, 2015a).

En resumen, el análisis de riesgo descrito en este libro implica combinar las evaluaciones de los peligros de origen volcánico, la vulnerabilidad y la exposición para estimar el riesgo y las posibles consecuencias de diferentes escenarios volcánicos. Los resultados de este tipo de análisis se pueden utilizar para la gestión del riesgo volcánico, como la planificación del uso del suelo, la gestión de emergencias y las estrategias de reducción de riesgos. En este documento se usarán indistintamente y como sinónimos los términos amenaza y peligro.

El volcán Galeras

El volcán Galeras es un estratovolcán andino de tipo andesítico que en su historia ha presentado erupciones vulcanianas (Calvache et al., 1997). Está ubicado en el departamento colombiano de Nariño, cuyo cráter tiene coordenadas $1.22^{\circ}N$ y $77.37^{\circ}W$ (Smithsonian Institution, 2023), cerca de la capital departamental, Pasto. El borde caldérico se eleva a unos 4.270 metros sobre el nivel del mar. Es considerado uno de los más activos de Colombia (Smithsonian Institution, 2023) y es la fase más reciente del Complejo Volcánico Galeras (Calvache, 1995).

Desde la invasión española al continente que hoy se conoce como América, acaecida en el siglo XVI, los primeros cronistas ya reportaban actividad del volcán Galeras, como, por ejemplo, Pedro Cieza de León en su Crónica del Perú (Cieza de León, 1553, p. 89) se refiere a él como “un Bolcá (sic), del cual algunas veces sale cantidad de humo, y en los tiempos pasados (según dicen los naturales) reventó una vez y echo de sí muy gran cantidad de piedras”. Sin embargo, estudios técnicos con el rigor científico necesario, solo aparecen en la década de los 70 (Calvache et al., 1997).

Calvache (1990) logra identificar 6 miembros de erupciones que dejaron depósitos de flujos piroclásticos identificables del estadio actual Galeras del Complejo Volcánico del mismo nombre (Calvache, 1995). Estos estudios y otros posteriores sirvieron de base para la realización de la tercera versión del mapa de amenazas del volcán Galeras (Hurtado y Cortéz, 1997; Ingeominas, 1997), el cual tiene un componente probabilista. Este mapa fue actualizado en 2015 sin componente probabilista (SGC, 2015a).

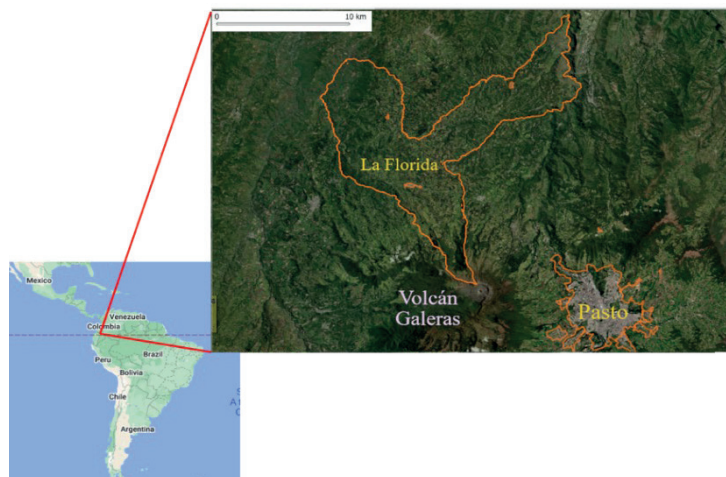


Figura 1. Localización del volcán Galeras y el municipio de La Florida

El municipio de La Florida se ubica en el flanco noroccidental del volcán Galeras (ver Figura 1) y parte del mismo se encuentra dentro de la Zona de Amenaza Volcánica Alta (ZAVA), definida por la tercera y cuarta versión del Mapa de Amenazas. Cuenta con una población de más de 9.000 habitantes, parte de ellos viven dentro de la ZAVA. A pesar de los esfuerzos del gobierno

nacional de Colombia por relocalizar a la población asentada dentro de la ZAVA, no ha sido posible llevar a cabo tal tarea. Por estas y otras razones, el municipio de La Florida, en convenio interadministrativo con la Universidad de Nariño de Colombia, siguiendo las recomendaciones del Marco de Sendai y la norma ISO 13000, se dio a la tarea de realizar la evaluación del riesgo volcánico probabilista, a partir de la cual surge este libro.

Glosario

Es importante tener claros algunos conceptos relacionados con el análisis probabilista del riesgo, para lo cual se transcriben las definiciones propuestas por las Naciones Unidas (United Nations Disaster Relief Coordinato [UNDRO], 1990; UNISDR, 2015, 2017a).

Amenaza: es un proceso, fenómeno o actividad humana que puede causar la pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, daños a la propiedad, trastornos sociales y económicos o degradación ambiental. Los peligros pueden ser de origen natural, antropogénico o socionatural. Las amenazas naturales están predominantemente asociadas con procesos y fenómenos naturales. Cada amenaza se caracteriza por su localización, intensidad o magnitud, frecuencia y probabilidad.

Análisis del riesgo de desastres: es un enfoque cualitativo o cuantitativo para determinar la naturaleza y el alcance del riesgo de desastres mediante el análisis de peligros potenciales y la evaluación de las condiciones existentes de exposición y vulnerabilidad que, en conjunto, podrían dañar a las personas, las propiedades, los servicios, los medios de subsistencia y el medio ambiente del que dependen. Las evaluaciones del riesgo de desastres incluyen: la identificación de peligros, una revisión de las características técnicas de los peligros, como su ubicación, intensidad, frecuencia y probabilidad.

Capacidad: comprende la combinación de todas las fortalezas, atributos y recursos disponibles dentro de una organización, comunidad o sociedad para gestionar y reducir los riesgos de desastres y fortalecer la resiliencia. La capacidad puede incluir infraestructura, instituciones, conocimientos y habilidades humanos, y atributos colectivos como las relaciones sociales, el liderazgo y la gestión.

Capacidad de afrontar: se refiere a la capacidad de las personas, las organizaciones y los sistemas, utilizando las habilidades y los recursos disponibles, para manejar condiciones adversas, riesgos o desastres. La capacidad de hacer frente requiere una conciencia continua, recursos y una buena gestión, tanto en tiempos normales como durante desastres o

condiciones adversas. Las capacidades de afrontamiento contribuyen a la reducción de los riesgos de desastres.

Evacuación: se refiere al traslado temporal de personas y bienes a lugares más seguros, antes, durante o después de la ocurrencia de un evento peligroso, con el fin de protegerlos (United Nations Office for Disaster Risk Reduction [UNDRR], 2017; United Nations, 2016).

Exposición: comprende la ubicación de las personas, la infraestructura, la vivienda, las capacidades de producción y otros activos humanos tangibles ubicados en áreas propensas a amenazas.

Índice de exposición: es una medida cuantitativa utilizada en la evaluación de riesgos para evaluar el nivel de exposición de los elementos en riesgo ante un peligro específico (Thouret et al., 2023), como erupciones volcánicas, terremotos o inundaciones. Proporciona una representación numérica del impacto potencial de la amenaza en los elementos.

Intensidad: nivel, grado, energía o grado de impacto, expresados en términos de presión dinámica, carga de ceniza, espesor de ceniza, profundidad de enterramiento.

Riesgo de desastre: es la pérdida potencial de vidas, lesiones o bienes destruidos o dañados que podría ocurrirle a un sistema, sociedad o comunidad en un período de tiempo específico, determinado probabilísticamente en función de la amenaza, la exposición, la vulnerabilidad y la capacidad.

Riesgo aceptable: o riesgo tolerable, es la medida en que un riesgo de desastre se considera aceptable o tolerable. Es decir, un riesgo que la sociedad o un individuo decide que se puede asumir, por diferentes factores como son las condiciones sociales, económicas, políticas, culturales, técnicas y ambientales existentes.

Riesgo residual: Es el riesgo de desastres que permanece incluso cuando se implementan medidas efectivas de reducción del riesgo de desastres y para el cual se deben mantener las capacidades de respuesta y recuperación ante emergencias.

Riesgo Total: número esperado de vidas perdidas, personas heridas, daños a la propiedad o interrupción de la actividad económica debido a un fenómeno natural particular. Considera el costo de las pérdidas esperadas, como una combinación de la amenaza (H), vulnerabilidad (V), la exposición (E) y el costo de las pérdidas esperadas (C), y se expresa como la Ecuación 1.

$$R_T = C \times E \times V \times H \quad 1$$

Donde R_T representa el riesgo total. Cuando no se tienen en cuenta los costos, se tiene lo que se conoce como Riesgo Específico R_s . La Figura 2 muestra esquemáticamente estos conceptos. El riesgo específico es la multiplicación de la amenaza por la vulnerabilidad para cada intensidad. El riesgo total resulta de multiplicar el riesgo específico por el costo respectivo. El área bajo la curva del riesgo total corresponde al monto total de las pérdidas esperadas dentro de la ventana de tiempo contemplada (Woo, 2008).

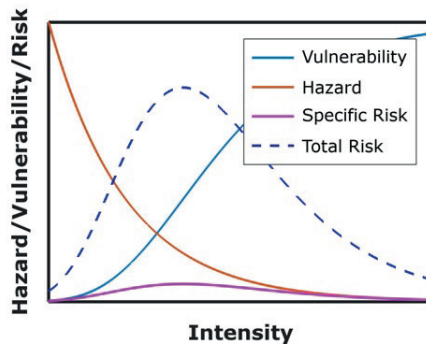


Figura 2. Amenaza (en rojo), vulnerabilidad (en azul), riesgo específico (en magenta) y riesgo total (línea punteada azul)

Riesgo específico: es el grado esperado de pérdida debido a un fenómeno natural particular y en función tanto de la amenaza natural como de la vulnerabilidad. Se expresaría como lo indica la ecuación 2.

$$R_s = V \times H \quad 2$$

Relocalización: se refiere a cambiar la ubicación de las personas expuestas de manera definitiva, haciendo nula la exposición de las mismas ante un fenómeno potencialmente dañino (Correa, 2011).

Servicios ecosistémicos: los servicios ecosistémicos o ambientales son aquellos que la naturaleza o los procesos ecológicos proveen a los seres vivos y al planeta. Se reconocen cuatro tipos de servicios: abastecimiento, regulación, apoyo y cultural (World Wildlife Fund [WWF], 2018).

Vulnerabilidad: son las condiciones determinadas por factores o procesos físicos, sociales, económicos y ambientales que aumentan la susceptibilidad de un individuo, una comunidad, activos o sistemas a los impactos de los peligros.



Amenaza

CAPÍTULO 1

Las amenazas volcánicas

Las amenazas volcánicas son varios tipos de peligros asociados con la actividad volcánica. Pueden incluir peligros tanto primarios como secundarios, y pueden tener impactos significativos en las poblaciones humanas y el medio ambiente. Algunos tipos comunes de peligros volcánicos incluyen:

Flujos de lava

Son corrientes de roca fundida que fluyen de un volcán durante una erupción. Los flujos de lava pueden causar daños a la infraestructura, la propiedad y los hábitats naturales, y pueden representar una amenaza para la vida humana si no se manejan adecuadamente. En volcanes efusivos como los de Hawái, son de muy baja viscosidad, por lo cual fluyen muy rápido. En volcanes con magma más viscoso, como los de tipo andesítico o riolítico, su viscosidad no les permite fluir tan fácilmente, solidificándose en general muy pronto; esto hace que se fragmente, dejando como registro geológico rocas esparcidas por donde ocurrió el flujo, como se puede ver en el frente del flujo de la Figura 3.



Figura 3. Flujo de lava andesítico

Nota. Volcán Kanaga, Alaska; flujo de 1906. Tomado de Michelle Coombs, United States Geological Survey (USGS).

Caso volcán Galeras

Según Calvache (1990) hay evidencia geológica de lava fisural hacia el este y noroeste del volcán, de edad aproximada entre la erupción de 1886 y el miembro que Calvache identifica como 1.100 ybp. Es posible que estas lavas hayan sido de relativa baja viscosidad, pero son de poco volumen y corto alcance. La erupción de 1886 produjo un flujo de lava que emerge desde el cráter y que dejó un depósito que indica que la descarga fue disminuyendo durante la erupción (ver Figura 4). El área cubierta por estas lavas es de alrededor de 5 km². Al ser tan escasas y de poco alcance, por el momento no se las considera como una amenaza representativa, pues no afectarían zonas pobladas (SGC, 2015a).



Figura 4. Vista aérea de la zona del cráter del volcán Galeras. Al fondo a la derecha, la ciudad de Pasto. En primer plano se nota el depósito del flujo de lava de la erupción de 1886. Tomado del Servicio Geológico Colombiano (2015).

Corrientes Piroclásticas de Densidad

Las corrientes de densidad piroclástica (PDC, por sus siglas en inglés) son mezclas de alta densidad y rápido movimiento de gases calientes y fragmentos de roca que se expulsan durante las erupciones volcánicas. También se conocen como flujos piroclásticos, flujos de ceniza o nubes ardientes, aunque rigurosamente son una mezcla de estas, como se verá más adelante.

Los PDC son el peligro más mortal y destructivo asociado con las erupciones volcánicas explosivas, y pueden viajar a velocidades de hasta varios cientos de kilómetros por hora. Estas corrientes pueden variar en tamaño e intensidad y pueden estar compuestas de diferentes materiales, como ceniza, piedra pómez y bloques de roca.

Los PDC se generan cuando materiales volcánicos, como cenizas y piedra pómez, se transportan por el aire durante una erupción y se mezclan con gases calientes. Esta mezcla fluye cuesta abajo debido a la fuerza de la gravedad y puede recorrer decenas de kilómetros desde el volcán.

La alta velocidad, densidad y temperatura de los PDC los hace capaces de destruir todo a su paso, incluidos edificios, puentes y vegetación. También pueden generar un calor intenso, lo que puede provocar incendios, y pueden causar asfixia debido a la inhalación de partículas finas en los pulmones (Blong, 1984; Horwell y Baxter, 2006).

Es importante tomar precauciones cuando se vive cerca de un área volcánica y seguir los consejos de las autoridades locales durante una erupción para minimizar el riesgo de lesiones o muerte por corrientes de densidad piroclástica.

Las corrientes de densidad piroclástica y los flujos piroclásticos son fenómenos estrechamente relacionados, pero existen algunas diferencias entre los dos.

Un flujo piroclástico es un tipo de PDC que se compone de una mezcla de gases calientes, cenizas y fragmentos de roca que fluyen por la ladera de un volcán a altas velocidades, generalmente, varios cientos de kilómetros por hora. Los flujos piroclásticos son altamente destructivos y pueden viajar largas distancias, enterrando todo a su paso, incluidos edificios e infraestructura. La parte basal de una corriente de densidad piroclástica se considera típicamente como un flujo piroclástico.

El término "flujo piroclástico" se usa a menudo para describir la mezcla densa y de rápido movimiento de gases calientes, cenizas y fragmentos de roca que se encuentra en la parte delantera de un PDC. Esta es

la parte más destructiva de la corriente y puede moverse a velocidades muy altas por las laderas de un volcán, sepultando todo a su paso.

PDC, por otro lado, es un término más amplio que abarca una gama de diferentes tipos de corrientes de densidad volcánica, incluidos los flujos piroclásticos, pero también otros tipos de corrientes que son menos densas y pueden viajar más lejos del volcán antes de asentarse. Estas corrientes menos densas a veces se denominan oleadas piroclásticas, que pueden formarse cuando el material volcánico rico en gas se libera rápidamente a la atmósfera y se expande, creando una nube turbulenta que se aleja rápidamente del volcán.

En resumen, los flujos piroclásticos son un tipo específico de PDC que son altamente destructivos y se mueven rápidamente por la ladera de un volcán, mientras que los PDC son una categoría más amplia que incluye una gama de diferentes tipos de corrientes de densidad volcánica, incluidos los flujos piroclásticos, así como oleadas piroclásticas menos densas. Entonces, mientras que un PDC es un término más amplio que abarca tanto los flujos piroclásticos como las oleadas, la parte basal de un PDC generalmente se considera un flujo piroclástico (ver Figura 5).



Figura 5. Esquema de las partes de una Corriente Piroclástica de Densidad en la cual se observa el flujo piroclástico en la parte basal y la nube acompañante en la parte superior

A medida que el PDC se aleja del volcán, puede volverse menos denso y adquirir una apariencia más turbulenta, parecida a una nube. Esto a menudo se denomina oleada piroclástica.

Comprender la dinámica de los flujos piroclásticos es crucial para predecir su avance y la extensión de sus depósitos, que son factores clave para evaluar el peligro que representan estos fenómenos volcánicos.

La dinámica de los flujos piroclásticos es compleja y depende de una variedad de factores, incluidos el volumen, la composición de la erupción, la topografía y la pendiente del terreno, así como la energía potencial inicial. Comprender estos factores y cómo interactúan es fundamental para predecir la distancia de descentramiento y la extensión de los depósitos.

Por ejemplo, el volumen y la composición de la erupción pueden influir en la densidad y la viscosidad del flujo piroclástico, lo que a su vez, afecta la velocidad y capacidad para viajar sobre diferentes tipos de terreno. La topografía y la pendiente del terreno también pueden influir en el comportamiento del flujo, ya que las pendientes más pronunciadas, generalmente, conducen a flujos más rápidos y destructivos.

Al estudiar la dinámica de los flujos piroclásticos, los científicos pueden desarrollar modelos para predecir de manera más precisa el comportamiento de estos fenómenos y los peligros potenciales que representan para las comunidades cercanas (Druitt, 1996; Sparks et al., 1997; Sulpizio et al., 2014).

Durante una erupción volcánica de carácter explosiva, una columna de gas, cenizas y escombros volcánicos es expulsada del cráter del volcán y se eleva a la atmósfera. Las columnas eruptivas transportan fragmentos de roca denominados tefra o piroclastos y ceniza. Estructuralmente, una columna eruptiva está formada por una zona inferior de empuje por gases y de una zona superior convectiva. El material multifásico (sólidos, gas y líquido) en la zona inferior de empuje asciende por inercia hasta una altura H_c donde la energía inicial se habrá disipado. A pesar que al salir del cráter el material es más denso que el aire, la columna o una parte de ella podrá seguir ascendiendo si en la región de empuje ha incorporado suficiente aire del medio que la rodea, de tal manera que, al expandirse por temperatura llega a H_c con menos

densidad que el aire que la rodea, y sigue ascendiendo por convección hasta una altura H_T . Las partes de la columna que no cumplen esta condición colapsan y generan los PDC. La altura desde la cual colapsa la columna proporciona a estos flujos la energía potencial que les permitirá avanzar por la superficie del terreno hasta que esa energía se disipe por diferentes mecanismos (Detalles en Sparks et al., 1997).

La línea imaginaria que une a H_c con la distancia L que es capaz de alcanzar el flujo se llama línea de energía. A la relación H_c/L se la conoce como coeficiente de Heim (Heim, 1932), y mide la movilidad del flujo; entre más avance tenga más pequeño es este coeficiente. El método de las Líneas de Energía (Malin y Sheridan, 1982; Sheridan, 1980) aprovecha este concepto para predecir el posible alcance de los PDC a partir de curvas empíricas que relacionan datos mundiales de alcance de PDC con la altura de colapso de la columna que lo originó (Ogburn y Calder, 2017; Aproximaciones y aplicaciones más recientes en Tierz et al., 2016). Es importante tener en cuenta que si la altura de un obstáculo supera la línea de energía, implica que el flujo no va a tener la energía suficiente para remontarla y viceversa, como se muestra en la Figura 6.

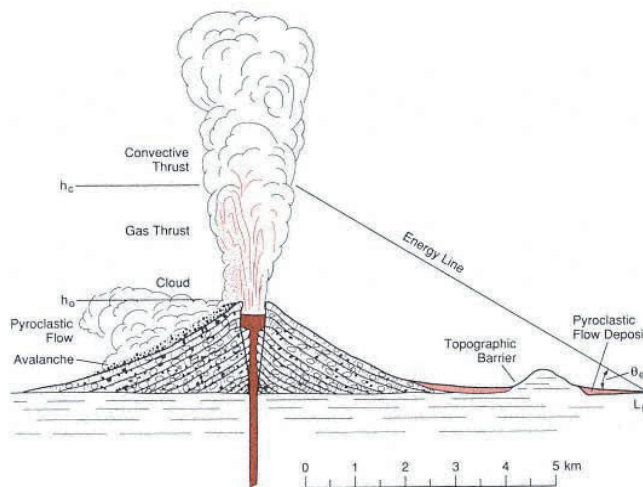


Figura 6. Esquema de un PDC con una altura de colapso H_c y un avance L_t . Si la línea de energía es más alta que un obstáculo, este será remontado. Modificada a partir de Sheridan (1980).

Caso volcán Galeras

Calvache (1990) identifica cinco miembros con depósitos de flujos piroclásticos que han permitido su datación, los cuales corresponden a los miembros 4500 ybp, 4000 ybp, 29000 ybp, 2300 ybp y 1886 d.c. Estos estudios y otros más recientes le han permitido al Servicio Geológico Colombiano, afirmar que los PDC son un producto predominante en la actividad del volcán Galeras (SGC, 2015a). Tanto el Mapa de Amenaza del volcán Galeras de 1997 (Ingeominas, 1997) como el de 2015 (SGC, 2015a) se basan, primordialmente, en los trabajos de Calvache (1990).

En el esquema de la Figura 7 (tomada de la Figura 7 en el trabajo de Calvache, 1990) se aprecia un esquema de la posible área abarcada por el miembro 4500 ybp. Es de resaltar que Calvache proyecta al flujo con una especie de lóbulo o lengua hacia el pueblo de La Florida; sin embargo, con la morfología actual, el recorrido de un PDC desde el cráter hasta La Florida por la cuenca del río Barranco es de aproximadamente 13 *km*. Sin tener en cuenta la disipación de energía que sucedería en la curva de aproximadamente 90°, tanto por el choque con el obstáculo topográfico que desvía el flujo, como por sedimentación y que parte del flujo, sería capaz de remontar ese obstáculo topográfico; siguiendo a Sheridan y Macias (1995), la probabilidad de que un PDC grande llegue a la población de La Florida estaría entre menos del 1 % para la típica altura de colapso del Galeras, la cual está estimada en 200 *m* (Banks et al., 1997). Sin embargo, de tratarse de un lóbulo o lengua desprendida de un flujo mayor, se facilitaría su avance hasta el pueblo de La Florida¹.

¹ Para detalles de la generación y alcance de lóbulos y lenguas, mirar estudios de Wadge (2022), Voight y Constantine (2000), Calder y Lockett (2015).

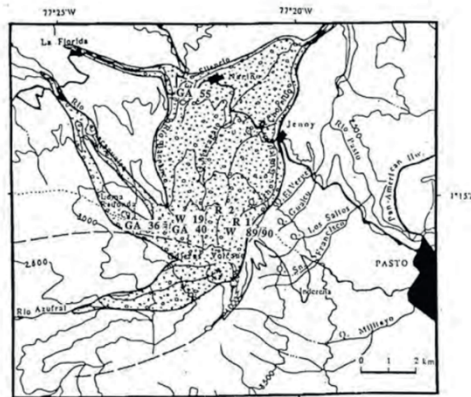


Figura 7. Esquema del miembro 4.500 ybp de acuerdo a Calvache (1990)

Nota. Tomada de Calvache (1990).

Por otra parte, estudios realizados por los autores de este libro han permitido focalizar la atención en la cuenca del río Barranco del municipio de La Florida. Dataciones realizadas por Jean-Claude Thouret en la Universidad Clermont-Ferrand de Francia permitieron encontrar que los depósitos de PDC bajo La Florida tienen edades de alrededor de 8.000 ybp y 330 ybp. El primero no corresponde a la fase volcán Galeras, sino a la fase Urcunina (Calvache, 1995); el segundo correspondería a una erupción de alrededor de 1690 del ciclo eruptivo 1690-1736, descrito por Cepeda (2020).

Piroclastos de caída

Las caídas piroclásticas volcánicas, también conocidas como caídas de tefra o ceniza y *lapilli*, ocurren especialmente en erupciones con un cierto grado de explosividad, durante la erupción una mezcla de ceniza, fragmentos de roca y gas son inyectados en la atmósfera. Luego, estos materiales son transportados por el viento y se depositan en el suelo, creando una capa de ceniza volcánica sobre el área circundante. La Figura 8 muestra este fenómeno, donde la pluma eruptiva ha sido direccionada por el viento, mostrando una subsecuente caída piroclástica que cubre parte de los alrededores del volcán Shinmoedake en Japón en 2011.

Debido a sus características físicas, así como también a su composición química altamente tóxica, las caídas piroclásticas pueden ser extremadamente peligrosas para las personas y el medio ambiente. La ceniza puede afectar viviendas e infraestructura, interrumpir los sistemas de transporte y comunicación y causar problemas respiratorios a personas y animales.

La distancia que pueden alcanzar los depósitos (y también la magnitud de estos) depende, en su mayoría, del tamaño de la erupción y de los patrones de viento predominantes, mientras que la composición química de la ceniza y el tamaño del grano también pueden jugar un papel aunque menos protagónico. En algunos casos, las caídas piroclásticas pueden viajar cientos o incluso miles de kilómetros desde la fuente de la erupción, afectando extensas áreas y alcanzando poblados distantes.



Figura 8. *Columna eruptiva y caída piroclástica (lluvia de ceniza) del volcán Shinmoedake, 2011*

Nota. Tomado de Reuters/Kyodo, cortesía USGS.

Sin embargo, las caídas de ceniza volcánica también pueden tener impactos ambientales positivos a largo plazo. La ceniza tiene la capacidad de alterar la composición del suelo y el agua, creando impactos en la producción agrícola y la calidad del agua.

En algunos casos, las caídas piroclásticas volcánicas pueden mejorar la productividad del suelo a largo plazo. La ceniza está compuesta por partículas finas que son ricas en minerales como sílice, calcio, potasio y

magnesio puede proporcionar nutrientes esenciales para las plantas y mejorar la fertilidad del suelo (Ciriminna et al., 2022).

La ceniza también permite renovar la estructura del suelo y su capacidad de retención de agua, aumentando su humedad y previniendo la erosión del mismo. Esto puede ser particularmente beneficioso en áreas con suelos secos o degradados. Sin embargo, los efectos de las cenizas volcánicas sobre la productividad del suelo dependen de una serie de factores, incluidos la composición y el espesor de la capa de cenizas, el tipo de suelo y el clima. En algunos casos, cantidades excesivas de ceniza pueden tener impactos negativos en la productividad del suelo, como alterar el pH del suelo o crear una capa densa que impide el crecimiento de las plantas.

Los detalles sobre el estudio de las columnas volcánicas, su origen, evolución y colapso se encuentran más ampliamente explicados en Sparks et al. (1997).

En general, hay dos tipos de caídas piroclásticas: caídas de ceniza y *lapilli*. La principal diferencia entre la ceniza volcánica y el *lapilli* es su tamaño y su formación. La ceniza consiste en partículas muy finas de vidrio volcánico y minerales que tienen menos de 2 milímetros de diámetro y se producen cuando el magma se fragmenta de forma explosiva. Los *lapilli* son fragmentos de magma más grandes, que varían en tamaño de 2 a 64 milímetros, y también se producen durante erupciones volcánicas explosivas (ver Figura 9).



Figura 9. *Ceniza volcánica (izquierda) y lapilli (derecha)*

Nota. Nótese el tamaño de cada tipo de caída piroclástica. Cortesía USGS.

Caso volcán Galeras

Según Servicio Geológico Colombiano (2015), en el volcán Galeras los piroclastos de caída corresponden a depósitos tanto de ceniza como de *lapilli*. El registro geológico muestra sus depósitos de manera local y sin continuidad, dificultando el reconocimiento de su distribución. Para caracterizar esta amenaza, el Servicio Geológico Colombiano ha recurrido a los depósitos de los eventos eruptivos de 1992 y 2010, así como modelamiento computacional. La Figura 10 muestra como ejemplo, los trabajos de remoción de ceniza en la vía que conduce a la cabecera del municipio de La Florida.



Figura 10. *Trabajos de remoción de ceniza de la erupción de noviembre de 2005 del volcán Galeras*

Nota. Foto tomada de BBC Mundo (26 noviembre de 2005)

Proyectiles balísticos

Los proyectiles balísticos volcánicos son fragmentos grandes y sólidos de lava y roca que son expulsados de un volcán durante una erupción explosiva. Estos fragmentos pueden variar en tamaño desde pequeñas partículas de unos pocos centímetros hasta rocas que pesan varias toneladas.

La energía de impacto de un proyectil balístico volcánico depende de varios factores, incluidos su tamaño, velocidad y trayectoria. Cuanto más grande sea el fragmento y más rápido viaje, más energía tendrá al impactar.

La energía de impacto de un proyectil balístico volcánico puede causar daños significativos y representar una grave amenaza para la vida humana y la infraestructura. Incluso los fragmentos relativamente pequeños pueden causar lesiones o la muerte si golpean a alguien directamente, mientras que los fragmentos más grandes pueden destruir edificios y otras estructuras, además de producir incendios. La distancia que puede recorrer un proyectil balístico volcánico depende de una variedad de factores, incluyendo el tamaño y la velocidad del proyectil, el ángulo de su trayectoria y las condiciones locales del viento. La Figura 11 detalla este tipo de proyectiles siendo disparados del volcán Parícutín, México, donde se aprecia su trayectoria parabólica en todas las direcciones.



Figura 11. *Proyectiles balísticos generados por una erupción del volcán Parícutín en 1943*

Nota. Nótese la trayectoria parabólica de los fragmentos. Tomado de Carl Fries, USGS.

En general, los proyectiles balísticos volcánicos también caben dentro de la clasificación de “piroclasto de caída”, que tal como se mencionó en la sección respectiva, son más pequeños (como las partículas de ceniza) y

pueden ser transportados por el viento largas distancias, a veces a cientos o incluso miles de kilómetros del volcán. Sin embargo, los piroclastos de caída más grandes se conocen como proyectiles balísticos y suelen seguir una trayectoria más parabólica y tienden a caer más cerca del volcán.

Caso volcán Galeras

En el volcán Galeras los proyectiles balísticos se generan, al menos en la actividad histórica, por destrucción de domos, acumulando depósitos en la parte alta del volcán (SGC, 2015a). Históricamente han alcanzado distancias de hasta 2 km, con diámetros que varían de unos pocos decímetros hasta unos 3.5 metros (Ingeominas, 1997). La erupción del 2 de enero de 2010 produjo este fenómeno, donde se pudo apreciar la trayectoria balística de las bombas y la afectación a la vegetación circundante, la cual fue incinerada debido a la alta temperatura de los proyectiles, tal como se puede apreciar en la Figura 12.



Figura 12. *Proyectiles balísticos erupción 2 de enero de 2010 del volcán Galeras*

Nota. Nótese los incendios producidos por la alta temperatura de los bloques. Tomado de Michel Bolaños (2010).

Onda de choque

Las ondas de choque volcánico de corto período se caracterizan por vibraciones de alta frecuencia que suelen durar menos de un segundo. El tipo de ondas de choque volcánicas que pueden afectar ventanas, abrir puertas y afectar otras estructuras, generalmente, se denominan ondas de aire u ondas expansivas. Estas ondas se generan cuando una erupción explosiva envía una gran cantidad de gases volcánicos, cenizas y otros desechos al aire a altas velocidades. La Figura 13 muestra una onda de choque generada por la erupción explosiva del volcán Sarychev, localizado en Japón, donde se puede apreciar como la onda empujó las nubes, permitiendo que la tripulación de la Estación Espacial Internacional (ISS) capturara la imagen.

A medida que los gases calientes y las cenizas se expanden rápidamente, crean una onda de choque que se desplaza por el aire y provoca cambios repentinos en la presión atmosférica. Estos cambios de presión pueden ser lo suficientemente fuertes como para romper ventanas, puertas y otros objetos en su camino.



Figura 13. Onda de choque volcánica. Erupción del 12 de junio de 2009 del volcán Sarychev

Nota. Tomado de ISS Nasa (2009).

Las ondas de aire generalmente viajan a velocidades de varios cientos de metros por segundo y se pueden sentir en un área amplia, según el tamaño de la erupción. En algunos casos, pueden causar daños a edificios y otras estructuras a varios kilómetros del volcán. La morfología de un volcán tiene gran importancia en la expansión de este tipo de onda, puesto que se generan

efectos de refracción y reflexión con la topografía. Así, la refracción absorbe energía reduciendo el avance del frente de onda, mientras que la reflexión se convierte en un efecto amplificador, como sucede con los bordes caldéricos o anfiteatros volcánicos, como lo muestra el esquema de la Figura 14.

Caso volcán Galeras

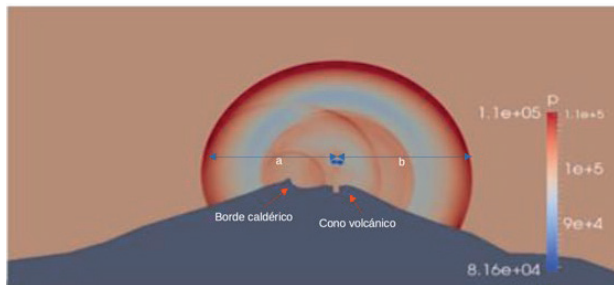


Figura 14. Modelamiento de la onda de choque con el programa OpenFoam, corte este-oeste del volcán Galeras

Nota. La distancia “a” es menor que la distancia “b” por la refracción con el borde caldérico. Nótese el efecto de la reflexión con el mismo borde.

Este fenómeno se ha presentado de manera recurrente al menos durante la actividad histórica del volcán Galeras (Espinoza, 2012). Ha logrado romper vidrios en el centro de la ciudad de Pasto, que se encuentra a unos 9 km de distancia del cráter del volcán; también ha derribado personas en la población de Consacá, en dirección al anfiteatro de Galeras, y ha causado daños en puertas y cerraduras. Testigos ubicados en la parte alta de la cuenca del río Barranco, en el municipio de La Florida, confirmaron a los autores de este documento que la erupción de 2010 abrió puertas y lanzó al aire diversos objetos.

Lahares

La palabra "lahar" tiene su origen en el idioma javanés, hablado en la isla indonesia de Java. En javanés, "lahar" significa "flujo de lodo volcánico", y el término se ha utilizado durante siglos para describir las mezclas de cenizas volcánicas, fragmentos de rocas y agua que se mueven rápidamente y que están asociadas con las erupciones volcánicas en la región (Marso et al., 2015).

La palabra "lahar" fue introducida por primera vez a la comunidad científica a principios del siglo XX por el vulcanólogo y geólogo holandés Franz Wilhelm Junghuhn, quien trabajó extensamente en los volcanes de Java. Junghuhn usó el término en sus informes y escritos para describir los flujos de lodo volcánico que había observado y estudiado en la isla, y el término fue adoptado más tarde por otros geólogos y vulcanólogos de todo el mundo (Johnson, 2012; Marso et al., 2015). Después de los PDC es el fenómeno más destructivo por su densidad y velocidad que puede resultar en altas presiones dinámicas, capaces de afectar seres vivientes, así como estructura e infraestructura. La Figura 15 muestra parte de los efectos del lahar secundario que descendió por las laderas del volcán Pichincha, el 31 de enero de 2022 y atravesó transversalmente la ciudad de Quito.



Figura 15. *Lahar secundario de la Gasca en Quito, del 31 de enero de 2022*

Nota. Tomado del diario *El Comercio* de Quito (2022).

Se han definido dos tipos de lahares: primarios y secundarios (Pierson et al., 2014). Los lahares primarios y los lahares secundarios son tipos de flujos de lodo volcánico, pero difieren en sus desencadenantes y características.

Los lahares primarios son flujos de lodo que se desencadenan directamente por la actividad volcánica, como erupciones explosivas, el colapso de un edificio volcánico, derretimiento de parte o todo el glaciar que puede tener un volcán o el depósito de material piroclástico que puede ser movilizado por lluvia ocurrida durante o inmediatamente después de la erupción. Están

compuestos de ceniza volcánica, rocas y agua, y pueden ser muy peligrosos y destructivos debido a su gran velocidad y volumen. Los lahares primarios pueden viajar muchos kilómetros desde su fuente y causar daños generalizados a la infraestructura y las comunidades.

Por otra parte, los lahares secundarios son flujos de lodo provocados por eventos no volcánicos, como fuertes lluvias o deshielo, que movilizan los escombros volcánicos que se han acumulado en las laderas de un volcán. Estos lahares pueden ocurrir días, meses o incluso años después de una erupción volcánica y pueden ser tan peligrosos y destructivos como los lahares primarios. Sin embargo, a menudo son más pequeños en volumen y velocidad que los lahares primarios.

Vale la pena señalar que la distinción entre lahares primarios y secundarios no siempre es clara, y puede haber casos en los que tanto los desencadenantes volcánicos como no volcánicos contribuyan a la formación de un flujo de lodo. Además, los lahares pueden desencadenarse por múltiples factores que actúan juntos, lo que hace que su clasificación como primaria o secundaria sea menos importante que sus características e impactos reales.

Hoy en día, la palabra "lahar" se usa ampliamente en la comunidad científica para referirse a los flujos de lodo o flujos de escombros volcánicos, y se ha convertido en un término importante en el estudio de los peligros volcánicos y la evaluación de riesgos. Estudios detallados sobre la mecánica de este tipo de flujos se detalla en Iverson (1978), Pierson y Scott (1985), Iverson (1997), Iverson et al. (2010), Vallance y Iverson (2015).

Caso volcán Galeras

A pesar que no existe evidencia histórica sobre este fenómeno en las faldas del volcán Galeras, sí existen depósitos de lahares en el registro geológico (SGC, 2015a), cuya formación se atribuye a varios factores, como la transformación de PDC en lahares debido a la incorporación de agua en su recorrido, la desestabilización de represamientos o removilización de depósitos posterior al evento eruptivo. Es decir, a pesar que el volcán carece de glaciar, se puede producir este tipo de fenómeno en sus laderas.

Caracterización de la amenaza

Las evaluaciones de peligro volcánico se llevan a cabo para evaluar los peligros potenciales que plantea la actividad volcánica para las personas, la infraestructura y el medio ambiente. Estas evaluaciones pueden ayudar a informar las decisiones con respecto a la planificación del uso de la tierra, la respuesta a emergencias y las estrategias de mitigación de riesgos. Las principales clases de análisis de la amenaza son las de carácter determinista y probabilistas.

Análisis determinista de la amenaza

El análisis determinista o de escenarios es el proceso de evaluar los impactos o pérdidas asociados a eventos específicos de interés (escenarios). Este método caracteriza posibles realizaciones de eventos en términos de tamaño y ubicación de los mismo, pero no cuantifica completamente la frecuencia de ocurrencia de estos eventos ni evalúa sus impactos de manera probabilística (UNISDR, 2017b).

La selección de escenarios y el análisis de las consecuencias pueden estar respaldados por información histórica sobre pérdidas o algún nivel de comprensión científica de los peligros, la exposición y la vulnerabilidad en la región de interés.

El análisis determinista de los peligros volcánicos puede ser útil para informar la toma de decisiones para la planificación de emergencias, la zonificación del uso de la tierra y la mitigación de peligros; sin embargo, tiene limitaciones, particularmente en su capacidad para dar cuenta de las incertidumbres inherentes y la imprevisibilidad de los procesos volcánicos.

Mapas de amenaza de origen determinista

Al elaborar un mapa de amenaza volcánica, los científicos se apoyan, principalmente, en la actividad volcánica pasada para evaluar los riesgos potenciales de futuras erupciones. Esto se debe a que las erupciones pasadas brindan información importante sobre el comportamiento y las características del volcán, incluidos los tipos de peligros que puede producir, la frecuencia e

intensidad de las erupciones y las áreas que pueden ser más vulnerables a la actividad volcánica.

Si bien los depósitos encontrados y estudiados en el pasado son factores importantes para crear un mapa de amenaza volcánica, no son los únicos. Otros factores que se consideran incluyen el historial de erupciones del volcán, el tamaño y el tipo del volcán, la ubicación y las características de las aberturas y fisuras volcánicas, y la proximidad y vulnerabilidad de las poblaciones e infraestructura circundantes, por lo tanto, los mapas de amenaza volcánica no son simplemente compilaciones del pasado.

Es decir, un mapa de amenaza volcánica determinista es un tipo de mapa que identifica y delinea áreas que, probablemente, se verán afectadas por diferentes tipos de peligros volcánicos (por ejemplo, flujos de lava, flujos piroclásticos, lahares, etc.) en función de escenarios específicos de actividad volcánica. Estos mapas se crean utilizando modelos que incorporan una variedad de datos geológicos, geofísicos e históricos para evaluar el impacto potencial de futuras erupciones (ver por ejemplo Hurtado y Cortéz, 1997). El propósito de un mapa determinista de amenazas volcánicas es ofrecer una representación precisa y exhaustiva de las áreas con mayor riesgo de amenazas volcánicas, de tal modo que los responsables de la toma de decisiones instauren medidas adecuadas para proteger a las personas y las propiedades. Una característica típica de los mapas de amenaza volcánica deterministas es que no es posible discriminar efectos locales relacionados con la exposición de elementos expuestos, como por ejemplo, no se puede obtener información del cambio de velocidad o altura de inundación con la distancia de un flujo, o topografía o ángulos de exposición de los elementos expuestos, ya que típicamente se dividen en pocas y amplias zonas que no permiten discriminar efectos locales.

Caso volcán Galeras

Tomando como base los estudios geológicos realizados por Calvache (1990), complementados con modelamiento y otros estudios previos del, en ese entonces, Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química (Ingeominas), que desarrolló el estudio de las amenazas del volcán Galeras y que culminó en la compilación de las mismas en la tercera versión del mapa de amenazas del volcán Galeras, el cual zonifica tres niveles de amenaza: alta,

media y baja (Hurtado y Cortéz, 1997; Ingeominas, 1997). Posteriormente, el Servicio Geológico Colombiano realizó un ajuste a ese mapa, generando una nueva versión (SGC, 2015a), que en adición a los insumos usados en la tercera versión, incluyeron trabajos más recientes, el mayor conocimiento y estilo eruptivo del volcán derivado del monitoreo realizado por el Servicio Geológico Colombiano desde 1989². Tanto en la tercera versión, como su actualización, consideraron todas las amenazas posibles de Galeras, como flujos de lava, PDC, lahares, caídas piroclásticas, proyectiles balísticos y onda de choque. Como se observa en la Figura 16, cada zona se interpreta como de igual peligrosidad, independientemente de la distancia al cráter, la ubicación geográfica u otros factores.

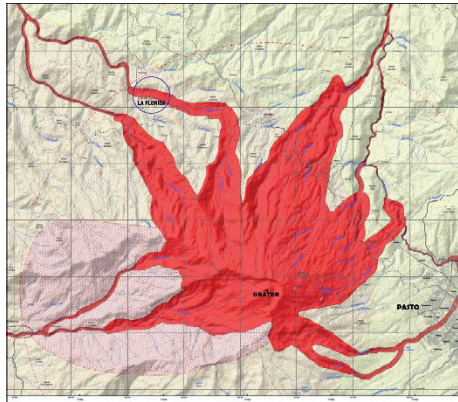


Figura 16. Mapa de amenazas del volcán Galeras, 2015

Nota. Tomado de la cartografía del Servicio Geológico Colombiano (2015).

Análisis probabilista de la amenaza

Generalidades

El análisis probabilístico de los peligros volcánicos implica el uso de modelos estadísticos y estocásticos para evaluar la probabilidad y el impacto potencial de diferentes peligros. Este enfoque implica analizar datos sobre erupciones pasadas y características geológicas para desarrollar una comprensión

² Para ampliar información se recomienda ver informes técnicos respectivos en <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Paginas/informes-tecnicos.aspx>

probabilística de la probabilidad y las posibles consecuencias de diferentes tipos de peligros volcánicos.

El análisis probabilístico de los peligros volcánicos puede ser útil para proporcionar estimaciones más precisas de la probabilidad y los impactos potenciales de diferentes peligros, teniendo en cuenta las incertidumbres y variaciones inherentes al comportamiento volcánico. Sin embargo, también requiere una cuidadosa consideración de los supuestos e incertidumbres en los modelos utilizados y la calidad y cantidad de los datos disponibles. Como tal, a menudo se complementa con análisis deterministas que incorporan modelos físicos y comprensión científica de los procesos volcánicos.

El modelado computacional es un componente importante de los análisis probabilísticos de los peligros volcánicos. Esto implica el uso de programas informáticos para simular y predecir el comportamiento de los procesos volcánicos y sus posibles impactos.

En el análisis probabilístico, el modelado computacional se usa para desarrollar modelos estadísticos y estocásticos del comportamiento volcánico, que se pueden usar para estimar la probabilidad y el impacto potencial de diferentes peligros. Estos modelos pueden incorporar datos sobre erupciones pasadas y características geológicas, así como la actividad sísmica, las emisiones de gases y la deformación del suelo.

El modelamiento computacional es útil para predecir el comportamiento de peligros volcánicos que no se han observado en el pasado o para los cuales hay datos limitados disponibles. No obstante, es importante reconocer que a pesar de las limitaciones de estos modelos y las incertidumbres asociadas con sus predicciones, cada vez, se mejora su capacidad predictiva; véase por ejemplo, el modelamiento computacional de la formación de un PDC de la Figura 17, que permite analizar los mecanismos de formación de PDC en 3D (Esposti Ongaro et al., 2020, Esposti Ongaro et al., 2012). Como tal, el modelado computacional, a menudo, se complementa con observaciones y mediciones de campo, así como con el juicio de expertos y los aportes de las partes interesadas.

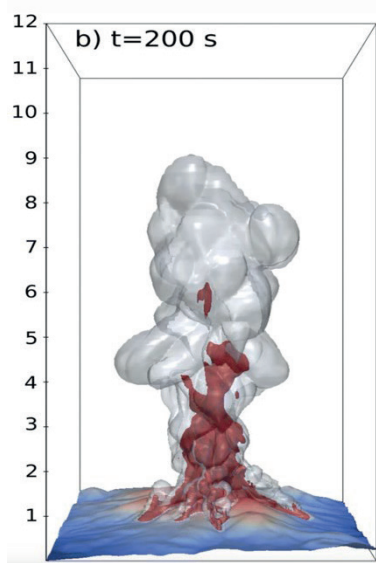


Figura 17. Modelamiento 3D de un PDC, después de 200 segundos del inicio de la erupción

Nota. La altura de la columna en km. Modificada de la figura 4 que fue tomada de Ongaro et al. (2020).

Las evaluaciones probabilísticas tienen en cuenta la incertidumbre inherente a la predicción de la ocurrencia y las características de los peligros naturales, como la frecuencia, la magnitud y la ubicación de las erupciones volcánicas. Esta incertidumbre puede surgir debido a las limitaciones en la disponibilidad de datos, la comprensión científica y las técnicas de modelado.

En resumen, el enfoque probabilista utiliza modelos estadísticos y computacionales para estimar la probabilidad de diferentes eventos volcánicos y sus posibles consecuencias. Los modelos probabilísticos incorporan incertidumbres en los parámetros de entrada, como el tamaño, la duración y la ubicación de la erupción, para producir una variedad de posibles resultados con probabilidades asociadas.

El Marco de Sendai

Como se evidenció en la sección anterior, existen, principalmente, dos formas de realizar el análisis de la amenaza, y surge la cuestión de cuál método se debe escoger. En este sentido, es importante mencionar el accidente de la planta nuclear de Fukushima en 2011, que resultó en una liberación a gran escala de materiales radiactivos luego de un terremoto de magnitud 9.0 y posterior tsunami (ver Figura 18). Su importancia estriba en que tuvo implicaciones significativas para las prácticas de gestión y evaluación de riesgos, incluido el uso de enfoques probabilísticos (Yang, 2014). El accidente resaltó la importancia de considerar eventos de baja probabilidad y altas consecuencias en las evaluaciones de riesgo y la necesidad de evaluaciones más realistas de las incertidumbres y sus impactos en el riesgo (National Research Council, 2014; Yang, 2014). Este evento generó conciencia sobre la importancia de incorporar las incertidumbres y sus impactos en las evaluaciones de riesgos y las prácticas de gestión. Esta conciencia ha contribuido a un reconocimiento más amplio del valor de los enfoques probabilísticos en la evaluación y gestión de riesgos de peligros naturales, incluidos los peligros volcánicos.



Figura 18. *Tsunami generado por el sismo de magnitud 9 frente a las costas de Japón en 2011*

Nota. Tomado de Miyaco City Officer (2011).

Dentro de este contexto surge el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 (UNISDR, 2015), el cual es un acuerdo global adoptado por los estados miembros de las Naciones Unidas en 2015, que establece un enfoque integral para reducir los riesgos de desastres. Este acuerdo mundial reconoce la importancia del análisis probabilístico de amenazas en la reducción del riesgo de desastres.

Específicamente, el Marco de Sendai destaca la necesidad de un enfoque basado en la ciencia para la reducción del riesgo de desastres, que incluye el uso de análisis probabilísticos para evaluar la probabilidad y los impactos potenciales de diferentes amenazas (UNISDR, 2017b, 2015). Enfatiza en la importancia de integrar el conocimiento científico, incluido el análisis probabilístico, en las políticas y la toma de decisiones, y garantizar que este conocimiento se comunique de manera efectiva a las partes interesadas.

El Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres (2015-2030) (UNISDR, 2015), recomienda la inclusión de evaluaciones probabilísticas en el análisis de peligros y riesgos porque este enfoque proporciona una comprensión más integral de los riesgos potenciales que plantean los peligros naturales, incluida la actividad volcánica.

Según este marco, al incorporar evaluaciones probabilísticas, el análisis de peligros y riesgos puede proporcionar una comprensión más realista y completa de la probabilidad y los impactos potenciales de los eventos volcánicos. Esta información se puede utilizar para informar las estrategias de reducción de riesgos, incluida la planificación del uso de la tierra, la preparación para emergencias y el desarrollo de infraestructura, y para priorizar las inversiones de reducción de riesgos.

El Marco de Sendai también reconoce la necesidad de un enfoque de amenazas múltiples para la reducción del riesgo de desastres, que tenga en cuenta las interacciones potenciales y los efectos en cascada de las diferentes amenazas. El análisis probabilístico puede ser particularmente útil en este contexto, ya que puede ayudar a identificar los escenarios más probables y severos y sus impactos potenciales, así como las incertidumbres y variaciones en el comportamiento de los peligros.

Así, el Marco de Sendai destaca la importancia del análisis probabilístico para informar estrategias efectivas de reducción del riesgo de desastres y enfatiza la necesidad de conocimiento científico y toma de decisiones basada en evidencia en este proceso. Más aún, las evaluaciones probabilísticas son una herramienta valiosa para la toma de decisiones en condiciones de incertidumbre. Pueden proporcionar a los responsables de la toma de decisiones una gama de posibles resultados y sus probabilidades asociadas, lo que permite la selección de medidas de reducción de riesgos que son apropiadas para un nivel determinado de tolerancia al riesgo. En general, el marco concluye en este sentido que la incorporación de evaluaciones probabilísticas en el análisis de peligros y riesgos es un paso importante para mejorar la comprensión de los peligros volcánicos y reducir los riesgos que estos representan.

Mapas de amenaza volcánica probabilistas

Los mapas probabilísticos de amenazas volcánicas son un tipo de mapa que identifica y delinea áreas que probablemente se verán afectadas por diferentes tipos de amenazas volcánicas, en función de la probabilidad de que ocurran durante un período de tiempo determinado. Estos mapas, generalmente, se crean utilizando modelos probabilísticos que tienen en cuenta una variedad de variables, como la frecuencia de erupciones pasadas, el estado actual del volcán, las características geológicas del área que rodea al volcán y escenarios hipotéticos que aún no ocurren o no se tiene registro geológico de ello (típico de pequeñas oleadas piroclásticas o nubes acompañantes), que se recrean usando modelamiento computacional.

El resultado de un mapa probabilístico de peligro volcánico se expresa en términos de la probabilidad de que ocurra un tipo específico de peligro volcánico con ciertas características de interés, dentro de un marco de tiempo dado. Por ejemplo, un mapa probabilístico de peligro volcánico puede indicar que existe un 10 % de probabilidad de que ocurra un flujo piroclástico dentro de un área específica durante los próximos 50 años, o de que hay un 20 % de probabilidad de un impacto de una onda de choque con una presión dinámica de 35 kPa en un lugar de interés y del 10 % de probabilidad de un impacto con una presión dinámica de 50 kPa en el mismo lugar.

Los mapas probabilísticos de amenazas volcánicas son útiles porque proporcionan a los tomadores de decisiones una comprensión cuantitativa de la probabilidad de que ocurran diferentes tipos de amenazas volcánicas dentro de un área específica a lo largo del tiempo. Esta información se puede utilizar para informar la planificación del uso de la tierra, la gestión de emergencias y las estrategias de reducción del riesgo de desastres. Además, proporcionan más información en comparación con la que un mapa determinista puede ofrecer. Por ejemplo, en la ya citada Figura 16 del mapa de amenazas volcánicas del Galeras, la zona roja representa la amenaza por flujos piroclásticos, pero no indica lo evidente y, es que, a mayor distancia, menor la probabilidad de una afectación. Es decir, si bien un mapa determinista informa sobre la existencia de la amenaza, no puede decir nada sobre la probabilidad de esa amenaza con una característica de interés (como la probabilidad de impacto con una presión dinámica de 10 kPa, por ejemplo) impacte cierto lugar, independiente del grado de mitigabilidad.

Conceptos importantes

Probabilidad. El concepto de probabilidad se refiere a la posibilidad de que ocurra un evento. Es una medida de incertidumbre o aleatoriedad y, generalmente, se expresa como un número entre 0 y 1, donde 0 significa que el evento es imposible y 1 significa que es seguro que ocurrirá.

Por ejemplo, la probabilidad de lanzar una moneda y que caiga cara arriba es de 0.5 o 50 %, suponiendo que la moneda no tenga defectos y tenga las mismas posibilidades de que caiga cara o cruz. De manera similar, la probabilidad de sacar un seis en un dado estándar de seis caras es $1/6$, o aproximadamente 0.17. En caso de lanzar 2 dados (ver Figura 19) existen $6*6 = 36$ combinaciones posibles, la probabilidad de sacar una en especial es de $1/36$.



Figura 19. Lanzamiento de dos dados

Nota. La probabilidad de sacar un número entre el 2 y el 12 es $1/36$. Imagen tomada de BBC Mundo (19 noviembre 2016).

En aplicaciones prácticas, la probabilidad se usa también para hacer predicciones y evaluar riesgos. Por ejemplo, las compañías de seguros usan la probabilidad para calcular las primas y determinar los pagos, y los meteorólogos usan la probabilidad para predecir la probabilidad de lluvia o tormentas. En ciencia e ingeniería, la probabilidad se usa para modelar sistemas complejos y hacer predicciones basadas en los datos disponibles. De hecho, en el campo de la Gestión del Riesgo de Desastres, las Naciones Unidas (UNISDR, 2017a) consideran que:

Los modelos probabilísticos se han convertido en una herramienta básica para facilitar una mejor gestión de riesgos en (re-a) seguros y están formando cada vez más la base de estrategias integrales de gestión de riesgos en la sociedad civil, gobierno y sector privado: en última instancia, permiten la reducción de riesgos. (p. 12).

En general, el concepto de probabilidad es una herramienta importante para comprender y manejar la incertidumbre en varios campos y aplicaciones.

Probabilidad condicional. La probabilidad condicional es un concepto matemático que se refiere a la probabilidad de que ocurra un evento, dado que ya ha ocurrido otro. Se expresa como la probabilidad de que ocurra el evento A , dado que ha ocurrido el evento B , y se denota como $P(A|B)$.

La fórmula para la probabilidad condicional es indicada en la ecuación 3:

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad 3$$

donde $P(A \cap B)$ es la probabilidad de que ocurran tanto A como B , y $P(B)$ es la probabilidad de que ocurra el evento B .

La probabilidad condicional es importante porque nos permite calcular la probabilidad de que ocurra un evento en un escenario más complejo, donde la ocurrencia de un evento afecta la probabilidad de otro. Por ejemplo, considere una prueba médica para una enfermedad, donde la prueba tiene una cierta tasa de falsos positivos. La probabilidad de que un paciente tenga la enfermedad, dado un resultado positivo de la prueba, es la probabilidad condicional de la enfermedad dado el resultado de la prueba.

La probabilidad condicional se usa en muchos campos, incluidas las estadísticas, el aprendizaje automático, las finanzas y la ingeniería, entre otros. Permite modelar sistemas complejos y hacer predicciones basadas en datos existentes y conocimientos previos.

En el ámbito volcánico, la probabilidad condicional volcánica se refiere a la probabilidad de que ocurra un evento volcánico, dadas ciertas condiciones o factores que afectan la probabilidad del evento. Por ejemplo, la probabilidad condicional de que un flujo piroclástico afecte un lugar determinado, depende de que ocurra una erupción y que se genere dicho flujo en la dirección de interés.

Para calcular las probabilidades condicionales volcánicas, los científicos e investigadores utilizan una variedad de fuentes de datos y técnicas analíticas, incluidos registros históricos de actividad volcánica, estudios geológicos del área alrededor del volcán, datos satelitales y modelos informáticos. Al analizar estas fuentes de datos y evaluar el impacto potencial de diferentes factores sobre la probabilidad de actividad volcánica, los científicos pueden estimar la probabilidad de que ocurra una erupción durante un cierto período de tiempo o bajo ciertas condiciones.

Las probabilidades condicionales son útiles para la evaluación de peligros volcánicos y la gestión de riesgos, ya que permiten, a los responsables de la toma de decisiones, comprender la probabilidad de que ocurran diferentes peligros volcánicos en un área determinada y tomar las medidas adecuadas para mitigar los riesgos. Pongamos por caso, si se determina que la probabilidad condicional de que ocurra un flujo piroclástico en un área en particular es alta, las autoridades podrían implementar planes de evacuación y otras medidas para proteger a las comunidades cercanas. Al utilizar la probabilidad condicional volcánica como herramienta para la toma de decisiones, los científicos y los responsables de la toma de decisiones pueden trabajar juntos para minimizar los impactos de los peligros volcánicos en las personas, la infraestructura y el medio ambiente.

La ecuación 3 puede expresarse como se indica en la ecuación 5:

$$P(A \cap B) = P(B) * P(A|B) \quad 4$$

5

Como se puede observar, se indica que la probabilidad de que ocurran simultáneamente los eventos A y B , equivalen a la multiplicación de la probabilidad de que ocurra el evento B y la probabilidad de que suceda el evento A dado B .

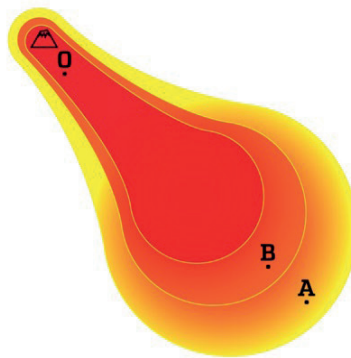


Figura 20. Esquema indicando un flujo amenazante que puede ocurrir desde la fuente O y que afecta tanto a A como a B con diferentes probabilidades

A modo de ejemplo, en el caso de las amenazas naturales como las volcánicas, si en la Figura 20 el punto O representa el lugar donde se genera un evento potencialmente destructivo (un flujo piroclástico), entonces $P(O)$ será la probabilidad que ese evento se genere en O . Para que el evento afecte a los puntos A o B se debe dar necesariamente la generación de el mismo en O , es decir, deben suceder los dos eventos, siendo su probabilidad $P(A \cap O)$ y $P(A|O)$, es la probabilidad de que se afecte la localidad A (o B) dado O . Por tanto, según la ecuación 5, la probabilidad de que ocurran simultáneamente A (o B) y O es:

$$P(A \cap O) = P(O) * P(A|O)$$

En el ámbito volcánico, si los datos disponibles son la geología del volcán, incluyendo la reología de su magma y su historia eruptiva, evaluar la probabilidad de una erupción volcánica y la generación de fenómenos destructivos como flujos piroclásticos puede ser una tarea desafiante debido a la complejidad de los procesos físicos y geológicos subyacentes involucrados. La probabilidad de una erupción y la generación de flujos piroclásticos puede verse afectada por varios factores, incluido el tipo de volcán, la composición y viscosidad del magma, la presencia de gas y vapor, e incluso la dirección del viento (ver Sparks et al., 1997).

Si bien la geología del volcán y su historial eruptivo pueden proporcionar información valiosa sobre su comportamiento pasado, predecir la probabilidad de futuras erupciones y flujos piroclásticos basándose solo en estos datos puede resultar en incertidumbres muy altas debido a la variabilidad de la actividad volcánica. La frecuencia y magnitud de las erupciones volcánicas pueden variar ampliamente entre diferentes volcanes, e incluso dentro del mismo volcán a lo largo del tiempo. No obstante, el modelamiento computacional se ha convertido en herramienta crucial para complementar los datos que proporciona la geología y la historia de un volcán, al proporcionar resultados de tantos escenarios hipotéticos como se necesite.

Por lo anterior, debido a la alta incertidumbre en estimar la probabilidad del desencadenamiento de una erupción y un evento potencialmente dañino ($P(O)$) y, en especial, debido a la letalidad de algunas de las amenazas volcánicas, es común optar por la probabilidad condicionada a la ocurrencia de una erupción y el desencadenamiento de la amenaza particular, independiente de cuándo se

produciría tal erupción, esto es $P(O)=I$ en la Figura 20, es decir, la probabilidad de que ocurra el evento A y O a la vez depende de la probabilidad de que el evento amenazante afecte a A dado O .

Es de anotar que, como se verá en el apartado de modelamiento, que $P(A|O)$ se puede inferir de datos geológicos complementados con modelamiento computacional.

Probabilidad Bayesiana (BPA). BPA es un método estadístico utilizado para estimar la probabilidad de que ocurra un evento basado en una combinación de conocimiento previo y nueva información. El enfoque implica construir un modelo de probabilidad que represente la incertidumbre y la variabilidad de los datos, y luego actualizar este modelo a medida que haya nuevos datos disponibles.

El enfoque bayesiano de la probabilidad se basa en el concepto de probabilidad subjetiva, que es el grado de creencia que una persona asigna a un evento en particular en función de su conocimiento y experiencia. En la evaluación probabilística bayesiana, las probabilidades subjetivas se actualizan mediante el teorema de Bayes, que proporciona una fórmula matemática para actualizar las probabilidades en función de nueva evidencia (Ding y Liu, 2012; Ferson, 2005).

La ecuación general para la evaluación probabilística bayesiana es el teorema de Bayes, que proporciona un marco matemático para actualizar las probabilidades previas en función de nuevas pruebas. El teorema se muestra en la Ecuación 6.

$$P(H|D) = \frac{P(H) * P(D|H)}{P(D)} \quad 6$$

Dónde:

$P(H|D)$ es la probabilidad posterior de la hipótesis (H) dados los datos observados (D). Esto representa la probabilidad actualizada de la hipótesis basada en la nueva evidencia.

$P(D|H)$ es la probabilidad de los datos (D) dada la hipótesis (H). Esto representa la probabilidad de observar los datos, dado que la hipótesis es verdadera.

$P(H)$ es la probabilidad previa de la hipótesis. Esto representa la probabilidad de la hipótesis antes de que se considere cualquier nueva evidencia.

$P(D)$ es la probabilidad de observar los datos. Esto a veces se denomina evidencia o probabilidad marginal.

Cabe anotar que, la ecuación 6 es la misma ecuación 3, cuando $P(D \cap H) = P(H) * P(D|H)$.

Evaluación probabilística volcánica bayesiana (BVPA). BVPA es un método utilizado para evaluar la probabilidad de erupciones volcánicas y los peligros asociados, utilizando un marco estadístico bayesiano. El enfoque implica la integración de múltiples fuentes de datos y experiencia, incluidos datos geológicos e históricos, datos de monitoreo en tiempo real y conocimiento experto, y modelamiento computacional para estimar la probabilidad de actividad volcánica futura y su impacto potencial.

El enfoque BVPA utiliza estadísticas bayesianas para combinar conocimientos previos y datos de múltiples fuentes para actualizar y refinar las estimaciones de la probabilidad de futuros eventos volcánicos. Permite la incorporación de información incierta e incompleta y puede proporcionar una evaluación más sólida y realista de la probabilidad de actividad volcánica en comparación con los métodos tradicionales.

BVPA, en general, implica la construcción de un modelo probabilístico que considera la probabilidad de diferentes escenarios haciendo un análisis dinámico de una secuencia incluso de múltiples dimensiones (Ding y Liu, 2012; Ferson, 2005; Gutiérrez y Zhang, 2009; Solow, 2001), como lo es una erupción o un flujo piroclástico, y la incertidumbre asociada con cada escenario. Esto permite tratar estadísticamente el problema de determinar la probabilidad de que un flujo llegue incluso desde varias fuentes.

El enfoque BVPA se ha aplicado a una variedad de volcanes en todo el mundo, incluido el Monte Vesubio en Italia, el Monte Etna en Sicilia y el volcán Soufrière Hills en Montserrat (Aspinall et al., 2012; Marzocchi et al.,

2012). Ha demostrado ser una herramienta útil para la evaluación de peligros volcánicos y la mitigación de riesgos, lo que permite a los responsables tomar decisiones informadas y medidas adecuadas para proteger a las personas y propiedades de posibles peligros volcánicos.

BVPA es una herramienta importante, en especial, a la hora de evaluar la probabilidad de arribo de un fenómeno potencialmente destructivo cuando este provenga de varias fuentes, como es el caso de las corrientes piroclásticas de densidad (PDC), cuyo punto de inicio es incierto pero que, dada la movilidad de este tipo de flujos y las condiciones topográficas particulares, un mismo lugar puede verse afectado desde varios frentes. Por ejemplo, si se tienen dos fuentes potenciales (lugares potenciales de colapso de columna, por ejemplo) $S1$ y $S2$.



Figura 21. Esquema ilustrando dos flujos con fuentes $S1$ y $S2$ que pudieran afectar a un mismo lugar A

Si desde esas dos mismas fuentes se puede alcanzar un punto de interés A (ver Figura 21), la probabilidad frecuencial sería computada como el número de veces que el flujo llega a A (N_A), entre el número total de veces que el flujo se originó en $S1$ y $S2$ ($N_T = N_{S1} + N_{S2}$), o $P(A) = N_A/N_T$. Pero, en caso de amenazas naturales, se da el caso frecuente que se pueden tener muchas fuentes potenciales, pero cuya probabilidad de llegada es nula, como el caso de un flujo piroclástico que arranca en dirección opuesta a A desde una fuente digamos $S3$. Bajo un análisis frecuencial, el número de veces que el flujo arranca de $S3$

afectaría a N_T haciéndolo más grande y reduciendo $P(A)$ de manera casi arbitraria. La alternativa es usar una extensión de la estadística Bayesiana, donde la ecuación 7 se convierte en la expresión general de la ecuación 6:

$$P(S_i|A) = \frac{P(S_i) * P(A|S_i)}{P(A)} \quad 7$$

Donde S_i se refiere a la fuente i .

Manipulando la ecuación 7 se obtiene la probabilidad de que el flujo afecte a A , dado que se origine un flujo en una fuente cualquiera S_i . O sea, se obtiene un número de probabilidades igual al número de fuentes contempladas. La teoría de la inferencia bayesiana dice que la probabilidad final es la sumatoria de estas probabilidades (Link y Barker, 2010). Cabe aclarar que, la aplicación de la ecuación 7 requiere de la probabilidad *a priori* $P(S_i)$. En el caso de la amenaza volcánica es razonable suponer que, inicialmente, todas las fuentes tienen la misma probabilidad de afectar a A (esta probabilidad es ajustada en cada iteración de la aplicación de la teoría Bayesiana). Es decir, si n es el número de fuentes, entonces $P(S_i) = 1/n$. Los detalles del ajuste de esta hipótesis inicial se encuentran en Moreno y Gonzales-Torre (2006) y Guerrero (2016).

El problema del muestreo. Para poder obtener las probabilidades de que un punto sea alcanzado o afectado por un evento amenazante, se debe tener un muestreo de datos estadísticamente significativos. Esto es lo que se conoce como “El Problema del Muestreo” (Brinkhurst, 1974; Furfey, 1947; Rogerson, 2005), que se refiere al desafío de seleccionar un subconjunto representativo de datos u observaciones de una población o conjunto de datos más grande. El objetivo del muestreo es obtener un subconjunto que refleje con precisión las características, la distribución y las propiedades de la población más grande.

El problema del muestreo surge porque a menudo es poco práctico o imposible recopilar datos de una población completa debido a limitaciones de tiempo, recursos o accesibilidad. En cambio, los investigadores o analistas recopilan datos de una muestra, que es un subconjunto más pequeño de la población. El desafío radica en seleccionar una muestra que sea imparcial y

representativa de la población, de modo que las conclusiones extraídas del análisis de la muestra puedan generalizarse a la población más grande con un cierto nivel de confianza. La Figura 22 muestra el esquema de un terreno hipotético en el cual se ha hecho un intento de levantarlo con la información obtenida de un muestreo pobre de solo 5 puntos (puntos rojos); es evidente que esa información escasa no es suficiente para dar una idea ni siquiera cercana a la verdadera topografía de ese terreno.

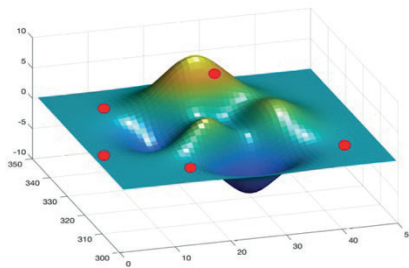


Figura 22. Representación de un terreno continuo

Nota. Los puntos rojos representan puntos de un muestreo pobre, estadísticamente no representativo.

El problema del muestreo implica tomar decisiones sobre el método a utilizar, determinar el tamaño de muestra apropiado y garantizar que el proceso evite sesgos o errores sistemáticos. Se emplean diferentes métodos de muestreo, como Monte Carlo (MC), el Muestreo Hiperúbico Latino (LHS), o el Muestreo Hiperúbico Latino Ortogonal (OLHS), para abordar problemas de muestreo específicos en función de las características de la población y los objetivos de la investigación.

En el caso de las simulaciones computacionales de fenómenos amenazantes de origen volcánico, cada simulación depende de ciertos parámetros de entrada, los cuales dependen del evento a simular. Los valores de estos parámetros de cada escenario hipotético son las incertidumbres del sistema inicial, las cuales resultan en una combinación de diferentes parámetros, como puede darse en la generación de PDC, la altura de colapso de una columna eruptiva, el lugar donde se inicia el flujo, los parámetros internos de fricción, reológicos, de tamaños de grano, etc. Estas

combinaciones deben estar restringidas a un rango finito de valores, es decir, entre valores máximos y mínimos. En el caso de las amenazas volcánicas, estos valores y las características físicas y reológicas de los fenómenos a analizar vienen dados por la historia geológica del volcán.

Como se verá más adelante, cada amenaza volcánica tiene su propia combinación de condiciones iniciales, que dependen de los datos de entrada requeridos por cada programa computacional; el número de combinaciones posibles resulta infinito al tratarse de números reales no enteros, por lo que se requiere un muestreo representativo de todos los casos posibles.

El *método de Monte Carlo (MC)* tiene como objetivo simular un gran número de posibles combinaciones de las variables para aproximar el comportamiento o distribución general. Es una técnica computacional utilizada para resolver problemas mediante muestreo aleatorio repetido (Eckhardt, 1987). Lleva el nombre del famoso casino Monte Carlo en Mónaco, conocido por sus juegos de azar.

La idea básica detrás del método de MC es simular procesos o sistemas aleatorios generando una gran cantidad de muestras o escenarios aleatorios. Estas muestras se extraen de distribuciones de probabilidad que representan las incertidumbres o la variabilidad en el problema que se estudia.

La precisión de los resultados de MC depende del número de muestras generadas. En general, a medida que aumenta el número de muestras, mejora la precisión de los resultados. Pero, el método de MC puede ser computacionalmente exigente para problemas con un gran número de variables o modelos complejos, en especial, cuando se trata de modelamiento a escala natural (Anderson, 1999; Dalbey et al., 2008; Matala, 2008). En particular, si se requiere una precisión del muestreo del orden $\varepsilon_s \sim 10^{-4}$, asumiendo una variabilidad moderada, se requeriría al menos un número de muestras $N_m = 1/\varepsilon_s^2 = 100.000.000$ (Dalbey et al., 2008), que lo hace computacionalmente impráctico a la hora de modelar fenómenos a escala natural, al menos con el poder de cómputo y técnicas numéricas desarrolladas a la fecha. Empero, este método es considerado como un punto de referencia a la hora de comparar resultados de otros métodos (Dalbey et al., 2008).

El *Muestreo Hipercúbico Latino (LHS)* es una técnica de muestreo estratificado que asegura una distribución uniforme de las muestras en el rango de cada variable. Proporciona una mejor cobertura del espacio de entrada en comparación con el muestreo aleatorio simple (Stein, 1987). Es una técnica de muestreo utilizada para generar un subconjunto representativo de muestras a partir de un espacio de parámetros multidimensionales.

LHS tiene como objetivo garantizar que los puntos muestreados se distribuyan uniformemente en el rango de cada variable de entrada mientras se mantiene una estructura estratificada, logrando una buena cobertura del espacio de parámetros, reduciendo el sesgo de muestreo y proporcionando una muestra representativa que capture la variabilidad de las variables de entrada.

LHS proporciona una mejora con respecto a MC, al garantizar una distribución más uniforme de las muestras en el espacio de parámetros (Pilger et al., 2008). Es útil en situaciones en las que, el número de muestras es limitado, pero se desea una cobertura representativa del espacio de entrada. La cantidad de muestras necesarias para LHS depende de la cantidad de variables y del nivel de precisión deseado, pero en general, se puede esperar una reducción de hasta el 90 % del número de muestras requeridas por MC (Baalousha, 2009). Una pauta general es usar un tamaño de muestra que sea una potencia de 2 (por ejemplo, 16, 32, 64, 128, 256 muestras) para LHS.

El *Muestreo Hipercúbico Latino Ortogonal (OLHS)* es una técnica de muestreo avanzada que se basa en los principios del muestreo LHS. Su objetivo es lograr un diseño de muestreo más eficiente y robusto mediante la incorporación de arreglos ortogonales (Baalousha, 2009).

El objetivo principal de OLHS es minimizar la correlación y maximizar el llenado de espacio dentro de los puntos muestreados, manteniendo la estructura estratificada de LHS. Las matrices ortogonales utilizadas en OLHS aseguran que las muestras se distribuyan de una manera más equilibrada y sistemática, lo que mejora la cobertura del espacio de parámetros y reduce los sesgos potenciales. En general, OLHS puede reducir el muestreo de MC hasta en un 99 % (Baalousha, 2009).

Una comparación gráfica de las ventajas tanto de LHS como de OLHS se muestra en la Figura 23, en la cual por medio de una distribución de ocho

puntos se puede ver que MC puede resultar en agrupaciones aleatorias dejando el espacio muestral con sesgos (Figura 23a), mientras que LHS (Figura 23b) al ser estratificado, presenta una mejor distribución, que es optimizada por OLHS (Figura 23c).

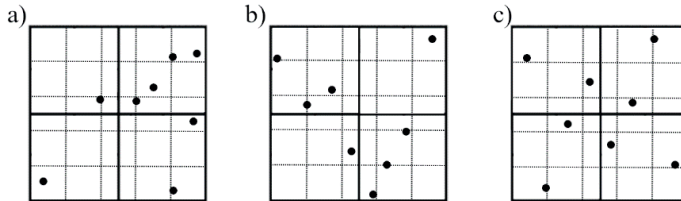


Figura 23. Distribución de 8 puntos en un plano usando: a) MC, b) LHS y c) OLHS

Modelamiento computacional

El modelamiento computacional de las amenazas volcánicas juega un papel crucial en la comprensión y predicción del comportamiento de productos eruptivos potencialmente amenazantes, la evaluación de los riesgos potenciales y la formulación de estrategias de mitigación efectivas. Implica el uso de simulaciones por computadora y modelos matemáticos para simular varios procesos volcánicos y sus impactos en el medio ambiente circundante. Aquí hay algunos aspectos y enfoques clave involucrados en el modelado computacional de peligros volcánicos.

De particular interés son los modelos basados en la física, que simulan los procesos físicos que ocurren durante la evolución espacio-temporal de los fenómenos de potencial amenaza. Estos modelos incorporan principios fundamentales de dinámica de fluidos, transferencia de calor y flujo multifásico para simular el comportamiento de los materiales volcánicos. Se basan en ecuaciones matemáticas y métodos numéricos para resolver las ecuaciones de gobierno que representan los balances de energía, masa y momentum.

El modelado computacional de peligros volcánicos es un campo interdisciplinario que combina conocimientos de vulcanología, geofísica, dinámica de fluidos e informática. Estos modelos son herramientas valiosas para el monitoreo de volcanes, la evaluación de riesgos, la planificación del uso de la tierra y la toma de decisiones para mitigar los impactos de las erupciones volcánicas y proteger a las comunidades en riesgo. Cabe decir que,

para su uso se debe actuar de manera responsable sin dejar de lado su validación y calibración. Los modelos computacionales deben validarse y calibrarse utilizando datos y observaciones del mundo real para garantizar su precisión y confiabilidad. Esto implica comparar las predicciones del modelo con las mediciones de campo, los datos satelitales y los registros históricos de erupciones. La validación y la calibración ayudan a mejorar los modelos y aumentan la confianza en sus predicciones.

El modelamiento y la exposición

Una de las principales ventajas de este tipo de aproximación, es que permite estimar el efecto de la exposición de los elementos o inversiones de interés ante el impacto de un fenómeno volcánico. En sí, el efecto tanto de la proximidad a la fuente como su distribución espacial, o incluso factores como el ángulo de impacto, resulta automáticamente de la salida del modelamiento computacional, dependiendo de la escala del modelo considerado. Una escala muy gruesa puede no permitir ver el detalle de algo como una casa, resultando en una aproximación general que solo considera el efecto de la proximidad. Con todo, una escala detallada puede permitir estimar el efecto de factores como la distribución espacial o el ángulo de impacto. Por ejemplo, en un lahar, una edificación cuya fachada queda localizada de manera perpendicular a la dirección del flujo, va a acumular más material en ese frente que en la parte posterior, como se puede observar en los círculos negros de la Figura 24, mientras que topografías planas y una distribución de edificios que evitan el libre fluir del flujo, tienden a acumular más material, como lo muestra el círculo azul de la misma figura. También en la 24 se ve el efecto de la distancia respecto a un parámetro como la altura de inundación.

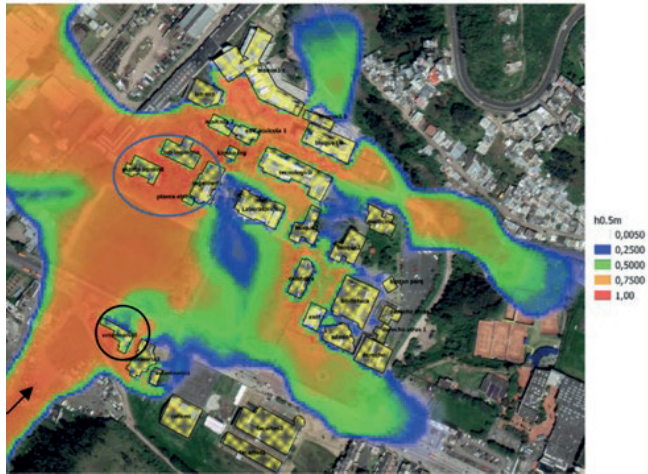


Figura 24. Probabilidades de inundación de 0.5 m de profundidad por lahar

Nota. La flecha indica la dirección media del flujo, los círculos negro y azul indican el efecto de las edificaciones en la profundidad del flujo. Modificado de Solarte Vallejo (2022)

Distribuciones de probabilidad

Cuando se modelan amenazas volcánicas, se utilizan comúnmente varias distribuciones probabilísticas para representar diferentes aspectos de los procesos volcánicos. La elección de las distribuciones depende del peligro específico que se está modelando y de los datos disponibles. Algunas de las distribuciones probabilísticas más utilizadas en el modelado de amenazas volcánicas incluyen entre otras:

Distribución exponencial. La distribución exponencial se usa a menudo para modelar los tiempos entre llegadas entre erupciones volcánicas o eventos volcánicos como flujos de lava o flujos piroclásticos. Asume una tasa de riesgo constante y se usa a menudo cuando los eventos ocurren independientemente unos de otros. Por ejemplo, se tiene una distribución exponencial cuando se trata de predecir o entender la distribución de piroclastos de caída con la distancia (Pyle, 1989).

La función de densidad de probabilidad (PDF) de la distribución exponencial viene dada como se indica en. La ecuación 8:

$$f(x, \lambda) = \lambda e^{-\lambda x} \quad 8$$

Dónde:

x es la variable aleatoria que representa el valor de interés,
 λ es un parámetro, conocido como el inverso de la media.

Es de notar que la probabilidad exponencial implica que la probabilidad para una intensidad nula es del 100 %.

Distribución normal o Gaussiana. La distribución normal, también conocida como distribución gaussiana, se utiliza para modelar parámetros volcánicos como la deformación del suelo, las emisiones de gases o los niveles de ruido. Es adecuado cuando los datos presentan una distribución simétrica y en forma de campana, como cuando se trata de modelar la incertidumbre en el espesor de depósitos de caída de ceniza. Este es el caso cuando se tiene un conjunto de datos de espesores de caída de ceniza observados de erupciones volcánicas anteriores. Podemos estimar la media (μ) y la desviación estándar (σ) de la distribución en función de los datos observados. Luego, la distribución gaussiana se puede usar para generar estimaciones probabilísticas del espesor de la caída de ceniza en diferentes lugares durante futuras erupciones³.

La PDF de la distribución normal, también conocida como distribución gaussiana, viene dada por:

$$f(x, \mu, \sigma) = \left(\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \right) e^{-(x-\mu)^2 / (2\sigma^2)} \quad 9$$

Dónde:

x es la variable aleatoria que representa el valor de interés,
 μ es la media de la distribución,
 σ es la desviación estándar de la distribución.

³ Para detalles y aplicación, consultar Sanchez (2014), Titos et al. (2022).

Distribución de Weibull. La distribución de Weibull (Weibull, 1951) es una distribución versátil que se puede utilizar para modelar varios peligros volcánicos. En este ámbito, se emplea para representar la duración o el tiempo de vida de las erupciones volcánicas, el tamaño de las partículas de ceniza volcánica o el tamaño de las bombas volcánicas y análisis probabilista de amenazas. De hecho, es de uso típico en estudios probabilistas de fenómenos volcánicos (ver por ejemplo Sandri et al., 2016; Garcia-Aristizabal et al., 2018). Un ejemplo son los PDC cuyo alcance puede tener una distribución probabilista tipo Weibull. Mediante el análisis de datos históricos y el estudio de las características de los volúmenes de depósitos de caída cuyo alcance puede tener una distribución probabilista tipo Weibull (Bonadonna y Costa, 2012).

La distribución de probabilidad acotada de Weibull viene dada por:

$$P(x) = n/\lambda^n x^{n-1} e^{-(x/\lambda)^n} \quad 10$$

Dónde:

x es la variable aleatoria que representa el valor de interés,

n es un parámetro exponencial que depende del fenómeno.

k es el parámetro de forma, que determina la forma de la distribución,

λ es el parámetro de escala, que controla la escala o ubicación de la distribución.

Esta distribución proporciona pronósticos razonables incluso con muestreos pequeños (Quinn y Quinn, 2010; Weibull, 1951).

Para el caso de fenómenos de origen volcánico es usual asumir $n=1$ y a λ como la media, como en Garcia-Aristizabal et al. (2018), Sandri et al. (2012) y Sandri et al. (2016).

Proceso de Regresión Gausiana (GRP). El Proceso de Regresión Gausiano (GRP) (Schulz et al., 2018), también conocido como modelado de procesos gaussianos, es una técnica de regresión no paramétrica flexible, de tipo Bayesiano, que se utiliza para modelar y predecir relaciones complejas entre variables. Se basa en los principios de los procesos gaussianos, que son

coleccionaciones de variables aleatorias, cualquier número finito de las cuales tiene una distribución gaussiana conjunta.

En GPR se modela la función subyacente que relaciona las variables de entrada (características) con las variables de salida (objetivos) de manera probabilística. A diferencia de los modelos de regresión paramétricos tradicionales que asumen una forma funcional fija con parámetros específicos, GPR no hace suposiciones explícitas sobre la forma de la función. En su lugar, modela la función de manera aleatoria de un proceso gaussiano.

La idea clave detrás de GPR es que los valores de la función en cualquier conjunto de puntos de entrada se distribuyen conjuntamente en Gauss. Esto permite definir una función media y una función de covarianza (también llamada función kernel), que caracterizan la distribución de la función en todo el espacio de entrada.

Para un número finito de datos de entrada existen un número infinito de funciones para interpolar o ajustar esos datos⁴. En GPR el proceso gaussiano ajusta una regresión sobre ese número infinito de funciones de interpolación (Wang, 2022), comenzando por la distribución probabilista gaussiana (Ecuación 10).

En el ámbito del análisis probabilista de los peligros volcánicos, es una herramienta valiosa para comprender y cuantificar las incertidumbres asociadas con las amenazas volcánicas. El modelo GPR puede incorporar varios datos geológicos, topográficos, históricos o resultados de modelamiento computacional para predecir las probabilidades de impacto de una amenaza en diferentes lugares. Además, GPR puede manejar datos escasos y distribuidos de manera desigual, haciéndolo adecuado para evaluaciones de peligro volcánico, donde los datos pueden ser limitados.

La Figura 25 muestra un ejemplo de distribuciones probabilistas que clásicamente se usan en el análisis de amenazas, la línea negra muestra la distribución exponencial, donde eventos pequeños son muy probables, en contraste con los eventos de baja intensidad, cuya probabilidad termina tendiendo a cero. En la misma figura, se puede observar en color azul, la

⁴ Se recomienda ver cualquier libro sobre análisis numérico.

distribución normal, donde los eventos pequeños de intensidad cercana a cero tienen una probabilidad más alta, mientras que aquellos muy grandes tienen una tendencia a una probabilidad nula. La distribución Weibull, mostrada en la línea roja, acepta que si bien los eventos muy pequeños pueden tener bajas probabilidades, una vez se contemplan eventos ligeramente de mayor magnitud, su probabilidad crece hasta alcanzar un pico, para luego descender hasta presentar una tendencia nula para eventos muy grandes.

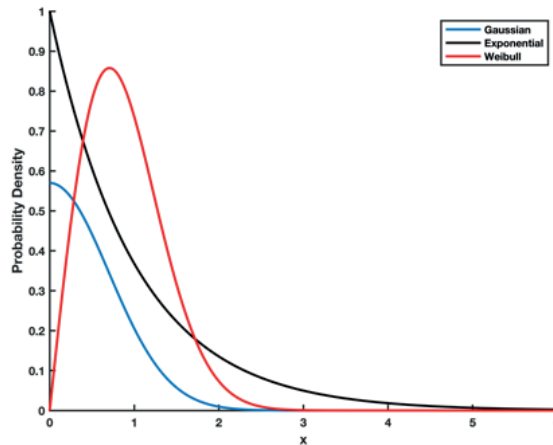


Figura 25. Ejemplos de distribuciones normal

Nota. (línea azul), exponencial (línea negra) y Wibull (línea roja). Fuente: esta investigación

Es importante destacar que las distribuciones probabilistas muestran la probabilidad de excedencia y no la probabilidad de que ocurra el suceso x .

Modelos de dispersión de cenizas

Las cenizas volcánicas, debido a su capacidad de dispersión, su composición química y su largo alcance, pueden representar peligros significativos para la aviación, la infraestructura y la salud humana. Los modelos de dispersión de cenizas simulan el transporte y la dispersión de cenizas volcánicas en la atmósfera, lo que ayuda a predecir su distribución espacial y temporal. Estos modelos consideran las condiciones

meteorológicas, los parámetros de la fuente de erupción y las características de las partículas para estimar las concentraciones de cenizas en diferentes lugares (depósitos sobre la superficie) y niveles de presión atmosférica (dispersión en el aire).

Las ecuaciones de balance o equilibrio utilizadas para modelar la caída y dispersión de cenizas volcánicas implican varios procesos físicos. A continuación se dan a conocer las ecuaciones de balance primarias comúnmente usadas.

Ecuación de advección-difusión-sedimentación

Esta ecuación representa la conservación de la masa de las partículas de ceniza volcánica. Da cuenta del cambio de masa debido a la advección, difusión, sedimentación y otros procesos. Se puede expresar como en la ecuación 11 (Folch et al., 2020; Folch et al., 2012):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(C)}{\partial t} + \nabla \cdot (CV) & \qquad \qquad \qquad 11 \\ & = \nabla \cdot (D\nabla C) - \nabla(V_s C) \\ & + S \end{aligned}$$

Donde C es la concentración de cada tipo de partículas de ceniza, t es el tiempo, V es el campo de velocidad, V_s la velocidad de caída de las partículas, ∇ es el operador de gradiente, D es el coeficiente de difusión y S representa los términos fuente, incluidas las emisiones de ceniza del volcán.

Estas ecuaciones de equilibrio, generalmente, se combinan con ecuaciones adicionales que describen el comportamiento de las columnas volcánicas, los parámetros de la fuente de erupción y la interacción de las partículas de ceniza con la atmósfera circundante.

Es importante tener en cuenta que los enfoques de modelado específicos pueden variar según la complejidad del modelo y las suposiciones realizadas. Se pueden aplicar varios métodos numéricos y parametrizaciones para resolver estas ecuaciones y simular la dispersión y deposición de ceniza volcánica.

Existen varios programas que basados en las anteriores ecuaciones permiten modelar este fenómeno. Por ejemplo:

FALL3D. FALL3D (Falling ash and Lava coLumn 3D) es un modelo computacional cuya solución numérica está basada en el enfoque Euleriano para simular columnas volcánicas y transporte de cenizas en la atmósfera (Costa et al., 2006; Folch et al., 2020). FALL3D considera las condiciones atmosféricas, los parámetros de la fuente de erupción y las características de las partículas de ceniza para predecir la distribución espacial y temporal de la ceniza volcánica. Ha sido ampliamente utilizado para evaluaciones de riesgos volcánicos y estudios de dispersión de cenizas.

Haz-Map. Haz-Map es un código que usa una solución analítica de las ecuaciones de difusión, transporte y sedimentación de partículas pequeñas, haciendo una serie de asunciones, con el fin de modelar la dispersión de ceniza generada por una columna eruptiva (Macedonio et al., 2005). Haz-Map se puede usar para simular la distribución de masa del depósito si se proporciona un perfil de viento ("modo de depósito"), o para definir la probabilidad de una acumulación dada de masa en el suelo si se utiliza un conjunto estadístico de perfiles de viento proporcionado ("modo de probabilidad"). Este programa puede usar datos meteorológicos satelitales y las condiciones iniciales ofrecidas por el programa PARFIT (Macedonio y Costa, 2014).

TEPHRA. TEPHRA es un modelo que como Haz-Map, usa una solución analítica; su aplicación consiste en tres partes: el modelo físico en sí, con las ecuaciones de conservación del proceso volcánico. Una segunda que identifica el rango de los parámetros de entrada para poder hacer las aproximaciones probabilistas como el rango de alturas de columna, la duración de la erupción, los parámetros de tamaños de grano y perfiles de viento. La tercera consiste en una aproximación computacional que usa la ventaja del procesamiento computacional en paralelo para acelerar los cálculos y así intentar obtener una aproximación probabilista práctica (Bonadonna et al., 2005).

Modelos de proyectiles balísticos

Los modelos de proyectiles balísticos volcánicos se utilizan para predecir y simular la trayectoria y el impacto de proyectiles volcánicos, como

bombas volcánicas, bloques y partículas de ceniza (*lapilli*), expulsados durante erupciones volcánicas explosivas. Estos modelos ayudan a comprender el peligro que representan los proyectiles volcánicos y a evaluar los riesgos potenciales para las personas, la infraestructura y el medio ambiente circundante.

Existen diferentes tipos de modelos balísticos volcánicos, los cuales se enuncian a continuación.

Modelos de trayectoria simple

Estos modelos utilizan suposiciones simplificadas para estimar la trayectoria y el alcance de los proyectiles volcánicos en función de parámetros como la velocidad inicial, el ángulo de lanzamiento y la resistencia atmosférica. Por lo general, se utilizan para evaluaciones preliminares y estimaciones rápidas.

Modelos numéricos de trayectoria de proyectiles

Estos modelos emplean métodos numéricos para simular la trayectoria de proyectiles volcánicos de una manera más detallada y precisa. Tienen en cuenta factores como la gravedad, la resistencia del aire, la velocidad y dirección del viento y las variaciones en la forma y la masa de los proyectiles. Los modelos numéricos usan ecuaciones matemáticas complejas y algoritmos computacionales para calcular la trayectoria del proyectil.

En general, las ecuaciones de movimiento en un escenario bidimensional (direcciones x y y) se pueden expresar de la siguiente manera:

Movimiento horizontal (dirección x):

$$m d^2 x / dt^2 = -F_{dx} \quad 12$$

Donde, x representa la posición horizontal del proyectil, t es el tiempo, m es la masa del proyectil y F_{dx} es la fuerza de arrastre que actúa en la dirección x .

Movimiento vertical (dirección y):

$$m d^2y/dt^2 = m * g - F_{dy} \quad 13$$

En esta ecuación, y representa la posición vertical del proyectil, t es el tiempo, m es la masa del proyectil, g es la aceleración debida a la gravedad y F_{dy} es la fuerza de arrastre que actúa en la dirección y .

Para incorporar los términos de la fuerza de arrastre, la fuerza de arrastre se puede descomponer en sus componentes x y y usando las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} F_{dx} &= -0.5\rho C_d A v_x |v| \\ F_{dy} &= -0.5\rho C_d A v_y |v| \end{aligned}$$

Donde, v_x y v_y son los componentes horizontal y vertical de la velocidad, respectivamente, $|v|$ representa la magnitud del vector de velocidad, ρ es la densidad del aire, C_d es el coeficiente de arrastre y A es el área de la sección transversal del proyectil.

Un programa típico y de amplio uso es el Eject! (Mastin, 2001), un modelo de trayectoria balística diseñado para simular las trayectorias de vuelo y las ubicaciones de impacto de los proyectiles volcánicos. Tiene en cuenta factores como la velocidad inicial, los ángulos de lanzamiento y las condiciones atmosféricas para calcular las trayectorias de las bombas volcánicas expulsadas durante las erupciones volcánicas.

Eject! incorpora métodos numéricos y ecuaciones de movimiento para simular las trayectorias balísticas de proyectiles volcánicos. Se puede utilizar para analizar las áreas de impacto potencial, evaluar las zonas de peligro y estimar el daño potencial causado por las bombas volcánicas.

Eject! es utilizado por investigadores y vulcanólogos para comprender el comportamiento de los proyectiles volcánicos, evaluar los riesgos potenciales asociados con las erupciones volcánicas explosivas y ayudar en el desarrollo de evaluaciones de peligros y estrategias de mitigación.

Modelos de lahares

El modelamiento computacional de los lahares juega un papel crucial en la comprensión y predicción del comportamiento de estos flujos de escombros volcánicos de rápido movimiento. Hay varios modelos informáticos disponibles para simular lahares, que incorporan varios métodos numéricos y algoritmos. Entre estos modelos, se tienen los siguientes:

Laharz

Laharz es un modelo empírico bidimensional ampliamente utilizado desarrollado por el United States Geological Survey (USGS) (Iverson, 1997). Predice el área de inundación del flujo de lahares tanto en planta como en corte del depósito final a partir de correlaciones empíricas en la zona distal, correlacionando esas áreas con el volumen. Es de notar que la zona proximal es la eficiencia del flujo $L/H \in (0.1, 0.3)$, donde L es el avance del flujo en planta y H la diferencia de altura entre el punto de inicio (rigurosamente, del centro de gravedad de la masa) del flujo y el punto de avance máximo.

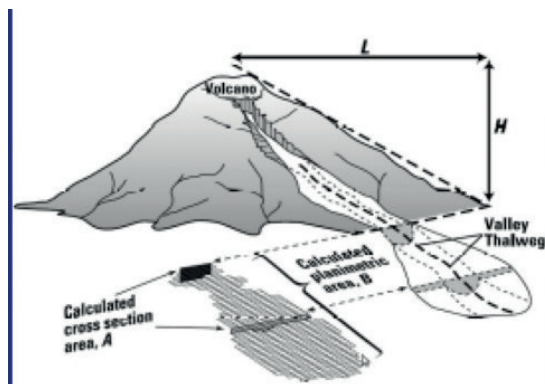


Figura 26. Descripción gráfica de Laharz

Nota. Se observa las áreas en planta y en corte que predice Laharz (ecuaciones a y b). Tomado de Iverson et al. (2010).

La Figura 26 (Iverson et al., 2010) muestra esquemáticamente esta aproximación, donde las áreas en planta (B) y en corte (A) se correlacionan de forma empírica con el volumen, como se indica en las ecuaciones 15 y 15:

$$A = 0.05V^{2/3} \quad 14$$

$$B = 200V^{2/3} \quad 15$$

Si bien esta aproximación permite una rápida estimación de las áreas de afectación, no ofrece información sobre campos dinámicos y es problemático cuando el flujo presenta divergencias y confluencias. Además, el que solo sea válido para zonas distales, puede generar confusión y mal uso.

Flow-R

Flow-R (Evaluación de trayectoria de flujos gravitacionales a escala regional) es un modelo empírico distribuido para evaluaciones de susceptibilidad regional de flujos de escombros, desarrollado en la Universidad de Lausana (Suiza). Es un modelo empírico distribuido para las evaluaciones de susceptibilidad regional utilizando un modelo de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés) (Horton et al., 2013). El modelo permite la delimitación automática del área fuente, según los criterios del usuario y la evaluación de la extensión de la propagación y área de afectación.

Es muy rápido y simple, e incluye la evaluación de susceptibilidad de afectación ante todos los casos posibles de inicio, mediante enrutamiento probabilístico. A pesar de su alcance está limitado por el conocimiento *a priori* de H/L y requiere otros parámetros empíricos de acuerdo a la amenaza y lugar.

Titan2D

Titan2D es un modelo numérico ampliamente utilizado para simular flujos granulares densos (Patra et al., 2005). Se basa en las ecuaciones: conservación de masa y ecuación del balance de momentum, desarrollada a partir de la aproximación de Savage y Hutter (1989); estas ecuaciones son promediadas en profundidad. Utiliza un marco computacional para simular el flujo de materiales granulares. Titan2D incorpora factores como la morfología del terreno, las condiciones iniciales y las propiedades de los materiales para modelar la propagación y la deposición de flujos granulares.

Si bien Titan2D se desarrolló originalmente para modelar flujos granulares, como lo es la parte basal de un flujo piroclástico (Patra et al., 2005; Sheridan et al., 2010, 2005), si se asume que la fricción tanto basal como interna disminuyen por la presencia de agua, se puede y se han simulado flujos de lodo o lahares muy densos (Sheridan et al., 2005) siempre y cuando el flujo permanezca dentro del régimen granular, es decir, flujos donde la fricción continúa siendo dominante.

Titan2F

Este programa calcula la evolución espacio-temporal de la concentración de partículas, la profundidad del flujo, el campo de velocidad y la presión dinámica en cada punto de la cuadrícula computacional. Es una herramienta computacional que modela flujos de dos fases para la evaluación del riesgo de lahares o flujos de lodo en general, que no tiene restricciones en la concentración volumétrica inicial de partículas aparte de la concentración máxima de empaquetamiento ($\theta_s \leq 0.65$). El modelo es válido para flujos bifásicos cuyas fases consisten en sólidos y agua (Córdoba et al., 2019; Córdoba et al., 2015). La fase sólida es tenida en cuenta adaptando los desarrollos de Savage y Hutter (1989), Iverson (1997) e Iverson (2010), quienes propusieron que los flujos granulares pueden ser modelados usando el criterio de falla de Coulomb (Coulomb, 1773); mientras que la fase fluida usa las ecuaciones típicas de conservación de la mecánica de fluidos, pero teniendo en cuenta la fricción mediante la ecuación de Colebrook-White (Colebrook y White, 1937). La interacción entre fases es tenida en cuenta mediante una ecuación de arrastre fenomenológica (empírica), junto con un término de flotación⁵.

No obstante, el enfoque fenomenológico utilizado para el modelo de arrastre entre fases asume un diámetro promedio de los sólidos, lo que significa que no se pueden rastrear rocas o partículas individuales. El modelo integra las ecuaciones en profundidad, suponiendo enfoques de capa delgada y de aguas poco profundas. Este modelo predice correctamente la dinámica de los flujos impulsados por la gravedad, proporcionando los valores promediados de profundidad para la concentración de partículas, las velocidades de flujo y de las fases, y la profundidad del flujo en una topografía tridimensional (Córdoba et al., 2018; Guerrero et al., 2018).

⁵ Para detalles del sistema de ecuaciones que usa este modelo ver Córdoba et al. (2018).

FLO-2D

FLO-2D se basa en ecuaciones de flujo continuo promediadas en profundidad. Este código modela la reología del lahar utilizando una relación de tensión cortante, y esta reología depende de la concentración de sedimento y la masa del flujo, que varían durante la propagación del flujo (Nutrioso, 2023; O'Brien y Julien, 1993).

FLO-2D incluye varios parámetros de entrada: 1) el DTM/DSM (Modelo Digital de Terreno/ Modelo digital de Superficie) del área de estudio; 2) un hidrograma de entrada basado en la acumulación de lluvia medida y los valores de descarga de agua y sedimentos (es decir, volumen de flujo); 3) un rango de coeficientes de rugosidad de Manning (0,03–0,08 según la geometría y el material del canal); 4) límite elástico y viscosidades dinámicas expresadas en función de la concentración volumétrica de sedimento⁶.

Corrientes piroclásticas de densidad

Modelar y simular corrientes volcánicas de densidad piroclástica es una tarea compleja, debido a su naturaleza altamente dinámica y turbulenta. Los PDC son mezclas de rápido movimiento de gas caliente y partículas volcánicas que fluyen por las laderas de un volcán durante las erupciones explosivas. Los modelos computacionales son herramientas valiosas para comprender el comportamiento de los PDC, predecir su dinámica de flujo y evaluar los peligros asociados. En seguida se listan algunos modelos computacionales notables utilizados para simular PDC volcánicos:

Conos de energía

El método de los Conos de Energía (Malin y Sheridan, 1982; Sheridan, 1980) es una técnica utilizada para evaluar los peligros potenciales asociados con las oleadas volcánicas y la nube acompañante de los PDC. Es un modelo conceptual que tiene en cuenta la energía de la columna eruptiva para estimar la extensión lateral y el comportamiento del oleaje volcánico y la nube de ceniza asociada.

⁶ Los detalles de comparaciones se encuentran entre Flo-2D y Titan2F en Thouret et al. (2022) y entre Titan2D y Flo-2D en Neglia et al. (2021).

El método se basa sobre el concepto de línea de energía, que es una herramienta útil para comprender y analizar los peligros volcánicos, incluidas las PDC. La línea de energía representa el equilibrio entre la energía potencial (debido a la elevación) y la energía cinética (debido a la velocidad) de una masa que fluye. Brinda información sobre el potencial de un flujo peligroso para remontar obstáculos, ya que, si el obstáculo topográfico es más bajo que la línea de energía, podría ser superado por el flujo. También, ayuda a identificar áreas propensas a la deposición o erosión.

El método de los Conos de Energía se basa sobre el cálculo de las líneas de energía en todos los ángulos, teniendo en cuenta las variaciones topográficas. El vértice del cono corresponde a la fuente de la erupción, y la extensión lateral del cono representa el alcance potencial de la marejada volcánica y la nube de ceniza (ver Figura 6). La extensión lateral del cono se define en función del nivel de energía umbral, que se determina a través de relaciones empíricas u observaciones previas.

El método de los Conos de Energía proporciona un enfoque simplificado para evaluar los peligros potenciales de las oleadas volcánicas y sus nubes acompañantes. Se puede usar para evaluaciones preliminares de peligros y para identificar áreas en riesgo según la extensión lateral del cono. Debido a su naturaleza semiempírica es posible decir que, con este método, se pudiera contemplar incluso el efecto resultante de la termodinámica del flujo. Pero, es importante tener en cuenta que el método tiene limitaciones y suposiciones, y es posible que no capture toda la complejidad de la dinámica de los PDC ni considere factores locales específicos que pueden influir en el peligro. Estas incertidumbres se pudieran cubrir con un método probabilista que cubra un rango de combinaciones de condiciones de altura de colapso y coeficientes de Heim estadísticamente significativo.

Este método se puede combinar con modelos de propagación de flujos piroclásticos para dar una idea completa del fenómeno de los PDC, por ejemplo, como lo propone Ogburn y Calder (2017).

TITAN2D

TITAN2D es un modelo numérico muy conocido para simular flujos granulares, incluidos los flujos piroclásticos (Dalbey et al., 2008; Galas et al.,

2007; Sheridan et al., 2005). Se basa en los desarrollos de Savage y Hutter (1989), quienes adaptan el criterio de falla de Coulomb (1773) a flujos granulares. Las ecuaciones de Capas Delgadas son integradas en profundidad y utiliza un marco computacional para simular el flujo de materiales granulares en dos dimensiones, pero en una topografía tridimensional. TITAN2D tiene en cuenta factores como la topografía, las condiciones iniciales, las propiedades de los materiales y el volumen inicial esperado para modelar la propagación y la deposición de la parte basal de los PDC.

FLO-2D

FLO-2D es un modelo hidrodinámico bidimensional que se utiliza para simular varios tipos de flujos, incluidos los flujos piroclásticos (Castillo et al., 2006; Nutrioso, 2023). Resuelve las ecuaciones de conservación de la masa y el momento para simular el comportamiento de flujo de estos flujos. FLO-2D incorpora parámetros como el volumen de flujo, las condiciones iniciales, la topografía y las propiedades del material para modelar la propagación el deposito de los flujos piroclásticos.

Los PDC consisten también en la nube acompañante y posibles oleadas piroclásticas. Modelar el flujo de PDC y sus fenómenos asociados, como el flujo piroclástico y su nube acompañante, así como las oleadas, es de hecho un aspecto crítico de la evaluación del peligro volcánico. Si bien la complejidad de estos fenómenos plantea desafíos, se han realizado esfuerzos para desarrollar modelos y enfoques para simular y evaluar su comportamiento.

PDAC

El Código de Análisis de Dispersión Piroclástica (PDAC), se basa en las leyes de transporte multifásico de masa, momento y energía de Euler, de una mezcla gas-piroclasto formada por una fase gaseosa multicomponente y N fases de partículas representativas de los piroclastos (Esposti Ongaro et al., 2007).

PDAC se desarrolla sobre la base del modelo de flujo multifásico de Neri et al. (2003), que permite describir la dinámica del colapso de la columna volcánica y la propagación de los flujos piroclásticos relacionados, en condiciones tridimensionales, incluyendo una descripción realista de la

topografía del volcán. Por el momento, su uso se restringe a supercomputadoras, por los límites de costo computacional, es decir, el tiempo de cómputo, pues el tamaño de la grilla tridimensional es muy grande, como para realizar estudios detallados de riesgo a escalas que puedan ser usadas por los tomadores de decisiones que intenten decidir sobre las pérdidas económicas esperadas de bienes individuales.

VolcFlow

Es un nuevo modelo de profundidad promedio que simula tanto la parte concentrada como la diluida de las corrientes piroclásticas y sus interacciones; en este modelo, la parte basal del flujo puede formar una corriente diluida, resultando en la nube acompañante (Kelfoun, 2017). Es un modelo pseudo-3D, donde las ecuaciones bidimensionales se aplican a una topografía tridimensional. Es decir, VolcFlow es capaz de simular tanto la parte basal como la nube acompañante del PDC. Cabe mencionar que, la nube acompañante y las oleadas son muy diluidas, por tanto pueden tener un componente turbulento muy complejo. Parte de las complejidades derivadas es la posibilidad de entrada de aire ambiental que, debido a la posible alta temperatura del PDC, termina dilatándose y expandiendo el flujo, modificando así su dinámica. VolcFlow asume flujo isotérmico, o sea las complejidades del efecto termodinámico y de entrada de aire en la nube acompañante que se considera despreciable.

En términos generales, los modelos para modelar PDC ayudan a simular su comportamiento, predecir su dinámica de flujo, estimar las distancias de descentramiento y evaluar los peligros asociados. Requieren datos de entrada, como características de erupción, información topográfica, propiedades de los materiales y condiciones atmosféricas para ejecutar simulaciones.

La selección del modelo depende de los objetivos de investigación específicos, los datos de entrada disponibles, los recursos computacionales y el nivel de detalle deseado para la simulación. Es importante tener en cuenta que cada modelo tiene sus propios supuestos, limitaciones y parámetros de entrada necesarios.

Por otro lado, si se escoge un modelo computacional de bajo costo computacional, pueden estar restringidos para modelar flujos piroclásticos, por ejemplo, la parte basal de los PDC, como los programas TITAN2D y

FLO-2D. Por tanto, se debe recurrir a una aproximación adicional para estas partes de los PDC como la nube acompañante o independiente como las oleadas piroclásticas (ver por ejemplo Ogburn y Calder, 2017).

Ondas de choque

Las ondas de choque volcánicas, también conocidas como ondas expansivas volcánicas, son ondas de alta presión generadas por erupciones volcánicas explosivas. El modelado de estas ondas de choque juega un papel crucial en la comprensión de su propagación, impacto y peligros asociados. Si bien el modelado de ondas de choque volcánicas es una tarea compleja, se han desarrollado varios enfoques y modelos para simular su comportamiento.

Es importante tener en cuenta que modelar ondas de choque volcánicas es una tarea desafiante, debido a la naturaleza compleja de las erupciones volcánicas y la interacción dinámica con el entorno circundante. El modelado preciso requiere información detallada sobre los parámetros de la fuente de erupción, las condiciones atmosféricas y la topografía local. La colaboración entre vulcanólogos, científicos atmosféricos y expertos en modelado numérico es esencial para desarrollar modelos realistas y confiables para simular ondas de choque volcánicas y evaluar los peligros asociados.

El modelamiento computacional de ondas de choque de origen volcánico se puede hacer usando programas generales que permitan la simulación de la propagación tridimensional de este tipo de ondas de presión en la atmósfera. Tal es el caso de OpenFoam, un programa de Código Abierto, el cual permite simular fluidos supersónicos en medios compresibles por el método de volúmenes finitos (Zicanov, 2019).

OpenFoam proporciona una plataforma flexible para simular una amplia gama de fenómenos de flujo de fluidos, incluida la propagación y el comportamiento de las ondas de choque generadas por las erupciones volcánicas. Al utilizar OpenFoam, los investigadores y científicos tienen la flexibilidad de personalizar y ampliar las capacidades del software para satisfacer sus necesidades específicas en el modelado de ondas de choque volcánicas.

Ejemplo de aplicación: caso volcán Galeras

Análisis probabilista

Para realizar el análisis probabilista de cada una de las amenazas potencialmente originadas durante una erupción explosiva del volcán Galeras, se procedió a usar los tipos de muestreo estadísticamente significativo pertinentes de acuerdo a las particularidades de cada amenaza. A fin de automatizar el modelamiento de cada una de ellas con sus respectivas combinaciones de condiciones iniciales, se desarrollaron dos programas (scripts) para la herramienta matemática Octave (Eaton, 2022), el cual es un entorno de computación numérica de código abierto y un lenguaje de programación diseñado para el análisis numérico y la computación científica. Proporciona un lenguaje de alto nivel y una amplia gama de funciones matemáticas y estadísticas, similar al software propietario como MATLABTM. El primero de estos programas usa la técnica OLHS para generar un muestreo estadísticamente significativo de las combinaciones de las condiciones iniciales específicas de cada amenaza y luego, automáticamente, llama al programa respectivo para ejecución del programa (por ejemplo, Titan2D) y registro de los resultados para su posterior uso. El segundo script toma los datos de la salida del programa respectivo y calcula la probabilidad frecuencial o bayesiana, dependiendo el caso específico, del parámetro a analizar. Por ejemplo, la probabilidad de impacto de una onda de choque con más de 10.000 Pa en cada pixel del modelo digital de elevación.

Amenaza por lahares

Entre las muchas cuencas que tiene el municipio de La Florida, aquella que representa más riesgo por su proximidad al cráter del volcán Galeras, es la cuenca del río Barranco, sobre la cual se centra el ejemplo de análisis probabilista de la amenaza por lahares.

Localización y área de estudio. La microcuenca del río Barranco se localiza sobre el flanco norte del volcán Galeras y ocupa gran parte del municipio de La Florida. Hacia la parte media y baja de la cuenca se encuentra situada la cabecera urbana (con más de 1.500 habitantes) y una porción del sector industrial, agrícola y ganadero del municipio, que se dedican a la producción y venta de productos lácteos. Como se aprecia en la Figura 27, la zona alta de la microcuenca de Barranco se encuentra sobre la cima del volcán Galeras y

constituye una de las principales zonas de vida del territorio, al encontrarse en la categoría de páramo subandino según la tipificación de Holdridge (1987).

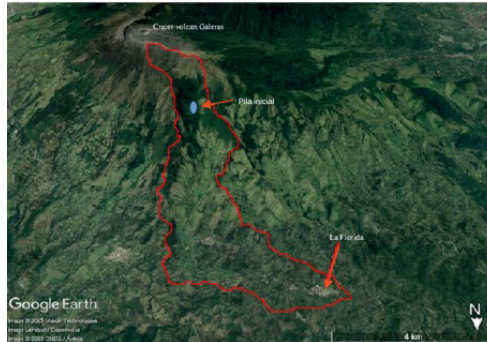


Figura 27. Cuenca del río Barranco

Nota. La línea roja indica la divisoria hidrológica. El punto azul muestra el lugar de la pila inicial.

Modelamiento. El análisis de esta amenaza en la cuenca del río Barranco se realizó usando el programa Titan2F por su carácter bifásico y la información completa útil para obtener las curvas de intensidad-probabilidad requeridas para la evaluación del riesgo.

Las condiciones iniciales que requiere este programa son: la localización del lugar de arranque, el volumen total, la velocidad inicial y la concentración volumétrica de sólidos en la pila inicial de material (Cordoba et al., 2016)⁷. Los valores a tomar de las anteriores condiciones son las incertidumbres iniciales del problema que se abarcan por medio del análisis probabilístico. Respecto a la localización, para simplificar, se optó por ubicar la pila inicial de material sobre el lecho del río Barranco, enseguida del accidente topográfico del Barranco, que tiene una pendiente mayor a 70° (óvalo azul en la Figura 27). Lo anterior implica que si el flujo se inicia aguas arriba del lugar asumido como punto de inicio del modelamiento, llegaría a ese punto asumido como de inicio con una velocidad que es incierta.

⁷ Ver el Manual del Usuario en Cordoba et al., 2016.

Para abordar el problema de las incertidumbres restantes, se recurre a encontrar rangos posibles de cada una de ellas; posteriormente, se utilizan métodos como OLHS para realizar combinaciones hipotéticas de estas condiciones en un muestreo estadísticamente significativo de todas las posibles combinaciones.

Los depósitos de lahares en esta cuenca muestran una amplia gama de concentraciones de sólidos posibles, con partículas de diámetro medio de 1 mm, típico de lahares (Pareschi, 1996). El rango de concentraciones se definió de acuerdo a las concentraciones de sedimentos también típicas en lahares, que van desde lahares fangosos (concentraciones volumétricas desde 0.20 a 0.30), flujos hiperconcentrados (concentración entre 0.3 y 0.5) e incluso flujos granulares (concentraciones mayores a 0.5) (Pierson, 1985; Pierson, 1980; Pierson y Scott, 1985). Por lo anterior se asume un rango de concentraciones en términos de fracción volumétrica de sólidos de entre 0.2 y 0.5.

Para obtener el rango de volúmenes iniciales posibles se tuvo en cuenta los depósitos de lahares en esta cuenca para confirmar que dichos rangos los abarcan como caso particular. Para el cálculo del volumen máximo y mínimo se deben tener en cuenta tres factores: el máximo volumen esperado de sólidos, el máximo volumen de líquidos y la concentración volumétrica de sólidos. Para el cálculo del volumen máximo de la fase líquida, teniendo en cuenta los parámetros morfométricos de la parte alta de la cuenca como: pendiente, tiempo de concentración y caudal, para el cual se siguió la metodología expuesta por Guerrero et al. (2019), quienes a partir de un análisis hidrológico de la cuenca estiman la capacidad de drenaje de la misma; de este modo, se llega a inferir que la microcuenca del Barranco es capaz de drenar un volumen de agua máximo de unos 800.000 m³, el cual suponiendo un flujo altamente concentrado (50 % de sólidos) transportaría hasta 800.000 m³ de material granular, dando como resultado un volumen total del flujo de 1'600.000 m³. Dado que se consideró toda la cuenca para el cálculo del volumen de agua, se asume, en este ejemplo, que el volumen de agua máximo considerado cubre la posibilidad de que se forme un represamiento en la pequeña cuenca alta del Barranco debido a los depósitos de flujos piroclásticos durante la duración de la erupción.

El cálculo del volumen mínimo del flujo se realiza a través del estimativo del volumen de material sedimentado que posee una alta susceptibilidad a ser

integrados en un flujo, es decir que, como mínimo, es de esperar el movimiento del material de la cabecera del Barranco. Tras una inspección visual *in situ*, se estimó una profundidad media de suelo de 0,50 m, que permitió estimar que un volumen de unos 100.000 m³ pudieran ser removilizados en la parte alta del Barranco. Teniendo en cuenta este volumen y que se tiene un flujo altamente concentrado, entonces, serían necesarios unos 65.000 m³ de líquido para movilizar el lahar, obteniéndose un volumen mínimo del flujo de 165.000 m³.

Finalmente, para el cálculo del rango de velocidades, se tiene la posibilidad de que el flujo inicie en el mismo punto asumido como de arranque, lo cual resulta en una velocidad inicial mínima de 0 m/s. Para el cálculo de la velocidad máxima, es de esperarse que esta se presente cuando el flujo tenga su inicio en la parte más alta de la cuenca. Usando la idea de gravedad reducida y la pendiente media del canal principal (Iverson, 1978) tenemos:

$$V_{max} = \cos\beta \sqrt{\frac{\rho_f - \rho_w}{\rho_f} gh} \quad 16$$

Donde,

- ρ_f : Densidad del flujo.
- ρ_w : Densidad del agua.
- β : Ángulo medio opuesto a la pendiente del canal principal.
- g : Aceleración de la gravedad.
- h : Diferencia de alturas entre el punto más alto de la cuenca y el punto de salida.

La aplicación de la ecuación 16 resultó en nuestro caso en unos 12 m/s.

La Tabla 1 muestra el resumen de los rangos usados para el muestreo OLHS de las condiciones iniciales que requiere el programa Titan2F.

Tabla 1. Rangos usados para las condiciones iniciales usadas por Titan2F

Incertidumbre	Mínimo	Máximo
Concentración	0.2	0.5
Volumen	165.000 m ³	1.600.000 m ³

Velocidad	0 m/s	12 m/s
-----------	-------	--------

Una vez determinados los rangos de las condiciones iniciales se procede con la técnica de muestreo de las variables. Como se explicó más arriba, el objetivo de este proceso es crear un muestreo estadísticamente representativo de combinaciones y condiciones iniciales según los parámetros establecidos. En nuestro ejemplo, se usó la técnica OLHS, a través de la cual se obtuvo un total de 128 escenarios hipotéticos de lahares con diferentes combinaciones, de acuerdo a los rangos de volúmenes, velocidades y concentraciones calculados anteriormente.

Tal como se explicó, el script desarrollado para Octave permite, automáticamente, llamar a Titan2F para que sea ejecutado las 128 veces correspondientes a cada una de las combinaciones del muestreo OLHS. El modelamiento computacional se realizó sobre un Modelo Digital de Elevación (DEM) GeoSAR (Geographic Synthetic Aperture Radar) (Corbley, 2010; Wheeler y Hensley, 2000) de precisión 3 metros. Ahora bien, para poder modelar el detalle de las calles del casco urbano de La Florida, una precisión de 3 metros puede no dejar ver el detalle de calles cuya distancia entre edificaciones sea pequeña, por lo cual se procedió a interpolar el DEM GeoSAR a 1 metro (notando que esto no introduce mejora en la información). Esto se realizó para poder incluir el detalle de calles y edificaciones, logrado con un DEM de 1 metro de precisión, elaborado a partir de fotos de dron de alta resolución. Con este DEM de 1 metro del área urbana y teniendo los dos DEM a la misma precisión, se los pudo parchar usando la herramienta GrasGiss (Hofierka et al., 2002), lo cual permitió no perder el detalle de las calles en la zona urbana.

El cómputo de los niveles de la amenaza se realizó teniendo en cuenta la evolución espacio-temporal de dos factores: Primero, las presiones dinámicas, litostática e hidrostática, puesto que es el parámetro potencialmente destructivo (ver capítulo de vulnerabilidad). Segundo, el nivel de inundación, ya que induce enterramiento por los sedimentos; dicho enterramiento puede causar varios niveles de pérdidas dependiendo del elemento expuesto, bien sea cobertura vegetal o edificaciones. Para presión dinámica se extrajo la probabilidad frecuencial de excedencia de 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 35 kPa, notando que 10 kPa de sobrepresión es capaz de derribar seres humanos y con 35 kPa puede haber destrucción total de las edificaciones

de concreto armado (ver capítulo de vulnerabilidad). Además, se calculó la probabilidad frecuencial de inundación de 25, 50, 75, 100, 125 y 150 cm, teniendo en cuenta que, en este trabajo, se encontró que 125 cm de enterramiento implica pérdida irreparable del inmueble y que con 20 cm se tendría pérdida total de cultivos (ver capítulo de vulnerabilidad).

Es importante destacar que las probabilidades que se presentan a continuación están condicionadas a que el evento ocurra, y que, en el caso de lahares primarios, solo ocurrirá cuando se remueva el material piroclástico depositado durante una erupción en curso, ya sea piroclastos de caída (ceniza o *lapilli*), flujos piroclásticos, o ambos. Lo anterior implica que, para el caso de lahares primarios, la probabilidad de excedencia, no debería superar ni la probabilidad de que se depositen flujos piroclásticos (lo cual es de esperar que tenga un volumen de depósito mucho mayor que el de las caídas piroclásticas) en el lugar de inicio, ni la probabilidad de depósito de ceniza que sería potencialmente removilizado por la lluvia. Se deb tener en cuenta que, un depósito de flujo piroclástico que represe cualquier cauce genera una fuente adicional de agua, adicional a la lluvia, por lo cual el límite superior de los rangos de volumen debe cubrir esta posibilidad de acuerdo al criterio del modelador.

Resultados. Recordando que la presión dinámica es el factor que permite estimar la capacidad destructiva del impacto, que como indica la ecuación 17, depende de la densidad del flujo y de la velocidad del mismo a la hora del impacto. Cabe anotar que, la velocidad al estar elevada al cuadrado, se convierte en factor dominante.

$$P_d = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad 17$$

Donde,

P_d : Presión dinámica.

ρ : Densidad del flujo.

v : Velocidad media del flujo.

La capacidad de Titan2F permite extraer resultados de velocidad, profundidad y concentración (entre otras) en cada pixel, por lo cual, con los scripts de Octave desarrollados, se pueden extraer probabilidades de presión

dinámica de impacto de interés sobre cualquier bien o estructura que se encuentre ubicado sobre un píxel, y también la probabilidad de niveles de inundación de interés. La Figura 28 muestra las probabilidades de excedencia de dichas presiones de impacto de interés. Es preciso mencionar que, en todos los casos se mantiene una probabilidad de excedencia de un 10 % a lo largo de las cercanías del lecho del río. En el caso de presiones de impacto de 10 kPa, que afectaría a personas; se tiene una probabilidad de excedencia de cerca del 20 % en la parte media de la cuenca. Para presiones dinámicas, se pueden ver afectadas edificaciones con pobre diseño estructural (Figura 28d); asimismo, el análisis muestra probabilidades de excedencia de más del 30 % en sectores dispersos de la parte alta de la cuenca.

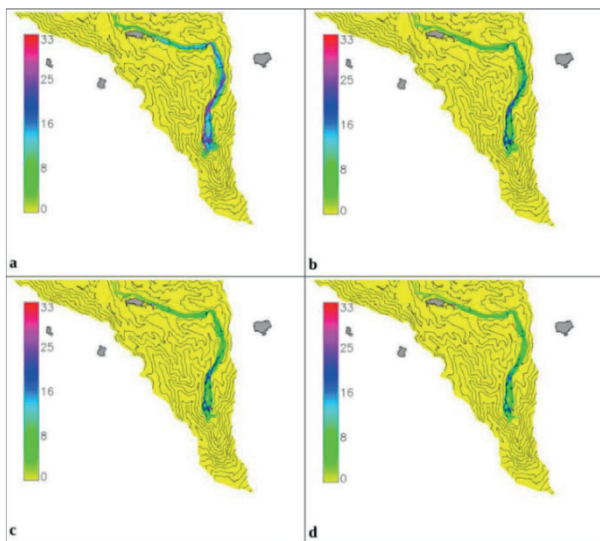


Figura 28. Probabilidades de excedencia de impacto para presiones dinámicas de a) 5 kPa, b) 10 kPa, c) 20 kPa y d) 30 kPa

Nota. Los polígonos sombreados representan los centros urbanos.

Para el nivel de inundación se analizó la probabilidad de exceso de profundidades de 0.25 m, 0.5 m, 1 m, 1.25 m y 1.5 m, también bajo el criterio del daño esperado; es así como, en el capítulo de vulnerabilidad se observará que un enterramiento por lahar de más de 1.25 metros hace que los costos de reparar igualen o excedan los costos de reemplazar.

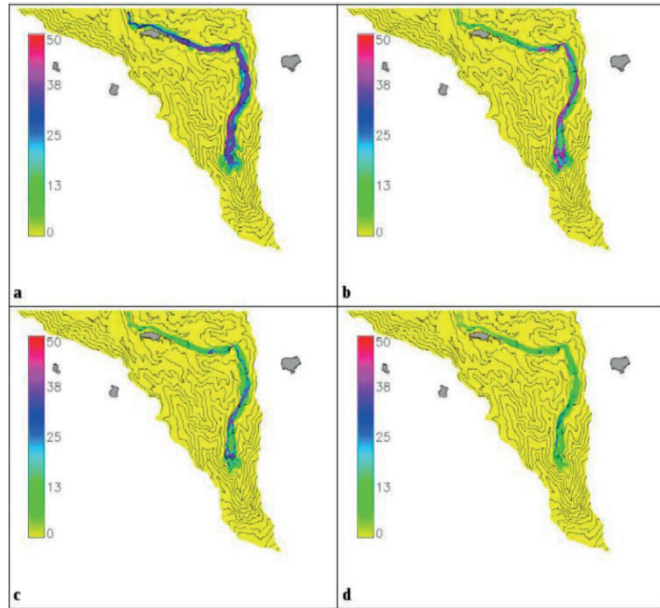


Figura 29. Probabilidad de excedencia de niveles de inundación por lahar de a) 25 cm, b) 50 cm, c) 1 metro, y d) 1.25 metros

Como se puede observar en la Figura 29, en caso de presentarse un lahar en la cuenca del río Barranco, para un nivel de enterramiento de 25 cm, la probabilidad de excedencia es de alrededor del 50 % a lo largo de la mayor parte de las cercanías del lecho del río (Figura 29a); en contraste, esa excedencia solo ocurre hasta la cuenca media del río, en el caso de una inundación de 1.25 metros (Figura 29d).

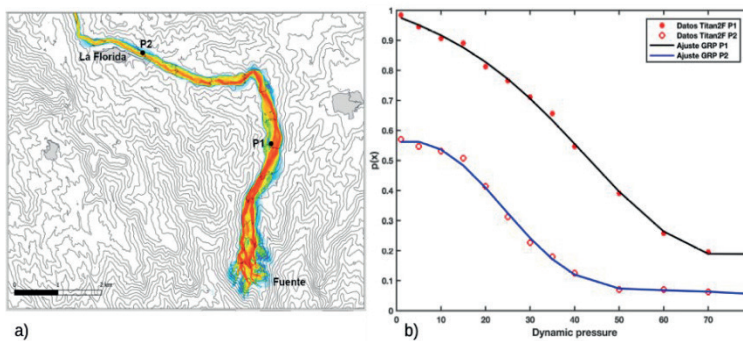


Figura 30. a) Área de inundación por lahar en la cuenca del río Barranco, indicando los lugares P1 y P2 analizados en el texto. b) Probabilidades de

excedencia de presiones dinámicas extraídas de datos arrojados por Titan2F y curvas de ajuste

Escogiendo dos lugares *P1* y *P2* (Figura 30a) ubicados dentro de la cuenca del Barranco, estando localizado *P1* en el tramo medio alto de esa cuenca y *P2* en el tramo bajo, a partir de los datos de presión dinámica para el muestreo OLHS arrojados por Titan2F, es posible obtener la probabilidad de excedencia de impacto por presión dinámica en cada lugar (en realidad en cada pixel del DEM, como ya se vio más arriba). Los puntos rojos de la Figura 30b muestran esas probabilidades de excedencia tanto para *P1* como para *P2*. Las líneas negra y roja muestran la tendencia de estos puntos, que se ajustan en un más del 97 %, usando regresión por el método GRP. Se puede observar que, para el lugar *P1*, la probabilidad de que se exceda de 10 kPa a 20 kPa (la vida está en peligro por arrastre), es de más del 90 %. Para presiones dinámicas donde las estructuras reforzadas pueden verse afectadas (ver más adelante, en el capítulo de vulnerabilidad), es decir, entre 30 kPa y 35 kPa, la probabilidad de excedencia es de alrededor del 70 %; mientras que para afectación de estructuras incluso de acero (~70 kPa), esa probabilidad es de más del 25 %. En otras palabras, ubicarse en la cuenca media alta y alta del Barranco es muy peligroso, debido a la alta probabilidad de afectación a la vida y toda clase de estructuras, teniendo en cuenta una sola de las amenazas volcánicas y en caso de que se desencadenen lahares en esa cuenca.

Respecto al lugar *P2* (Figura 30b), para presiones dinámicas entre 10 kPa y 15 kPa se tienen probabilidades de excedencia de alrededor del 50 %, para 30-35 kPa de un 25 % y para más de 70 kPa de un 5 %. De todos modos, incluso a distancias significativas (más de 10 km del lugar de origen del evento amenazante), el nivel de peligro no es despreciable.

Este ejemplo muestra una de las más importantes ventajas de estimar la amenaza de manera probabilista a partir del modelamiento computacional; en sí, se termina disponiendo de una gran cantidad de información útil a la hora de tomar decisiones para gestionar el riesgo de manera cuantitativa y eficiente, lo cual contrasta con las aproximaciones deterministas, con las cuales no sería posible determinar la peligrosidad ante diferentes niveles de intensidad de impacto de las amenazas.

Amenaza por PDC. A fin de realizar el análisis probabilístico de la amenaza por PDC, se trabajó usando los insumos de la zonificación de la amenaza volcánica del Galeras, en lo que respecta a flujos piroclásticos (ver Figura 16) y la información disponible sobre la geología del volcán, tanto en documentos publicados (Banks et al., 1997; Calvache, 1990; Cepeda, 2020; Hurtado y Cortéz, 1997; Ingeominas, 1997; Servicio Geológico Colombiano, 2015) como de información proporcionada directamente a los autores por el Servicio Geológico Colombiano (Gomez, 2018). Las dos partes de los PDC se aproximaron mediante el uso conjunto de Titan2D y los Conos de Energía.

Flujos piroclásticos. Para la parte basal (flujo piroclástico) se escogió el programa Titan2D (Patra et al., 2005), pues ha mostrado su capacidad de reproducir con éxito la extensión y alcance de flujos piroclásticos (Capra et al., 2011; Galas et al., 2007; Ogburn y Calder, 2017; Patra et al., 2005; Sheridan et al., 2005), habiendo sido usado con éxito incluso en Colombia, país donde se enfoca este libro, en el caso del Cerro Machín y el mismo volcán Galeras (García et al., 2011; Murcia et al., 2010).

Debido a la posibilidad de que estos flujos puedan superar barreras topográficas, no se puede negar la probabilidad de que, desde varios puntos de inicio, se pueda alcanzar un mismo lugar de interés, como lo demuestran tanto las modelizaciones de García et al. (2011), quienes encuentran que la barrera topográfica de la caldera del volcán Galeras es remontada por estos flujos cuando superan los 2 millones de metros cúbicos; como el flujo piroclástico de la erupción de 1936 (Ingeominas, 1997)⁸. En este caso, en particular la inferencia bayesiana es una herramienta apropiada para el cálculo de las probabilidades de impacto.

A diferencia de los lahares, lo que afectaría a un activo o bien no solo es la presión dinámica de impacto y el posible enterramiento, sino la exposición a altas temperaturas (de hasta $1.000^{\circ}C$), que usualmente presentan. Es por esta razón, que en términos de evaluación de amenazas se los clasifica como de tipo no mitigable, o sea que su nivel de daño esperado es del 100 %, sea cual fueren las medidas de mitigación que se proponga (ver capítulo de Vulnerabilidad).

⁸ Ver fotografías de la erupción de 1936 del volcán Galeras en Ingeominas, 1997.

En este orden de ideas, se asume que no es necesario estimar probabilidades para diferentes presiones dinámicas, nivel de inundación por flujos piroclásticos o temperaturas, bastando con estimar la probabilidad de llegada. Ya que los programas de cómputo pueden arrojar información de llegada con espesores extremadamente pequeños, se requiriese un acotamiento, que en este caso, se opta por un corte a 20 cm como criterio de paro, como en García et al. (2011).

Localización. El programa Titan2D requiere como entrada la localización del punto de inicio, el volumen de la pila de material, la velocidad inicial y las fricciones basal e interna del flujo. Las cuales no se conocen *a priori*, es decir, son las incertidumbres del problema, que se abarcan en este ejemplo mediante el análisis probabilista, por medio del muestreo OLHS, el cual requiere rangos para cada una de las incertidumbres.

Respecto a la localización, se establecieron dos zonas radiales centradas en el cráter volcánico, formando un círculo interior y un anillo exterior (Figura 31). La zona interior está limitada por el borde caldérico (distancia media: 650 m). Para definir el límite exterior del anillo, se asumió como el límite más lejano de los colapsos de columnas en el volcán Galeras, tomado de análisis fotográficos, trabajo de campo y mapas de isópacas (Ingeominas, 1997; SGC, 2015a), equivalente a unos 1.200 m de distancia al cráter.

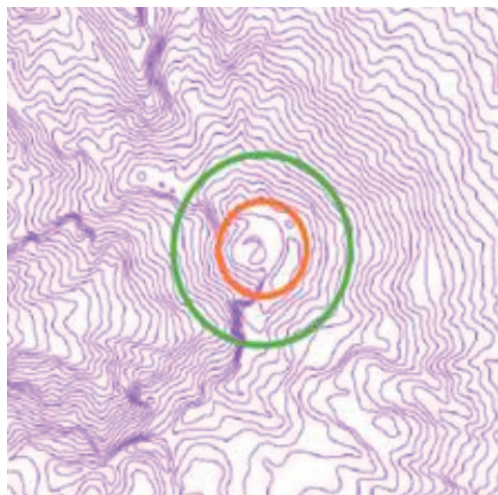


Figura 31. Rangos donde se asume pueden darse inicio los flujos piroclásticos

Nota. El círculo rojo encierra el área dentro del anfiteatro. El anillo limitado por los círculos rojo y verde es donde se asume puede colapsar una columna eruptiva.

Velocidades. El rango de velocidades iniciales típicamente son, en la parte inferior del rango, de unos 10-30 m/s (Druitt, 1996; Hoblitt, 1986), que representa flujos piroclásticos de movimiento más lento asociados a erupciones de menor energía. Estos flujos, generalmente, ocurren en ambientes volcánicos, donde el material que compone al flujo piroclástico tiene una mayor resistencia al flujo, lo que resulta en velocidades iniciales más lentas. Por la parte superior, se pueden observar velocidades típicamente de 60 a 100 m/s (Druitt, 1996) y que alcanzan hasta 300 m/s en erupciones más energéticas, como las que involucran explosiones de domos u oleadas piroclásticas. Estos flujos de movimiento más rápido a menudo se asocian con erupciones explosivas y pueden ser extremadamente destructivos, debido a su alta energía e impulso. Sin embargo, teniendo en cuenta que Titan2D usa una pila inicial de material que colapsa desde cierta altura, que depende del rango de volúmenes, esta pila va a adquirir una velocidad inicial de acuerdo a dicha altura; por lo que, en este ejemplo, se considera que el rango de velocidades iniciales típicas entre 30 m/s y 100 m/s queda cubierto por el rango de alturas consecuencia del volumen. Este rango, además es compatible con Banks et al. (1997), quienes consideran los flujos piroclásticos del volcán Galeras como relativamente pequeños. Velocidades iniciales más altas son consideradas aquí como generadas de oleadas piroclásticas y explosiones de domo, que serán tenidas en cuenta con el método de los conos de energía usado más adelante.

Volúmenes. El rango de volúmenes se debe ajustar a la geología del volcán; en este ejemplo se determina con base a los trabajos de Calvache (1990), quien identifica 6 miembros: 4.500 ybp, 2.900 ybp, 2.300 ybp, 1.100 ybp y 1866 DC, para los cuales Calvache estima el volumen total de cada miembro que se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Volúmenes estimados para cada miembro o unidad, según Calvache (1990)

Unidad	Volumen (10^6 m^3)
1866	2.9
1.100	1.2
2.300	2.1

2.900	1.3
4.000	1.2
4.500	8.7

No obstante, estos son volúmenes totales del respectivo depósito piroclástico, esparcidos en toda el área del volcán; por lo tanto, no tiene sentido concentrar todo ese volumen en cada uno de los lugares de inicio del muestreo OLHS. En otras palabras, la incertidumbre de la estima del rango de volúmenes iniciales representa un desafío, pues, por un lado es exagerado asumir que en cada lugar de inicio se presenta todo el volumen estimado por los estudios geológicos de los miembros encontrados por Calvache (1990), pero por otro, sería tendencioso atribuir arbitrariamente una fracción de las áreas de los depósitos respectivos o simplemente dividir esos volúmenes entre el número total de muestras. Nótese que Banks et al. (1997) admite que sus estudios, que se basan primordialmente en Calvache (1990), tienen un sesgo hacia el nor-noroeste, debido a la ubicación de las poblaciones que consideran más amenazadas.

Por lo anterior, en este ejemplo se opta por asumir que, a futuro, existe igual probabilidad de inicio de los PDC hacia cualquier dirección cardinal. Como se verá más adelante, los anillos mostrados en la Figura 31 se dividen en cuatro sectores, por lo cual, como criterio de este ejemplo, los volúmenes máximo y mínimo mostrado en la Tabla 2 se dividen entre cuatro, obteniendo unos volúmenes mínimo de 300.000 m³ y máximo de 2.000.000 m³ (García et al., 2011)⁹.

Fricción basal e interna. Uno de los factores más importantes en la dinámica de flujos granulares es el efecto de la fricción. El coeficiente de fricción es una medida de la resistencia al flujo, generada por una avalancha deslizante en el contacto con la topografía subyacente. En su forma más simple, es la tangente del ángulo que conecta la parte superior del área fuente con la parte más distal del flujo (Heim, 1932).

En el caso de Titan2D, se tienen dos coeficientes de fricción: la fricción basal, que tiene en cuenta de la interacción entre la bases del flujo con el lecho; y la fricción interna, que tiene en cuenta la fricción entre partículas (Savage y Hutter, 1989; Sheridan et al., 2005). La fricción basal puede ser aproximada por

⁹ García et al. (2011) usa un mínimo de 100.000 m³ y un máximo de 2.000.000 de m³.

el coeficiente de Heim ($\varepsilon = H/L$), la cual, según el criterio de Ogburn y Calder (2017), puede ser aproximada por la relación mostrada en la ecuación 21.

$$\varepsilon = 0.11V^{-0.14} \quad 18$$

Donde el volumen V está en km^3 .

Aplicando la ecuación 21 al rango de volúmenes se obtiene, para la fricción basal, un mínimo $\varepsilon_{max} = 0.34$, para el volumen mínimo y un $\varepsilon_{min} = 0.26$, para el volumen máximo. Ya que la fricción interna es mayor que la basal (Sheridan et al., 2005), en este ejemplo, asumimos una fricción interna constante de 0.35, ya que dicho parámetro tiene muy poca incidencia en la evolución del flujo, comparada con la incidencia de la fricción basal (Neglia et al., 2021). Puesto que la fricción basal está directamente relacionada con el volumen, en este ejemplo, la fricción desaparece como incertidumbre en el muestreo OLHS, quedando como incertidumbres la localización y el volumen.

La nube acompañante y oleadas piroclásticas. Para la nube acompañante y oleadas fueron modeladas con la teoría de las Líneas de Energía (Heim, 1932), adaptando la técnica de los Conos de Energía de Sheridan (Malin y Sheridan, 1982; Sheridan y Macías, 1995) y las propuesta de Ogburn y Calder (2017), para así tener en cuenta las dos partes de los PDC a la vez. Validaciones de las predicciones estadísticas del método de los conos de energía demuestran que es una de las mejores herramientas computacionales para reproducir el alcance máximo de las PDC, ya que es capaz, dependiendo del modelo de fricción usado, de capturar tanto la parte dominada por la convección como la inercial (Tierz et al., 2016).

Al no contar con suficientes registros geológicos ni históricos que permitan llegar a curvas de probabilidad como las obtenidas por Sheridan y Macías (1995), se opta en este ejemplo por aplicar directamente el método de los conos de energía, pero implementando las ideas de Ogburn y Calder (2017). Las principales incertidumbres involucradas en este método son: 1) la energía potencial inicial del flujo, representada en una altura desde donde inicia el colapso de la columna eruptivo, que para explosiones laterales de domo (flujos de bloques y ceniza) y oleadas representa la cabeza de la energía cinética, y 2) el

coeficiente de Heim ($\varepsilon = H/L$), que para este tipo de flujos Ogburn y Calder (2017) proponen una relación con el volumen como se indica en la ecuación 22.

$$\varepsilon = 0.06V^{-0.20} \quad 19$$

Donde el volumen V está en km^3 .

Aplicando la ecuación 22, para los volúmenes máximo y mínimo estimados en la sección anterior, se obtiene $\varepsilon_{max} = 0.3$ y $\varepsilon_{min} = 0.2$. Respecto al rango de alturas de colapso, en este ejemplo, se opta por tener en cuenta que la altura de colapso más probable en el volcán Galeras es de 100 m a 200 m (Calvache, 1990; García et al., 2011), dejando esta variable como fija en 200 m sobre el cráter del volcán.

Resultados.

Flujos piroclásticos. El área establecida como posible origen de flujos piroclásticos (Figura 31) se dividió en 5 sectores, 4 sectores circulares, más un círculo central (Figura 32), dentro de cada uno de los cuales se generaron 256 combinaciones con las incertidumbres L_x , L_y y V (donde L_x es la coordenada x de la localización, L_y es la coordenada y de la localización y V el volumen), usando la técnica de muestreo OLHS, para un total de 1.280 realizaciones.

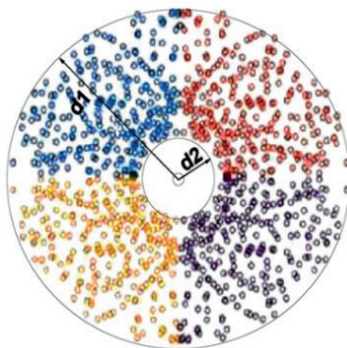


Figura 32. Esquema de los 5 sectores donde se distribuye el muestreo OLHS de la localización de los lugares de arranque de los flujos

Nota. d_1 es la distancia de 1.200 m a partir del cráter y d_2 la distancia al borde caldérico (640 m).

Utilizando los scripts para Octave/Matlab™ descritos en la sección anterior (lahares), tanto para el pre como para el posproceso, se obtuvo la distribución probabilista bayesiana de flujos piroclásticos que se muestra en la Figura 33. En este caso, se modeló toda el área del volcán, ya que es necesario tener en cuenta la movilidad de este tipo de flujos que pueden llegar a remontar obstáculos topográficos con relativa facilidad. La baja probabilidad de impacto en la parte inmediatamente exterior de la caldera volcánica es un efecto de la inferencia bayesiana, ya que en esos lugares es poco probable que se afecten desde varios lugares de inicio a la vez. En el caso de la cuenca del Barranco, se muestra una probabilidad condicional de hasta el 50 % de afectación en la parte alta de dicha cuenca.

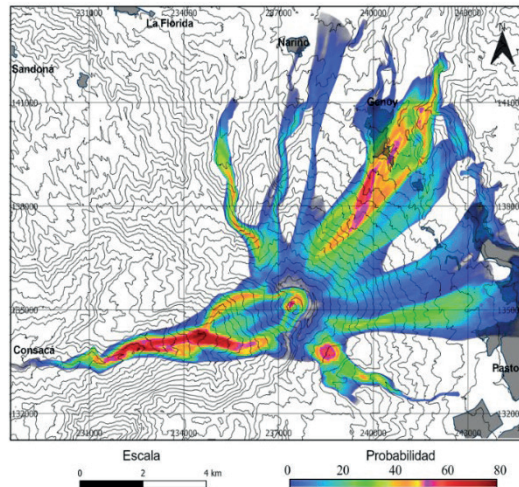


Figura 33. Distribución probabilista bayesiana condicional de impacto por flujos piroclásticos en el área de influencia del volcán Galeras

Nota. En gris los centros urbanos.

Nube acompañante, colapso de domo y oleadas. Aprovechando que se tiene la base topográfica del modelo digital, es posible desarrollar una base de datos de relaciones H/L para cada uno de los pixels del modelo digital de elevación; teniendo ya el rango de volúmenes (ver sección anterior) y aplicando la Ecuación 22 se obtiene el valor de H/L correspondiente. Posteriormente, se aplicó un script para Octave/Matlab™, desarrollado por

los autores de este libro, que permite un conteo de las veces que el H/L del pixel es mayor o igual al correspondiente de cada volumen. La Figura 34 muestra este concepto de manera esquemática, donde cada punto tiene su respectivo H/L . Si el coeficiente de Heim que corresponde al volumen ensayado es menor que la línea de energía respectiva, se la incluye en el conteo para luego encontrar las probabilidades.

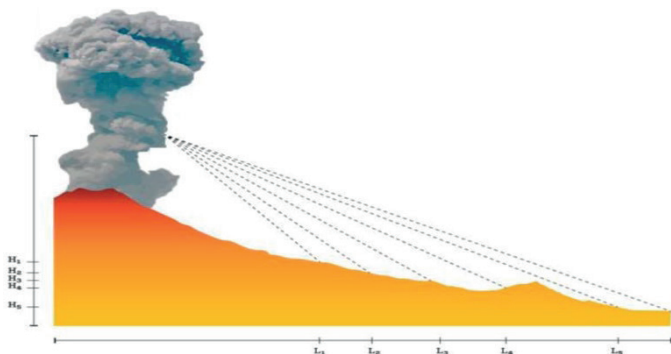


Figura 34. Esquema de líneas de energía con diferentes ángulos H_i/L_i en cada pixel

Nota. H_i se lee de arriba hacia abajo. Nótese que para algunas líneas de energía el flujo sería capaz de remontar obstáculos.

Como resultado de esta metodología se obtuvo la distribución probabilística, como se indica en la Figura 35. Aplicando los criterios propuestos por Ogburn y Calder (2017), para el caso del municipio de la Florida, se puede notar que existe la probabilidad, aunque baja (menor del 10 %), de que estos se dirijan también hacia la quebrada Panchindo y El Cucho. Esta observación es compatible con los hallazgos realizados en las dataciones realizadas por Jean-Claude Thouret (Cordoba et al., 2019) en micro-carbones en la cuenca Panchindo cerca de la cabecera de La Florida (~2.100 ybp).

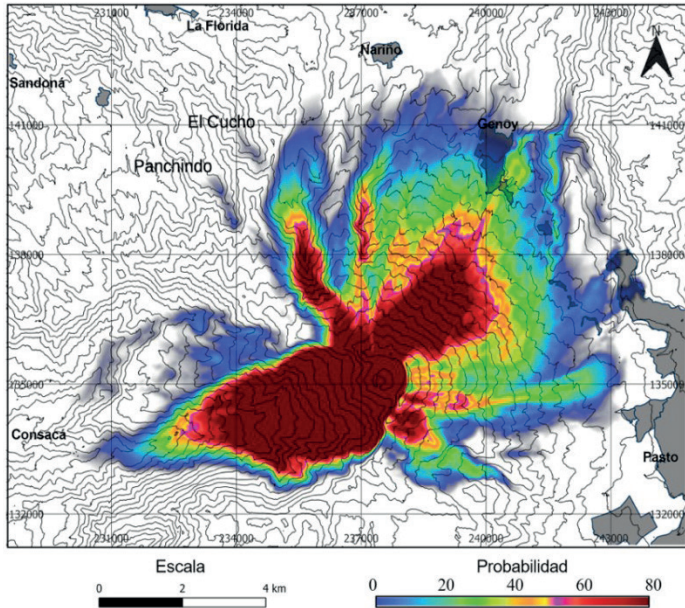


Figura 35. *Distribución probabilista del alcance de la nube acompañante u oleadas piroclásticas por el método de las líneas de energía*

PDC. Para tener en cuenta tanto la parte basal de los PDC, como su nube acompañante y posibles oleadas piroclásticas, se procedió a hacer una envolvente de probabilidades usando el Sistema de Información Geográfica Qgis (QGIS-project, 2023). En la Figura 36 se aprecia cómo la nube acompañante puede superar barreras topográficas con notables probabilidades, mientras que las canalizaciones y encañonamientos del flujo hacen que los PDC se presenten con importantes probabilidades aguas abajo de dichas formaciones topográficas. Por ello, en la cuenca alta del Barranco, la combinación de flujos piroclásticos y nube acompañante hacen que, comparados con la sola nube, los flujos tengan probabilidades de llegar hasta un 40 % en la parte media-alta de la cuenca.

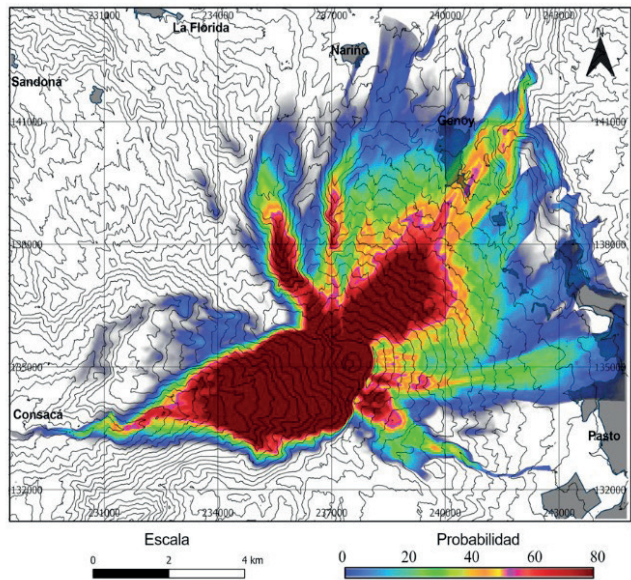


Figura 36. *Envoltorio de probabilidades que muestran la probabilidad de impacto por PDC en el área de influencia del volcán Galeras*

Se aclara que si se comparan los resultados para PDC de este ejemplo con los resultados de Ingeniar (2022b), se notarán algunas diferencias, que estriban en el tipo de aproximación, puesto que Ingeniar establece periodos de retorno, pero en este ejemplo se ha usado el concepto de probabilidad condicional por considerarlo más conservador como lo hace Hurtado y Cortes (1997) en el mapa de amenazas de galeras en su tercera versión, al igual que en la cuarta versión (SGC, 2015a) y, además, el criterio de fricción basal e interna del flujo se basa en la propuesta de Ogburn y Calder (2017). Las diferencias en aproximación solo indican diferencias en criterio, y será responsabilidad de los tomadores de decisiones decidir cómo aprovechar el hecho de que se tienen dos resultados similares: uno bajo el criterio de probabilidad condicional y otro que tiene en cuenta los periodos de retorno.

Amenaza por onda de choque. Los registros históricos indican que erupciones del volcán Galeras han generado ondas de choque que han llegado a afectar los municipios de Pasto y Consacá situadas a 9 y 13 kilómetros de distancia del cráter, respectivamente. Según Espinoza (2012) en dichos centros

poblados los principales daños causados por este fenómeno son la ruptura de ventanas, apertura de puertas y conmoción en personas. Esta amenaza es recurrente y no despreciable, ya que, puede, en suma, tener altos costos a distancias considerables. Por esta razón, el Servicio Geológico Colombiano, la incluye en su mapa de amenazas del volcán Galeras (SGC, 2015a).

Siendo la onda de choque inherentemente tridimensional, en el presente trabajo se hizo una evaluación probabilística de la amenaza por onda de choque para el volcán Galeras mediante simulaciones numéricas, usando el programa de modelamiento OpenFoam, el cual permite simular fluidos supersónicos en medios compresibles por el método de volúmenes finitos (Zicanov, 2019). OpenFoam permite una simulación tridimensional, teniendo en cuenta el efecto topográfico de toda el área de influencia del volcán.

Modelamiento. Las simulaciones se ejecutaron en una malla tridimensional sobre el modelo de elevación digital de 3 m de la superficie del volcán. Con el fin de determinar todos los escenarios posibles dentro de los valores límites de presión inicial esperados para el volcán Galeras, se realizaron modelamientos con diferentes valores de presión inicial de explosión dentro de los rangos 0.4 Mpa y 6 Mpa (como se verá más adelante), para posteriormente realizar un tratamiento estadístico de estos escenarios mediante un análisis frecuencial que permitió tener una distribución probabilística de la amenaza.

La malla fue creada con las herramientas blockMesh y snappyHexMesh de OpenFoam (Greenshields, 2017), el dominio computacional cubre toda el área de la zona de influencia del volcán Galeras; para esto, se tomó un área de aproximadamente 2116 km². Inicialmente, se creó una malla computacional de geometría cúbica que consta de 300 elementos en cada dirección horizontal y con 100 en sentido vertical, la cual se obtuvo mediante el uso de la herramienta blockMesh. Después, la parte baja de la malla se ajustó a la topografía alrededor del volcán Galeras mediante la técnica de reducción del tamaño máximo de la malla hacia la topografía del volcán Galeras dada por el Modelo Digital de Elevación con la herramienta snappyHexMesh. Finalmente, se obtuvo una malla compuesta de 3.028.089 elementos, 9.169.548 caras y 3.137.424 nodos (ver Figura 37).



Figura 37. *Malla tridimensional de volúmenes finitos usada en el modelamiento de onda de choque por OpenFoam*

Como dato principal de entrada de OpenFoam está la presión inicial de la explosión, para lo cual se determinan rangos mínimo y máximo. Para establecer el valor mínimo del rango de presiones teniendo en cuenta que históricamente la ciudad de Pasto se ha visto afectada por este fenómeno (Espinosa, 2012), se hicieron varias pruebas con diferentes valores de presión inicial, de esta forma, se encontró que para lograr una sobrepresión de 100 Pa en Pasto, que es la sobrepresión capaz de generar ruptura de ventanas de grandes dimensiones en esta ciudad (Hurtado y Cortéz, 1997), se necesitó un mínimo de 0.4 MPa de presión de explosión.

Para poder determinar el valor máximo del rango de presiones también se tuvo en cuenta el registro histórico dado en Espinoza (2012). En razón de que, en la ciudad de Pasto, el mayor efecto producido por la onda de choque ha sido la ruptura de ventanas, se tomó como valor máximo el valor de sobrepresión necesario para fracturar todas las ventanas comunes (3 mm de espesor) a aprte de sus dimensiones, este valor de sobrepresión es de 1 kPa (Mercx et al., 1991; Saito y Takayama, 2005; Valentine, 1998). Aplicando el método de ensayo y error, se obtuvo un valor de presión inicial de 6 MPa con el que se llega al centro de la ciudad de Pasto con aproximadamente 1 kPa de sobrepresión.

En virtud de que la fuente es puntual y con un solo grado de libertad, el muestreo estadístico requerido está compuesto de 29 escenarios, que se considera como un muestreo representativo bajo estas condiciones (Guerrero et al., 2018; McClung, 2001; Ruiz-Bueno, 2008).

Resultados. Una vez obtenidos los resultados de las 29 realizaciones, con información de la sobrepresión incidente en cada nodo sobre el terreno, se obtuvo la probabilidad frecuencial de presiones dinámicas de interés para el análisis del riesgo, así: 200 Pa para ruptura de vidrios grandes, 1.000 Pa para ruptura de todos los vidrios, 15.000 Pa a partir de la cual pelagra la vida humana (Glasstone y Dolan, 1977), 35.000 Pa, a partir de la cual se puede esperar daño en estructuras reforzadas y 80.000, donde se esperaría destrucción, incluso, de estructuras en acero (Glasstone y Dolan, 1977; Valentine, 1998).

La Figura 38 muestra los resultados de la aproximación probabilista para sobrepresiones a) capaces de romper vidrios típicos del área de influencia del volcán, b) presiones dinámicas que afectarían a todos los vidrios, c) sobrepresiones capaces de afectar construcciones reforzadas y d) presiones dinámicas que afectarían incluso a construcciones en acero. Se puede ver en a) el efecto de la reflexión y refracción del terreno, muy importante en topografías como las de los Andes.

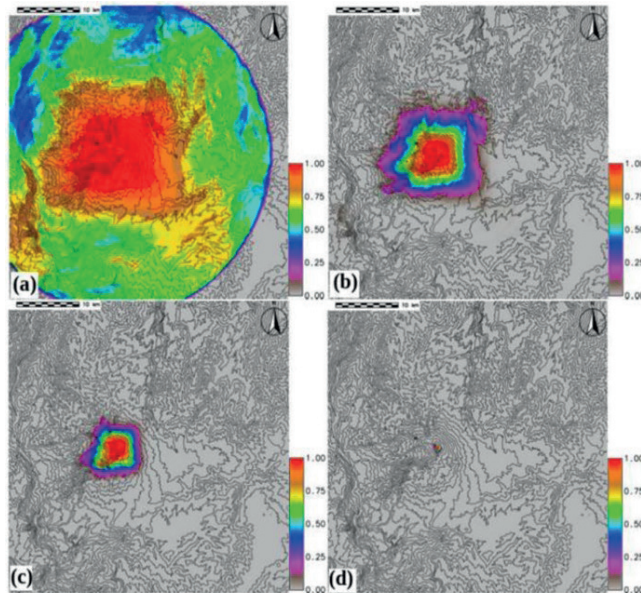


Figura 38. Distribución probabilista de la amenaza por onda de choque

Nota. a) 200 Pa, b) 1 kPa, c) 15 kPa y d) 80 kPa.

Proyectiles balísticos. En el volcán Galeras la actividad del último periodo eruptivo ha traído consigo expulsión de proyectiles y representa el evento con mayor probabilidad en las erupciones volcánicas de tipo explosivo (SGC, 2015a), hasta el momento generando incendios forestales, como los ocurridos en las erupciones del 24 de abril de 2009 y el 2 de enero de 2010 (Acosta-Moncayo y Muñoz, 2012; Ingeominas, 2010); los incendios ocasionados por los balísticos dejaron ver el alcance de los mismos a lo largo de las faldas del volcán, como se puede ver en la Figura 39.



Figura 39. Registro del impacto de los proyectiles balísticos en las faldas del volcán Galeras ocasionando incendios

Nota. Tomado de Alberto Quizano Vodniza, 3 de enero de 2010.

Pese a que en el volcán Galeras se tienen registros históricos de algunos de los balísticos expulsados, también existe incertidumbre al asociarlo con un evento eruptivo determinado, por lo cual se conoce, parcialmente, su distribución (Ingeominas, 1997; SGC, 2015a); dicha información se compendia en la Tabla 3 que comprende datos tomados de Ingeominas (1997) y en el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2015).

Modelamiento. A partir de la información de SGC (2015b) fue posible deducir los rangos necesarios para modelar hacia diferentes direcciones de disparo. Dichos rangos están dentro de los compilados por Taddeucci et al. (2017), para proyectiles balísticos de explosiones vulcanianas. La Tabla 3 muestra los rangos aplicados, aclarando que el rango de ángulos de disparo se

ajustó de acuerdo a la configuración topográfica del cráter (no son posibles los 10 grados de Alatorre-Ibargüengoitia et al., 2006). Es decir, dadas las condiciones topográficas del cráter del volcán, se extrajeron perfiles topográficos cada 5 grados a partir del cráter sobre el DEM de 3 m de resolución, con lo cual se determinó el ángulo mínimo dependiendo de la topografía.

Tabla 3. Rangos de parámetros de proyectiles balísticos volcán Galeras

Parámetro	Mínimo	Máximo
Ángulo	30°	70°
Diámetro (m)	0.2	3.5
Densidad (kn/m ³)	2.300	2.800
Velocidad inicial (m/s)	100.0	300

Nota. A partir de datos de Ingeominas (1997), Servicio Geológico Colombiano (2015) y SGC (2015).

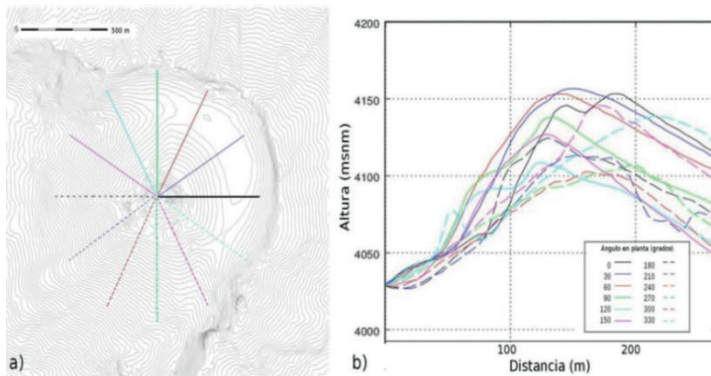


Figura 40. 12 ejemplos de direcciones de disparo de proyectiles balísticos

Nota. a) 12 de cortes del perfil topográfico del cono volcánico del Galeras. b) Los respectivos 12 cortes del cono volcánico. A partir de un DEM de 3 m.

A manera de ejemplo, en la Figura 40 se muestran 12 de los distintos perfiles del cono, extraídos cada 30°. Puede observarse la asimetría del cono volcánico de Galeras, por lo cual se decidió tomar como ángulo mínimo de eyección 30° y un ángulo máximo de 70°.

Para verificar el modelo, se compararon los resultados de nuestro modelo con el típico programa Eject!.4, resultando en diferencias relativamente mínimas para los mismos parámetros. Por ejemplo, para el caso de Galeras, donde la densidad atmosférica cambia significativamente con la altura, para grandes distancias, se notaron diferencias de algunos cientos de metros en la predicción, siempre del lado de la seguridad, es decir, prediciendo mayor alcance que Eject!.4.

Para cada dirección se modeló un muestreo estadísticamente significativo de las combinaciones potenciales de las condiciones iniciales dentro de los rangos establecidos (ver Tabla 3) usando el método OLHS. La trayectoria del proyectil se cruza con el perfil topográfico respectivo, obteniendo información de velocidad para la masa respectiva del proyectil, pudiéndose obtener la energía de impacto (Ecuación 20).

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad 20$$

Resultados. Con la información obtenida de cada perfil, se logra obtener la probabilidad frecuencial de impacto. Para las zonas mostradas en el capítulo de vulnerabilidad, las probabilidades evaluadas corresponden a la probabilidad de que se excedan los 10^3J y 10^7J . La Figura 41a muestra la distribución de probabilidades de excedencia de un impacto de 10^3J , donde se puede observar que hasta la cota 3.000 m.s.n.m. o una distancia aproximadamente radial de 4 km se tienen probabilidades de hasta un 2 %. La Figura 41b muestra la distribución de probabilidades de excedencia de un impacto de 10^7J , donde se observa una influencia de la caldera del volcán con probabilidades de hasta un 2 %, llegando hasta una cota de 3.400 m.s.n.m hacia el oriente y nororiente (hasta unos 3.200 m de distancia), pero hacia dentro de la caldera, es decir, dirección suroccidente, con esa probabilidad se llega a una cota de unos 2.800 m.s.n.m., o hasta una distancia de unos 3.800 m.

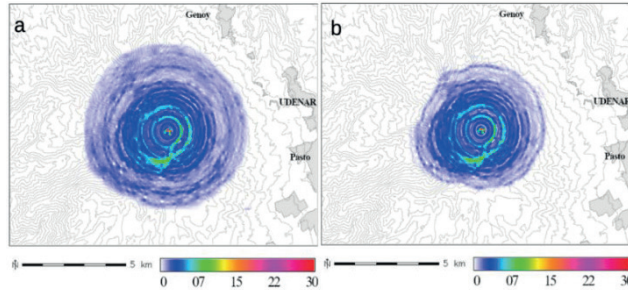


Figura 41. *Distribución de probabilidades*

Nota. a) probabilidad de excedencia de impacto con energía de 10^3 J. b) Probabilidad de excedencia de impacto con energía de 10^7 J.

Caída de ceniza. En el caso de las caídas piroclásticas, el modelamiento probabilístico de dispersión se realizó por medio del programa Haz-Map (Costa et al., 2006; Macedonio et al., 2005), haciendo uso del software para la obtención de condiciones iniciales de erupciones PARFIT (Macedonio y Costa, 2014), datos meteorológicos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2017) y datos meteorológicos de ERA-Interim (Dee et al., 2011).

Análisis de la historia eruptiva. La definición de las condiciones iniciales y la calidad de los resultados dependen, en gran medida, de la caracterización y el análisis de la historia eruptiva del volcán. En el caso Galeras, teniendo en cuenta la calidad, la cantidad y la continuidad de los datos, el historial de la actividad se puede dividir en tres fases: 1) una fase pre-invasión española, donde los registros eruptivos se limitan al análisis de los depósitos encontrados; 2) la segunda fase surge entre el periodo de conquista y la instauración del observatorio para el volcán (1532-1989 DC), es allí donde se recopilan registros históricos de los periodos eruptivos del volcán que fueron documentados por los habitantes de la ciudad y cronistas españoles; y 3) la última etapa corresponde al periodo comprendido entre la instauración del Observatorio Vulcanológico de Pasto y el periodo actual, esta etapa es la que podría considerarse completa en todos los aspectos, debido a que se posee registro cualitativo y cuantitativo de los dos principales periodos eruptivos sucedidos en el volcán Galeras (Sandri et al., 2021), teniendo en

cuenta que la actividad documentada no es de gran magnitud. La dos principales fuentes de información para Galeras fueron los datos obtenidos por el Servicio Geológico de Colombia, de registros históricos (Cepeda, 2020; Espinoza, 2012; Gomez, 2018; Ingeominas, 2010) y el registro de erupciones de Galeras de la base de datos del Smithsonian Institution (2017)

De cada evento registrado, se obtuvo el volumen estimado y la altura de la columna eruptiva. Sin embargo, algunos registros carecen de este tipo de información, razón por la cual, se realizó una aproximación de los datos, teniendo en cuenta el Índice de Explosividad Volcánica (VEI por sus siglas en inglés) (Newhall and Self, 2014) y los rangos de volumen y altura de columna que proponen dichos autores respecto al VEI.

Para nuestro ejemplo Galeras, se encontraron 76 erupciones registradas entre el año 3.120 a. C. y el 2010 d. C., aun, como es explica por Sandri et al. (2021), este registro es completo después del periodo siguiente a 1900. A partir de esto registro, las erupciones se clasificaron en función de su magnitud, estimada a partir de los VEI y alturas de columna publicados (Pyle, 2000). Teniendo en cuenta el análisis de las frecuencias de los eventos eruptivos, se consideraron dos escenarios según la intensidad, representada por la altura de la columna, y la magnitud, representada por la masa total eruptada, tal como se indica en la Tabla 4.

Tabla 4. *Clasificación de las erupciones del volcán Galeras respecto a la la magnitud (4a) y altura de la columna (4b)*

Talla eruptiva por magnitud	Magnitud mínima (kg)	Magnitud máxima (kg)
Pequeño	< 2.0	2.0
Mediano	2.01	4.0
Grande	4.01	> 4.01

a)

Talla eruptiva por intensidad	Altura mínima (km)	Altura máxima (km)
Pequeño	1	6
Grande	6.1	14

b)

En base a las frecuencias y las clasificaciones indicadas en la Tabla 4, se obtuvo el parámetro de peso que se indica en la Ecuación 21.

$$\text{Peso} = \frac{\text{frecuencia de la clase}}{\text{número de eventos evaluados}} \quad 21$$

A través de los datos compilados, también fue posible realizar un análisis de la completitud de los datos recolectados y se determinó que los registros de eventos podrían considerarse completos desde el año 1923¹⁰, por lo cual, se limitó el análisis de frecuencias a los últimos 100 años, encontrando los pesos que se indican en la Tabla 5.

Tabla 5. Pesos de las clasificaciones respecto a a) la magnitud y b) intensidad (altura de columna)

Talla eruptiva	Por magnitud (%)
Pequeña	51.1
Mediana	42.2
Grande	6.6

a)

Talla eruptiva	Por intensidad (%)
Pequeña	53.3
Grande	46.6

b)

Análisis de vientos. Otro de los factores importantes al momento de evaluar la dispersión de ceniza consiste en el estudio de la configuración de los vientos de la zona, debido a que estos determinan, en gran medida, la dirección y el alcance de las partículas (Jenkins et al., 2015; Sparks et al., 1997).

Tomando la información de la base de datos de ERA-Interim e interpolando sobre el punto más cercano al cráter, se obtuvo un perfil de 20 años, correspondientes a la más reciente fase eruptiva del volcán Galeras (1993-2012), con datos de vientos cada 6 horas, como se puede observar en la Figura 42.

¹⁰ Para detalles mirar Sandri et al. (2021).

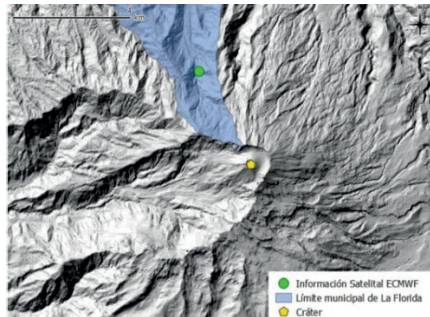


Figura 42. *Ubicación punto ERA-Interim de toma de datos para reanálisis*

Con el fin de evaluar la tendencia de los vientos se realizó un análisis de los datos en 3 diferentes altitudes: 5.000, 10.000 y 15.000 m.s.n.m., debido a que corresponden a las altitudes aproximadas del cráter del volcán y las alturas medias de columnas que, en este ejemplo, se clasificaron como pequeñas y grandes, respectivamente.

Condiciones iniciales. Las condiciones iniciales se establecieron desde la base de datos obtenida anteriormente. Las condiciones de la columna eruptiva se recrearon por medio del programa de inversión PARFIT. Para su funcionamiento PARFIT requiere información bastante específica de los depósitos de caída, razón por la cual se optó por analizar 9 eventos eruptivos del periodo 2004-2010, que contienen información detallada, abarcando las clasificaciones arriba descritas. El uso de PARFIT permitió la reconstrucción de los parámetros eruptivos de cada uno de dichos nueve eventos. A parte de eso, se realizó el mismo procedimiento con la información de masa y altura de columna del evento del 21 de noviembre de 1925, estimada por SGC con el objetivo de obtener la información de una erupción de gran envergadura.

El parámetro de granulometría requerido, se obtuvo a partir de la caracterización de erupciones de volcanes análogos y con base en el estudio de Costa et al. (Costa et al., 2017, Costa et al., 2016), procediendo con el método de ensayo y error, donde se tuvo en cuenta tanto los porcentajes de partículas finas y gruesas como la participación del agregado, conformado gracias a la cohesión de las partículas finas (Costa et al., 2010; Mastin et al., 2016).

Modelamiento. El modelamiento de la dispersión de la caída de ceniza se realizó por medio del modo probabilístico de Haz-Map. Para ello, se contrastaron los perfiles de vientos obtenidos con la información de tres escenarios de diferente magnitud y dos de diferente intensidad, los cuales fueron obtenidos considerando la historia geológica reciente del volcán Galeras (SGC, 2015). Estos escenarios corresponden a las fechas del 24 de abril de 2009 para un escenario pequeño, el 30 de septiembre de 2009 para un escenario de mediana magnitud, y, finalmente, la erupción del 21 de noviembre de 1925, que representa los eventos de gran magnitud.

Con el fin de trabajar sobre el modelo probabilístico, cada uno de los escenarios fue simulado sobre cada perfil obtenido (4 perfiles diarios durante 29 años). Por lo tanto, en cada evento se hizo uso del perfil completo de vientos, obtenidos del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF, por sus siglas en inglés) sobre el modo probabilístico de Haz-Map. Haz-Map permite la creación automática de mapas de probabilidad, basados en todas las simulaciones realizadas y a través de la definición de umbrales mínimos de caída de ceniza. La definición de estos umbrales para el cálculo de las probabilidades correspondientes se contrastó con los datos definidos en el estudio de vulnerabilidad, se determinaron como importantes las cargas de 0.5, 1, 5, 10 y 50 kg/m², que corresponden, aproximativamente, a los espesores de 0.1, 0.2, 1-2, 2-4 y 10-20 centímetros de depósito, según su densidad. La distribución de probabilidad de cada una de estas cargas fue computada, obteniendo un total de 30 mapas probabilísticos, donde a cada uno de los eventos le corresponde un total de 5 mapas definidos por las cargas o umbrales.

Resultados. Los mapas de probabilidades para cada carga fueron obtenidos calculando la probabilidad de exceder, en cada punto, la carga definida en los diferentes escenarios modelados y ajustados previamente según su peso (0.5, 1, 5, 10 y 50 kg/m²), dando como resultado diferentes distribuciones de probabilidad de caída de material a lo largo del área de influencia del volcán Galeras, para cada una de las cargas especificadas. La Figura 43 muestra la distribución probabilista en toda el área de influencia del volcán Galeras para una carga de a) 1 kg/m³ y b) 50 kg/m³.

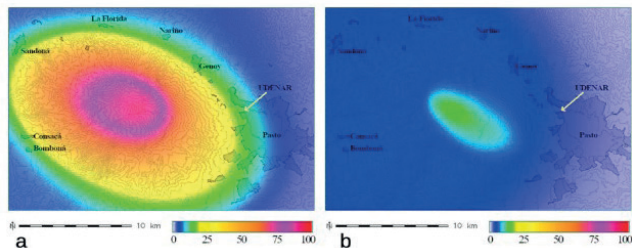


Figura 43. Distribución probabilista de caída

Nota. a) 1 kg/m^3 (2 a 4 mm de espesor), b) 50 kg/m^3 (unos 10 cm de espesor).

En lo que respecta al municipio de la Florida en particular, la distribución probabilística en toda el área del volcán, fue delimitada de acuerdo al área de este municipio, como se muestra en la Figura 44, donde se observa la distribución de probabilidades para caídas iguales o superiores a 1 kg/m^2 . En los casos contemplados, se tiene que, en la distribución de probabilidad de caída igual o superior a 0.5 kg/m^2 (correspondiente a un espesor de depósito de ceniza entre 0.1 cm y 0.2 cm), se puede observar que la parte alta de la zona denominada como Barranco es la que posee mayor incidencia de la amenaza con probabilidades cercanas al 100 %, el sector de Zaragoza y la cabecera municipal se mantiene entre el 60 y 40 por ciento, mientras que la zona norte del municipio presenta probabilidades menores o iguales al 10 %. La probabilidad de caída para cargas iguales o superiores a 1 kg/m^2 (2 a 4 milímetros de depósito) se encuentra entre valores máximos cercanos al 70 %, concentrados en la zona sur del municipio correspondiente a la parte alta de Barranco; en la zona urbana y el resto de la zona norte del municipio se concentran probabilidades menores al 30 % (Figura 44). La probabilidad de caída para 5 kg/m^2 (aproximadamente 1 o 2 centímetros de depósito) posee máximos cercanos al 10 %, concentrados en la zona sur del municipio, correspondiente a la parte alta de Barranco, la zona urbana aparece con probabilidades de, aproximadamente, 5 % y, en el resto de la zona norte del municipio, se concentran probabilidades menores al 3 %. El comportamiento de la probabilidad de caída de 10 kg/m^2 o 2 centímetros de depósito es muy similar a la anterior carga, donde los máximos no superan al 7 % y se encuentran concentrados en la parte alta de Barranco. Sin embargo, hacia la cabecera municipal los valores se mantienen en menos del 5 % y la zona norte del municipio posee valores cercanos o menores al 1 %. La distribución de probabilidad de caída de carga de 50 kg/m^2 e indica valores máximos cercanos al 6 %, concentrados en la parte alta

de Barranco, mientras que el casco urbano y el resto del municipio poseen probabilidades menores al 5 %.

De lo anterior, se puede inferir que, aunque la probabilidad de cargas que puedan afectar gravemente la infraestructura es baja en el caso urbano, zonas más rurales (en especial la zona de Barranco) podrían verse seriamente influenciadas por depósitos de caída.

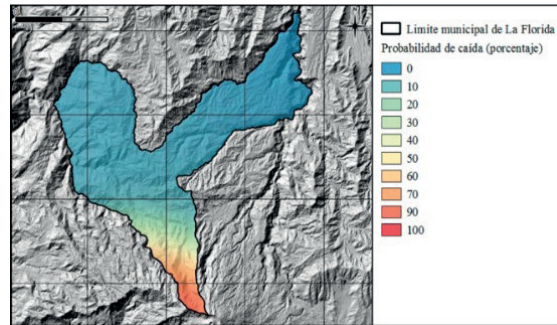


Figura 44. Distribución de probabilidades de excedencia de una carga de 1 kg/m^3 de caída de ceniza en el municipio de La Florida, Nariño, Colombia

Probabilidad anual

Las probabilidades arriba calculadas se refieren a la probabilidad condicionada a que ocurra el evento, es decir, independiente de la probabilidad de que dicho evento se desencadene (o $P(B) = 1$ en la Ecuación 4). Para encontrar la probabilidad absoluta de que un lugar sea afectado por un evento amenazante se debe encontrar $P(B)$ dentro del periodo de tiempo de interés.

Aproximar la probabilidad anual de que ocurra una erupción capaz de generar eventos potencialmente destructivos es un desafío adicional, debido a las altas incertidumbres involucradas. En un estudio realizado por Sandri et al. (2021), quienes a partir de la historia eruptiva del volcán Galeras logran establecer la probabilidad acumulada (CDF) de que suceda una erupción de magnitud > 2.6 . La Figura 45 muestra la curva lognormal CDF para eventos inter-ciclos extraída de Sandri et al. (2021), de la cual se puede inferir que existe una probabilidad $P(B)$ de más del 95 %, de que dentro de un periodo de 75 años, después del último ciclo eruptivo, se presente una erupción de alta

magnitud. Ya que las curvas presentadas por Sandri et al. (2021), por completitud de la información analizada, se sustentan en la actividad reciente (<200 años), estas curvas serían válidas siempre y cuando el volcán Galeras mantenga el patrón de comportamiento mostrado durante ese periodo de tiempo. Cabe anotar que, la alta incertidumbre en el establecimiento del fin del último ciclo eruptivo que si bien, tal como lo afirma Sandri et al. (2021), dicho ciclo parece haber concluido prácticamente; pero, en el momento no es posible establecer un año exacto, lo cual podría estar comprendido entre 2012 y 2017, de acuerdo a la actividad reportada por el Servicio Geológico a esos autores.

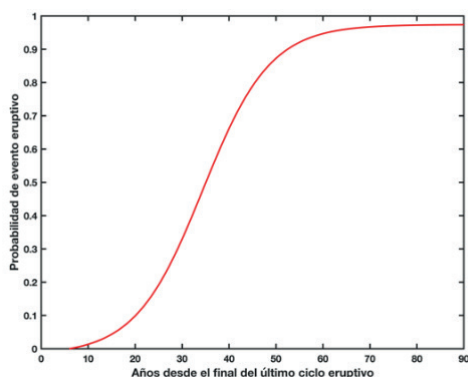


Figura 45. Probabilidad acumulada de erupción del volcán Galeras en años después del último ciclo eruptivo

Nota. Extraída de Sandri et al. (2021).

Se puede afirmar que, dentro de las limitaciones indicadas, si cada ciclo es independiente de la ocurrencia de otro (Sandri et al., 2021, 2019) e tendría una tasa anual promedio $\lambda=1/75= 0.0133$, por tanto, la probabilidad de que ocurra al menos una erupción por año de $P(1 \text{ por año}) = 1-P(0 \text{ por año}) = 1-e^{-\lambda} = 0.0132$; es decir, una probabilidad anual de un 1.3 % aproximadamente.

Nota: esta probabilidad anual plana, como la toman las aseguradoras sería válida por un breve periodo de tiempo después del fin del último ciclo eruptivo del volcán Galeras, puesto que la probabilidad acumulada se incrementa a medida que pasan los años (Sandri et al., 2021).



Vulnerabilidad

CAPÍTULO 2

La vulnerabilidad

El análisis de vulnerabilidad es un componente importante del análisis de riesgos que se enfoca en evaluar la susceptibilidad y la capacidad de un sistema, comunidad o infraestructura para verse afectado negativamente por las amenazas. Ayuda a comprender los posibles impactos y consecuencias de los peligros en bienes vulnerables y a identificar áreas donde se necesitan intervenciones o medidas de mitigación.

Según el *Manual para Formuladores de Políticas y Planificadores* de las Naciones Unidas (UNDRO, 1990), la vulnerabilidad se entiende como el “grado de pérdida de un determinado elemento en riesgo o conjunto de dichos elementos como resultado de la ocurrencia de un fenómeno natural de una determinada magnitud y expresado en una escala de 0 (sin daño) a 1 (pérdida total)” (p. 91). En otras palabras, la vulnerabilidad es una medida del nivel de daño esperado ante una intensidad de impacto. Como se puede ver en la Figura 46, para cada nivel de intensidad, un impacto puede resultar en cierto nivel de daño. Estas curvas se deben deducir para cada amenaza y para cada elemento o grupo de elementos expuestos.

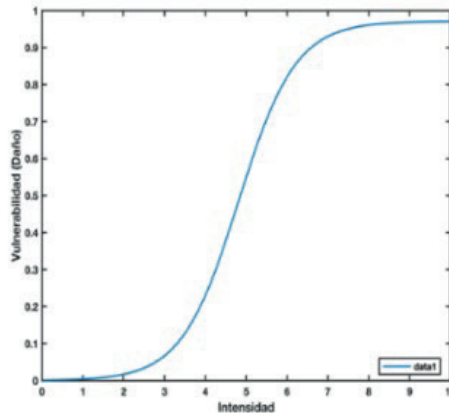


Figura 46. Esquema de la vulnerabilidad de un elemento expuesto representando el nivel de daño para un nivel de intensidad hipotético

En el mismo sentido, aunque de manera más general y cualitativa, en su *Guía para la Evaluación Nacional del Riesgo de Desastres* (UNISDR, 2017b) de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción de Desastres la vulnerabilidad se define como “las condiciones determinadas por factores o procesos físicos, sociales, económicos y ambientales que aumentan la susceptibilidad de un individuo, una comunidad, activos o sistemas a los impactos de los peligros” (p. 100).

La definición de UNDR0 (1990) permite un acercamiento cuantitativo de la vulnerabilidad, lo cual facilita un análisis probabilista del riesgo. En el contexto del análisis de riesgos, el análisis de vulnerabilidad involucra los siguientes aspectos clave:

1. Exposición: implica identificar y caracterizar los elementos en riesgo, como personas, edificios, infraestructura, ecosistemas y activos económicos, que están expuestos a la amenaza. La evaluación de la exposición considera factores como la ubicación, la densidad y el valor de los activos en las áreas propensas a peligros.

2. Sensibilidad: el análisis de sensibilidad examina el grado en que los elementos en riesgo son sensibles o susceptibles al impacto de las amenazas. Tiene en cuenta sus características físicas, resistencia estructural, resiliencia y adaptabilidad. Por ejemplo, la vulnerabilidad de un edificio a los movimientos sísmicos depende del tipo de construcción, los materiales utilizados y el diseño estructural.

La gestión del riesgo, también puede considerar los siguientes factores, que están relacionados con la vulnerabilidad:

1. Capacidad de adaptación: la capacidad de adaptación se refiere a la habilidad de un sistema o comunidad para hacer frente, recuperarse o adaptarse a los impactos de las amenazas. Considera factores como medidas de preparación, sistemas de alerta temprana, capacidades de respuesta ante emergencias, cohesión social, estructuras de gobernanza y disponibilidad de recursos. Una mayor capacidad de adaptación reduce la vulnerabilidad y mejora la resiliencia.

2. Interdependencias: considera la interconexión y las interdependencias entre los diferentes elementos en riesgo. Tomando por caso las interrupciones en la infraestructura crítica, como los sistemas de energía, agua o transporte, pueden tener efectos en cascada en otros sectores, lo que exacerba la vulnerabilidad. Comprender estas interdependencias ayuda a evaluar la vulnerabilidad general de un sistema.

3. Factores socioeconómicos: el análisis de vulnerabilidad reconoce que la vulnerabilidad está influenciada por factores socioeconómicos, que incluyen la pobreza, la desigualdad, el acceso a los recursos y la marginación social. La evaluación de la vulnerabilidad socioeconómica examina cómo estos factores afectan la capacidad de las comunidades o los individuos para prepararse, responder y recuperarse de los peligros.

Al realizar un análisis de vulnerabilidad, los analistas de riesgos pueden identificar áreas, comunidades o sistemas que están en mayor riesgo y desarrollar estrategias para la reducción de riesgos, la preparación para emergencias y el desarrollo de resiliencia. Brinda información valiosa sobre las causas subyacentes y los impulsores de la vulnerabilidad, lo que facilita intervenciones específicas y medidas políticas para mejorar la resiliencia y reducir los impactos potenciales de las amenazas.

Análisis de vulnerabilidad en el contexto volcánico

En el contexto de la evaluación del riesgo volcánico, la vulnerabilidad se refiere a la susceptibilidad y capacidad de las personas, las comunidades, la infraestructura y los ecosistemas de verse afectados por las amenazas volcánicas. Se enfoca en comprender y cuantificar los posibles impactos y consecuencias de la actividad volcánica en los elementos expuestos.

El análisis de vulnerabilidad dentro de la evaluación del riesgo volcánico implica los siguientes aspectos clave:

1. Evaluación de la exposición: esto implica identificar y mapear los elementos en riesgo dentro de las cercanías de los volcanes, como asentamientos humanos, infraestructura crítica, áreas agrícolas y ecosistemas ambientalmente sensibles. Considera factores como la proximidad, la distribución espacial y la densidad de los elementos expuestos.

2. Vulnerabilidad física: la evaluación de la vulnerabilidad física examina la susceptibilidad de los elementos expuestos a las amenazas específicas de origen volcánico, como son caídas piroclásticas transportadas eólicamente, PDC, lahares, onda de choque, proyectiles balísticos, flujos de lava o gases volcánicos. Considera las características físicas, la integridad estructural y la resiliencia de los edificios, la infraestructura y los sistemas naturales. Para ilustrar, la vulnerabilidad de un edificio a un impacto por lahar depende de su diseño, materiales y medidas de protección.

3. Vulnerabilidad socioeconómica: la evaluación de la vulnerabilidad socioeconómica considera los factores sociales, económicos e institucionales que influyen en la capacidad de las comunidades y las personas para hacer frente a las amenazas volcánicas. Tiene en cuenta factores como los niveles de ingresos, el acceso a los recursos, la educación, la atención médica, las estructuras de gobierno y las redes sociales. En efecto, las comunidades con recursos limitados e infraestructura inadecuada pueden ser más vulnerables a los peligros volcánicos.

4. Capacidades de preparación y respuesta: evaluar las capacidades de preparación y respuesta de las comunidades y autoridades es crucial para determinar su vulnerabilidad. Implica evaluar la planificación de emergencias, los sistemas de alerta temprana, los procedimientos de evacuación, la conciencia pública y la disponibilidad de recursos e infraestructura para la respuesta y la recuperación. Las comunidades con medidas de preparación bien desarrolladas y sistemas de respuesta robustos son menos vulnerables.

5. Vulnerabilidad ambiental: las erupciones volcánicas pueden tener impactos ambientales significativos, incluida la destrucción de ecosistemas, la contaminación de fuentes de agua y la pérdida de biodiversidad. Evaluar la vulnerabilidad de los ecosistemas y los recursos naturales ayuda a comprender su resiliencia y el potencial de impactos a largo plazo en el medio ambiente.

Al considerar estos aspectos de la vulnerabilidad dentro de la evaluación del riesgo volcánico, los científicos, planificadores y tomadores de decisiones pueden identificar las áreas y comunidades que corren mayor peligro y priorizar las intervenciones para la reducción del riesgo, la preparación para emergencias y la construcción de resiliencia. Ayuda a

desarrollar estrategias para mejorar la capacidad de adaptación de los elementos expuestos y minimizar los impactos potenciales de los peligros volcánicos en las vidas humanas, la infraestructura y el medio ambiente.

Sin embargo, estimar la vulnerabilidad ante peligros de origen volcánico es complejo (Ettinger et al., 2016; Ortiz, 1996; Thouret et al., 2014), debido a que cada fenómeno amenazante se origina bajo características particulares y a que, para distintos niveles de intensidad del mismo, se tienen diversos efectos sobre los elementos expuestos en el área de afectación (Gaume et al., 2009)¹¹.

La cuantificación de la vulnerabilidad (ver Figura 46) se puede hacer calculando la vulnerabilidad como la relación entre el costo de reparar un elemento afectado y el costo de reemplazar dicho elemento como se muestra en la (Ecuación 22) (Ciurean et al., 2017; Quan Luna et al., 2011; UNDRO, 1990), conocida también como Relación de Daño Medio (Ghesquiere et al., 2006).

$$V = \frac{\text{Costo de reparar}}{\text{Costo de reemplazar}} \quad 22$$

Donde el costo de reparar es el valor que conlleva restaurar el elemento y el costo de reemplazar equivale al valor del elemento nuevo, por lo tanto, la vulnerabilidad (V) de un elemento resulta en una cuantificación del nivel de daño entre valores de 0 a 1; donde 1 corresponde a destrucción total o que el costo de reparar iguala al de reemplazar o el costo total del elemento expuesto.

Cabe mencionar que el concepto de vulnerabilidad difiere del de fragilidad, que es la probabilidad de que la estructura sufra daño total para diferentes intensidades; aunque, es posible desarrollar curvas de vulnerabilidad a partir de las de fragilidad (Galán y Samayoa, 2020).

Exposición

La exposición se acepta como la localización de las personas, la infraestructura, la vivienda, así como las capacidades de producción y otros

¹¹ Para más detalles consultar Gaume et al. (2009).

activos humanos tangibles, ubicados en áreas propensas a amenazas (UNISDR, 2017a). Los elementos expuestos se pueden categorizar para facilitar la estimación del riesgo, tal como se sugiere en UNDR0 (1990). Al medir la exposición, se puede incluir el número de personas expuestas o los tipos de activos en el área (UNISDR, 2017a).

En caso de evaluar el riesgo de manera cualitativa, basado, por ejemplo, en mapas de amenaza determinista (como el Mapa de Amenaza Volcánica de Galeras de la Figura 27), donde la amenaza es constante para cada nivel dentro del área respectiva, o sea, sin importar la distancia al cráter, el nivel de amenaza es el mismo dentro de cada categoría (alta, media, baja), a la hora de evaluar el riesgo (Ecuación 2) es necesario incluir un término o índice de exposición (E) (Beroya-Eitner, 2016) tal que $R = E \times V \times H$ a fin de contar con una representación numérica del impacto potencial de la amenaza en los elementos expuestos¹². Lo anterior, se puede ver en la Figura 47 que muestra la localización de dos elementos expuestos P1 y P2 que han sido ubicados a diferentes distancias tanto del lugar de origen de un hipotético lahar como del lecho del río. Siendo la amenaza (H) constante, el riesgo de un elemento expuesto dependería solamente de su vulnerabilidad (V), pero es evidente que entre más cerca se encuentre dicho elemento de la fuente y del lecho, mayor será su riesgo, razón por la cual el término E se incluye para contemplar este efecto.

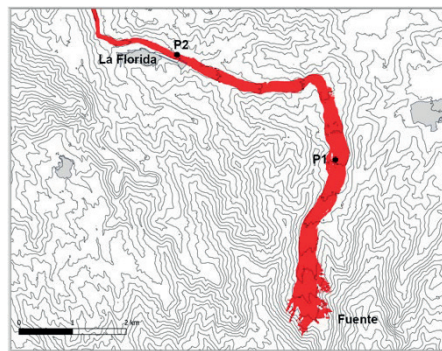


Figura 47. Ubicación de los puntos P1 y P2 dentro de una hipotética zona de amenaza alta, en un análisis determinista de la amenaza

¹² Ver por ejemplo Thouret et al. (2023).

Dentro de este caso, el Índice de Exposición (E) (Thouret et al., 2023) tiene en cuenta, entre otros, varios factores relacionados con los elementos en riesgo:

1. Proximidad al peligro: la distancia entre los elementos expuestos y la fuente potencial del peligro, como la falla del volcán o terremoto, es un factor crítico. Cuanto más cerca estén los elementos del peligro, mayor será su exposición y riesgo potencial.
2. Distribución espacial y densidad: se considera la distribución y concentración de elementos expuestos dentro del área propensa a amenazas. Es probable que las áreas de mayor densidad o los grupos de elementos expuestos tengan un índice de exposición más alto.

Una vez evaluados estos factores, se calcula el Índice de Exposición y se asigna un valor numérico a cada elemento en riesgo o ubicación geográfica. El índice se representa en una escala, donde los valores más altos indican una mayor exposición.

Para el caso en que se aproxima el riesgo, a partir de análisis deterministas de la amenaza, el índice de exposición es una herramienta esencial en la evaluación de riesgos, ya que permite tener en cuenta la distribución espacial y la proximidad al peligro dentro de un área amenazada, cuya aproximación estima dicha amenaza como constante.

Ahora bien, tal como se indicó en el capítulo relacionado con el análisis probabilista de la amenaza, el modelamiento computacional arroja resultados que dependen de factores como la proximidad al peligro, y si se cuenta con información y capacidad computacional a la escala requerida, puede tener en cuenta la distribución espacial, densidad e incluso ángulo de impacto de los elementos expuestos (ver Figura 24). Es decir, los efectos de la Exposición (E), al menos por los componentes ubicación, distribución espacial y densidad, están inmersos en los resultados del análisis de la amenaza. Esto implica la necesidad de ubicar los elementos expuestos dentro de la cartografía y el modelo digital de elevación o de terreno utilizado para el modelamiento computacional.

Ejemplo de aplicación

En el ejemplo, que se centra en el área del municipio de La Florida, en Colombia, se realizó la valoración de la vulnerabilidad de elementos físicos o estructurales de manera cuantitativa (Ecuación 22), para el posterior análisis de riesgo ante seis de los efectos potencialmente dañinos que resultan de las amenazas del volcán Galeras: carga por caída de tefra, impacto de onda de choque, impacto de proyectiles balísticos, impacto por lahares, enterramiento por lahares y corrientes piroclásticas de densidad.

Exposición

Se resume la identificación de los elementos expuestos tanto tipo estructural como humana. En este trabajo no se incluye otro tipo de elementos como líneas de transmisión de energía, acueductos, etc.

Elementos estructurales. Para obtener la ubicación y características de los elementos expuestos, se procedió a combinar los resultados de visitas de campo, entrevistas e imágenes de Google Earth, con las cuales se pudo identificar tanto la ubicación, como las características de los elementos individuales.

Dentro del municipio de La Florida se identificaron 3.958 elementos clasificables para el estudio de vulnerabilidad, distribuidos como se indican en la Figura 48 que muestra la ubicación de cada uno de los elementos estructurales encontrados. No todos los elementos estructurales encuestados corresponden a casas de habitación, incluso algunos corresponden al mismo hogar, pero la edificación tiene diferentes tipos estructurales, cuya clasificación fue necesario diferenciar.

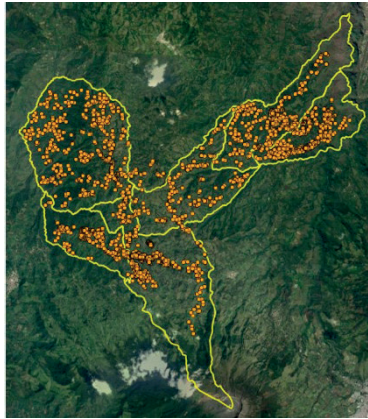


Figura 48. *Elementos estructurales expuestos dentro del municipio de La Florida*

Nota. Las líneas amarillas indican subcuencas y los puntos anaranjados indican los elementos expuestos identificados.

Elementos humanos expuestos. A partir de las encuestas realizadas e información oficial de la institución que en Colombia se encarga de censar a la población (Departamento Administrativo Nacional de Estadística), se encontró, al momento de realizar la investigación (Cordoba et al., 2019), que en el todo municipio a 2015 habían 9.047 habitantes (DANE, 2019). Según el mismo documento, hay un promedio de unas 4 personas por hogar, con 3.5 en la cabecera municipal y 4.1 en el resto del municipio. En el sector de la cuenca del Barranco, se tiene un promedio de 3.6 hab/casa. Dentro de la zona definida por el Servicio Geológico Colombiano (2015) como de amenaza volcánica alta se encuentran unas 350 casas, es decir, unos 1.118 habitantes (Presidencia de la República, 2019).

Servicios ecosistémicos y cultivos. En el caso de los servicios ecosistémicos o ambientales y cultivos, su exposición viene dada por el uso del suelo que se le está dando al lugar. Durante el trabajo de campo e información de las entidades pertinentes en Colombia (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2021, 2005), se logró clasificar el uso actual del suelo de acuerdo al tipo de cultivo, separando las zonas de protección y amortiguamiento (producción-protección). En la Figura 49 se puede notar cómo las áreas clasificadas como zonas de protección (bosque natural) son

muy pequeñas, correspondiendo la mayor al Santuario de Flora y Fauna del Galeras (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2005), localizado en el extremo sur del municipio.

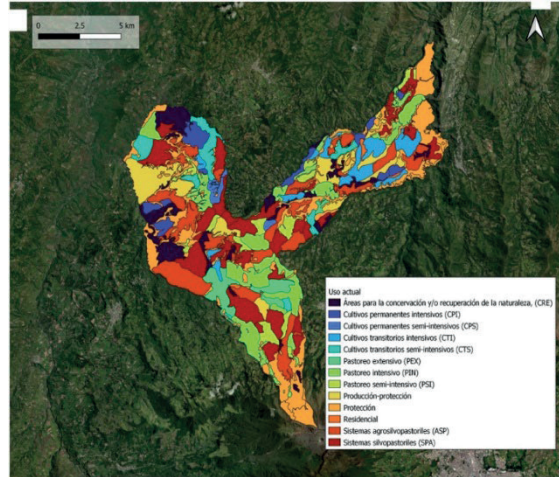


Figura 49. Mapa del uso actual de suelo

Nota. Se muestra la dedicación agrícola y zonas boscosas del municipio de La Florida.

Por otra parte, se compiló la información de uso del suelo en un mapa (ver Figura 50) para resumir el uso de suelo en tres categorías: bosques y áreas seminaturales, territorios agrícolas, y territorios artificializados, para así facilitar la evaluación del riesgo.

Es importante decir que de los 149 km² del municipio de La Florida (Alcaldía de La Florida, 2016), 4.68 km² pertenecen al parque nacional Santuario de Flora y Fauna del Volcán Galeras (SFFG) (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2015), una zona altamente protegida, donde no se permite la entrada a ninguna persona sin un permiso especial. El resto de la superficie está dedicada a servicios agrícolas y pastoriles, con excepción de algunos remanentes del bosque original, ubicados cerca de las quebradas de los arroyos y del río El Barranco.

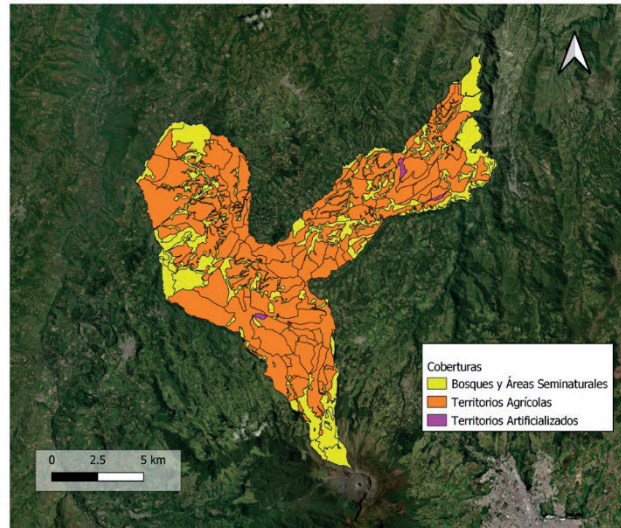


Figura 50. Mapa de coberturas




Nota. Discrimina zonas agrícolas en general, bosques y zonas urbanas (territorios artificializados)

Caracterización de los elementos estructurales expuestos. A fin de facilitar la caracterización de los elementos estructurales, fue necesario obtener información específica para las diferentes amenazas. Por ejemplo, las caídas piroclásticas afectan directamente los techos, por lo que se tiene en cuenta las características de la cubierta como el material de cobertura, el estado general, entre otros. Para el caso de la onda de choque, el elemento más vulnerable son los vidrios de las ventanas, por lo cual, es necesario conocer el porcentaje de aberturas (área, material y dimensión de ventanas de fachada). Para la amenaza por lahares se obtuvo información sobre la composición de la estructura, si presenta o no refuerzo, el tipo de material de muros y el estado general de la vivienda. Finalmente, para el caso de enterramiento es importante conocer el porcentaje de oquedades en el primer piso de la vivienda, debido a que la presencia de estos vacíos facilita el ingreso de material del flujo.

A partir de la información recolectada fue posible agrupar los elementos estructurales en tres tipologías, que facilitan el análisis de vulnerabilidad como se muestra en la Tabla 6. Es preciso mencionar que cuando una

estructura está clasificada como 2 o 3, pero sus condiciones lo ameritan (por mal mantenimiento, regular o mal estado), se reclasifica según criterio como 2 o 1.

Tabla 6. *Tipologías estructurales presentes en el municipio de La Florida*

Tipología	Descripción	Foto ejemplo
1	Estructura no reforzada, techo en hoja de zinc, aluminio, cartón o similares.	
2	Estructura no reforzada, en madera, ladrillo. Techo en teja de barro o similar. Buen estado.	
3	Estructura reforzada, aperticada. Techos en losa reforzada. Sismoresistente. Buen estado.	

Es importante señalar que, esta agrupación tipológica se realizó según lo encontrado en el municipio de La Florida, es decir, es válida solo para esa zona.

Curvas intensidad-daño (vulnerabilidad). En este apartado se muestran las curvas de Intensidad-Nivel de Daño (vulnerabilidad) para cada una de las amenazas de Galeras contempladas en este documento, pues el impacto de cada amenaza puede afectar de manera diferente a los elementos expuestos.

Corrientes de Densidad Piroclástica. Existen varios estudios que estiman la capacidad destructiva de las PDC sobre estructuras de diferente capacidad de resistencia (Brosch et al., 2021; Petrazzuoli y Zuccaro, 2004;

Spence et al., 2004; Valentine, 1998), de los cuales se pudieran deducir o inferir curvas de vulnerabilidad. Empero, el costo de reparar puede ser demasiado alto, más aún si se consideran los efectos térmicos, pues a pesar que se pudieran presentar presiones dinámicas no destructivas en los bordes del flujo, la alta temperatura haría inútil intentar una reparación, pues los costos pudieran igualar o exceder el costo de una estructura nueva. Es decir, es preferible asumir que los PDC destruyen todo a su paso (USGS, 2023), por lo cual se asume un daño del 100 % ante cualquier nivel de impacto; esto es, una línea horizontal en $V = I$, en la Figura 46.

Proyectiles balísticos. El daño que ocasiona el impacto de un proyectil balístico depende de su energía cinética al momento de impactar:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Donde m es la masa del proyectil y v su velocidad.

En general, la energía de impacto de proyectiles balísticos de origen volcánico supera la energía requerida para la penetración de diversos materiales (Alatorre-Ibargüengoitia et al., 2012; Ortiz, 1996; Williams et al., 2017). La Tabla 7 muestra el daño mínimo que ocasionaría un impacto de proyectiles balísticos de origen volcánico con diferentes energías.

Tabla 7. Daño mínimo esperado ante el impacto de proyectiles balísticos de origen volcánico

Daño	Energía (Joules)
Penetración de cubiertas livianas (asbesto cemento, aluminio, porlicarbonato, etc.)	10^3
Penetración de losas de concreto reforzado	10^4
Destrucción total	$10^6 - 10^7$

Como se describe en el capítulo de amenazas, el impacto de proyectiles balísticos con energías desde 10^3 J a 10^7 J tienen, aproximadamente, la misma probabilidad en su área de afectación. Esto, sumado a la incertidumbre en la cantidad de proyectiles que impactan en un

elemento expuesto, lleva a asumir el criterio de daño total en caso de impacto, por lo cual se establece una línea horizontal en $V = I$ en la Figura 46.

Caídas Piroclásticas (Tefra). Los fragmentos volcánicos conocidos como tefra, ceniza o *lapilli*, se depositan a diferentes distancias del cráter, según su tamaño, densidad y dirección del viento y pueden afectar grandes zonas alrededor del volcán. Entre sus efectos se tienen problemas de salud, contaminación de fuentes de agua, daños en cultivos, entre otros (Behncke et al., 2012; Blong et al., 2017; Spence et al., 2005). Espesores del orden decimétrico pueden causar el colapso de las cubiertas, especialmente si la ceniza está húmeda (Blong, 1984; Wilson et al., 2014).

La afectación por caídas piroclásticas inicia por las cubiertas, cuyo colapso (de darse), puede afectar otras partes de la estructura. Tomando como ejemplo el colapso de una estructura de techo de concreto reforzado, puede implicar el colapso de toda la estructura o causar una afectación tan grave que el costo de la reparación sea equivalente al de su reemplazo. Primero se establecen curvas de vulnerabilidad específicas para las cubiertas, las cuales, luego se ajustan para considerar su impacto en el conjunto de la estructura.

Si bien, a nivel mundial existen diversas aproximaciones al respecto (Spence et al., 2005; Zuccaro et al., 2008), para el caso particular del área del volcán Galeras, existen estudios particulares como los de Torres-Corredor et al. (2017) y Corporación OSSO (2009). Del trabajo de campo realizado en este trabajo, se adaptaron las propuestas de Torres-Corredor et al. (2017), quienes llega a la función de vulnerabilidad de la Ecuación 23.

$$V = \left(1 - e^{\left(\frac{\gamma_i}{\gamma_o}\right)^\alpha \ln 0.5} \right) \quad 23$$

Donde V es el daño esperado para cierto nivel de intensidad; γ_i , γ_o es la intensidad que genera el 50 % de daño o pérdida esperada, y α corresponde a un factor de forma.

La Tabla 8 muestra los parámetros γ_o y α usados en el ejemplo, tanto por espesor de ceniza depositada como por su carga, a fin de facilitar el análisis de riesgo, bien se haga por carga o espesor.

Tabla 8. *Parámetros usados específicos para el municipio de La Florida, por tipología y tipo de análisis*

Parámetro/Tipología	1	2	3
γ_o por espesor en cm	4	12	21
γ_o por carga en kPa	0.5	1.5	2.67
α	3	3	3

Aplicando la Ecuación 23 y los parámetros de la Tabla 8 se obtuvieron las curvas de vulnerabilidad de cubiertas que se muestran en la Figura 51, para cada una de las tipologías clasificadas en el municipio de La Florida, tanto por espesor (Figura 51a) como para carga (Figura 51b). Se puede observar cómo las cubiertas de la Tipología 1 fallarían completamente por depósitos que excedan los 7 cm o 1 kPa de carga; para la Tipología 2, este colapso total se presentaría a partir de los 20 cm de depósito o 3 kPa de carga, mientras que en el caso de la Tipología 3, la cubierta colapsaría completamente con depósitos que excedan 40 cm de espesor o 5 kPa de carga.

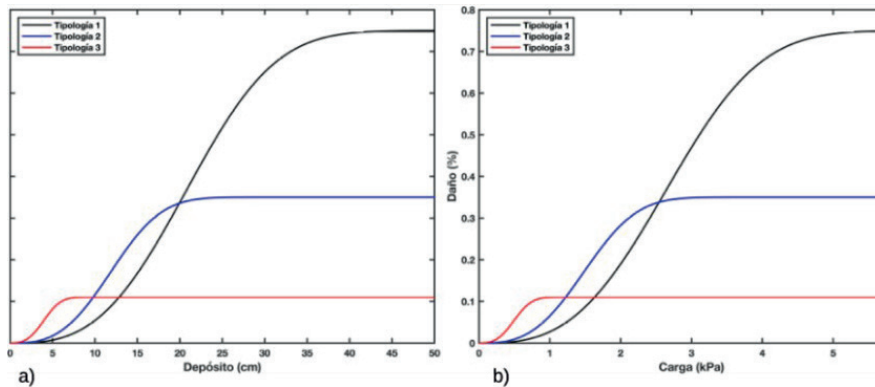


Figura 51. *Daño total de cubiertas por caída de ceniza para las tres tipologías*

Nota. a) por espesor del depósito, b) por carga.

El análisis de la vulnerabilidad de cubiertas y su posibilidad de colapso, no se debe confundir con la afectación a toda la estructura, por lo cual, se debe tener en cuenta el impacto que el daño de la cubierta tiene sobre la estructura total. Adaptando las ideas presentadas por Torres-Corredor et

al. (2017), quienes proponen relaciones porcentuales de daño de cubierta respecto a la edificación.

Para este propósito, considerando que las viviendas típicas del municipio constan generalmente de una o dos plantas, según lo determinado por el trabajo de campo realizado, se asume un estado de conservación medio para todas las estructuras, con una longitud de luz que se puede clasificar como larga en promedio. Esto resulta en que un daño total de las cubiertas en la Tipología 3 representa un 11 % del total de la edificación; para la Tipología 2, dicho daño representa un 35 %, mientras que en la Tipología 1, el colapso total de la cubierta llega a representar el 75 % de toda la edificación. Extrapolando estos porcentajes a las curvas de daño de cubiertas mostradas en la Figura 51, se obtiene las curvas de daño de la estructura completa, como se muestra en la Figura 52 por a) espesor del depósito, y b) por carga.

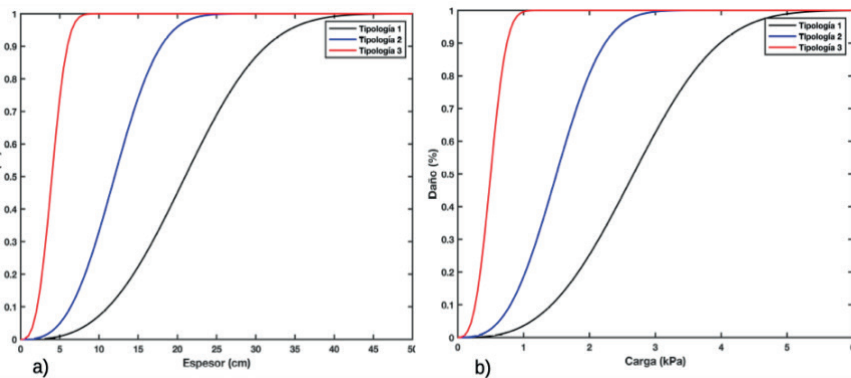


Figura 52. Curvas de vulnerabilidad (daño) por caídas piroclásticas

Nota. Para a) espesor de ceniza depositado, b) carga.

Onda de choque. Los daños ocasionados por el impacto de una onda de choque dependen en su mayoría de la cercanía a la fuente y la energía con la que se genera la onda. Según Espinoza (2012), la ciudad de Pasto, capital del departamento de Nariño en Colombia, cuyo centro se ubica a unos 9 km del cráter del volcán Galeras y algunos centros poblados que se encuentran alrededor de este volcán han sufrido, como mínimo, ruptura de ventanas y apertura de puertas por este fenómeno.

Elementos como las ventanas, que se componen de un marco y una lámina u hoja de vidrio, se ven seriamente afectados ante esta amenaza, ya que debido a su baja resistencia pueden llegar a fragmentarse o incluso generar cortaduras o lesiones considerables en las personas y los animales (Fisher, 2008).

Investigaciones como las de Mercx et al. (1991), Valentine (1998), Saito et al. (2001) y Saito y Takayama (2005), relacionan niveles de sobrepresión y el daño esperado en elementos de estructuras como muros, techos y ventanas (presiones típicas de ruptura). Por otra parte, Pickering y Bockholt (1971) hacen una revisión exhaustiva de la literatura sobre el daño por explosiones nucleares a estructuras en entornos urbanos y presentan un conjunto de criterios de daño probabilístico para una serie de estructuras. Como resultado de esta investigación, estos autores presentan valores de sobrepresión con un 10 %, 50 % y 90 % de probabilidad, de que una estructura falle (daño irreparable y colapso total).

Para la elaboración de las curvas de vulnerabilidad se requiere determinar el porcentaje de daño para cada sobrepresión, siendo el ciento por ciento el correspondiente a la destrucción total. En este trabajo, por precaución, se asume que el daño económicamente irreparable corresponde al valor intermedio propuesto por Pickering y Bockholt (1971) (50 % de probabilidad de destrucción total).

Integrando la información proporcionada por Pickering y Bockholt (1971), Moriano et al. (2017) y Rodríguez y Córdoba (2018), pero teniendo en cuenta el efecto de la ruptura de vidrios en la estructura total, se obtuvieron las curvas de vulnerabilidad por onda de choque para las tres tipologías clasificadas. La Figura 53 muestra el daño esperado para las tres tipologías consideradas; se observa que, para presiones dinámicas, la relación de daño respecto a toda la estructura es menor en la Tipología 1 para presiones dinámicas bajas. Esto se debe a que se encontró que, en las construcciones clasificadas como Tipología 1, las ventanas son, en general, más pequeñas que en las otras tipologías, lo que resulta en un porcentaje de daño menor con respecto a la estructura completa. Pese a que, esto no ocurre para presiones dinámicas grandes, ya que la estructura misma comienza a verse afectada por el impacto de la onda de choque.

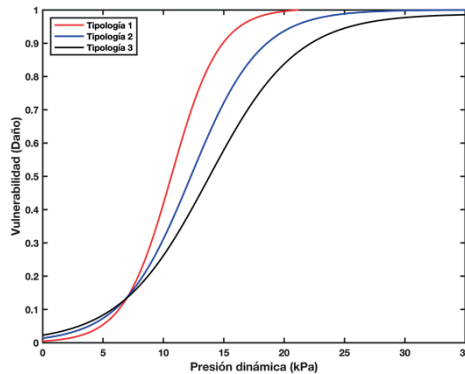


Figura 53. Relación de daño (vulnerabilidad) ante un impacto de onda de choque para las Tipologías 1, 2 y 3

Lahares. Los lahares primordialmente afectan a una estructura por su impacto, representado en la presión dinámica que combina tanto el efecto de la velocidad, como la densidad del flujo ($P_d = \frac{1}{2} \rho v^2$); no obstante, otro factor que puede ser costoso a la hora de reparar es el enterramiento que produce el depósito de los sedimentos del flujo.

Para el caso de impacto, se tuvo en cuenta los estudios de Valentine (1998), Spence et al. (2004) y Zanchetta et al. (2004), quienes abordan el daño causado a estructuras por sobrepresiones generadas por flujos de gravedad; cada uno de estos estudios presenta una clasificación estructural y proponen determinados rangos de afectación. Valentine (1998) propone probabilidades de destrucción total de estructuras ante el impacto de sobrepresiones impartidas por flujos de gravedad, su estudio se basa en observaciones y posteriores deducciones sobre pruebas nucleares de estudios como los de Pickering y Bockholt (1971) y Glasstone y Dolan (1977). De acuerdo con Valentine (1998), estos resultados sirven de analogía para flujos de gravedad de origen volcánico. Moriano et al. (2017) recopila esta información y presenta una relación entre presión de impacto y daño de diferentes tipos de estructuras teniendo en cuenta una clasificación tipológica de estructuras similar a la usada en este trabajo.

La Figura 54 muestra el nivel de daño esperado para diferentes intensidades de impacto de lahares en términos de presión dinámica. La Tipología 1 se vería afectada en más de un 70 % con presiones dinámicas

superiores a 10 kPa, mientras que sufriría un daño de más del 90 % con presiones dinámicas que superen los 15 kPa. Con 10 kPa, las construcciones clasificadas como Tipología 2 tendrían un daño de hasta un 50 % de su estructura, y más del 90 % con sobrepresiones que sobrepasen los 20 kPa. Para las construcciones clasificadas como Tipología 3, con impactos mayores a 10kPa se esperaría un daño mayor que el 35 % de la estructura total, y un daño mayor al 90 % con presiones dinámicas superiores a 30 kPa.

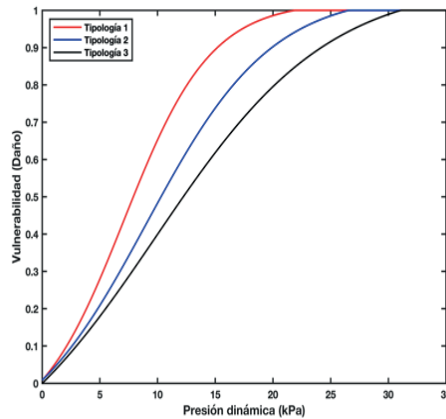


Figura 54. Nivel de daño (vulnerabilidad) por impacto de lahares

Nota. Para la Tipología 1 (línea roja), Tipología 2 (línea azul) y Tipología 3 (línea negra).

Para el caso de enterramiento, se estudiaron diferentes criterios como los de Quan-Luna et al. (2011) y Ppathoma-Köhle et al. (2012), que presentan las distribuciones de vulnerabilidad promedio para estructuras de composición mixta. Pese a ello y dadas las características presentes en el área de estudio, se encontró que las curvas de distribución de daño para diferentes tipos de estructura propuestas por Ciurean et al. (2017) se ajustan más a la realidad de las estructuras estudiadas. Dado que el escenario de exposición de lahares encuentra que, en la cuenca del Barranco, la mayoría de viviendas corresponde a la vivienda rural típica (en tapia), por seguridad, se optó por tomar, para todos los elementos estructurales, la distribución de mayor fragilidad propuesta por Ciurean et al. (2017), que se indica en la Figura 55. Es de notar que, de acuerdo a la Figura 55,

una inundación por lahares que depositen más de 120 cm se puede considerar como daño total. Esto es compatible con la experiencia vivida después del desastre de Mocoa, Putumayo, Colombia (Office for the Coordination of Humanitarian Affairs [OCHA], 2017), durante la reconstrucción de las viviendas afectadas, se observó que si el daño alcanzaba más de la mitad del primer piso de la casa, el costo de la reparación superaba el valor total de la vivienda (habitantes e ingenieros del lugar, comunicación personal, 2019).

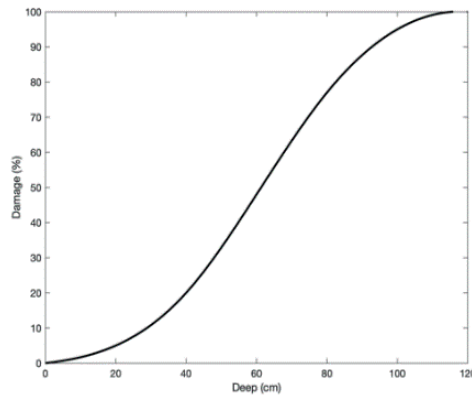


Figura 55. Daño esperado en función de la altura del depósito

Nota. Adaptada de Ciurean et al. (2017).

Agricultura y servicios ecosistémicos. Las erupciones volcánicas pueden tener impactos significativos en la agricultura y los ecosistemas. Las erupciones volcánicas pueden plantear diversas amenazas directas e indirectas a los cultivos.

Los impactos directos pueden incluir la caída de ceniza, que puede enterrar cultivos, dañar las hojas e inhibir la fotosíntesis. Los flujos de lava, las PDC, lahares y los gases volcánicos también pueden destruir la vegetación a su paso. Los impactos indirectos pueden resultar de cambios en el clima y las condiciones ambientales causados por erupciones volcánicas. La caída de ceniza puede alterar las propiedades del suelo, afectando la disponibilidad de nutrientes y la retención de agua. Los gases volcánicos, como el dióxido de azufre, pueden provocar lluvia ácida, que puede dañar los cultivos y el suelo.

Las erupciones volcánicas pueden provocar la destrucción total de los ecosistemas cercanos al volcán (Dutch, 1999); así, el impacto de una erupción volcánica en los ecosistemas varía desde efectos catastróficos en las cercanías del cráter hasta efectos difusos en zonas distales. Se ha prestado especial atención a la caída de ceniza, tanto por su extensión como por sus efectos inmediatos y a largo plazo (Neild et al., 1998)¹³.

Entonces, el grado de vulnerabilidad de los cultivos y servicios ecosistémicos depende de factores como la proximidad al volcán, el tipo y la intensidad de la erupción y los cultivos específicos que se cultivan. Evaluaciones exhaustivas de vulnerabilidad consideran factores como el tipo de cultivo, la etapa de crecimiento, la ubicación y los peligros volcánicos para estimar las posibles pérdidas e impactos en la agricultura; por lo cual, obtener curvas de daño-intensidad es una tarea compleja, siendo necesarias, por el momento, simplificaciones que hagan práctica y posible una aproximación al análisis del riesgo al que se exponen plantas, cultivos y servicios ecosistémicos.

Corrientes de Densidad Piroclástica. para el caso de PDC, es de esperarse que causen la destrucción de la vegetación que se encuentre en su camino, eliminando a menudo la cubierta forestal arrancando y arrastrando el follaje, las ramas y la corteza. También puede ocurrir daño por calor a las plantas. El calor daña los tejidos hidratados de las plantas (Blong, 1984; Neild et al., 1998). En las partes distales o bordes del flujo, si bien el impacto directo pudiera no ser tan dañino, la alta temperatura en PDC calientes permite asumir daño total a lo largo de su recorrido, es decir, $V=I$ para la vegetación en general.

Lahares. Para el caso de lahares, destruyen e incorporan al flujo la vegetación que se encuentre a su paso. En su fase de sedimentación, dependiendo de la profundidad del depósito, puede enterrar y terminar destruyendo las plantas. En las partes distales y bordes del flujo, donde su espesor es mínimo, no se esperaría un daño importante en árboles y cultivos, pero sí en pastizales y césped; por tanto, un criterio por el lado de la seguridad es asumir daño total o $V=I$.

Proyectiles balísticos. Por su temperatura pueden producir incendios que destruyen la foresta (ver Figura 12). Un impacto directo de un proyectil

¹³ Se recomienda revisar la información de Neild et al. (1998).

relativamente grande puede eliminar la vegetación en el lugar de impacto directo. En este caso, un criterio es también asumir daño total ($V = I$) en la vegetación dentro del rango de este tipo de fenómenos.

Onda de choque. Se puede asumir que no afectan los servicios ecosistémicos y cultivos, puesto que la energía máxima esperada para el volcán Galeras, de la potencial explosión, no permitiría alcanzar una presión dinámica suficiente para poder destruir cultivos y bosques. En otras palabras, no habría daño o afectación en plantas o $V = 0$.

Lava. Destruye cualquier cultivo y planta que se encuentre a su paso, incendiando incluso árboles y arbustos cercanos. En este caso, se puede esperar daño total o $V = I$.

Caída de ceniza. A diferencia de los flujos de lava, PDC y lahares, que causan la devastación total de las tierras cultivables y la vegetación afectadas, la caída de ceniza muestra un gradiente de daño, tanto en distancia respecto al punto de emisión, como de espesor (Arnolds, 2013; Bignami et al., 2012), pues el nivel de daño sobre la agricultura y demás servicios ecosistémicos que resulta de este fenómeno aumenta progresivamente con el espesor de la tefra (Agustsdottir, 2015). En efecto, este caso hay algunos estudios que relacionan el espesor de la caída con el daño esperado, en general, debido al bloqueo de la luz solar, exposición a acidez, etc. (Arnolds, 2013; Blong, 1984; Jenkins et al., 2015; Neild et al., 1998; Thompson et al., 2015; Wild et al., 2019). La Tabla 9 muestra un compendio del daño esperado en relación con el espesor de ceniza.

Tabla 9. Compendio de daño de la cubierta vegetal por caída de ceniza

Espesor (mm)	Efecto
< 5	No hay daño significativo
5 – 25	Se afectan pastizales temporalmente El suelo no se ve privado de oxígeno El dosel de vegetación se recobra rápidamente
25 – 150	Ruptura y enterramiento de pastos y plantas no maderables Grandes porciones de la cubierta vegetal se ve eliminada

>150 Esterilización del suelo por falta de oxígeno
Cientos de años hasta restauración completa del suelo

Nota. Adaptada de Neild et al. (1998).

La Figura 56 muestra una curva de espesor de depósito de ceniza contra daño esperado para el caso particular de pastizales, donde se puede notar que con unos 5 cm de espesor se puede esperar casi daño total, lo que es compatible con el nivel de daño que establecen Jenkins et al. (2015) y Thompson et al. (2015).

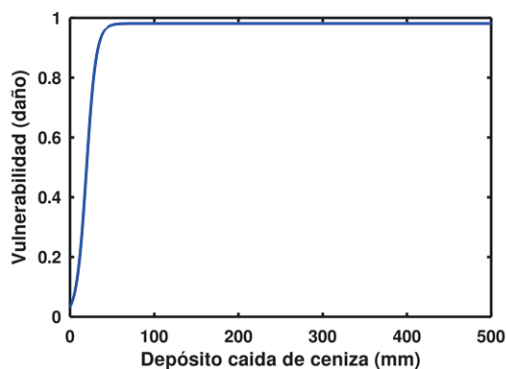


Figura 56. Curva de daño por caída de ceniza en pastizales

Nota. A partir de los datos de Wild et al. (2019).

Capacidad

De acuerdo a UNISDR (2017b) en el contexto de análisis del riesgo, la capacidad se refiere a la combinación de todas las fortalezas, atributos y recursos disponibles dentro de una organización, comunidad o sociedad para gestionar y reducir los riesgos de desastres y fortalecer la resiliencia. La capacidad puede incluir infraestructura, instituciones, conocimientos y habilidades humanas y atributos colectivos como relaciones sociales, liderazgo y gestión.

La capacidad de afrontamiento. Es la capacidad de las personas, organizaciones y sistemas, utilizando las habilidades y recursos disponibles, para gestionar condiciones adversas, riesgos o desastres. La capacidad de hacer frente

requiere conciencia continua, recursos y una buena gestión, tanto en tiempos normales como durante desastres o condiciones adversas. Las capacidades de afrontamiento contribuyen a la reducción de los riesgos de desastres.

Capacidad para realizar una reducción del riesgo. Se refiere a los aspectos técnicos, financieros y capacidades administrativas necesarias para una implementación efectiva. La reducción del riesgo es a menudo una tarea compleja y que requiere muchos recursos. Su alcance es una compensación entre la profundidad científica total de la evaluación, el tiempo y los recursos humanos que se pueden dedicar para llevarla a cabo, mientras se cumple el objetivo de utilizar la evaluación en el riesgo de desastres.

La capacidad económica, que incluye factores como el producto interno bruto (PIB), desempeña un papel importante en la capacidad general de las personas, los municipios y las naciones para prepararse, responder y recuperarse de los peligros volcánicos. La capacidad económica influye en el papel de cada nivel, ya sea del individuo, del municipio o de la nación; esta última puede desempeñar un papel fundamental cuando las capacidades económicas individuales o municipales son limitadas.

Si bien la capacidad económica puede mejorar la preparación y la resiliencia, es importante señalar que la vulnerabilidad a los peligros volcánicos no está determinada únicamente por factores económicos. La equidad social, la gobernanza eficaz, la cohesión comunitaria y otros factores no económicos también desempeñan roles críticos en la determinación de la capacidad y la resiliencia en general. Equilibrar el desarrollo económico con medidas que aseguren la inclusión y aborden las vulnerabilidades sociales es esencial para la reducción integral del riesgo y la gestión de desastres. Con todo, este aspecto de la gestión del riesgo está fuera del alcance de este documento, ya que el enfoque del libro se centra en el análisis del riesgo probabilista en sí.

Como se verá en el capítulo de análisis del riesgo un criterio para encontrar el grado de tolerancia al riesgo es la capacidad para tomar medidas de reducción del mismo, como lo sugiere UNISDR (2017b). En este sentido, Woo (2015), Katz y Lazo (2012), Marzocchi y Woo (2009), Woo (2008), proponen un método para evaluar la esta capacidad basada en el PIB. En ese contexto, un análisis de costo-beneficio requiere el uso de una unidad común,

que en este caso, es un valor monetario, lo que puede traducir la capacidad como la cantidad de dinero que los tomadores de decisiones pueden invertir para reducir el riesgo, o intentar salvar vidas (Viscusi, 1992).

Ejemplo de aplicación: caso municipio de La Florida, Nariño, Colombia

Para evaluar la capacidad, optamos por utilizar la capacidad de evacuación de emergencia por desastres, representada por el ingreso per cápita y los ingresos fiscales municipales y nacionales (Liu et al., 2020), a fin de incluir la opción de una evacuación permanente, es decir, abordar la posibilidad de reubicar a las familias en riesgo basándose en el análisis probabilista del riesgo y en la capacidad económica del municipio y la nación.

El PIB per cápita de Colombia es de alrededor de US \$ 6.700 (Banco Mundial, 2022), mientras que el PIB por habitante del municipio de La Florida es de unos US \$ 2.000. Es decir, la cantidad de dinero disponible para invertir en reducir el riesgo para el municipio de La Florida, es escaso.



Riesgo

CAPÍTULO 3

El riesgo

Las Naciones Unidas (UNISDR, 2017a) definen el riesgo como la posible pérdida de vidas, lesiones o activos destruidos o dañados que podría ocurrirle a un sistema, sociedad o comunidad en un período de tiempo específico, determinado probabilísticamente en función del peligro, la exposición, la vulnerabilidad y la capacidad (International Organization for Standardization [ISO], 2018).

Análisis del riesgo

El análisis del riesgo pretende determinar la naturaleza y el nivel del riesgo al que se expone un activo o elemento determinado, mediante el análisis de peligros potenciales y la evaluación de las condiciones existentes de exposición y vulnerabilidad que, en conjunto, podrían dañar a las personas, las propiedades, los servicios, los medios de vida y el entorno del que dependen (UNISDR, 2017b).

A fin de que, el análisis del riesgo se pueda incluir en la planificación física, se requiere al menos de la siguiente información adaptada de UNDRO (1990):

1. Disponer de mapas y modelos digitales de elevación y/o terreno a una escala apropiada, según el nivel de detalle requerido en cada caso. Por ejemplo: ¿se va a analizar casa a casa o edificio por edificio?
2. Distribución de probabilidades de exceso de intensidad esperada para cada una de las amenazas.
3. Mapas de exposición.
4. Funciones de vulnerabilidad.
5. Datos de costos de los elementos expuestos y capacidades.

Los puntos 2, 3 y 4 deben contener información a la escala requerida.

Es ilustrativo observar gráficamente como se combina la información de los puntos 2 y 4 (Figura 57), a partir de las cuales se puede estimar el riesgo específico. La Figura 57 muestra un caso hipotético de una curva de excedencia de probabilidad de afectación de cierto elemento expuesto ante varias

intensidades de interés, así como el nivel de daño esperado para ese elemento, que podría haber determinado su clasificación dentro de cierta tipología.

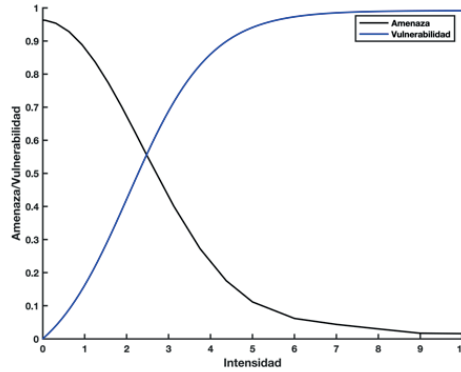


Figura 57. *Curvas hipotéticas de amenaza probabilista y vulnerabilidad para varios niveles de intensidad*

Para el caso del riesgo en servicios ecosistémicos se tendrían los mismos pasos arriba anotados, aunque se puede especificar una información adicional mínima (Bai y Jin, 2015):

1. Identificación de elementos expuestos en términos de los componentes ecológicos de interés.
2. Datos de sensibilidad de los ecosistemas.
3. Datos sobre tiempo de restauración.

Para información específica sobre riesgo en sistemas ecológicos específicos consultar a Fairman et al. (1998).

Riesgo específico

El riesgo específico se refiere a la medida cuantificada del grado esperado de pérdida o daño que puede ocurrir debido a un fenómeno natural o antrópico. Este concepto se utiliza a menudo en el contexto de la evaluación de riesgos, la gestión de desastres y la toma de decisiones. Trata de asignar valores o medidas numéricas a la pérdida o daño potencial.

La cuantificación del riesgo específico ayuda a traducir conceptos abstractos de peligros en información procesable, ayudando a las sociedades a gestionar riesgos de manera proactiva, reducir las vulnerabilidades y mejorar la resiliencia general ante diversas amenazas.

Como un primer paso para llegar a cuantificar el riesgo para un tipo específico de evento y elemento expuesto, es posible seguir la metodología propuesta por UNDRO (1990); a partir de la información de los datos indicados en los puntos 2 y 4, se puede obtener el riesgo específico como indica la ecuación 24.

$$R_{S_i} = \sum (P_i \times V_i) \quad 24$$

Donde P_i es la probabilidad de excedencia de un evento de intensidad i , y V_i el nivel de daño o vulnerabilidad del elemento expuesto ante un evento de intensidad i , y R_{S_i} el riesgo específico para ese elemento expuesto, que tiene una vulnerabilidad V_i y puede ser impactado por un evento con una probabilidad de excedencia P_i . Cabe anotar que la expresión 24, es similar a la expresión relacionada con las consecuencias esperadas de la teoría de decisiones (Hirst y Carter, 2002).

Bajo el supuesto de disponibilidad de datos concurrentes, es decir, que a cada intensidad le corresponda un valor de probabilidad y vulnerabilidad, se puede multiplicar la probabilidad de excedencia de un evento de intensidad i por la vulnerabilidad correspondiente. Esto resulta en un punto de la curva de riesgo específico, como se muestra en la Figura 58. Al multiplicar la probabilidad de excedencia de un evento por la vulnerabilidad del elemento expuesto, se combina la probabilidad de que ocurra el evento, la intensidad potencial del evento y la vulnerabilidad del elemento expuesto. El valor numérico resultante representa el impacto o daño esperado debido al evento; por tanto, representa la probabilidad de cierto nivel de daño.

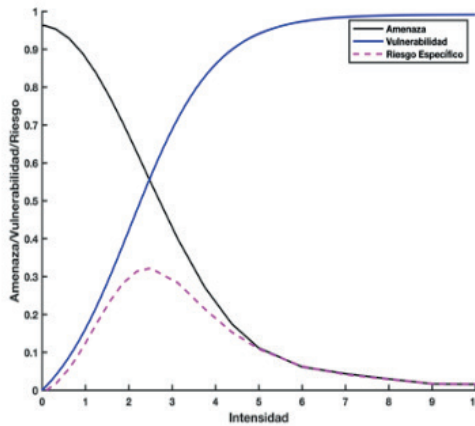


Figura 58. Curva hipotética de riesgo específico

Nota. Se muestra las curvas de amenaza probabilista y vulnerabilidad.

Es importante destacar que, en el caso del modelado computacional, el término de exposición (E) está integrado dentro de la evaluación probabilista de la amenaza, como se explicó en los capítulos de amenazas y vulnerabilidad.

Riesgo integral

El riesgo integral (Aspinall y Blong, 2015; Baybutt, 2012; Hirst y Carter, 2002; Health & Safety Executive [HSE], 2001) es un concepto matemático utilizado para cuantificar el riesgo acumulativo, asociado con un peligro a lo largo del tiempo. Considera tanto la probabilidad de que ocurra un evento como las consecuencias o impactos asociados con ese evento. Proporciona una evaluación integral del riesgo, teniendo en cuenta toda la gama de resultados potenciales y sus probabilidades. El objetivo del riesgo integral es proporcionar, a los tomadores de decisiones, una medida cuantitativa del riesgo, ayudándoles a comprender el perfil de riesgo general asociado con un área específica.

Se propone como una medida del riesgo social ante la posibilidad de accidentes fatales en una instalación, calculando un valor numérico (EV) del valor esperado del número de muertes por año en accidentes (Hirst y Carter, 2002). EV se calcula con la expresión indicada en la ecuación 25:

$$EV = \sum_{N=1}^{N_{max}} f(N)N \quad 25$$

Donde $f(N)$ es la probabilidad de las N diferentes consecuencias fatales. Hirst y Carter (2002) proponen que EV se puede utilizar como criterio de tolerabilidad (ver sección sobre riesgo aceptable).

Se puede observar que EV es un caso particular del concepto general de riesgo específico, si se compara la ecuación 25 para EV con la ecuación 24. Si se asume en la ecuación 24 que la vulnerabilidad o nivel de año es del 100 % ($V=1$) y que N corresponde al número de elementos expuestos (E). En el caso de seres humanos sería el número de fatalidades esperadas por un evento totalmente destructivo como los PDC, balísticos o lahares donde la presión dinámica supere el límite de supervivencia humana. Para elementos estructurales se referiría al número de casas o elementos estructurales de interés, que pudieran ser totalmente destruidos. Un ejemplo de aplicación de este concepto al caso volcánico se puede observar en Aspinall y Blong (2015). En el caso que dentro de las consecuencias se incluyan los costos de las pérdidas esperadas, las propuestas de riesgo integral planteadas por Hirst y Carter (2002) se interpretarían como riesgo total para el caso de fatalidades o destrucción total.

Riesgo total

Se entiende por riesgo total a la probabilidad de consecuencias dañinas o pérdidas esperadas resultantes de interacciones entre peligros naturales o inducidos por el hombre y condiciones vulnerables en un área y período de tiempo determinados (van Westen, 2011).

El riesgo total pretende cuantificar el riesgo en términos monetarios, facilitando una comparación efectiva en un proceso de toma de decisiones, para que así se puedan priorizar acciones de acuerdo a las capacidades y limitantes que se tenga a la hora de poner en práctica los resultados del análisis del riesgo. De esta forma, a partir de la ecuación 24 se incluye el costo del elemento, como se indica en la ecuación 26, cuyo resultado se muestra gráficamente en la Figura 59.

$$R_{T_i} = C_i \times R_{S_i} \quad 26$$

Donde C_i es el costo del elemento expuesto, y R_{T_i} es el riesgo total en que se encuentra el elemento expuesto i , el cual corresponde a la probabilidad de un nivel de pérdidas esperadas (muertes, lesiones, propiedades, medios de vida, interrupción de la actividad económica o daños al medio ambiente) resultantes de interacciones entre peligros naturales o inducidos por el hombre y condiciones vulnerables en un área o elemento expuesto dentro de un período de tiempo determinados.

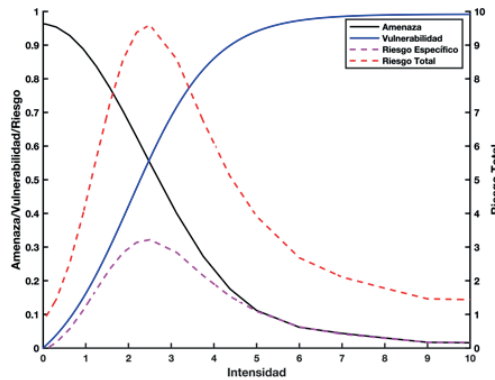


Figura 59. Amenaza, vulnerabilidad, riesgo específico y riesgo total

Nota. El área bajo de curva de riesgo total, son las pérdidas totales esperadas dentro de un tiempo de interés. A partir de van Westen (2011).

El concepto de riesgo total basado en pérdidas económicas esperadas calcula las pérdidas económicas promedio o esperadas durante un período de tiempo determinado, por ejemplo, anualmente, integrando la distribución de probabilidad de pérdidas.

La aplicación del concepto de riesgo total basado en las pérdidas económicas esperadas, permite a los gestores del riesgo volcánico priorizar acciones que minimicen el impacto económico general de los eventos volcánicos, considerando, al mismo tiempo, las incertidumbres inherentes a los peligros volcánicos y sus consecuencias. Este enfoque ayuda a asignar recursos de manera eficiente y tomar decisiones informadas para proteger vidas y propiedades en áreas propensas a volcanes.

Riesgo aceptable

Siendo el análisis probabilista del riesgo una herramienta crucial en la gestión del riesgo, es necesario categorizar el mismo. Si bien, lo deseable es que no se produzcan pérdidas y menos de vidas, no hay forma de eliminar completamente los riesgos, lo que obliga a intentar lograr un balance de costos contra beneficios, categorizando el riesgo en niveles de aceptabilidad o tolerancia. La medida de cuán aceptable es un riesgo se hace de acuerdo al nivel de tolerabilidad que la sociedad, el individuo o los tomadores de decisiones están dispuestos a aceptar de acuerdo a varias condiciones.

El concepto de riesgo "aceptable" se refiere a un nivel de riesgo que la sociedad o las partes interesadas consideran razonable o manejable dentro de un contexto determinado. Es el punto en el que los beneficios potenciales de una actividad o situación superan las posibles consecuencias negativas, incluso si esas consecuencias no se eliminan por completo (ISO, 2018).

En la gestión de riesgos, en especial, en campos como la gestión del riesgo de desastres, la ingeniería y la seguridad ambiental, la idea de riesgo aceptable a menudo se utiliza para tomar decisiones sobre cuánto riesgo es razonable asumir en diversas situaciones.

El riesgo aceptable implica sopesar los beneficios potenciales de una actividad frente a sus riesgos potenciales. Si los beneficios superan significativamente los riesgos y estos pueden gestionarse a un nivel considerado aceptable, la actividad podría continuar.

Para ello, la UNISDR (2017) comenta sobre el riesgo aceptable o tolerable:

El grado en que un riesgo de desastre se considera aceptable depende de las condiciones sociales, económicas, políticas, culturales, técnicas y ambientales existentes. En términos de ingeniería, el riesgo aceptable también se utiliza para evaluar y definir las medidas estructurales y no estructurales que se necesitan para reducir posibles daños a personas, propiedades, servicios y sistemas a un nivel tolerado elegido, de acuerdo con códigos o "prácticas aceptadas", que se basan en probabilidades conocidas de peligros y otros factores. (p. 27)

En este nivel no se requerirían medidas de reducción del riesgo. En el contexto de la evaluación probabilística del riesgo volcánico, el concepto de riesgo aceptable se emplea para determinar el impacto potencial que la sociedad, las partes interesadas o aquello que los tomadores de decisiones están dispuestos a tolerar, dada la incertidumbre y variabilidad, asociadas con los peligros volcánicos. Implica equilibrar los beneficios de diversas actividades con las posibles consecuencias de los eventos volcánicos, considerando, al mismo tiempo, la naturaleza probabilística de estos eventos.

Riesgo tolerable

El riesgo tolerable es un concepto estrechamente relacionado con el riesgo aceptable. Representa el nivel máximo de riesgo que un individuo u organización está dispuesto a tolerar en una situación determinada. Esto implica la voluntad de aceptar cierto nivel de riesgo para garantizar ciertos beneficios, confiando en que será controlado adecuadamente (Rausand, 2011).

El riesgo tolerable a menudo se define a través de un proceso estructurado de evaluación de riesgos que considera factores como la gravedad de las posibles consecuencias, la probabilidad de que esas consecuencias ocurran y la tolerancia al riesgo del individuo, sociedad u organización.

Dentro de lo clasificado como riesgo tolerable, es posible que se requieran medidas de mitigación o de control adicional de riesgos existentes; es decir, por debajo del umbral de riesgo tolerable, normalmente se inician medidas adicionales de reducción del riesgo o acciones correctivas.

Tolerar un riesgo implica no considerarlo insignificante o algo que podríamos ignorar, sino más bien reconocerlo como algo que debemos mantener bajo revisión y reducir aún más si es posible (Rausand, 2011).

Riesgo inaceptable

Es la región donde el riesgo es demasiado grande para considerarse tolerable o aceptable y donde no caben medidas de reducción del riesgo. Usualmente, de ser posible, en esta zona, la única opción es la relocalización de los elementos expuestos o asumir el costo de un eventual reemplazo total,

como es el caso de elementos como la infraestructura de acueductos que, en el proceso de evaluación del riesgo, resulten en esta franja.

Acceptabilidad o evaluación del riesgo

La evaluación del riesgo es un proceso que implica comparar los resultados del análisis del riesgo para su posterior tratamiento o manejo, con los criterios de riesgo, entendidos como la evaluación de la importancia de un riesgo (ISO, 2018). Estos criterios tienen en cuenta el contexto externo e interno del sistema.

Existen varias estrategias para establecer criterios de aceptabilidad de un riesgo, entre ellas:

1. Mortalidad Endógena Mínima (MEM) (Leedeo, 2021).
2. Retroalimentación con experiencias pasadas (– Globalmente Al Menos Equivalente [GAME]) (Cote et al., 2014).
3. Definición de la región de Riesgo tan Bajo como sea Alcanzable (ALARP, acrónimo del inglés) (HSE, 2023).
4. Análisis de Costo-Beneficio/Análisis de costo de ciclo de vida (CBA) (HSE, 2001; Marzocchi y Woo, 2009).

Criterio MEM. Se entiende por mortalidad endógena a las muertes por causas internas, como la enfermedad, envejecimiento, etc. (Marsden, 2017). Es un método para obtener valores absolutos de aceptación de riesgos en función de la tasa de mortalidad natural de la sociedad. MEM considera un riesgo aceptable si es inferior a la tasa de mortalidad de los individuos humanos en la población general (Leedeo, 2021). Al tomar por caso, la tasa anual de mortalidad por cualquier causa a 2001, en un año, en el Reino Unido fue de 1 en 97 o 10.309 por millón de personas (HSE, 2001).

Criterio GAME. Esta metodología es implementada en los países de habla francesa, utiliza la experiencia del pasado y exige que el rendimiento en términos de seguridad del proyecto no sea peor que el de sistemas similares (los sistemas de referencia). La idea es tener un criterio de nivel de riesgo tan bueno como como el que ofrecería cualquier sistema equivalente (Comité Europeo de Normalización Electrotécnica [CENELEC], 2017).

GAME aprovecha la aceptación de riesgo frente a un sistema, producto o instalación existente, de referencia y similar al nuevo sistema que se desea implementar. Esta regla requiere un sistema existente que pueda actuar como referencia. Por ejemplo, la Autoridad de Seguridad del Túnel del Canal de la Mancha impuso el requisito de que el rendimiento de seguridad del túnel no debería ser peor que el de un ferrocarril de superficie de longitud similar (Marsden, 2017; Rausand, 2011).

Criterio ALARP. Para establecer un nivel de riesgo tolerable o aceptable, se utilizan a menudo criterios de riesgo bajo el principio Tan Bajo Como Sea Razonablemente Alcanzable (ALARP) (HSE, 2023), que establece un límite superior por debajo del cual se debe reducir el riesgo (nivel de riesgo manifiesto) y un límite inferior que es un objetivo que puede no alcanzarse o nivel de riesgo mínimo (Figura 60) (Baybutt, 2012; Rausand, 2011). Dependiendo del tipo de riesgo, de cada situación, de cada país y sus normativas, estos límites se establecen de diferente manera. Por ejemplo, la oficina Health & Safety Executive del Reino Unido (HSE, 2001) usa MEM para proponer como Límite Superior 10^{-3} y como Límite Inferior 10^{-6} con base a la tasa anual de fatalidades en el Reino Unido. La zona ALARP equivale al rango de probabilidades de riesgo que se definen como tolerables.

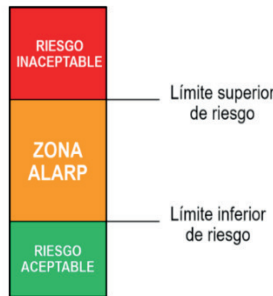


Figura 60. Esquema del criterio ALARP (Tan Bajo Como Sea Razonablemente Alcanzable) para definir niveles de riesgo

Criterio Costo-Beneficio (CBA). Estrategias como las MEM y GAME para definir límites ALARP señaladas anteriormente, tienen críticas respecto a la neutralidad, moralidad y factibilidad económica (Nathwani et al., 1997; Rackwitz, 2002). Por otra parte, el daño puede no consistir solamente en fatalidades o destrucción total, así, un daño parcial como el

inferido por el impacto de una onda de choque volcánica puede producir la destrucción de todos los vidrios de las ventanas o daño parcial; pero que debería ser considerado en un análisis de riesgo y en la definición del nivel del mismo, al cual se expone un bien.

Una forma común de determinar lo que es factible es utilizar evaluaciones de costo-beneficio como base para decidir si se puede o vale la pena implementar ciertas medidas de reducción de riesgos (Bai y Jin, 2015). El análisis costo-beneficio supone que cualquier individuo toma decisiones racionales solo si compara las ventajas y desventajas de una acción particular, de modo que siempre se puede tomar algún tipo de mejor decisión. Por supuesto, la esencia del análisis costo-beneficio es que no se limita a decisiones que afectan a un individuo, pues se relaciona también con decisiones sociales (Munda, 2017).

La decisión de aceptar o no tolerar un riesgo por parte de una comunidad depende de muchos factores, entre ellos, la percepción del riesgo que tengan esas comunidades y personas, quienes son influenciados por la racionalidad del *homo sapiens*, pero sobre la cual el análisis intuitivo costo-beneficio que hace el “homo economics” ejerce un papel a veces preponderante (Di Bucci y Savadori, 2018). La racionalidad de grupos de personas se ve influenciada por factores extremadamente complejos, desde la educación racional, la manipulación de sectores políticos y económicos, hasta el imaginario popular.

El análisis CBA es un enfoque sistemático que se utiliza para evaluar la viabilidad económica de proyectos, políticas o decisiones, comparando sus costos y beneficios. Se emplea comúnmente en diversos campos, incluida la economía, las políticas públicas y la gestión de proyectos. El CBA tiene como objetivo determinar si los beneficios de una acción propuesta superan los costos, ayudando a los tomadores de decisiones a asignar recursos de manera eficiente. En otras palabras, CBA proporciona un marco estructurado y cuantitativo para evaluar proyectos o políticas. Ayuda a tomar decisiones informadas basadas en criterios económicos objetivos en lugar de juicios subjetivos.

Desde la perspectiva de quienes toman decisiones, el CBA puede verse como un marco lógico para definir umbrales de probabilidad clave en la definición de los límites de tolerabilidad. La evacuación no es, de ninguna

manera, la única decisión difícil que el CBA puede ayudar a racionalizar. En niveles más bajos de amenaza, el CBA puede justificar medidas preparatorias por adelantado de una crisis: estas podrían incluir acciones como implementar logística de transporte, preparación de servicios de emergencia o medidas de mitigación; y, para fines a largo plazo, proporcionar una base razonada para justificar la planificación del uso de la tierra y perfeccionar la geografía de la planificación de emergencia (Aspinall y Blong, 2015; Marzocchi et al., 2012; Marzocchi y Woo, 2009; Woo, 2008).

Siguiendo a Marzocchi y Woo (2009), se puede imaginar una situación en la cual, debido a diversos factores, se debe escoger entre proteger o no proteger. Si el costo de proteger es C_p , pero si se opta por no proteger o no existe la capacidad de proteger, se incurre en unas pérdidas L . Si C_p y L están en las mismas unidades, la razón C_p/L se puede comparar con la probabilidad de que el fenómeno adverso afecte al elemento expuesto con una probabilidad P , de tal manera que si la probabilidad P excede a C_p/L , se recomienda proteger (Woo, 2008). Esto es:

$$\begin{array}{ll} \text{Proteger si} & P > C_p/L \\ \text{No es necesario proteger si} & P < C_p/L \end{array}$$

Si por concepto de proteger nos referimos a una medida de relocalización o lo que pudiera llamarse evacuación permanente, se estaría definiendo un umbral de probabilidad ($P_u = C_p/L$), a partir del cual se puede obtener un límite superior de probabilidad de riesgo tolerable, más allá del cual se considera no tolerable. Pero si se trata del costo de evacuar o de las posibles medidas de mitigación, entonces C_p disminuye, determinando un umbral inferior. Es importante mencionar que, entre más grande sea la relación C_p/L , el rango donde se requieren medidas de protección se reduce. En otras palabras, bajo este criterio, a mayor costo de proteger más permisivo se tiende a ser; incluso, en algún punto se puede dar la probabilidad $P < C_p/L$.

Por otro lado, la situación inversa se presenta cuando el nivel de pérdidas por no proteger (L) aumenta, haciendo que C_p/L disminuya, reduciendo en consecuencia, el límite de lo tolerable. Osea que, este criterio es un balance de costos que puede incluir lo factible, y si se tasa con la misma medida, incluso el costo social.

Una de las opciones para establecer ese balance costo-beneficio es tratar de medir todos los efectos en términos monetarios (Munda et al., 1995) y estableciendo criterios de eficiencia. Por ejemplo, una propuesta costo-beneficio se puede medir con el criterio de eficiencia de Pareto, que asume que al menos una persona mejora y ninguna empeora. En la práctica, es difícil hacer cualquier cambio sin perjudicar al menos a una persona. Por esta razón se ha propuesto el principio de Kaldor-Hicks (Law y Smullen, 2008), que declara que un estado social A es “socialmente preferible” a un estado social B existente, si quienes ganan con el traslado a A pueden compensar a quienes pierden y aún les quedan algunas ganancias. Tal situación es consistente con una mejora de Pareto, ya que tenemos a B indiferente a A para los perdedores (una vez que son compensados), y A preferido a B para los ganadores (si pueden sobrecompensar).

Para el caso de CBA, según el criterio de eficiencia de Kaldor-Hicks, aplicado a evacuaciones o relocalizaciones, se consideraría que un resultado es eficiente si la propuesta no solo es factible económicamente, sino que los individuos o la comunidad llegan a considerar la nueva propuesta como “socialmente preferible”.

Si se incluye a la comunidad como parte de los tomadores de decisiones, se puede hablar, dentro del contexto CBA, en términos generales de intentar determinar la cantidad de dinero que esos tomadores de decisiones están dispuestos a invertir en la medida de reducción, bien sea, para reemplazar un activo o bien material, o para salvar vidas (Viscusi, 1992). Ejemplificando, un activo económico como una casa o un terreno puede tener cierto valor económico en el mercado, pero también puede tener un valor afectivo adicional que hace que C_p aumente. De esta forma, las críticas a CBA relacionadas con el punto de vista social (Munda, 2017), serían tenidas en cuenta. Además, CBA tiene la transparencia y la auditabilidad como características especiales (Woo, 2015).

Como ya se ha insinuado, es posible aplicar las ideas de Woo (2008) sobre evacuación, al caso de relocalización (que es una especie de evacuación permanente). Se debe considerar, eso sí, que la relocalización de individuos o una población, sus actividades económicas, sus redes y relaciones sociales, así como su entorno físico, de infraestructura y estructura, es un proceso complejo con toda clase de impactos significativos -directos e indirectos- en

la población y sobre los gobiernos (Correa, 2011); por esta razón, en términos monetarios, el costo de las medidas de protección C_p , entre otros, deberían incluir el costo del activo que, potencialmente, puede ser destruido: los traslados, las compensaciones, etc. En el caso de evacuación temporal, existen, entre otros costos, esos traslados, el costo de permanencia en el refugio (si ya existe, de otra forma se incluye el costo de su construcción), compensación, etc. En la definición de estos factores juega un papel primordial la participación ciudadana en conjunto con los demás tomadores de decisiones.

Para encontrar un valor en términos monetarios de las pérdidas esperadas, (L) en caso de no acción, Woo (2008) y Marzocchi y Woo (2009) proponen la relación que se muestra en la Ecuación 27.

$$L = F \times N \times V_e \quad 27$$

Donde N es el número de elementos expuestos (personas o activos), V_e el costo por la pérdida de un elemento expuesto, y F es la fracción de N que debería su supervivencia a la medida de reducción. V_e corresponde a la suma del costo del activo físico (C_p), las compensaciones, el costo psicosocial y el costo representativo de lo que los habitantes del predio dejan de producir en caso de perecer por un evento eruptivo (C_a) (Woo, 2008), dentro de un periodo de tiempo de interés, que puede ser el periodo de retorno de una erupción del volcán.

El costo de los activos físicos es relativamente fácil de estimar; pero, cuando se habla de vidas humanas nos enfrentamos a la dificultad de poner un costo a la vida. Una forma de hacerlo es teniendo en cuenta la disposición para pagar, a fin de evitar el peligro (Marzocchi y Woo, 2009). Por otra parte, C_a se puede aproximar como $C_a = N \times R$, donde R son las pérdidas socioeconómicas, promedio per cápita (Marzocchi y Woo, 2009), las cuales pueden estimarse a partir del PIB per cápita del país o lugar en cuestión (Katz y Lazo, 2012; Woo, 2015, 2008). Este valor se puede aproximar como en 25 veces el ingreso anual per cápita (Woo, 2008). Es notable que C_a es un factor de mayor peso en la estimación de V_e (Woo, 2015).

Recordando que la amenaza se define como la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente dañino, y una vez obtenido el umbral

superior de probabilidad, se puede encontrar en términos de pérdidas esperadas, el límite superior de la probabilidad del riesgo (Ecuación 28), que nos sirve a su vez, para definir un límite superior de lo no tolerable, pero, ahora en términos de pérdidas económicas dentro del periodo de interés (por ejemplo el periodo de retorno de erupciones de un volcán, o pérdidas anuales si se estima conveniente).

$$R_{T_s} = C_p \times V \times P_u \quad 28$$

Una vez determinado lo que correspondería al límite superior ALARP, es necesario estimar el límite inferior, para lo cual se puede optar por opciones rígidas como las propuestas por Ospina (2018), quien usando el criterio MEM propone varias opciones para determinar el límite inferior ALARP (R_{T_i}) como una fracción del límite superior. Sin embargo, estas opciones pudieran caer en las críticas al criterio MEM que se mencionó antes. Por esta razón y dada a flexibilidad de CBA, sería aconsejable, acordar de manera participativa con la comunidad y tomadores de decisiones, un porcentaje del límite ALARP, iniciando quizá, a manera de discusión, como propuesta de arranque con un criterio MEM.

Ejemplo de aplicación

A fin de establecer los niveles de riesgo No Tolerable, Tolerable y Aceptable que definen las Naciones Unidas (UNISDR, 2009), en el ejemplo de aplicación, es decir, el municipio de La Florida, Nariño, Colombia y, una vez obtenidas las curvas de probabilidad de amenaza en cada pixel del modelo digital, así como las curvas de vulnerabilidad (daño) de los elementos expuestos, procedemos a estimar el riesgo específico y riesgo total al que se expone cada uno de estos elementos.

Para obtener el riesgo total se necesita definir el valor de los elementos expuestos (C_p). Para el caso del municipio de La Florida, mediante visitas de campo, encuestas y avalúos comerciales oficiales (Cámara Colombiana de la Construcción [CAMACOL], 2021; FEDELONJAS, 2017) se logró establecer un valor promedio para cada una de las tipologías encontradas, estimando en una media para Tipología 1 en US\$ 30.000, para la Tipología 2 en US\$ 37.000 y la Tipología 3 en US\$ 40.000.

Riesgo en edificaciones. Se multiplicaron las probabilidades de impacto para las diferentes intensidades de interés por el valor del daño esperado, para cada uno de los elementos estructurales expuestos y para cada una de las amenazas.

Por ejemplo, para el caso de lahares, superponiendo las curvas de amenaza para el punto P2 de la Figura 30, con la curva de vulnerabilidad de una casa de Tipología 1 (Figura 61), se puede obtener las curvas de Riesgo Específico y Riesgo Total. En este caso, la probabilidad es condicionada a que “ocurra el evento” ($P(B)=1$), condición aplicada por Hurtado y Cortez (1997) para aproximar una amenaza probabilista del volcán Galeras en la Tercera Versión del Mapa de Amenazas de ese volcán. Se puede observar que en caso que se desencadenen lahares en la cuenca del barranco, en el punto P2 (Figura 30a), el pico de riesgo probabilístico ocurre para un impacto con una presión dinámica de 15 kPa, correspondiente a una probabilidad condicional del 45.7 %, un riesgo específico $R_s = 41.25 \%$ y un riesgo total $R_T = US\$ 16.530$. Las pérdidas totales esperadas resultan de la integral bajo la curva del riesgo total, y equivalen al costo total del bien (US\$ 30.000).

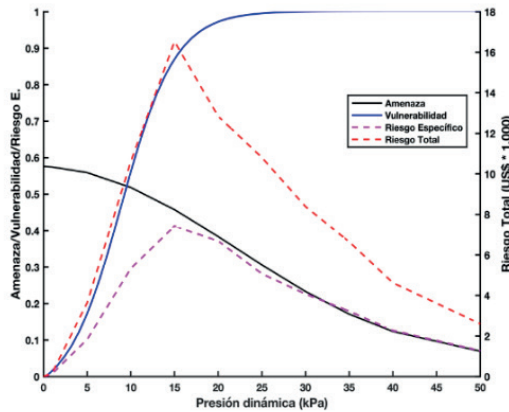


Figura 61. Curvas de amenaza, vulnerabilidad, riesgo específico y riesgo total

Nota. Para el caso de lahares en la cuenca del Barranco en el punto P2 de la Figura 30.

Si la generación de lahares está supeditada a la presencia de depósitos de PDC, la probabilidad condicional depende de la probabilidad de que el

punto asumido como el inicio de los lahares en la cuenca del barranco. Esta probabilidad es de un 40 % en caso de que se presentan flujos piroclásticos. Es decir, si A es la ocurrencia de lahares y B la de PDC, entonces $P(A|B) = 0.4 \times 0.457 = 0.183$, o $P(A|B) = 18.3\%$, lo que equivale a un riesgo total de US\$ 6.612.

Este procedimiento se realiza para cada una de las demás amenazas estudiadas para el volcán Galeras, permitiendo obtener mapas de riesgo específico y total para cada uno de los elementos estructurales expuestos. De este modo, se adoptó el criterio de comparar los picos de riesgo probabilístico de cada amenaza y seleccionar el máximo para caracterizarlo.

Límites ALARP. Con los datos de riesgo específico y total para cada uno de los elementos estructurales expuestos, se buscan los límites superior e inferior ALARP. Estos criterios, en general, usan la probabilidad anual. Siendo la probabilidad anual de ocurrencia de erupciones que generen PDC de un 1.3 %; entonces, la probabilidad absoluta de un impacto de 15 kPa de presión dinámica en P2 resulta en 0.0024 y en riesgo específico anual de 0.0021.

Criterio MEM. Una opción es la metodología propuesta por Ospina (2018) y aplicada para toda el área del volcán Galeras por Ingeniar (2022a), con la cual, esta empresa, establece como límites ALARP, los rangos indicados en la Tabla 10, donde se indican los rangos de probabilidad de perecer por la actividad del volcán para cada uno de los ocupantes de la vivienda, siendo aceptable si esta probabilidad “es menor al riesgo que tienen de morir por cualquier otro motivo” (Ingeniar, 2022a, p. 65).

Tabla 10. Categorización del riesgo en base a MEM

Categoría	Tolerabilidad	Rango
Bajo	Aceptable	$R < 10^{-6}$
Medio	Tolerable	$10^{-6} < R < 10^{-4}$
Alto	No tolerable	$R > 10^{-4}$

Nota. Adaptada de Ingeniar (2022a).

Nótese que en este caso, se trata de probabilidad anual. En el caso del punto 2 de nuestro ejemplo, si se asumen 15 kPa como una presión dinámica

peligrosa para la vida humana, el riesgo es del orden de 10^{-3} , es decir, bajo este criterio P2 se encontraría bajo una situación de riesgo “no tolerable”.

Por otro lado, Connor (2011) propone límites de aceptabilidad basado en la experiencia volcánica, según los cuales para un riesgo del orden de 10^{-3} , como se encuentra el punto P2 del ejemplo, sus habitantes se encontrarían en el límite de lo no tolerable, con la implicación de que se deberían tomar, al menos, medidas de evacuación o incluso de relocalización. Sin embargo, la edificación se encuentra dentro de lo tolerable, lo cual implica que se requieren medidas de mitigación para protegerla.

Criterio CBA. Las alternativas para identificar límites ALARP, arriba anotadas, requieren una probabilidad anual que, al menos para el volcán Galeras, no sería un valor fijo (Sandri et al., 2021), ya que la probabilidad de ocurrencia de una erupción del volcán Galeras, con una magnitud que haría esperar la generación de PDC, se incrementa con el tiempo, de tal manera que para una ventana temporal de unos 75 años después del final del último ciclo eruptivo, esta probabilidad supera el 95 %, como se puede ver en la Figura 62. Esta circunstancia implica que la probabilidad anual, al menos en el volcán Galeras, es una buena aproximación para los primeros años del fin del último ciclo eruptivo del volcán.

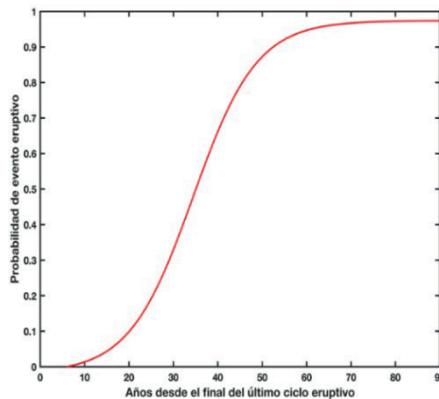


Figura 62. Probabilidad acumulada de ocurrencia de una erupción de magnitud 2.6, capaz de generar PDC

Nota. Adaptada de Sandri et al. (2021).

La propuesta para el caso volcánico de Woo (2008) considera de manera abierta un tiempo de análisis o de interés, pudiéndose definir niveles de tolerabilidad basándose, por ejemplo, en probabilidades condicionadas a la ocurrencia de una erupción capaz de generar PDC y demás fenómenos característicos del volcán Galeras ($P(B)=I$).

De esta forma y una vez conocido el costo C_p , se requiere conocer el costo de la no acción (L). Si el análisis se hace por edificación individual, se tiene que el número de habitantes promedio es $N = 3.6$; bajo un criterio de seguridad asumimos que la fracción de esos habitantes que deberían su supervivencia a la medida de reducción es $F=1$. Para estimar el costo V_e se asume que las pérdidas consisten en el bien material y el costo de lo que las personas que habitan en la vivienda dejarían de producir en 25 años (Woo, 2008). Si la inversión en reducción del riesgo va a ser asumida por el Estado colombiano, el análisis costo-beneficio se hace con base al Producto Interno Bruto (PIB) anual per cápita de Colombia, que es de alrededor de US\$ 6.700. Por lo cual, lo que se deja de producir en 25 años asciende a US\$ 167.500. Esto implica que el riesgo de referencia sería:

Para la Tipología 1:

$$V_{eT_1} = 30.000 + 167.500 = 197.500$$

$$L_{T_1} = 1 \times 3.6 \times 197.500 = 711.00$$

$$P_{uT_1} = 30.000/711.000 = 0.04$$

De igual manera, para las demás tipologías:

$$P_{uT_2} = 0.05$$

$$P_{uT_3} = 0.054$$

Estos umbrales de probabilidad definen un límite a partir del cual, si la probabilidad de ocurrencia los supera, estaría dentro de lo “no tolerable”. Estos umbrales también sirven para encontrar un umbral mínimo de tiempo a partir del cual se ven superados. Para el ejemplo de lahares impactando al punto P2, para

la Tipología 1, se alcanzaría el umbral del 4 % de probabilidad, si la probabilidad de erupción es del 9.7 %, el cual, según la Figura 62, ocurriría en un plazo de 20 años después del final del último ciclo eruptivo de Galeras. Planificaciones o análisis a menos tiempo saldrían de lo “no tolerable”.

El límite inferior que sirve para encontrar el umbral de lo tolerable se pudiera definir asumiendo un 10 % del valor del límite superior, como lo propone Ospina (Ospina, 2018), pero se optó por definirlo de manera participativa con la comunidad y alcaldía del municipio de La Florida, llegando a un acuerdo del 20 % del riesgo de referencia. Adicional, se propuso una nueva categoría para tener en cuenta los elementos expuestos en una situación de riesgo muy bajo o prácticamente nulo, como es el caso de la caída de ceniza, que solo requeriría una acción de limpieza posterior, u onda de choque, cuyo requerimiento es la protección de vidrios o su regulación en términos de resistencia.

Una vez definidos los rangos superior e inferior en términos de riesgo específico, y en razón de facilitar la aplicación de los límites de tolerabilidad, se pasa a expresar esta categorización en términos de riesgo total, como se demuestra en la Tabla 11 para PDC ($V = I$), la cual se construye definiendo el riesgo total, como se indica en la Ecuación 29.

$$R_{T_i} = C_{p_i} \times P_{u_i} \times V_{u_i} \quad 29$$

Donde el subíndice i se refiere al elemento expuesto i , Pu , el umbral de amenaza para el elemento i y Vu , la vulnerabilidad respectiva para ese nivel de amenaza.

Tabla 11. Niveles de tolerabilidad para PDC y cada una de las tipologías clasificadas en el municipio de La Florida

Tipología	Rango en miles de US\$	Tolerabilidad
1	$R_T > 1.2$	No Tolerable
	$0.24 < R_T < 1.2$	Tolerable
	$0.024 < R_T < 0.24$	Aceptable
	$R_T < 0.024$	Muy bajo
2	$R_T > 1.85$	No Tolerable
	$0.37 < R_T < 1.85$	Tolerable
	$0.037 < R_T < 0.37$	Aceptable

	$R_T < 0.037$	Muy bajo
3	$R_T > 2.2$	No Tolerable
	$0.43 < R_T < 2.2$	Tolerable
	$0.043 < R_T < 0.43$	Aceptable
	$R_T < 0.043$	Muy bajo

Para el caso del ejemplo de lahares y otras amenazas, donde la vulnerabilidad cambia con la intensidad de la amenaza, se opta por usar la vulnerabilidad correspondiente al pico de riesgo. De este modo, se propone usar la Ecuación 29 con la vulnerabilidad respectiva a cada tipología. Por ejemplo, para lahares que pudieran darse, los niveles de tolerabilidad resultan como se indica en la Tabla 12.

Tabla 12. Niveles de tolerabilidad para lahares

Tipología	Rango en miles de US\$	Tolerabilidad
1	$R_T > 1.0$	No Tolerable
	$0.2 < R_T < 1.0$	Tolerable
	$0.02 < R_T < 0.2$	Aceptable
	$R_T < 0.02$	Muy bajo
2	$R_T > 1.57$	No Tolerable
	$0.31 < R_T < 1.57$	Tolerable
	$0.031 < R_T < 0.31$	Aceptable
	$R_T < 0.031$	Muy bajo
3	$R_T > 1.62$	No Tolerable
	$0.32 < R_T < 1.62$	Tolerable
	$0.032 < R_T < 0.32$	Aceptable
	$R_T < 0.032$	Muy bajo

Como se puede ver, el punto 2 se enfrentaría a riesgos por cada una de las amenazas volcánicas, o sea, una situación de multiamenaza. Para definir la situación de riesgo de una casa con Tipología 1, ubicada en el punto 2, se puede observar que el Riesgo por PDC se clasifica como aceptable (la probabilidad de impacto es prácticamente nula), al igual que por las otras tres amenazas. No obstante, el riesgo total por lahares para una casa con Tipología 1, ubicada en el Punto 2, asciende a US\$ 6.612 > US\$ 1.000. Por lo cual, se clasifica ese activo como en nivel de riesgo “no tolerable”. Esto sucede

porque el punto P2 se ubicó para este ejemplo en un lugar a pocos metros del lecho del río Barranco, donde, de ninguna forma, se deberían construir casas de habitación. De igual forma, se procede para todos los elementos expuestos.

Es de resaltar la flexibilidad de este método, pues permite estimar el umbral de riesgo aceptable para cada activo; por ejemplo, si se trata de un hospital, su costo sería muy elevado, así como el costo de la inacción. De esta forma, el análisis mostrado en el ejemplo, se realizó para cada uno de los activos encontrados en el estudio de elementos expuestos de acuerdo a su tipología, y considerando casos especiales como el hospital y centros de interés público como la alcaldía. La Figura 63 muestra todos los elementos estructurales expuestos que se identificaron, clasificando en rojo a los elementos en situación de riesgo “no tolerable”, naranja en “riesgo tolerable”, en amarillo los elementos en riesgo “aceptable” y en azul las edificaciones en riesgo “muy bajo”.

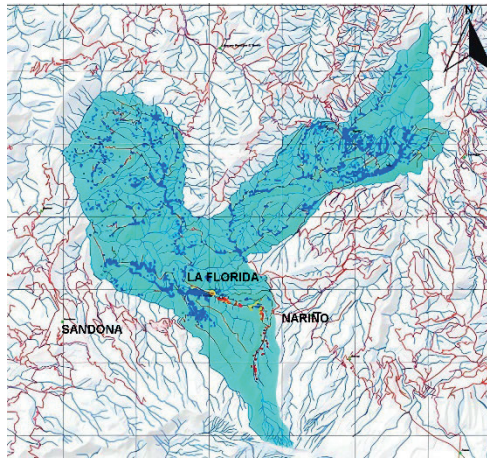


Figura 63. Riesgo probabilista para edificaciones del municipio de La Florida, Nariño, Colombia

Nota. Los puntos rojos indica en riesgo “no tolerable”, en naranja las edificaciones en riesgo “tolerable”, en amarillo las que se encuentran en condición de riesgo “aceptable” y las azules en riesgo “muy bajo”.

También, puede notarse en la Figura 63, que no se indican áreas de riesgo, puesto que, rigurosamente, no hay riesgo para elementos que no

existen. A pesar de ello, esta aproximación pudiera inducir a equivocaciones, puesto que si se tiene una visión de amenaza, se podría interpretar que la inexistencia de riesgo implica que esos lugares son seguros para habitar. Ahora bien, en caso de que se planea ubicar algún activo en cualquier lugar, se debe evaluar su condición de riesgo bajo el criterio que se usó para realizar el análisis del mismo. Esto es crucial en el caso de elementos de importancia colectiva como hospitales, edificios de cuerpos de bomberos o de las administraciones locales.

Con todo, ese no es el único criterio para establecer áreas bajo niveles de riesgo. Por ejemplo, otra propuesta para obtener áreas en situación de riesgo con cierto nivel de tolerabilidad es la realizada por Ingeniar (2022a), quienes ubican casas hipotéticas repartidas en toda el área de influencia del volcán Galeras, donde realizan el análisis del riesgo. De este modo, encuentran una clasificación del riesgo potencial en cualquier lugar, llegando a mapear áreas con niveles de riesgo, para el tipo de edificación, bajo el cual hacen el análisis.

En este caso, se prefirió dejar el riesgo para edificaciones con los elementos expuestos existentes en el municipio, dejando a los tomadores de decisiones la clasificación de la situación del riesgo de la edificación, en particular, usando el análisis CBA aquí indicado.

Nota: el análisis arriba descrito opta por el lado de la seguridad, al estimar en riesgo “en caso que se presente” una erupción capaz de generar todas las amenazas aquí estudiadas, independiente de su periodo de retorno o probabilidad de ocurrencia, es decir $P(B)=1$. Pero, el criterio CBA expuesto se puede usar para incluir la probabilidad anual o dentro de cualquier periodo de tiempo de interés. Así, para el caso de probabilidad anual del volcán Galeras (1 en 75 años aproximadamente), el riesgo para una casa con Tipología 1 en el punto 2 sería clasificado como en nivel “aceptable”. Si se requiere otro periodo de tiempo, como el de un Plan de Ordenamiento Territorial, que en un país como Colombia se realiza para un periodo de 12 años, se tiene un $P(B)=0.05$ (ver Figura 62), por lo que el punto 2 se encontraría también en nivel “tolerable”. Pero si la planificación se hace a más largo plazo, se tendría que a 20 años se alcanzaría un nivel de “no tolerable”. Esto se debe a que, dentro de un periodo de retorno de unos 75 años, la probabilidad de una erupción de una magnitud capaz de generar

depósitos de PDC se incrementa con el tiempo (Figura 62). Por lo anterior, esta información pudiera ser muy útil para planificadores y tomadores de decisiones.

En el análisis del riesgo de los servicios ecosistémicos y cultivos que se realiza en la siguiente sección, se establecen áreas en riesgo que evitarían malinterpretaciones a la hora de planificar el uso del suelo.

Riesgo en cultivos y Servicios Ecosistémicos. En este caso un análisis CBA del tipo Woo (2008), no tiene mucho sentido, puesto que no hay una medida de mitigación viable, o imposible como lo es una medida de evacuación con la cual exista alguna fracción de los elementos expuestos que deban su supervivencia a dichas acciones. Por lo tanto, para servicios ecosistémicos y cultivos, no pueden existir niveles de tolerabilidad, teniendo que buscar una alternativa para conocer niveles de riesgo clasificados como alto, medio-alto, medio y bajo.

Considerando que Woo (2008) basa su propuesta en los trabajos de Katz y Murphy (1997), quienes proponen una comparación entre utilidades y pérdidas esperadas, es posible extender la idea y usar los conceptos de la relación beneficio/pérdida (Lee y Lee, 2007; Raisanen y Palmer, 2001), mediante el cual se acepta que los tomadores de decisiones se enfrentan a la incertidumbre de si algún evento puede afectar sus decisiones. En el caso que nos concierne, se tasa el beneficio que proporcionan los Servicios Ecosistémicos y los cultivos (C_p), y el costo de las pérdidas que puedan resultar de una probable afectación por un evento volcánico (L). En este caso, el umbral de probabilidad P_u se define de manera similar a la propuesta de Woo (2008): $P_u = C_p/L$.

El valor por hectárea (Ha) de bosque es, aproximadamente, $C_{pb} = US\$ 518/Ha$ y, el de cultivos $C_{pc} = US\$ 754/Ha$ (Gasparinetti et al., 2022). Para estimar el costo de las pérdidas L , en nuestro ejemplo tendremos en cuenta varios factores como se muestra en la Ecuación 30

$$L_s = C_p + C_r + C_m \quad 30$$

Donde L_s son las pérdidas esperadas por el impacto de una amenaza potencialmente destructiva, C_p el costo directo del servicio ecosistémico o

cultivo, C_r y C_m son los costos de reforestación y/o cultivo y costo de mantenimiento del área reforestada. Estos últimos se calcularon para el municipio de La Florida, de acuerdo a las propuestas de Gasparinetti et al. (2022) para países tropicales. De este modo, se pudo obtener los umbrales P_{ub} y P_{uc} como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. *Umbral de probabilidad para bosques y cultivos en el municipio de La Florida y riesgo total en términos de pérdidas*

	C_p	C_r	C_m	L	P_u	R_t
Bosques	518	3.253	12.500	16.271	0.03	15.54
Cultivos	754	4.620	17.750	23.124	0.03	22.62

Nota. Los valores en US\$/Ha. Se hace la descripción de variables en el texto.

De la misma manera que se clasificó el riesgo para elementos estructurales, se procede a clasificarlo, pero en términos de riesgo alto, medio, bajo y muy bajo. Para tal efecto se usa la vulnerabilidad y la probabilidad de impacto combinadas, multiplicadas por C_p , para obtener el riesgo total.

Como se pudo evidenciar en la sección de vulnerabilidad, el daño esperado es de carácter binario para todas las amenazas, excepto para la caída de ceniza. En nuestro caso, por simplicidad, para la caída de ceniza se optó por aceptar la aproximación de Jenkins et al. (2015), quienes estiman que a partir de un depósito cuyo espesor sea igual o superior a los 5 cm, la vegetación no se puede recuperar a corto plazo. Es decir, se asume daño total si el espesor de caída iguala o supera los 5 cm y se asume que las plantas lograrán recuperarse si este es menor. Así, multiplicando por la probabilidad de arribo para PDC y balísticos de enterramiento con 5 cm, de caída de ceniza con 5 cm, se toma la clasificación de riesgo más desfavorable, para obtener la distribución del riesgo que se indica en la Figura 64, donde se muestran las áreas clasificadas con niveles de riesgo alto, medio, bajo y muy bajo.

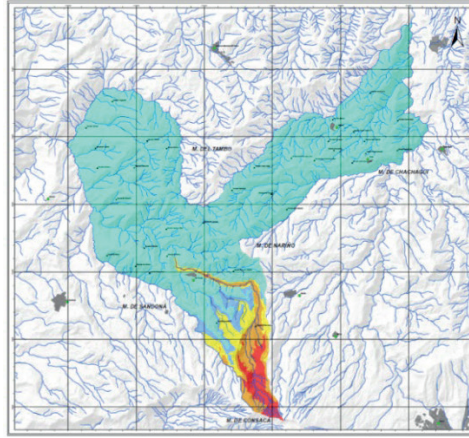


Figura 64. Riesgo probabilista para edificaciones y Servicios Ecosistémicos, cultivos y pastizales en el municipio de La Florida

Nota. La escala no permite discriminar la ubicación de estructuras. En rojo área en “alto riesgo”, en naranja área en “riesgo medio”, en amarillo el área en “riesgo bajo” y en verde área en “riesgo muy bajo”.

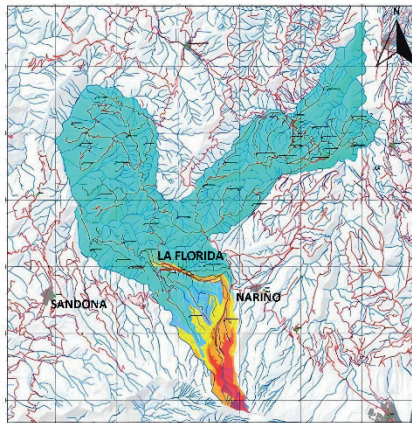


Figura 65. Riesgo total que incluye riesgo sobre ecosistemas, y cultivos, y estructuras

Nota. En rojo áreas en riesgo alto, en anaranjado en riesgo medio, en amarillo en riesgo bajo, y en azul en riesgo muy bajo.

Para presentar un solo mapa de riesgo volcánico probabilista para el municipio de La Florida, se procedió a renombrar la clasificación de niveles de tolerabilidad en las edificaciones, de tal manera que coincidiera el riesgo no tolerable como riesgo alto, el tolerable como riesgo medio, el aceptable como riesgo bajo; el riesgo muy bajo queda con el mismo nombre.

De esta manera, se pudo unir los dos mapas (Figura 63 y Figura 64) en un solo mapa. La Figura 65 muestra el resultado de este ejercicio.

Conclusiones

A lo largo del libro *Riesgo Volcánico Probabilista, con ejemplo de aplicación* se ha realizado una exploración en profundidad de los conceptos del análisis del riesgo volcánico que, es a la vez, integral y accesible. Al dividir metodologías complejas en pasos claros y viables, se presenta un enfoque estructurado para el análisis del riesgo volcánico. Si bien el libro se destaca por brindar un enfoque sistemático al análisis del riesgo volcánico, algunos lectores pueden encontrar ciertas secciones densas o técnicas, particularmente, aquellos sin una sólida formación en geociencias, probabilidad y estadística, modelamiento computacional o metodologías de evaluación de riesgos. Se ha intentado presentar conceptos complejos de una manera clara y accesible para mitigar este desafío potencial, lo que hace que el libro sea adecuado para una amplia audiencia. A través de un enfoque sistemático, este libro ha equipado a los lectores con el conocimiento y las herramientas necesarias para navegar las complejidades de la evaluación de peligros volcánicos, el análisis de vulnerabilidad y la cuantificación de riesgos.

El capítulo relacionado con el análisis probabilista de las amenazas volcánicas es una de las mayores fortalezas del libro, la cual radica en su tratamiento del análisis probabilístico de peligros para diversas amenazas volcánicas asociadas con el vulcanismo explosivo. A través del modelamiento computacional de casos hipotéticos y el uso de métodos de muestreo como el Muestreo Hipercúbico Latino Ortogonal, se logra un muestreo representativo de posibles escenarios, permitiendo estimar la probabilidad de impacto con una cierta magnitud o intensidad de interés en cualquier área determinada. Al combinar estas probabilidades con evaluaciones de la probabilidad anual de erupción de volcanes específicos, el libro proporciona una comprensión integral de la probabilidad de que eventos peligrosos afecten a sectores o elementos expuestos individuales. En sí, permite asentar una base sólida para comprender la probabilidad de que eventos potencialmente dañinos afecten los elementos expuestos y proporciona información valiosa sobre la naturaleza probabilística de los peligros volcánicos.

El capítulo relacionado con la vulnerabilidad de las edificaciones expuestas es fundamental para evaluar la susceptibilidad de los edificios a las amenazas volcánicas. A través de la categorización de elementos en tres tipos

principales basados en características estructurales, los autores capturan la diversa gama de tipos de construcción y su susceptibilidad a sufrir daño. Al realizar análisis detallados de la intensidad o magnitud del daño para cada peligro volcánico, este capítulo proporciona a los lectores una comprensión clara de los riesgos potenciales que enfrentan los elementos expuestos. Las metodologías presentadas sirven como una herramienta valiosa para identificar vulnerabilidades e informar estrategias de mitigación de riesgos.

El capítulo relacionado con la evaluación del riesgo ofrece una metodología sólida para cuantificar el riesgo de cada elemento y peligro expuesto. Al integrar el análisis probabilístico de peligros con evaluaciones de vulnerabilidad, los autores calculan el riesgo total para cada elemento. El análisis integral de costos y beneficios presentado en este capítulo facilita la toma de decisiones informadas y la priorización de riesgos al clasificarlos como no tolerables, tolerables o aceptables. Las metodologías descritas proporcionan un marco práctico para asignar recursos de manera efectiva y priorizar los esfuerzos de mitigación para reducir los impactos de los peligros volcánicos.

Finalmente, el libro *Riesgo Volcánico Probabilista, con ejemplo de aplicación*, proporciona un marco integral para evaluar y gestionar el riesgo volcánico. A través de un meticuloso análisis probabilístico de cada una de las amenazas volcánicas analizadas, la evaluación de vulnerabilidad estructural y metodologías de cuantificación de riesgos, el libro equipa a los lectores con las herramientas necesarias para navegar en las complejidades de la gestión del riesgo volcánico. Al combinar el análisis probabilístico de peligros de origen volcánico con evaluaciones de las probabilidades de erupción anual, proporciona una comprensión matizada de la probabilidad de eventos amenazantes. La evaluación sistemática de la vulnerabilidad estructural y el cálculo del riesgo de los elementos expuestos mejoran aún más nuestra capacidad para priorizar los esfuerzos de mitigación y asignar recursos de manera efectiva.

Al realizar análisis de costo-beneficio, el libro facilita la toma de decisiones informadas y la priorización de riesgos, lo que, en última instancia, contribuye al desarrollo de comunidades resilientes en regiones expuestas al vulcanismo explosivo. En general, este libro sirve como un recurso invaluable para profesionales e investigadores en el campo, ofreciendo conocimientos y metodologías prácticas para mitigar los impactos de los peligros volcánicos.

Referencias

- Acosta-Moncayo, L.A., Muñoz, M., 2012. Percepción y prevención del riesgo volcánico Galeras en el corregimiento de Mapachico municipio de Pasto. *Bibl. Virtual Univ. Nariño* 115.
- Agustsdottir, A.M., 2015. Ecosystem approach for natural hazard mitigation of volcanic tephra in Iceland: building resilience and sustainability. *Nat Hazards* 78, 1669–1691. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1795-6>
- Alatorre-Ibargüengoitia, M.A., Delgado-Grabados, H., Farraz-Motes, I.A., 2006. Hazard zoning for ballistic impact during volcanic explosions at Volcán de Fuego de Colima (México), in: *Neogene-Quaternary Continental Margin Volcanism: A Perspective from México*, GSA Special Papers. Geological Society of America, pp. 195–202.
- Alatorre-Ibargüengoitia, M.A., Delgado-Granados, H., Dingwell, D.B., 2012. Hazard map for volcanic ballistic impacts at Popocatepetl volcano (Mexico). *Bull. Volcanol.* 74, 2155–2169. <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0657-2>
- Alcaldía de La Florida, 2016. Actualización del Plan de Uso Eficiente y Ahorro del Agua del municipio de La Florida - Nariño.
- Anderson, E.C., 1999. Monte Carlo Methods Importance Sampling (Lecture Notes for Stat), *Statistical Genetics*. University of Berkley, Berkley.
- Arnolds, O., 2013. Chapter Six - The Influence of Volcanic Tephra (Ash) on Ecosystems, in: Sparks, D. (Ed.), *Advances in Agronomy*. San Diego, CA, pp. 331–380.
- Aspinall, W.P., Blong, R.J., 2015. Volcanic Risk Management. In H. Sigurdsson (Ed.), in: *The Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, pp. 1215–1234.
- Aspinall, W.P., Woo, G., Voight, B., Baxter, P.J., Neri, A., 2012. Evidence-based volcanology: application to eruption crises. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 128, 273–285.
- Baalousha, H., 2009. Using orthogonal array sampling to cope with uncertainty in ground water problems. *Ground Water* 47, 709–713. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00576.x>
- Bai, Y., Jin, W.-L., 2015. Chapter 38 -Risk Assessment Methodology, in: *Marine Structural Design*. Elsevier, Amsterdam, NL.
- Banco Mundial, 2022. PIB per cápita (US\$ a precios actuales) - Colombia.

- Banks, N.G., Calvache V, M.L., Williams, S.N., 1997. 14C ages and activity for the past 50 ka at Volcán Galeras, Colombia. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 77, 39–55. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(96\)00085-6](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(96)00085-6)
- Baybutt, P., 2012. Understanding Risk Tolerance Criteria. Primatech Inc., Ohio, USA.
- Behncke, B., Berger, J., Jenkins, S., Neri, M., Spence, R., Stahr, K., 2012. Volcanic events and corresponding damage, in: Bignami, C., Bosi, V., Costantini, C., Lavigne, F., Thierry, P. (Eds.), *Handbook for Volcanic Risk Management*. Miavita, Orleans, France, pp. 25–43.
- Beroya-Eitner, M.A., 2016. Ecological vulnerability indicators. *Ecol Indic* 60, 329–334.
- Bignami, C., Bosi, V., Costantini, L., Lavigne, F., Thierry, P., 2012. *Handbook for volcanic risk management: prevention, crisis management, resilience.*, MIAVITA Project. Orleans, France.
- Blong, R.J., 1984. *Volcanic Hazards: A Sourcebook on the Effects of Eruptions*, 1st ed. Elsevier.
- Blong, R.J., Grasso, P., Jenkins, S.F., Magill, C.R., Wilson, T.M., McMullan, K., Kandlbauer, J., 2017. Estimating building vulnerability to volcanic ash fall for insurance and other purposes. *J. Appl. Volcanol.* 6. <https://doi.org/10.1186/s13617-017-0054-9>
- Bonadonna, C., Connor, C.B., Houghton, B.F., Connor, L., Byrne, M., Laing, A., Hincks, T.K., 2005. Probabilistic modeling of tephra dispersal: Hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand. *J. Geophys. Res.* 110, B03203. <https://doi.org/10.1029/2003JB002896>
- Bonadonna, C., Costa, A., 2012. Estimating the volume of tephra deposits: A new simple strategy. *Geology* 40, 415–418. <https://doi.org/10.1130/G32769.1>
- Brinkhurst, R.O., 1974. The Sampling Problem, in: *The Benthos of Lakes*. Springer, London, UK.
- Brosch, E., Lube, G., Cerminara, M., Esposti-Ongaro, T., Bread, E.C.P., Dufek, D., Sovilla, B., Fullard, L., 2021. Destructiveness of pyroclastic surges controlled by turbulent fluctuations. *Nat. Commun* 12, 7306. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27517-9>
- Calder, E.S., Luckett, R., 2015. Pyroclastic flows: processes and models. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 398, 1–24.
- Calvache, M., 1995. *The geological evolution of Galeras Volcanic Complex*. Arizona State University.

- Calvache, M., 1990. Geology and Volcanology of the Recent Evolution of Galeras Volcano, Colombia. Louisiana State University.
- Calvache, M.L., Cortés, G.P., Williams, S.N., 1997. Stratigraphy and chronology of the Galeras volcanic complex, Colombia. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 77, 5–19. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(96\)00083-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(96)00083-2)
- CAMACOL, 2021. Informe Económico.
- Capra, L., Manea, V.C., Manea, M., Norini, G., 2011. The importance of digital elevation resolution on granular flow simulations: a test case for Colima volcano using TITAN2D computational routine. *Nat Hazards* 59, 665–680. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9788-6>
- Castillo, L., Fidel, L., Jackson, L.E., 2006. MODELADO DE FLUJOS DE LODO USANDO FLO-2D EN LA QUEBRADA PAIHUA: IMPACTO EN LA CIUDAD DE MATUCANA, LIMA, in: XIII Congreso Peruano de Geología. Sociedad Geológica del Perú, Perú, pp. 92–95.
- CENELEC, 2017. EN 50126-1. Railway Applications - The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS).
- Cepeda, H., 2020. Quinientos años de documentación histórica de actividad del volcán Galeras: escenarios eruptivos, Quinientos años de documentación histórica de actividad del volcán Galeras: escenarios eruptivos. Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia. <https://doi.org/10.32685/9789585279421>
- Cieza de León, P., 1553. Crónica del Perú. Sevilla, España.
- Ciriminna, R., Scurria, A., Tizza, G., Pagliaro, M., 2022. Volcanic ash as multi-nutrient mineral fertilizer: Science and early applications. *JSFA Rep.* 2, 528–534. <https://doi.org/10.1002/jsf2.87>
- Ciurean, R.L., Hussin, H., van Westen, C.J., Jaboyedoff, M., Nicolet, P., Chen, L., Frigerio, S., Glade, T., 2017. Multi-scale debris flow vulnerability assessment and direct loss estimation of buildings in the Eastern Italian Alps. *Nat. Hazards* 85, 929–957. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2612-6>
- Colebrook, C.F., White, C.M., 1937. Experiments with Fluid Friction in Roughened Pipes. *Proc. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.* 161, 367–381. <https://doi.org/10.1098/rspa.1937.0150>

- Connor, C.B., 2011. A Quantitative Literacy View of Natural Disasters and Nuclear Facilities. *Numeracy* 4. <https://doi.org/10.5038/1936-4660.4.2.2>
- Corbley, K.P., 2010. GeoSAR - Making Mapping the 'Impossible' Possible. *GEO Inform.* 13.
- Cordoba, G., Guerrero, D.A., Rodriguez, D., Costa, A., Thouret, J.C., 2019. Estudio del Riesgo por Amenazas Volcánicas. (Unpublished No. 4), Revisión y Ajuste del Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de La Florida. Universidad de Nariño-Municipio de La Florida, La Florida, Nariño, Colombia.
- Cordoba, G., Sheridan, M.F., Pitman, E.B., Argoti, T., 2016. Titan2F: Manual del usuario en español.
- 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 Cordón Caulle eruption. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 15, 757–766. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-757-2015>
- Córdoba, G.A., Sheridan, M.F., Pitman, B., 2018. Titan2F code for lahar hazard assessment : derivation , validation and verification. *Bol. Soc. Geológica Mex.* 70, 611–631.
- Corporación OSSO, Fondo Nacional de Calamidades, 2009. Estudio de la vulnerabilidad física y funcional a fenómenos volcánicos, en el área de influencia del volcán Galeras - Vivienda. p. 80.
- Correa, E., 2011. Populations at Risk of Disaster: A Resettlement Guide, GFDRR. The World Bank, Washington, D.C.
- Costa, A., Folch, A., Macedonio, G., 2010. A model for wet aggregation of ash particles in volcanic plumes and clouds: Theoretical formulation. *J Geophys Res-Solid Ea* 115, 1–14. <https://doi.org/10.1029/2009JB007175>
- Costa, A., Macedonio, G., Folch, A., 2006. A three-dimensional Eulerian model for transport and deposition of volcanic ashes. *Earth Planet. Sci. Lett.* 241, 634–647. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.11.019>
- Costa, A., Pioli, L., Bonadonna, C., 2017. Corrigendum to “Assessing tephra total grain-size distribution: Insights from field data analysis” [*Earth Planet. Sci. Lett.* 443 (2016) 90–107] (S0012821X16300577)(10.1016/j.epsl.2016.02.040). *Earth Planet. Sci. Lett.* 465, 205–209. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.03.003>

- Costa, A., Pioli, L., Bonadonna, C., 2016. Assessing tephra total grain-size distribution: Insights from field data analysis. *Earth Planet. Sci Lett* 443, 90–107.
- Cote, T., Rigaud, E., Garbolino, E., 2014. Diversité et complexité de la mise en œuvre du principe “ globalement au moins aussi équivalent ” (GAME), in: Hal-01087237. Presented at the 9e Congrès de Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement - IMDR, HAL open science, Dijon, France.
- Coulomb, C., 1773. Essai sur une application des règles de maximis and minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l’architecture, in: *Mémoires Fe Mathématique et de Physique*. Paris, pp. 343–382.
- Dalbey, K., Patra, A.K., Pitman, E.B., Bursik, M.I., Sheridan, M.F., 2008. Input uncertainty propagation methods and hazard mapping of geophysical mass flows. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 113, 1–16. <https://doi.org/10.1029/2006JB004471>
- DANE, 2019. Resultados del Censo Nacional de Población y Vivienda 2018. Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Bogotá, Colombia.
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E.V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.J., Park, B.K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.N., Vitart, F., 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 137, 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- Di Bucci, D., Savadori, L., 2018. Defining the acceptable level of risk for civil protection purposes: a behavioral perspective on the decision process. *Nat. Hazards* 90, 293–324. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3046-5>
- Ding, D., Liu, X., 2012. Bayesian Methods with Application in Risk Analysis, in: *National Conference on Information Technology and Computer Science*. pp. 788–791.
- Druitt, T.H., 1996. Pyroclastic Density Currents, in: Gilbert, J.S., Sparks, R.S.J. (Eds.), *The Physics of Explosive Volcanic Eruptions*. The Geological Society, Cambridge, UK., pp. 145–182.

- Dutch, S., 1999. Volcanoes, impacts on ecosystems, in: *Environmental Geology, Encyclopedia of Earth Science*. Springer, Dordrecht.
- E. Pickering, E., L. Bockholt, J., 1971. Probabilistic Air Blast Failure Criteria for Urban Structures 110.
- Eaton, J.W., 2022. GNU Octave.
- Eckhardt, R., 1987. Stan Ulam, John Von Neumann, and the Monte Carlo Method. *Los Alamos Sci.* 15, 131–136.
- Espinosa, A., 2012. *Enciclopedia de Desastres Naturales Históricos de Colombia*. Universidad del Quindío, Quindío, Colombia.
- Esposti Ongaro, T., Cavazzoni, C., Erbacci, G., Neri, A., Salvetti, M.V., 2007. A parallel multiphase flow code for the 3D simulation of explosive volcanic eruptions. *Parallel Comput.* 33, 541–560.
- Esposti Ongaro, T., Clarke, A.B., Voight, B., Neri, A., Widiwijayanti, C., 2012. Multiphase flow dynamics of pyroclastic density currents during the May 18, 1980 lateral blast of Mount St. Helens. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 117, 1–22. <https://doi.org/10.1029/2011JB009081>
- Esposti Ongaro, T., Komorowski, J.C., Legendre, Y., Neri, A., 2020. Modelling pyroclastic density currents from a subplinian eruption at La Soufrière de Guadeloupe (West Indies, France). *Bull. Volcanol.* 82, 76. <https://doi.org/10.1007/s00445-020-01411-6>
- Ettinger, S., Mounaud, L., Magill, C., Yao-Lafourcade, A.F., Thouret, J.C., Manville, V., Negulescu, C., Zuccaro, G., De Gregorio, D., Nardone, S., Uchuchoque, J.A.L., Arguedas, A., Macedo, L., Manrique Llerena, N., 2016. Building vulnerability to hydro-geomorphic hazards: Estimating damage probability from qualitative vulnerability assessment using logistic regression. *J. Hydrol.* 541, 563–581. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.017>
- Fairman, R., Mead, C.D., Williams, W.P., 1998. ENVIRONMENTAL RISK ASSESSMENT: Approaches, Experiences and Information Sources, ENVIRONMENTAL ISSUES SERIES NO. 4. European Environment Agency, Copenhagen.
- FEDELONJAS, 2017. Federación Colombiana de Lonjas de Propiedad Raiz [WWW Document]. URL <https://www.fedelonjas.org.co/>
- Ferson, S., 2005. Bayesian methods in risk assessment. *Adv. Nucl. Sci. Technol.* 13, 415–465. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-029309-4.50010-6>
- Fisher, T., 2008. Synopsis of Causation Blast Injury of the Ear. *Minist. Def.*

- Folch, A., Costa, A., Basart, S., 2012. Validation of the FALL3D ash dispersion model using observations of the 2010 Eyjafjallajökull volcanic ash clouds. *Atmos. Environ.* 48, 165–183. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.06.072>
- Folch, A., Mingari, L., Gutierrez, N., Hanzich, M., Macedonio, G., Costa, A., 2020. FALL3D-8.0: a computational model for atmospheric transport and deposition of particles, aerosols and radionuclides – Part 1: Model physics and numerics. *Geosci Model Dev* 13, 1431–1458. <https://doi.org/doi.org/10.5194/gmd-13-1431-2020>, 2020
- Freire, S., Florczyk, A.J., Pesaresi, M., Sliuzas, R., 2019. An Improved Global Analysis of Population Distribution in Proximity to Active Volcanoes, 1975–2015. *Int. J. Geo-Inf.* 8. <https://doi.org/doi:10.3390/ijgi8080341>
- Furfey, H., 1947. 978-0-12-369398-3. *Am. Cathol. Sociol. Rev.* 8, 258–265. <https://doi.org/10.2307/3707220>
- Galán, O.E., Samayoa, J.C., 2020. DESARROLLO DE CURVAS DE FRAGILIDAD Y VULNERABILIDAD PARA EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA REFORZADA DE UN NIVEL. Universidad de El Salvador, El Salvador.
- Galas, S., Dalbey, K., Kumar, D., Patra, A., 2007. Benchmarking Titan2D Mass Flow Model Against a Sand Flow Experiment and the 1903 Frank Slide, in: *The 2007 International Forum on Landslide Disaster Management*. pp. 899–917.
- García, A.M., Murcia, H.F., Cortés, G.P., Laverde, C.A., 2011. Simulación de flujos Piroclásticos en el Volcán Galeras con el Código TiTAN2D 36, 135–161. <https://doi.org/10.15446/gc>
- Garcia-Aristizabal, A., Kocot, J., Russo, R., Gasparini, P., 2018. A probabilistic tool for multi-hazard risk analysis using a bow-tie approach: application to environmental risk assessments for geo-resource development projects. *Acta Geophys.* <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0201-7>
- Gasparinetti, P., Brandão, D.O., Mandingo, E.V., Khan, A., Cabanillas, F., Farfan, J., Román-Dañobeytia, F., Bahri, A.D., Ponlork, D., Lentini, M., 2022. Economic Feasibility of Tropical Forest Restoration Models Based on Non-Timber Forest Products in Brazil, Cambodia, Indonesia, and Peru. *Forest* 13, 1878. <https://doi.org/10.3390/f13111878>

- Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., Blaškovičová, L., Blöschl, G., Borga, M., Dumitrescu, A., Daliakopoulos, I., Garcia, J., Irimescu, A., Kohnova, S., Koutroulis, A., Marchi, L., Matreata, S., Medina, V., Preciso, E., Sempere-Torres, D., Stancalie, G., Szolgay, J., Tsanis, I., Velasco, D., Viglione, A., 2009. A compilation of data on European flash floods. *J. Hydrol.* 367, 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.028>
- Ghesquiere, F., Mahul, O., Jamin, L., 2006. Earthquake Vulnerability Reduction Program in Colombia A Probabilistic Cost-benefit Analysis (No. Working Paper 3939), Policy Research Working Papers. World Bank Group, Washington, D.C.
- Glasstone, S., Dolan, P.J., 1977. The Effects of Nuclear Weapons. Third edition (No. TID-28061). Department of Defense, Washington, D.C. (USA); Department of Energy, Washington, D.C. (USA), United States.
- Gomez, D., 2018. respuesta_SGC_a_UDENAR_datos_ceniza_23feb18.
- Greenshields, C., 2017. OpenFoam user guide. OpenFOAM Foundation Ltd.
- Guerrero, D.A., Criollo, R.A., Córdoba, G.A., Rodríguez, D.M., 2019. A Modeling Approach for Lahar Hazard Assessment: the Case of Tamasagra Sector in the City of Pasto, Colombia. *Ing. Cienc.* 15, 7–31. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.15.30.1>
- Guerrero, I.A., Villota, D.E., Córdoba, G.A., Gómez, H.J., 2018. Effects of the concentration of solids on the phenomenon of super-elevation in artificial curved open channels de sobre-elevación en canales artificiales curvos 34, 21–34.
- Guerrero López, D.A., 2016. Aplicación para ANDROID para el cálculo de la amenaza relativa frente a flujos piroclásticos. Tesis Grado. Universidad de Nariño.
- Gutiérrez, H., Zhang, H., 2009. Análisis bayesiano para la diferencia de dos proporciones usando R [Bayesian Analysis for the Difference of Two Proportions Using R]. *Rev. Metodos Cuantitativos Para Econ. Empresa* 8, 50–70.
- Heim, A., 1932. *Der Bergsturz und Menschenleben*, Fretz und Wasmuth. Verlag, Zurich.
- Helens, M.S., Pierson, T.C., 1985. Geological Society of America Bulletin Initiation and flow behavior of the 1980 Pine Creek and Muddy River lahars ., *Geol. Soc. Am. Bull.* [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1985\)96<1056](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1985)96<1056)

- Hirst, I.L., Carter, D.A., 2002. A “worst case” methodology for obtaining a rough but rapid indication of the societal risk from a major accident hazard installation. *J. Hazard. Mater.* A92, 223–237.
- Hoblitt, R.P., 1986. Observations of the Eruptions of July 22 and August 7 1980, at Mount St. Helens, Washington (Professional Paper No. 1335). U.S. Geological Survey.
- Hofierka, J., Mitasova, H., Mitas, L., 2002. GRASS and modeling landscape processes using duality between particles and fields, in: Proceedings of the Open Source GIS - GRASS Users Conference. Trento, Italy, p. 11.
- Holdridge, L.R., 1987. *Ecología basada en zonas de vida*. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, San Jose, Costa Rica .
- Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B., Zimmermann, M., 2013. Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 13, 869–885. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-869-2013>
- Horwell, C.J., Baxter, P.J., 2006. The respiratory health hazards of volcanic ash: a review for volcanic risk mitigation. *Bull. Volcanol.* 69, 1–64. <https://doi.org/doi:10.1007/s00445-006-0052-y>
- HSE, 2023. ALARP “at a glance.”
- HSE, 2001. *Reducing Risk, Protecting People: HSE’s decision-making process*, HSEBooks. Norwich, UK.
- Hurtado, A.D., Cortéz, G.P.J., 1997. Third version of the hazard map of Galeras Volcano, Colombia. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 77, 89–100. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(96\)00088-1](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(96)00088-1)
- IDEAM, 2017. *Datos estaciones meteorológicas*. Instituto de Hidrología Metereología y Estudios Ambientales.
- IGAC, 2021. *Datos Abiertos Agrología*.
- IGAC, I.G.A.C., 2005. *Mapa de formaciones vegetales y zonas de vida*. IDEAM.
- Ingeniar, 2022b. ESTUDIOS DETALLADOS DE RIESGO POR CORRIENTES DE DENSIDAD PIROCLÁSTICA, FLUJOS DE LODO, FLUJOS DE ESCOMBROS VOLCÁNICOS Y CAÍDA DE PIROCLASTOS EN LOS MUNICIPIOS DEL ÁREA DE INFLUENCIA DEL VOLCÁN GALERAS: Evaluación probabilista de la amenaza volcánica. Producto 3 consolidado (9677-VOGA005-059-2021). Unidad Nacional Para la Gestión del Riesgo de Desastres, Bogotá, Colombia.

- Ingeniar, 2022a. ESTUDIOS DETALLADOS DE RIESGO POR CORRIENTES DE DENSIDAD PIROCLÁSTICA, FLUJOS DE LODO, FLUJOS DE ESCOMBROS VOLCÁNICOS Y CAÍDA DE PIROCLASTOS EN LOS MUNICIPIOS DEL ÁREA DE INFLUENCIA DEL VOLCÁN GALERAS: Metodología de evaluación probabilista del riesgo volcánico, Producto 2, 9677-VOGA005-059-2021. Unidad Nacional Para la Gestión del Riesgo de Desastres, Bogotá, Colombia.
- Ingeominas, 2010. Resumen de actividad del volcán Galeras del 29 de diciembre de 2009 al 4 de enero de 2010. Instituto Colombiano de Geología y Minería, Ingeominas, Pasto.
- Ingeominas, 1997. Mapa de Amenaza Volcánica del Galeras (Tercera Versión). Ingeominas, Bogotá, D.C; Colombia.
- ISO, 2018. ISO: 31000. RISK MANAGEMENT. PRINCIPLES AND GUIDELINES.
- Iverson, R.M., 1997. The physics of debris flows. *Rev. Geophys.* 35, 245–296.
- Iverson, R.M., 1978. Gravity-driven mass flows. Springer Berl. Heidelb. 558–570.
- Iverson, R.M., Matthew, L., LaHusen, R.G., Berti, M., 2010. The perfect debris flow? Aggregated results from 28 large-scale experiments. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 115, 1–29.
- Jenkins, S., Wilson, T., Loughlin, S., Sparks, S., Brown, S., Jenkins, S., Vye-brown, C., 2015. Volcanic ash fall hazard and risk, in: *Global Volcanic Hazards and Risk*. pp. 173–222. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316276273>
- Johnson, B., 2012. Origin and meaning of the word “lahar.” *EARTH Mag.* 57, 54–57.
- Katz, R.W., Lazo, J., 2012. Economic Value of Weather and Climate Forecasts, *The Oxford Handbook of Economic Forecasting*. Oxford, UK. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780195398649.013.0021>
- Katz, R.W., Murphy, A.H., 1997. Forecast value: prototype decision-making models, in: Katz, R.W., Murphy, A.H. (Eds.), *Economic Value of Weather and Climate Forecasts*. Cambridge University Press, Cambridge, UK., pp. 183–217.
- Kelfoun, K., 2017. A two-layer depth-averaged model for both the dilute and the concentrated parts of pyroclastic currents. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 122, 4293–4311. <https://doi.org/10.1002/2017JB014013>

- Law, J., Smullen, J. (Eds.), 2008. *A dictionary of Finance and Banking*, 4ed ed. Oxford University Press, Oxford, UK.
- Lee, K.L., Lee, J.W., 2007. The economic value of weather forecasts for decision-making problems in the profit/loss situation. *Meteorol. Appl.* 14, 455–463. <https://doi.org/0.1002/met.44>
- LEEDEO, 2021. Risk acceptance methods and criteria: ALARP, CBA, MEM and GAME.
- Link, W., Barker, R.J., 2010. *Bayesian Inference: with ecological applications*. Academic Press, Boston, United States.
- Liu, W., Li, L., Chen, L., Mingxin, W., Wang, J., Yuan, L., Liu, Y., Li, H., 2020. Testing a Comprehensive Volcanic Risk Assessment of Tenerife by Volcanic Hazard Simulations and Social Vulnerability Analysis. *Int. J. Geo-Inf.* 9, 273. <https://doi.org/doi:10.3390/ijgi9040273>
- Macedonio, G., Costa, A., 2014. Parfit-2.1 A tool for the parametrization of volcanic ash deposits (No. User Manual). Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Italy.
- Macedonio, G., Costa, A., Longo, A., 2005. A computer model for volcanic ash fallout and assessment of subsequent hazard. *Comput. Geosci.* 31, 837–845. <https://doi.org/DOI:10.1016/j.cageo.2005.01.013>
- Malin, M.C., Sheridan, M.F., 1982. Computer-Assisted Mapping of Pyroclastic Surges. *Science* 217, 637–640. <https://doi.org/10.1126/science.217.4560.637>
- Marsden, E., 2017. Risk acceptability and tolerability.
- Marso, J.N., Torres, R.C., Laguerta, E.P., 2015. Lahar: A Javanese word for a destructive volcanic mudflow. *J. Geol. Soc. Philipp.* 69, 19–32.
- Marzocchi, W., Sandri, L., Selva, J., 2012. BET_EF: A probabilistic tool for long- and short-term eruption forecasting. *Bull. Volcanol.* 74, 1777–1805.
- Marzocchi, W., Woo, G., 2009. Principles of volcanic risk metrics: Theory and the case study of Mount Vesuvius and Campi Flegrei, Italy. *J. Geophys. Res.* 114, B03213. <https://doi.org/10.1029/2008JB005908>
- Mastin, L.G., 2001. A simple calculator of ballistic trajectories for blocks ejected during volcanic eruptions (Open-File Report No. 01–45). U.S. Geological Survey.
- Mastin, L.G., Van Eaton, A.R., Durant, A.J., 2016. Adjusting particle-size distributions to account for aggregation in tephra-deposit model

- forecasts. *Atmospheric Chem. Phys.* 16, 9399–9420.
<https://doi.org/10.5194/acp-16-9399-2016>
- Matala, A., 2008. Sample Size Requirement for Monte Carlo simulations using Latin Hypercube Sampling, *Independent Research Projects in Applied Mathematics*.
- McClung, D.M., 2001. Superelevation of flowing avalanches around curved channel bends. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 106, 16489–16498.
<https://doi.org/10.1029/2001jb000266>
- Mercx, W.P.M., Weerheijm, J., Verhagen, Th.L.A., 1991. Some considerations on the damage criteria and safety distances for industrial explosions, in: *Institution of Chemical Engineers Symposium Series*. Rijswijk, The Netherlands, pp. 255–275.
- Moreno, E., Gonzales-Torre, F., 2006. On the frequentist and Bayesian approaches to hypothesis testing. *Stat. Oper. Res. Trans.* 30, 3–54.
- Moriano Tello, D.E., Paredes Ruiz, P.A., Córdoba Guerrero, G., Delgado Granados, H., 2017. Evaluación de la vulnerabilidad de edificaciones ante la génesis de lahares: Caso de estudio en la población de Santiago Xalitzintla, en el flanco NE del volcán Popocatepetl (México). *Boletín Soc. Geol. Mex.* 69, 223–241.
- Munda, G., 2017. On the use of Cost-Benefit Analysis and Multi-Criteria Evaluation in ex-ante Impact Assessment (EUR 28768 EN), JRC Technical reports. European Union, Luxembourg.
- Munda, G., Nijkamp, P., Rietveld, P., 1995. Qualitative multicriteria methods for fuzzy evaluation problems: An illustration of economic-ecological evaluation. *Eur. J. Oper. Res.* 82, 79–97.
[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)E0250-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)E0250-2)
- Murcia, H.E., Sheridan, M.F., Macías, J.L., Cortés, G.P., 2010. TITAN2D simulations of pyroclastic flows at Cerro Machín Volcano, Colombia: Hazard implications. *J. South Am. Earth Sci.* 29, 161–170.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.09.005>
- Nathwani, J.S., Lind, N.C., Pandey, M.D., 1997. *Affordable Safety by Choice: The life quality method*. University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.
- National Research Council, 2014. *Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident for Improving Safety of U.S. Nuclear Plants*. The National Academies Press, Washington, DC.
- Neglia, F., Sulpizio, R., Dioguardi, F., Capra, L., Sarocchi, D., 2021. Shallow-water models for volcanic granular flows: A review of

- strengths and weaknesses of TITAN2D and FLO2D numerical codes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 410. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107146>
- Neild, J., O’Flaherty, P., Hedley, P., Underwood, R., Johnston, D., Christenson, B., Brown, P., 1998. Impact of a Volcanic Eruption on Agriculture and Forestry in New Zealand, MAF Policy Technical Paper 99/2. Ministry of Agriculture and Forestry, New Zealand.
- Neri, A., Esposti Ongaro, T., Macedonio, G., Gidaspow, D., 2003. The role of convective instabilities in volcanic ash plume formation. *Earth Planet. Sci. Lett.* 221–236.
- Newhall, G., Self, S., 2014. The Volcanic Explosivity Index (VEI): An Estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism The Volcanic Explosivity Index (VEI)’ An Estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism. *Res. Gate* 87, 1231–1238. <https://doi.org/10.1029/JC087iC02p01231>
- Nutrioso, 2023. FLO-2D.
- O’Brien, J.S., Julien, P.Y., 1993. Two-dimensional Water Flood and Mudflow Simulation. *J Hydraul Eng* 8, 877–887.
- OCHA, 2017. Colombia – Avalancha e inundaciones en Mocoa (Putumayo). (Flash Update No. 1). United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA).
- Ogburn, S., Calder, E.S., 2017. The relative effectiveness of empirical and physical models for simulating the dense undercurrent of pyroclastic flows under different emplacement conditions. *Front. Earth Sci.* 5, 1–23. <https://doi.org/10.3389/feart.2017.00083>
- Ortiz, R., 1996. Riesgo volcánico. Servicio de publicaciones del Excmo, Cabildo Insular de Lanzarote.
- Ospina, E., 2018. ESTUDIO PARA DEFINIR Y PROPONER VALORES NACIONALES DE RIESGO MÁXIMO INDIVIDUAL & SOCIAL ACCIDENTAL PARA ACTIVIDADES INDUSTRIALES, Y PARA INSTALACIONES FIJAS E INFRAESTRUCTURA DE TRANSPORTE (CONTRATO DE CONSULTORÍA NO 9677-PPAL001-849-2017). Universidad de los Andes, UNGRD, Colombia.
- Papathoma-Köhle, M., Totschnig, R., Keiler, M., Glade, T., 2012. A new vulnerability function for debris flow - The importance of physical vulnerability assessment in Alpine areas. 12th Congr. Interpraevent.

- Pareschi, M., 1996. Physical modeling of eruptive phenomena: Lahars, in: *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. Springer, Berlin, Heidelberg, Germany., pp. 463–489.
- Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2015. Plan de Manejo Santuario de Flora y Fauna Galeras 67, 217.
- Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2005. Plan De Manejo 2006-2010 Santuario De Flora Y Fauna Galeras.
- Patra, A.K., Bauer, A.C., Nichita, C.C., Pitman, E.B., Sheridan, M.F., Bursik, M., Renschler, C.S., 2005. Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches over natural terrain. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 139, 1–21.
- Petrazzuoli, S.M., Zuccaro, G., 2004. Structural resistance of reinforced concrete buildings under pyroclastic flows: A study of the Vesuvian area. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 133, 353–367. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(03\)00407-4](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(03)00407-4)
- Pierson, T.C., 1980. Erosion and deposition by debris flows at Mt. North Canterbury, New Zeland. *Earth Surf. Process.* 5, 227–247.
- Pierson, T.C., Scott, K.M., 1985. Downstream Dilution of a Lahar: Transition From Debris Flow to Hyperconcentrated Streamflow. *Water Resour. Res.* 21, 1511–1524. <https://doi.org/10.1029/WR021i010p01511>
- Pierson, T.C., Wood, N.J., Driedger, C.L., 2014. Reducing risk from lahar hazards: concepts, case studies, and roles for scientists. *J. Appl. Volcanol.* 3, 16. <https://doi.org/doi:10.1186/s13617-014-0016-4>
- Pilger, G.G., Costa, J.F., Koppe, J., 2008. The benefits of Latin Hypercube Sampling in sequential simulation algorithms for geostatistical applications. *Appl. Earth Sci. Trans. Inst. Min. Metall. Sect. B* 117, 160–174. <https://doi.org/10.1179/174327508X387483>
- Presidencia de la República, 2019. Fortalecimiento de la Gestión del Riesgo de Desastres en la Zona de Amenaza Volcánica Alta-ZAVA del volcán Galeras. (No. BPIN 2018011001058). Bogotá, Colombia.
- Pyle, D.M., 2000. Sizes of volcanic eruptions, in: Sigurdson, H. et al. (Ed.), *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, pp. 263–269.
- Pyle, D.M., 1989. The thickness, volume and grainsize of tephra fall deposits. *Bull. Volcanol.* 51, 1–15. <https://doi.org/doi:10.1007/BF01086757>
- QGIS-project, 2023. QGIS Desktop User Guide/Manual.
- Quan Luna, B., Blahut, J., Westen, C.J. van, Sterlacchini, S., Asch, T.W.J. van, Akbas, S.O., 2011. The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves. *Nat.*

- Hazards Earth Syst. Sci. 11, 1–9. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1-2011>
- Quinn, J.B., Quinn, G.D., 2010. A practical and systematic review of Weibull statistics for reporting strengths of dental materials. *Dent. Mater.* 26, 135–147. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2009.09.006>
- Rackwitz, R., 2002. Optimization and risk acceptability based on the Life Quality Index. *Struct. Saf.* 24, 297–331. [https://doi.org/10.1016/S0167-4730\(02\)00029-2](https://doi.org/10.1016/S0167-4730(02)00029-2)
- Raisanen, J., Palmer, T.N., 2001. A Probability and Decision-Model Analysis of a Multimodel Ensemble of Climate Change Simulations. *J. Clim.* 14, 3512–3226. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<3212:APADMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<3212:APADMA>2.0.CO;2)
- Rausand, M., 2011. *Risk Assessment: Theory, Methods, and Applications*, 1st ed, Statistics in practice. Wiley, Hoboken, NJ.
- Rodriguez, D., Córdoba, G., 2018. Evaluación del riesgo por lahares del complejo volcánico Chiles-Cerro Negro: el caso de estudio del pueblo Panam, Nariño, Colombia, in: Thouret, J.C., Córdoba, G., Charbonnier, S., Delgado, H., Mariño, J., Villarreal, J.L. (Eds.), *Hazard and Risk Mapping-The Arequipa-El Misti Case and Other Threatened Cities*. Presses Universitaires Blaise Pascal, Clermont, France, pp. 87–92.
- Rogerson, P.A., 2005. Spatial Sampling Problems, Sampling Designs, and Subsequent Inference, in: Kempf-Leonard, K. (Ed.), *Encyclopedia of Social Measurement*. Elsevier, Dallas, Texas.
- Ruiz-Bueno, A., 2008. La mostra: alguns elements per a la seva confecció. *REIRE. Rev. D’Innovació Recer. En Educ.* 1, 75–88.
- Saito, T., Eguchi, T., Takayama, K., Taniguchi, H., 2001. Hazard predictions for volcanic explosions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 106, 35–51.
- Saito, T., Takayama, K., 2005. Applying shock-wave research to volcanology. *Comput. Sci. Eng.* 7, 30–35.
- Sandri, L., Costa, A., Selva, J., Tonini, R., Macedonio, G., Folch, A., Sulpizio, R., 2016. Beyond eruptive scenarios: Assessing tephra fallout hazard from Neapolitan volcanoes. *Sci. Rep.* 6, 1–13. <https://doi.org/10.1038/srep24271>
- Sandri, L., Garcia, A., Costa, A., Guerrero Lopez, A., Cordoba, G., 2021. Stochastic Modeling of Explosive Eruptive Events at Galeras Volcano, Colombia. *Front. Earth Sci.* 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.583703>

- Sandri, L., Garcia-Aristizabal, A., Costa, A., Guerrero, A., Cordoba, G., 2019. Modeling temporal distribution of eruptive events at Galeras volcano, in: 27 IUGG General Assembly. IUGG Centennial, Montreal, Canada.
- Sandri, L., Jolly, G., Lindsay, J., Howe, T., Marzocchi, W., 2012. Combining long- and short-term probabilistic volcanic hazard assessment with cost-benefit analysis to support decision making in a volcanic crisis from the Auckland Volcanic Field, New Zealand. *Bull. Volcanol.* 74, 705–723. <https://doi.org/10.1007/s00445-011-0556-y>
- Savage, S.B., Hutter, K., 1989. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *J Fluid Mech.* 199, 177–215.
- Schulz, E., Speekenbrink, M., Krause, A., 2018. A tutorial on Gaussian process regression: Modelling, exploring, and exploiting functions. *J. Math. Psychol.* 85, 1–16.
- SGC, 2015a. Actualización Del Mapa De Amenaza Volcánica Del Volcán Galeras – Colombia. Servicio Geológico Colombiano, Pasto, Colombia.
- SGC, 2015b. IMPLEMENTACIÓN DE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA LA SIMULACIÓN DE FENÓMENOS VOLCÁNICOS, COMO SOPORTE EN LA ACTUALIZACIÓN DEL MAPA DE AMENAZA DEL VOLCÁNICA DEL VOLCÁN GALERAS – COLOMBIA (INFORME TÉCNICO DE SIMULACIONES No. En cumplimiento a la Sentencia de la Corte Constitucional T-269 de 2015). SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO DIRECCIÓN DE GEOAMENAZAS, Pasto, Colombia.
- Sheridan, M.F., 1980. Pyroclastic block flow from the September, 1976, eruption of La Soufrière volcano, Guadeloupe. *Bull. Volcanol.* 43, 397–402. <https://doi.org/10.1007/BF02598040>
- Sheridan, M.F., Macias, J.L., 1995. Estimation of risk probability for gravity – driven pyroclastic flows at Volcan Colima, Mexico. *J Volc Geoth Res.* 66, 251–256.
- Sheridan, M.F., Patra, A.K., Dalbey, K., Hubbard, B., 2010. Probabilistic digital hazard maps for avalanches and massive pyroclastic flows using TITAN2D, in: Groppelli, G., Viereck-Goette, L. (Eds.), *Stratigraphy and Geology of Volcanic Areas*. Geological Society of America.
- Sheridan, M.F., Stinton, A.J., Patra, A., Pitman, E.B., Bauer, A., Nichita, C.C., 2005. Evaluating Titan2D mass-flow model using the 1963 Little

- Tahoma Peak avalanches, Mount Rainier, Washington. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 139, 89–102. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.06.011>
- Smithsonian Institution, 2023. Active Volcanoes.
- Smithsonian Institution, 2017. Galeras.
- Solarte, I.D., Vallejo, J.A., 2022. Análisis probabilístico de la amenaza por lahares del volcán Galeras en la Universidad de Nariño, sede Torobajo, mediante simulación en Titan2F (Trabajo Final de Grado). Universidad de Nariño, Pasto, Colombia.
- Solow, A.R., 2001. An Empirical Bayes Analysis of Volcanic Eruptions. *Math. Geol.* 33, 95–102. <https://doi.org/10.1023/A:1007514410745>
- Sparks, R.S.J., Bursik, M.I., Carey, S.N., Gilbert, J.S., Glaze, L.S., Sigurdsson, H., Woods, A.W., 1997. *Volcanic Plumes*. John Willey and Sons LTD., New York.
- Spence, R., Zuccaro, G., Petrazzuoli, S., Baxter, P.J., 2004. Resistance of buildings to pyroclastic flows, analytical and experimental studies and their application to Vesuvius. *Nat. Hazards Rev.* 5 (1), 48–59.
- Spence, R.J.S., Kelman, I., Baxter, P.J., Zuccaro, G., Petrazzuoli, S., 2005. Residential building and occupant vulnerability to tephra fall. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 5, 477–494. <https://doi.org/10.5194/nhess-5-477-2005>
- Stein, M., 1987. Large Sample Properties of Simulations Using Latin Hypercube Sampling. *Technometrics* 29, 143–151.
- Sulpizio, R., Dellino, P., Sarocchi, D., 2014. Pyroclastic density currents: state of the art and perspectives. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 283, 36–65. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.06.014>
- Taddeucci, J., Alatorre-Ibarguengoitia, M.A., Cruz-Vazquez, O., Del Bello, E., Scarlato, P., Ricci, T., 2017. In-flight dynamics of volcanic ballistic projectiles. *Rev. Geophys., AGU Publications* 55, 675–718.
- Thompson, M.A., Lindsay, J.M., Gaillard, J.C., 2015. The influence of probabilistic volcanic hazard map properties on hazard communication. *J. Appl. Volcanol.* 4. <https://doi.org/10.1186/s13617-015-0023-0>
- Thouret, J., Taillandier, M., Wavelet, E., 2023. Semeru volcano, Indonesia: measuring hazard, exposure and response of densely populated neighbourhoods facing persistent volcanic threats. *Nat Hazards* 117, 1405–1453. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05910-5>

- Thouret, J.C., Ettinger, S., Guitton, M., Santorni, O., Magill, C., Martelli, K., 2014. Assessing physical vulnerability in large cities exposed to flash floods and debris flows: the case of Arequipa (Peru). *Nat. Hazards* 73, 1771–1815.
- Tierz, P., Sandri, L., Costa, A., Zaccarelli, L., Di Vito, M.A., Sulpizio, R., Marzocchi, W., 2016. Suitability of energy cone for probabilistic volcanic hazard assessment: validation tests at Somma-Vesuvius and Campi Flegrei (Italy). *Bull. Volcanol.* 78. <https://doi.org/10.1007/s00445-016-1073-9>
- Torres-Corredor, R.A., Ponce-Villarreal, P., Gómez-Martínez, D.M., 2017. Vulnerabilidad física de cubiertas de edificaciones de uso de ocupación normal ante caídas de ceniza en la zona de influencia del volcán Galeras. *Rev. Bol. Geol. UIS* 39, 67–82. <https://doi.org/10.18273/revbol.v39n2-2017005>
- UNDRO, 1990. *Mitigating Natural Disasters*. Office of the United Nations Disaster Relief Co-Ordinator, New York.
- UNDRR, 2017. *Sendai Framework Terminology on Disaster Risk Reduction [WWW Document]*. Terminology. URL <https://www.undrr.org/terminology#E>
- UNISDR, 2017a. *National Disaster Risk Assessment*. United Nations, Geneva.
- UNISDR, 2017b. *National Disaster Risk Assessment: Governance System, Methodologies, and Use of Results, Words into Action Guidelines*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Geneva.
- UNISDR, 2015. *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 - 2030, Third World Conference on Disaster Risk Reduction, Sendai, Japan, 14-18 March 2015*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Geneva. <https://doi.org/A/CONF.224/CRP.1>
- UNISDR, 2009. *Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Geneva.
- United Nations, 2016. *Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction (Seventy-first session. Agenda item 19 (c) No. A/71/644), Sustainable development: disaster risk reduction*. United Nations General Assembly, New York.
- USGS, 2023. *Pyroclastic flows move fast and destroy everything in their path*.

- Valentine, G.A., 1998. Damage to structures by pyroclastic flows and surges, inferred from nuclear weapons effects. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 87, 117–140. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(98\)00094-8](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(98)00094-8)
- Vallance, J.W., Iverson, R.M., 2015. Lahars and their deposits, in: *Encyclopedia of Volcanoes*. Elsevier.
- van Westen, C.L., 2011. Risk Analysis, in: United Nations University (Ed.), *Multi-Hazard Risk Assessment, Guide Book*. University of Twente, Netherland.
- Viscusi, W.K., 1992. *Fatal Tradeoffs: Public and Private Responsibilities for Risk*. Oxford University Press, New York.
- Voight, B., Constantine, E., 2000. Rock-slide debris avalanche of 26 December 1997, and associated pyroclastic flow and ash cloud, on Soufrière Hills volcano, Montserrat, British West Indies. *Bull. Volcanol.* 61, 107–120.
- Wadge, G., 2022. The eruption of Soufrière Hills volcano, Montserrat from 1995 to 1999. *Geol. Soc., Memoirs* 21, 59–70.
- Wang, J., 2022. *An Intuitive Tutorial to Gaussian Processes Regression*. Submitted to Elsevier.
- Weibull, W., 1951. A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. *J. Appl. Mech.* Vol. 18, 293–297.
- Wheeler, K., Hensley, S., 2000. The GeoSAR Airborne Mapping System.
- Wild, A.J., Wilson, T.M., Bebbington, M.S., Cole, J.W., Craig, H.M., 2019. Probabilistic volcanic impact assessment and cost-benefit analysis on network infrastructure for secondary evacuation of farm livestock: A case study from the dairy industry, Taranaki, New Zealand. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 387, 106670. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106670>
- Williams, G.T., Kennedy, B.M., Wilson, T.M., Fitzgerald, R.H., Tsunematsu, K., Teissier, A., 2017. Buildings vs. ballistics: Quantifying the vulnerability of buildings to volcanic ballistic impacts using field studies and pneumatic cannon experiments. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 343, 171–180. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.06.026>
- Wilson, G., Wilson, T.M., Deligne, N.I., Cole, J.W., 2014. Volcanic hazard impacts to critical infrastructure: A review. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 286, 148–182. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.08.030>
- Woo, G., 2015. Cost-Benefit Analysis in Volcanic Risk, in: *Volcanic Hazards, Risks, and Disasters*,. Elsevier Inc.

- Woo, G., 2008. Probabilistic criteria for volcano evacuation decisions. *Nat. Hazards* 45, 87–97. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9171-9>
- WWF, 2018. Glosario ambiental: Servicios ecosis... ¿qué? Apropiémonos Leng. Mediambiental Glosario Ambient. URL <https://www.wwf.org.co/?324210/Glosario-ambiental-Servicios-ecosis-que>
- Yang, J.E., 2014. Fukushima dai-ichi accident: Lessons learned and future actions from the risk perspectives. *Nucl. Eng. Technol.* 46, 27–38. <https://doi.org/10.5516/NET.03.2014.702>
- Zancheta, G., Sulpizio, R., Pareschi, M., Leoni, F., Santacroce, R., 2004. Characteristics of May 5–6, 1998 volcanoclastic debris flows in the Sarno area (Campania, southern Italy): relationships to structural damage and hazard zonation. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 133 (1), 377–393.
- Zicanov, O., 2019. *Essential computational fluid dynamics.*, 2nd ed. Wiley, MI, USA.
- Zuccaro, G., Cacace, F., Spence, R.J.S., Baxter, P.J., 2008. Impact of explosive eruption scenarios at Vesuvius. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 178, 416–453.

Lista de figuras

Figura 1.	Localización del volcán Galeras y el municipio de La Florida.....	16
Figura 2.	Amenaza (en rojo), vulnerabilidad (en azul), riesgo específico (en magenta) y riesgo total (línea punteada azul)	20
Figura 3.	Flujo de lava andesítico.....	23
Figura 4.	Vista aérea de la zona del cráter del volcán Galeras. Al fondo a la derecha, la ciudad de Pasto. En primer plano se nota el depósito del flujo de lava de la erupción de 1886. Tomado del Servicio Geológico Colombiano (2015).	24
Figura 5.	Esquema de las partes de una Corriente Piroclástica de Densidad en la cual se observa el flujo piroclástico en la parte basal y la nube acompañante en la parte superior	26
Figura 6.	Esquema de un PDC con una altura de colapso H_c y un avance L_t . Si la línea de energía es más alta que un obstáculo, este será remontado. Modificada a partir de Sheridan (1980).	28
Figura 7.	Esquema del miembro 4.500 ybp de acuerdo a Calvache (1990)	30
Figura 8.	Columna eruptiva y caída piroclástica (lluvia de ceniza) del volcán Shinmoedake, 2011	31
Figura 9.	Ceniza volcánica (izquierda) y lapilli (derecha).....	32
Figura 10.	Trabajos de remoción de ceniza de la erupción de noviembre de 2005 del volcán Galeras	33
Figura 11.	Proyectiles balísticos generados por una erupción del volcán Parícutín en 1943	34
Figura 12.	Proyectiles balísticos erupción 2 de enero de 2010 del volcán Galeras.....	35
Figura 13.	Onda de choque volcánica. Erupción del 12 de junio de 2009 del volcán Sarychev.....	36
Figura 14.	Modelamiento de la onda de choque con el programa OpenFoam, corte este-oeste del volcán Galeras.....	37
Figura 15.	Lahar secundario de la Gasca en Quito, del 31 de enero de 2022.....	38
Figura 16.	Mapa de amenazas del volcán Galeras, 2015	42

Figura 17.	Modelamiento 3D de un PDC, después de 200 segundos del inicio de la erupción	44
Figura 18.	Tsunami generado por el sismo de magnitud 9 frente a las costas de Japón en 2011	45
Figura 19.	Lanzamiento de dos dados.....	49
Figura 20.	Esquema indicando un flujo amenazante que puede ocurrir desde la fuente O y que afecta tanto a A como a B con diferentes probabilidades.....	53
Figura 21.	Esquema ilustrando dos flujos con fuentes S1 y S2 que pudieran afectar a un mismo lugar A	55
Figura 22.	Representación de un terreno continuo	57
Figura 23.	Distribución de 8 puntos en un plano usando: a) MC, b) LHS y c) OLHS	60
Figura 24.	Probabilidades de inundación de 0.5 m de profundidad por lahar	62
Figura 25.	Ejemplos de distribuciones normal.....	66
Figura 26.	Descripción gráfica de Laharz	71
Figura 27.	Cuenca del río Barranco.....	80
Figura 28.	Probabilidades de excedencia de impacto para presiones dinámicas de a) 5 kPa, b) 10 kPa, c) 20 kPa y d) 30 kPa	85
Figura 29.	Probabilidad de excedencia de niveles de inundación por lahar de a) 25 cm, b) 50 cm, c) 1 metro, y d) 1.25 metros.....	86
Figura 30.	a) Área de inundación por lahar en la cuenca del río Barranco, indicando los lugares P1 y P2 analizados en el texto. b) Probabilidades de excedencia de presiones dinámicas extraídas de datos arrojados por Titan2F y curvas de ajuste...86	
Figura 31.	Rangos donde se asume pueden darse inicio los flujos piroclásticos.....	89
Figura 32.	Esquema de los 5 sectores donde se distribuye el muestreo OLHS de la localización de los lugares de arranque de los flujos	93
Figura 33.	Distribución probabilista bayesiana condicional de impacto por flujos piroclásticos en el área de influencia del volcán Galeras	94
Figura 34.	Esquema de líneas de energía con diferentes ángulos Hi/Li en cada pixel.....	95

Figura 35.	Distribución probabilista del alcance de la nube acompañante u oleadas piroclásticas por el método de las líneas de energía.....	96
Figura 36.	Envoltorio de probabilidades que muestran la probabilidad de impacto por PDC en el área de influencia del volcán Galeras	97
Figura 37.	Malla tridimensional de volúmenes finitos usada en el modelamiento de onda de choque por OpenFoam	99
Figura 38.	Distribución probabilista de la amenaza por onda de choque.....	100
Figura 39.	Registro del impacto de los proyectiles balísticos en las faldas del volcán Galeras ocasionando incendios	101
Figura 40.	12 ejemplos de direcciones de disparo de proyectiles balísticos	102
Figura 41.	Distribución de probabilidades	104
Figura 42.	Ubicación punto ERA-Interim de toma de datos para reanálisis	107
Figura 43.	Distribución probabilista de caída	109
Figura 44.	Distribución de probabilidades de excedencia de una carga de 1kg/m ³ de caída de ceniza en el municipio de La Florida, Nariño, Colombia.....	110
Figura 45.	Probabilidad acumulada de erupción del volcán Galeras en años después del último ciclo eruptivo	111
Figura 46.	Esquema de la vulnerabilidad de un elemento expuesto representando el nivel de daño para un nivel de intensidad hipotético.....	113
Figura 47.	Ubicación de los puntos P1 y P2 dentro de una hipotética zona de amenaza alta, en un análisis determinista de la amenaza	118
Figura 48.	Elementos estructurales expuestos dentro del municipio de La Florida	121
Figura 49.	Mapa del uso actual de suelo	122
Figura 50.	Mapa de coberturas	123
Figura 51.	Daño total de cubiertas por caída de ceniza para las tres tipologías	127
Figura 52.	Curvas de vulnerabilidad (daño) por caídas piroclásticas....	128

Figura 53.	Relación de daño (vulnerabilidad) ante un impacto de onda de choque para las Tipologías 1, 2 y 3.....	130
Figura 54.	Nivel de daño (vulnerabilidad) por impacto de lahares.....	131
Figura 55.	Daño esperado en función de la altura del depósito	132
Figura 56.	Curva de daño por caída de ceniza en pastizales	135
Figura 57.	Curvas hipotéticas de amenaza probabilista y vulnerabilidad para varios niveles de intensidad	140
Figura 58.	Curva hipotética de riesgo específico	142
Figura 59.	Amenaza, vulnerabilidad, riesgo específico y riesgo total	144
Figura 60.	Esquema del criterio ALARP (Tan Bajo Como Sea Razonablemente Alcanzable) para definir niveles de riesgo.....	148
Figura 61.	Curvas de amenaza, vulnerabilidad, riesgo específico y riesgo total	154
Figura 62.	Probabilidad acumulada de ocurrencia de una erupción de magnitud 2.6, capaz de generar PDC	156
Figura 63.	Riesgo probabilista para edificaciones del municipio de La Florida, Nariño, Colombia.....	160
Figura 64.	Riesgo probabilista para edificaciones y Servicios Ecosistémicos, cultivos y pastizales en el municipio de La Florida	164
Figura 65.	Riesgo total que incluye riesgo sobre ecosistemas, y cultivos, y estructuras	164

Lista de tablas

Tabla 1.	Rangos usados para las condiciones iniciales usadas por Titan2F.....	82
Tabla 2.	Volúmenes estimados para cada miembro o unidad, según Calvache (1990)	90
Tabla 3.	Rangos de parámetros de proyectiles balísticos volcán Galeras	102
Tabla 4.	Clasificación de las erupciones del volcán Galeras respecto a la la magnitud (4a) y altura de la columna (4b)	105
Tabla 5.	Pesos de las clasificaciones respecto a a) la magnitud y b) intensidad (altura de columna)	106
Tabla 6.	Tipologías estructurales presentes en el municipio de La Florida.....	124
Tabla 7.	Daño mínimo esperado ante el impacto de proyectiles balísticos de origen volcánico	125
Tabla 8.	Parámetros usados específicos para el municipio de La Florida,por tipología y tipo de análisis	127
Tabla 9.	Compendio de daño de la cubierta vegetal por caída de ceniza	134
Tabla 10.	Categorización del riesgo en base a MEM	155
Tabla 11.	Niveles de tolerabilidad para PDC y cada una de las tipologías clasificadas en el municipio de La Florida	158
Tabla 12.	Niveles de tolerabilidad para lahares	159
Tabla 13.	Umbral de probabilidad para bosques y cultivos en el municipio de La Florida y riesgo total en términos de pérdidas	163

Acerca de los autores

Gustavo Córdoba Guerrero

Ingeniero Civil de la Universidad de Nariño, Colombia. Master en Métodos Numéricos de la Universidad Politécnica de Catalunya, PhD en Ciencias de la Tierra de la Universidad de Bristol, Inglaterra. Actualmente es docente-investigador de la Universidad de Nariño y dirige en Grupo de Investigación en Amenazas, Riesgos y Medio Ambiente, GRAMA, de esa Universidad. Miembro investigador del Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - Sezione di Bologna, Boloña, Italia, proyecto Pianeta Dinámico.

Antonio Costa

Físico de la Universidad de Pisa, Italia. PhD en Modelamiento Físico para la Protección Ambiental de la Universidad de Boloña, Italia. Fue Director del Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - Sezione di Bologna, Boloña, Italia. Actualmente funge de Investigador Senior en el Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - Sezione di Bologna, Boloña, Italia.

Diana Marcela Rodriguez

Ingeniera Civil de la Universidad de Nariño, Colombia. Mg en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente de la Universidad de Manizales. Miembro investigador del Grupo de en Amenazas, Riesgos y Medio Ambiente, GRAMA, de la Universidad de Nariño.

Jean-Claude Thouret

Fue professor del departamento de Ciencias de la Tierra (Laboratorio Magmas y Volcanes) de la Universidad Clermont-Auvergne, de Francia. Profesor emérito de la UCA Université Clermont-Auvergne. Actualmente trabaja en estudios de amenazas y exposición al riesgo volcánico especialmente en Perú, Guatemala, Indonnesia. Se encuentra redactando el libro “Volcano Geomorphology: landforms, processes and hazards” a publicarse en 2024 por la editorial Springer Verlag de Alemania

Ruby Alicia Criollo

Ingeniera Civil de la Universidad de Nariño, Colombia. PhD en Ciencias de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Sao Paulo, Brazil. Profesora de la

Facultad de Ingeniería de la Universidad de Nariño. Investigadora del Grupo de Investigación en Riesgos, Amenazas y Medio Ambiente, GRAMA, de la Universidad de Nariño.

Alejandra Guerrero

Ingeniera de Sistemas de la Universidad de Nariño. MsC en Ingeniería Informática de la Universidad Politécnica de Catalunya. Candidato a Doctor en Ciencias de la Tierra de la Universidad de Barcelona. Investigadora del Grupo de en Amenazas, Riesgos y Medio Ambiente, GRAMA, de la Universidad de Nariño. Miembro investigador del Consejo Superior de Investigaciones (CSIC) de España.

êditorial

Universidad de **Nariño**

Fecha de publicación: 2024
San Juan de Pasto - Nariño - Colombia

El libro "Riesgo Volcánico Probabilista, con ejemplo de aplicación" ofrece un estudio exhaustivo de las complejidades involucradas en la evaluación y análisis del riesgo volcánico. Este libro se destaca por su enfoque meticuloso al análisis probabilístico de las amenazas volcánicas, la evaluación de la vulnerabilidad estructural y la cuantificación del riesgo, proporcionando información valiosa para profesionales e investigadores en el campo de la vulcanología y la gestión de riesgos. Cada capítulo concluye con un ejemplo aplicado a uno de los municipios ubicados dentro del área de influencia del volcán Galeras, en Colombia.

Una de las fortalezas del libro radica en su tratamiento del análisis probabilístico de las diversas amenazas de origen volcánico asociadas con el vulcanismo explosivo. A través del modelamiento computacional de casos hipotéticos, los autores logran un muestreo representativo de posibles escenarios, lo que permite estimar la probabilidad de impacto con cierta la magnitud o intensidad de interés en cualquier lugar o área determinada. La exposición de los elementos es inherente al cálculo de la amenaza, puesto que el modelamiento permite tener en cuenta factores como la ubicación o ángulo de exposición, para estimar el nivel de impacto.

La metodología de evaluación de la vulnerabilidad estructural presentada en el libro ofrece un enfoque sistemático para evaluar la vulnerabilidad de los edificios a las diferentes amenazas volcánicas. Al clasificar los elementos en tres tipos principales según sus características estructurales, los autores captan eficazmente la diversa gama de tipos de construcción y su susceptibilidad a sufrir daños. A través de un análisis detallado del nivel de daño, el libro proporciona a los lectores una comprensión clara de los riesgos potenciales que enfrentan los elementos expuestos.

La metodología de cálculo de riesgos presentada en el libro es sólida y permite la cuantificación del riesgo para cada amenaza y cada elemento expuesto. Al realizar un análisis integral de costos y beneficios, los autores proporcionan un marco para clasificar el riesgo como no tolerable, tolerable o aceptable, lo que facilita la toma de decisiones informadas y la priorización de riesgos.

En general, la "Evaluación probabilística del riesgo volcánico" es un recurso valioso para profesionales e investigadores que buscan mejorar su comprensión de la gestión del riesgo volcánico. Su cobertura integral, metodologías rigurosas y conocimientos prácticos lo convierten en una lectura esencial para quienes tengan interés en el estudio y mitigación de los impactos de las amenazas de origen volcánico.

ISBN: 978-628-7771-04-8



9 786287 771048



Universidad de Nariño
FUNDADA EN 1964

ai

Universidad de Nariño
ACREDITADA EN BETA CALIDAD
RESOLUCIÓN MEN 00022 - FEBRO 11 DE 2023

120 años

Universidad de Nariño

editorial
Universidad de Nariño