

Número Especial:
Sociedad y Volcanología (SOVOL)

IMPLICACIONES DEL ENFOQUE METODOLÓGICO DE EVALUACIÓN DE LA AMENAZA Y EL RIESGO DE DESASTRES POR ERUPCIONES DEL VOLCÁN GALERAS, COLOMBIA

Omar-Darío Cardona A.^{1,2*} y Gabriel Andrés Bernal G.^{2,3}

RESUMEN

Este artículo presenta un resumen de los estudios detallados del 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, que se realizaron con un enfoque probabilista, teniendo en cuenta el modelamiento de la vulnerabilidad de las comunidades expuestas. La utilización de este enfoque permitió obtener resultados que difieren de manera significativa de las evaluaciones y las decisiones que se habían tomado previamente, utilizando un enfoque determinista, que congelaron el desarrollo de la zona por 18 años. Dichas decisiones técnicas, jurídicas y de ordenamiento territorial, como el reasentamiento humano, que ha sido objeto del rechazo de las comunidades y de los actores locales, han tenido serias implicaciones sociales y económicas -que ahora han ameritado una cuidadosa reflexión y catarsis-, revelando la insospechada relevancia que tiene enfoque metodológico usado para la evaluación del riesgo y del cual se derivan las decisiones en materia de gestión del riesgo en una región propensa a amenazas, como lo es el área de influencia del volcán Galeras en Colombia.

PALABRAS CLAVES

Mapas de amenaza; Riesgo volcánico; Ordenamiento territorial; Volcán Galeras; Colombia

IMPLICATIONS OF THE METHODOLOGICAL APPROACH FOR HAZARD AND DISASTER RISK ASSESSMENT DUE TO ERUPTIONS OF THE GALERAS VOLCANO, COLOMBIA

ABSTRACT

This article presents a summary of the detailed studies of the risk due to pyroclastic density currents, mudflows, volcanic debris flows and pyroclastic falls in the municipalities within the influence area of the Galeras volcano. These studies were conducted with a probabilistic approach, considering the modeling of the vulnerability of the exposed communities. The use of this approach allowed obtaining results that significantly differ from the previous evaluations and decisions made previously, using a deterministic approach, which had frozen the development of the area for 18 years. Such technical, legal, and territorial planning decisions, including human resettlement, have faced rejection from local communities and stakeholders and have had serious social and economic implications, -that have now merited careful reflection and catharsis. This reveals the unexpected relevance of the methodological approach used for risk assessment, and the subsequent risk management decisions in a hazard-prone region, such as the influence area of the Galeras volcano in Colombia.

KEYWORDS

Hazard maps; Volcanic risk; Land-use planning; Galeras volcano; Colombia

1. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia.
2. INGENIAR: Risk Intelligence, Bogotá D.C., Colombia.
3. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia.

*Autor de correspondencia:
odcardonaa@unal.edu.co

DOI:

<https://doi.org/10.55467/reder.v8i1.137>

RECIBIDO

19 de septiembre 2022

ACEPTADO

10 julio de 2023

PUBLICADO

1 de enero de 2024

Formato cita

Recomendada (APA):

Cardona A., O.D. & Bernal G., G.A. (2024). Implicaciones del Enfoque Metodológico de Evaluación de la Amenaza y el Riesgo de Desastres por Erupciones del Volcán Galeras, Colombia. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 8(1), 12-36. <https://doi.org/10.55467/reder.v8i1.137>



Todos los artículos publicados en REDER siguen una política de Acceso Abierto y se respaldan en una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres (REDER)

INTRODUCCIÓN

Galeras es el volcán más activo de Colombia (Freitas, et al., 2021). Es un estratovolcán predominantemente andesítico, con una gran caldera en forma de herradura. El complejo volcánico Galeras ha estado activo durante más de un millón de años, como se evidencia en los depósitos de ceniza y flujos piroclásticos alrededor del edificio volcánico resultado de grandes erupciones explosivas ocurridas en el Pleistoceno tardío y desde mediados del Holoceno. El cono central formado alrededor del cráter del Galeras es ligeramente más bajo que el borde del anfiteatro (caldera), en donde se han presentado, en tiempos históricos, numerosos episodios eruptivos de pequeños a moderados.

Considerando la actividad de este volcán a partir de su última erupción magmática, el 21 de noviembre de 2004, debido a la proximidad de un episodio mayor y de acuerdo con la legislación existente, casi un año después se declaró la *situación de desastre* para los municipios de Pasto, Nariño y La Florida, en el departamento de Nariño (Figuras 3 y 8-13). Aunque dicho evento no se presentó, se formuló y puso en marcha el plan de acción específico que dicha declaración exigía; que permitía aplicar un régimen especial de disposiciones excepcionales en materia de contratos, control fiscal de recursos, adquisición y expropiación, ocupación temporal y demolición de inmuebles, entre otras, para la rehabilitación, reconstrucción y desarrollo. Mediante este proceso se promovieron intervenciones, entre las cuales se señalaba la necesidad de un plan de *reasentamiento* de los habitantes de la zona de amenaza volcánica alta; de acuerdo con los estudios de amenaza realizados antes y después de dicha situación. Otros instrumentos, como el plan departamental de contingencia por erupción del volcán Galeras, o de entidades del orden nacional, respaldaron este propósito, basados en el mapa de amenaza existente, el cual se asimiló como instrumento para determinar el riesgo en el área. Para algunos estas disposiciones significaron beneficios, pero otros las rechazaron con determinación; en particular las comunidades indígenas y de menores recursos.

En 2012, en la actualización de la política de gestión del riesgo del país se dispuso el *retorno a la normalidad* de esta zona del país. No obstante, debido a una *acción popular* interpuesta, mediante la sentencia T-269-15 de la Corte Constitucional se reafirmó la declaratoria de desastre sobre la zona de influencia del volcán, habilitando mecanismos jurídicos especiales de atención, coordinación y asignación presupuestaria de acuerdo con la nueva legislación que actualizó la política en 2012 (Ley 1523). Esto significó la obligación del Estado de seguir el proceso que se había interrumpido y continuar con el plan que estaba en marcha. Además, en cumplimiento con la sentencia, la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), formuló el Plan Integral de Gestión del Riesgo del Volcán Galeras (PIGRVG) que en el componente de conocimiento del riesgo incluyó diferentes líneas de acción para llevar a cabo *estudios detallados de riesgo por los diferentes productos volcánicos* y en las diferentes zonas de amenaza volcánica; definidas por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) en 2015 en la tercera actualización del mapa de amenaza del Galeras. Adicionalmente, en 2020 el Juez Promiscuo Municipal de La Florida, en seguimiento a la sentencia de la Corte, mediante dos actos administrativos ordenó a la UNGRD dos acciones. Por una parte, incluir una línea de acción en torno a la *evaluación del riesgo* en la Zona de Amenaza Volcánica Alta (ZAVA), con el fin de proceder o no con el reasentamiento de las familias que la habitan; incluyendo el riesgo como determinante en los respectivos planes de ordenamiento territorial de los municipios. Y, por otra parte, asumir el financiamiento de estos *estudios detallados del riesgo*.

Lo anterior derivó en la *Elaboración de estudios detallados de riesgo del Volcán Galeras 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*, los cuales se llevaron a cabo, a diferencia de lo que se había hecho previamente (SGC, 2015), con un enfoque probabilista del riesgo, teniendo en cuenta el modelo la exposición y vulnerabilidad de las comunidades. La utilización de este enfoque, solicitado por los actores locales y en particular por *movimiento social por la dignidad del territorio Galeras*, y los líderes comunitarios que se autoconstituyeron en veeduría social del proceso, permitió obtener resultados que difieren de manera significativa de las evaluaciones y las decisiones que se habían tomado previamente y que *congelaron* el desarrollo de la zona por 18 años. Se presenta a continuación una síntesis del enfoque metodológico del modelo de riesgo probabilista utilizado y las implicaciones de sus resultados; acogidos por la comunidad y los diferentes actores locales, institucionales y del sector privado en el área de influencia del volcán Galeras (Cardona et al. 2022a,b,c,d,e)¹.

1. Los trabajos en extenso de este marco probabilista se pueden encontrar en las cinco referencias arriba mencionadas y se puede acceder a todo el estudio que incluye los informes finales, el intercambio con los expertos de la supervisión técnica, los mapas en: <https://drv.ms/u/s!AvYNdx4t4FZnK4JlgJwLF3cWl3GxNQ?e=BP3n63> En este manuscrito se quieren ilustrar los puntos principales con fines de llegar a las reflexiones finales.

ENFOQUE PROBABILISTA DE EVALUACIÓN

La modelación probabilista del riesgo volcánico consiste en determinar las posibles consecuencias, y sus probabilidades de ocurrencia, que un conjunto de elementos expuestos puede sufrir, por cuenta de la ocurrencia de erupciones. Una buena modelación del riesgo es fundamental en la construcción de un proceso de desarrollo sostenible y resiliente, considerando los *trade-offs* de los posibles perjuicios y beneficios. En otras palabras, dicho proceso solo puede ser debidamente orientado, si se cuenta con una modelación de riesgo de desastres suficientemente robusta, en términos de la verosimilitud de daños o pérdidas, que facilite que las decisiones se puedan tomar con un apropiado soporte técnico, sin arbitrariedad y más allá de toda duda razonable. Una apropiada modelación del riesgo debe cumplir con la siguiente lista (no exhaustiva) de características:

- » *Multiamenaza*. Esta característica es fundamental, particularmente en riesgo volcánico, pues se requiere incorporar modelos que den cuenta de la dinámica propia de los diferentes productos volcánicos² y de forma acoplada entre ellos, de tal manera que la visión del riesgo sea completa y no solamente asociada a uno de los fenómenos derivados de la actividad del volcán. Esta característica plantea, adicionalmente, la necesidad de desarrollar diferentes modelos para cada combinación de amenaza-exposición-vulnerabilidad. Además, es necesario expresar el riesgo de la misma manera, de forma que los impactos de las diferentes amenazas (o productos volcánicos) sean conmensurables y aditivos.
- » *Basado en la frecuencia de los eventos*. La altísima incertidumbre inherente a la actividad volcánica genera la necesidad de contar con un marco conceptual y matemático que permita incorporar, de forma razonable, la incertidumbre en el resultado del riesgo. El enfoque de evaluación del riesgo catastrófico aplicado en este estudio, el cual está basado en los preceptos fundamentales de la teoría de ruina, permite caracterizar los daños y pérdidas potenciales causados por la actividad volcánica, por medio de distribuciones de probabilidad. De esta manera, los resultados se expresan como métricas probabilistas, dando una orientación integrada, completa y transparente al tomador de decisiones sobre el riesgo que enfrenta, considerando la vulnerabilidad de los elementos expuestos.
- » *Estocástico*. Significa que el modelo debe basarse tanto en la física del fenómeno volcánico como en la aleatoriedad de la ocurrencia de erupciones. Esto implica que se necesitan, por lo general, miles de simulaciones de eventos eruptivos para construir un conjunto razonablemente exhaustivo de los posibles daños o pérdidas que pueden sufrir los elementos expuestos, considerando su vulnerabilidad, y, por lo tanto, las consecuencias que se derivan desde el punto de vista económico, social, ambiental.
- » *Orientado a la toma de decisiones*. Más allá de los aspectos físicos y matemáticos que soportan la modelación, el modelo mismo debe estar orientado a un propósito. Una correcta orientación, en la cual los resultados realmente informen y guíen la toma de decisiones permite involucrar a las partes interesadas en el problema del riesgo y proporciona una información enfocada a responder a sus necesidades. El modelo de riesgo debe tener en cuenta entonces la magnitud de los impactos previstos y su probabilidad de ocurrencia, pero lo más importante es que permita probar la eficacia de las estrategias de gestión del riesgo que puedan ser factibles de acuerdo con el contexto local, la percepción y el grado de aversión al riesgo de las comunidades y de los tomadores de decisiones.

El procedimiento de modelación probabilista del riesgo se ilustra en la Figura 1. Este enfoque fue el exigido por la UNGRD para la realización del estudio que aquí se describe y contrasta con el utilizado previamente por el SGC, que para evaluar la amenaza volcánica ha utilizado un enfoque determinista (SGC, 2015). El SGC (antes INGEOMINAS) ha elaborado, desde la reactivación del volcán a finales de los años 80, varias versiones de mapas de amenaza. Estos mapas han sido objeto de polémicas con la dirigencia local y las comunidades (Cardona 1996, 1997) y no han facilitado una evaluación robusta del riesgo con fines de ordenamiento territorial.

2. En este estudio, la denominación *producto volcánico* se refiere al proceso mediante el cual el material volcánico expulsado durante una erupción se deposita en su ubicación final. No corresponde a la disposición final del material.

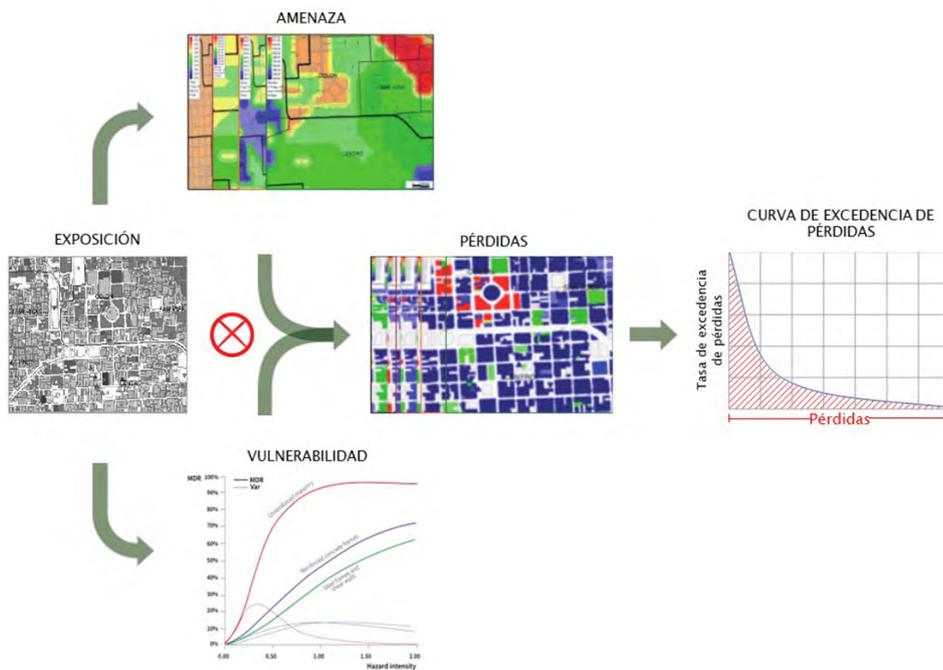


Figura 1. Componentes de la modelación del riesgo y su interrelación
Fuente: Cardona et al. (2022a).

La modelación probabilista del riesgo en este estudio se enfocó en los portafolios de edificaciones, infraestructura, cultivos y servicios ecosistémicos expuestos en el área de influencia del volcán Galeras, lo que incluyó los municipios de Ancuyá, Consacá, Guaitarilla, Imués, La Florida, Linares, Nariño, Pasto, Providencia, Samaniego, Sandoná, Santacruz, Tangua, Túquerres y Yacuanquer, localizados al sur de Colombia. Se consideraron como fenómenos volcánicos las corrientes de densidad piroclástica, los flujos de lodos y escombros, la caída de piroclastos transportados por el viento y los proyectiles balísticos, y se evaluó el riesgo para todas las combinaciones de portafolio-fenómeno volcánico, con excepción de la combinación servicio ecosistémico-caída de piroclastos, cuya complejidad excedió el alcance del estudio. El propósito principal fue aportar nuevos insumos para el ordenamiento territorial.

MODELO DE LA AMENAZA VOLCÁNICA

El modelo de amenaza implementado bajo este enfoque es un proceso de simulación totalmente acoplado entre fenómenos volcánicos; es decir, para cada evento eruptivo se desarrollan sobre el territorio los fenómenos volcánicos correspondientes. La Figura 2 presenta el flujograma del modelo de amenaza implementado. Se inicia con la simulación de los Eventos de Emisión para Modelación (EEM) a partir de sus distribuciones de probabilidad de magnitud y tiempo entre eventos. Para cada EEM se simula a su vez un perfil de viento, generado estocásticamente desde la información histórica disponible. Luego se simula la colección de pulsos eruptivos, y para cada uno se determina su régimen de colapso. La modelación de los eventos corresponde a la realizada por Cardona et al. (2022a,b) en la cual, a partir de la cantidad de material expulsado y el régimen de colapso, se distribuyen los tres primeros productos volcánicos: *caída de piroclastos*, *corrientes de densidad piroclástica* y *proyectiles balísticos*, haciendo uso de los modelos de distribución indicados en Cardona et al. (2022a,b). Este proceso se repite para todos los pulsos y para diferentes perfiles de viento simulados. De esta manera se totaliza el material sólido depositado por el evento simulado. En seguida se simula una colección de tormentas sobre el área de estudio, y para cada una de ellas se calcula el caudal líquido aportado por cada una de las 17 cuencas del edificio volcánico del Galeras. A partir de este caudal y el material sólido depositado por los eventos, se transita el caudal de mezcla en el modelo de *flujos de lodos y escombros volcánicos*. Este proceso se repite hasta completar la totalidad de tormentas simuladas. Finalmente, todos los pasos son ejecutados de nuevo para un nuevo EEM de diferente valor de magnitud, y así sucesivamente hasta generar una colección suficientemente amplia de eventos simulados para cada producto volcánico. Se asume que la colección es suficientemente amplia, al considerar las variaciones en las tres variables fundamentales que gobiernan la ocurrencia de los eventos simulados: magnitud de la

erupción, perfil de viento y campo de lluvia. En la práctica no es posible verificar que se cumpla la condición de exhaustividad requerida matemáticamente para la colección de eventos simulados. No obstante, dado que se recorren las variables fundamentales mencionadas de la forma más completa posible, se asume que dicha colección de eventos resultantes es suficientemente amplia para los propósitos del estudio. Todas las simulaciones de eventos eruptivos fueron realizadas en el software VHASt (Bernal, 2010). Las simulaciones estocásticas de perfiles de viento y campos de lluvia fueron realizadas en el software DroughtPro (Bernal et al., 2017).

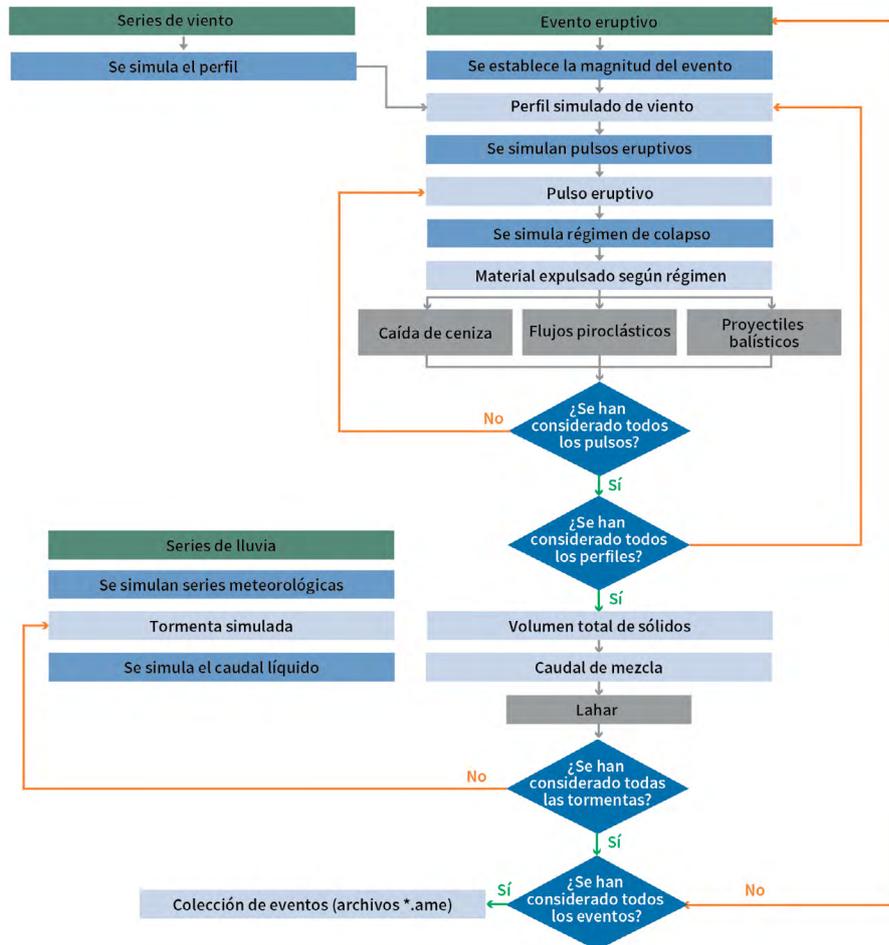


Figura 2. Flujograma del modelo de amenaza volcánica del Galeras
Fuente: Autores, 2024.

Frecuencia anual de ocurrencia

Un componente fundamental en la modelación de la amenaza, para efectos de evaluar el riesgo, es la asignación de una frecuencia anual de ocurrencia a cada evento simulado, que es la tasa de ocurrencia de un evento específico (i.e., la probabilidad de ocurrencia en el tiempo), y se compone de las tasas de ocurrencia de todos los aspectos que contribuyen a la manifestación de dicho evento. Por ejemplo, un evento de caída piroclástica depende esencialmente de la posibilidad de que ocurra un EEM con determinada magnitud en el volcán y que, a su vez, el campo de viento se manifieste de cierta manera. Por su parte, un evento de flujo de lodo y escombros depende, adicionalmente, de la manifestación de una lluvia fuerte en una cuenca en la cual se haya depositado el material sólido. La intersección de estos fenómenos causales determina que tan probable (i.e., qué tan frecuente) es un evento cualquiera. La asignación de las frecuencias de ocurrencia de los eventos se realiza con base a las tres variables fundamentales que controlan la amenaza en esta modelación: magnitud de los eventos, perfil de viento y campo de lluvia. Ahora bien, aparecen en la formulación términos adicionales debido a que debe cuantificarse la frecuencia de ocurrencia de las erupciones en el volcán y la probabilidad de estar o no en un periodo de actividad. De esta manera, los aspectos a considerar en la cuantificación de las frecuencias, listados en un orden lógico (debido a que existe cierta causalidad entre los aspectos considerados) son:

1. Probabilidad de estar o no en un periodo activo
2. Frecuencia de ocurrencia de erupciones en un periodo activo
3. Probabilidad de ocurrencia de la magnitud de la erupción
4. Probabilidad de ocurrencia de un par velocidad-dirección (perfil de viento)
5. Probabilidad de ocurrencia de volumen de precipitación diario (campo de lluvia, que aplica únicamente para flujos de lodo y escombros).

En términos matemáticos, la frecuencia anual de ocurrencia de un evento cualquiera se determina mediante la multiplicación de los términos listados anteriormente.

Catálogo de eventos simulados

Como resultado de la aplicación del modelo resumido en la Figura 2, se obtuvieron 12,972 eventos de caída de piroclastos, 3,061 eventos de corrientes de densidad piroclástica (concentradas y diluidas acopladas), se simularon 728,589,692 proyectiles balísticos con resultados agrupados en 9,936 eventos, y 117,119 eventos de flujo de lodo y escombros. La colección de eventos generada constituye el resultado del modelo de amenaza, debido a que dicha colección es el insumo fundamental para la evaluación del riesgo. La totalidad de eventos generados por cada producto volcánico se presenta en la Tabla 1, la cual incluye también los vínculos que permiten observar de forma rápida de la totalidad de los eventos simulados, dada la muy amplia cantidad de información.

Producto volcánico	Nº de eventos	Vínculo video
Caída de piroclastos	12,972	https://1drv.ms/v/s!AvYNdx4t4FZnk4JvY9icUjdDg0d3MQ?e=A5KdLU
Corrientes de densidad piroclástica	3,061	https://1drv.ms/v/s!AvYNdx4t4FZnk4JwEH3FKILglewMHg?e=GtlatF
Proyectiles balísticos	9,936	https://1drv.ms/v/s!AvYNdx4t4FZnk4Js94IRnaNSU9kDvQ?e=dU61y9
Flujos de lodo y escombros	117,119	https://1drv.ms/v/s!AvYNdx4t4FZnk4Ju6wkgZP0ZRyLKbg?e=1I9LHU

Tabla 1. Resumen de resultados de la evaluación de la amenaza en el volcán Galeras
Fuente: Cardona et al. (2022c).

Mapas de amenaza uniforme

Se generaron mapas de amenaza uniforme a partir de la totalización de los aportes de todos los eventos simulados de un mismo fenómeno volcánico, ponderados por su frecuencia anual de ocurrencia, mediante el uso del teorema de la probabilidad total para la cuantificación de tasas anuales de excedencia de la intensidad de los fenómenos modelados. De esta manera se construyeron mapas de amenaza uniforme, que reciben ese nombre debido a que, en todas las ubicaciones la intensidad presentada tiene siempre el mismo periodo de retorno. Cabe mencionar que estos mapas son representativos de una condición integrada de amenaza, en la cual están aportando la totalidad de los eventos que componen el conjunto, lo cual implica que no existe ningún evento que sea capaz de reproducir alguno de los mapas de amenaza uniforme. La Figura 3 ilustra uno de los mapas de amenaza uniforme para 1000 años de periodo de retorno (la totalidad de mapas generados se encuentran en Cardona et al., 2022b).

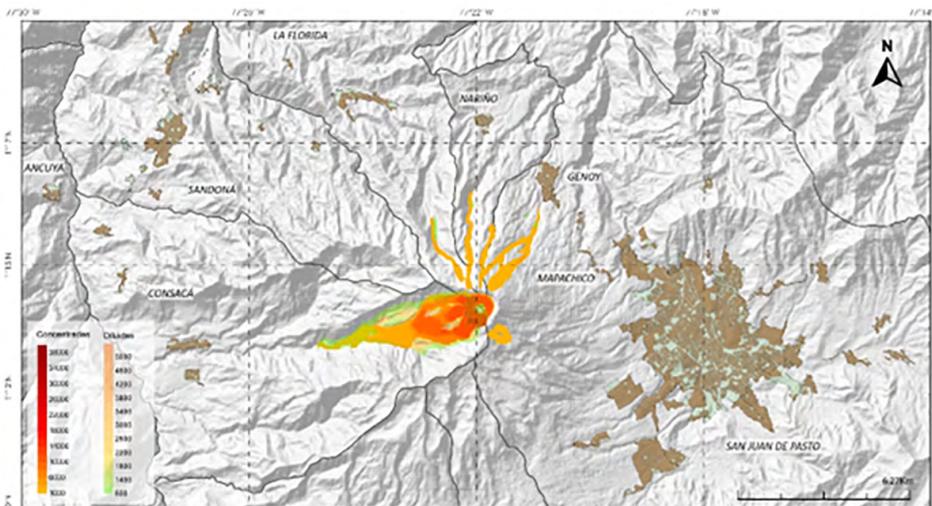


Figura 3. Mapa de amenaza uniforme por corrientes de densidad piroclástica concentradas y diluidas
Fuente: Cardona et al. (2022b).

Nota: 1000 años de periodo de retorno. Las escalas de color indican presión dinámica en Pa.

DESCRIPCIÓN DE LA EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD

Los elementos expuestos son un insumo fundamental dentro de la evaluación probabilista de riesgo debido a que comprenden los objetos sobre los cuales se evalúan las pérdidas o, en otras palabras, de los cuales procede la pérdida, debido al simple hecho de estar expuestos a una amenaza y ser susceptibles de sufrir un daño. En términos matemáticos, los elementos expuestos proveen individualmente el valor absoluto máximo posible de la pérdida en su ubicación, así como los sumandos de la función de densidad de probabilidad de la pérdida de un escenario de amenaza (Cardona et al., 2022a,c). Es decir, son el elemento integrador de la amenaza y la vulnerabilidad en su ubicación, así como el elemento integrador de las pérdidas totales para cada escenario o evento. Su adecuada caracterización es de gran importancia para una estimación rigurosa de las pérdidas.

Los elementos expuestos tienen implícita la responsabilidad sobre las pérdidas en la medida que se establece para quién son relevantes dichas pérdidas. Si, por ejemplo, los elementos expuestos corresponden a centros públicos de salud, entonces, las pérdidas causadas por los fenómenos volcánicos tienen relevancia e implican una responsabilidad para la institución de salud pública que sufre los efectos. Si los elementos expuestos son viviendas de estratos socioeconómicos bajos, las pérdidas pueden considerarse una responsabilidad fiscal del Estado, dada la imposibilidad de los propietarios de dichas viviendas privadas de asumir la situación de desastre. Por esta razón, es importante determinar la responsabilidad sobre las pérdidas directamente en la definición de los elementos expuestos. A esto se debe la agrupación de elementos expuestos en *portafolios*, los cuales permiten preestablecer, de manera general, dicha responsabilidad. Es posible entonces contar dentro de una misma evaluación del riesgo con portafolios, por ejemplo, de centros públicos de salud, centros educativos, viviendas, edificaciones institucionales, infraestructura vial, infraestructura de comunicaciones, etc. En síntesis, se definieron tantos portafolios como posibles afectados por las pérdidas o responsables de reducir el riesgo.

Como parte de los insumos para la evaluación del riesgo volcánico en los municipios del área de influencia del volcán Galeras, se generaron modelos de exposición para cuatro grupos principales de elementos expuestos: *edificaciones*, *infraestructura*, *cultivos* y *servicios ecosistémicos*. Cada grupo se subdividió en diferentes portafolios compuestos sucesivamente por tipos de elementos (o sub-portafolios), de los tamaños y valores totales indicados en la Tabla 2. Cada uno de los elementos que componen el modelo es caracterizado por medio de una ubicación geográfica, un valor económico expuesto y una clasificación o código que se asocia a la función de vulnerabilidad que se le asocia. El modelo de exposición generado refleja entonces el estado de los activos físicos de los municipios objeto de estudio y los medios de vida de sus pobladores, sobre los cuales se evalúa la posibilidad de daño o pérdida mediante la modelación en conjunto de la amenaza y la vulnerabilidad, para cuantificar el riesgo en términos de pérdidas económicas y sus distribuciones de probabilidad.

Grupo	Portafolio	Sub-portafolio	Tamaño	Valor expuesto (Millones COP)
Edificaciones	Residencial (viviendas)		198,953 edificaciones	8,338,248
		Centros de salud	176 edificaciones	74,394
	Edificaciones esenciales	Centros educativos	613 edificaciones	143,812
		Edificaciones institucionales	1,218 edificaciones	275,959
	Comercial		2,754 edificaciones	766,062
	Industrial		91 edificaciones	74,215
	Albergues		9 edificaciones	77,832
Infraestructura	Aeropuertos	Aeropuertos	1 terminal, 1 pista	64,161
		Helipuertos	1 helipuerto	589

(Continúa en la siguiente página)

(Continuación)

Grupo	Portafolio	Sub-portafolio	Tamaño	Valor expuesto (Millones COP)	
Infraestructura	Acueducto y alcantarillado	Bocatomas	24 bocatomas	31,500	
		Tuberías acueducto	112 km de tubería	78,674	
		Box culvert	1 box culvert	37	
		Tanques	50 tanques	2,951	
		Plantas de Tratamiento de Agua Potable	8 PTAP	127,416	
		Otros elementos*	365 elementos	2,037	
	Comunicaciones	Antenas en torres	2,094 antenas	366,099	
		Antenas en edificaciones	336 antenas	21,903	
	Estaciones de servicio		77 estaciones	252,786	
	Transmisión eléctrica	Media tensión (13.8 y 34.5 kV)		1260 km	61,144
		Alta tensión (115 kV y 220kV)		253.6 km	129,232
		Subestaciones		8 subestaciones	11,119
		Pequeñas Centrales Hidroeléctricas		3 PCH	10,543
	Vías	Vías		4,259 km de vía	1,692,389
		Puentes		102 puentes	109,953
		Túneles		1 túnel	123,522
	Cultivos	Café		8,104 ha	131,950
		Caña panelera		11,696 ha	1,783,512
Fique			2,156 ha	9,494	
Plátano			4,542 ha	72,623	
Frijol			5,033 ha	56,709	
Maíz			4,275 ha	10,316	
Papa			18,677 ha	339,306	
Servicios ecosistémicos	Agroecosistemas		176,579 ha	6,901,186	
	Arbustales		16,431 ha	14,847	
	Bosques		54,868 ha	4,372,474	
	Herbazales		2,600 ha	42,173	
	Páramos		49,205 ha	1,755,902	
	Subxerofitias		2,932 ha	52,612	
	Transicional		17,962 ha	1,068,428	
	Vegetación secundaria		20,660 ha	370,709	

Tabla 2. Resumen de los portafolios de exposición incluidos para la modelación del riesgo

Fuente: Cardona et al. (2022c).

Nota: *Cajillas, Cámaras, Desarenadores, Filtros, Llaves, Macromedidores, Válvulas y Vertederos

El modelo de exposición de edificaciones generado es muy extenso. La Figura 4 muestra únicamente el componente de georreferenciación, con el objetivo de ilustrar la dimensión de la base de exposición creada para el portafolio de construcciones (compuesta por 203,721 elementos).

En el modelo de exposición de infraestructura se incluyeron los sectores transporte, vías, comunicaciones, energía y agua, así como las estaciones de servicio y los albergues. En la modelación del riesgo para el sector agrícola los elementos expuestos corresponden a unidades de tierra cultivada, las cuales tienen una ubicación espacial, un área sembrada, un tipo de suelo y dentro de las cuales se producen uno o más tipos de cultivos, los cuales a su vez tienen una

estacionalidad, fenología, rendimiento y valor de producción. Las unidades ecosistémicas tienen atributos comunes como el clima, geomorfología, suelos, cobertura de la tierra y biota. Estos factores explican la distribución y diferenciación de las unidades de ecosistemas en terrestres o acuáticas, en transformadas o no transformadas, húmedas o secas, entre otras características más específicas de cada ecosistema.

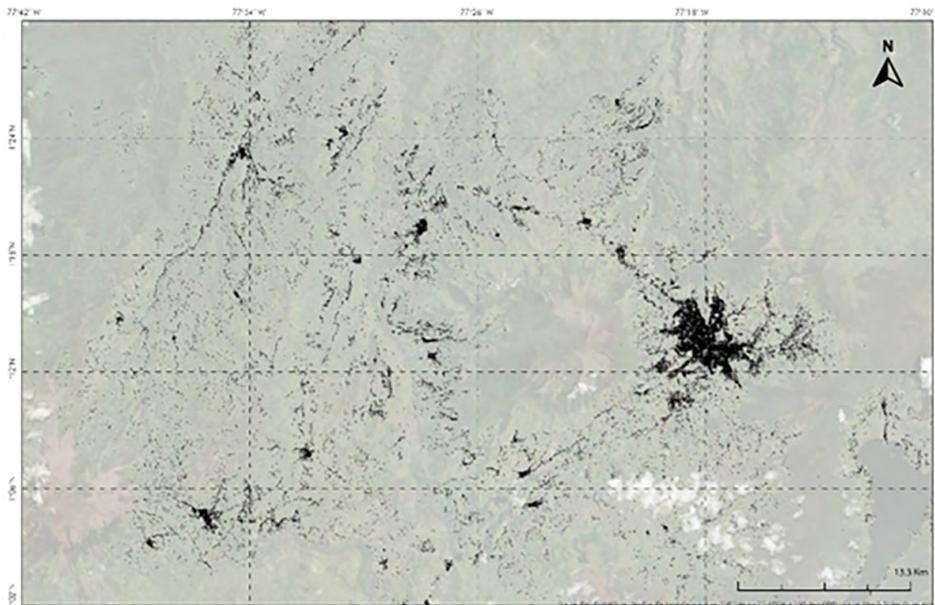


Figura 4. Mapa de ubicación geográfica de los 203,721 polígonos que conforman el componente de georreferenciación del portafolio de edificaciones alrededor del volcán Galeras
Fuente: Autores, 2024.

Para la modelación del riesgo volcánico se emplearon diferentes tipos de modelos de vulnerabilidad. Como resumen general, la Tabla 3 muestra el tipo de modelo empleado en cada caso. En algunos casos, las funciones de vulnerabilidad se obtuvieron de funciones de fragilidad (mayores detalles en Cardona et al., 2022d).

Producto / Grupo	Caída de piroclastos	Corrientes de densidad piroclástica	Proyectiles balísticos	Flujos de lodo y escombros
Edificaciones	Funciones de vulnerabilidad	Funciones de vulnerabilidad	Funciones de vulnerabilidad	Funciones de vulnerabilidad
Infraestructura	Funciones de vulnerabilidad	Vulnerabilidad binaria	Vulnerabilidad binaria	Vulnerabilidad binaria
Cultivos	Modelo especial (Rendimientos)	Vulnerabilidad binaria	Vulnerabilidad binaria	Vulnerabilidad binaria
Servicios ecosistémicos	(No calculado)	Vulnerabilidad binaria	Vulnerabilidad binaria	(No calculado)

Tabla 3. Tipos de modelo de vulnerabilidad empleados según el producto volcánico y el grupo de exposición
Fuente: Autores, 2024.

Vulnerabilidad de las edificaciones

La vulnerabilidad de edificaciones se modeló por medio de funciones de vulnerabilidad. Adicionalmente, se modeló de forma binaria para ciertas edificaciones en el caso de amenaza por flujos de lodos y escombros. Para el caso de caída de piroclastos, la literatura especializada se centra en la definición de funciones de fragilidad al colapso, indexadas a la carga. Son pocos los trabajos que usan directamente el espesor. Se destacan los trabajos de Pomonis et al. (1999), Spence et al. (2005), Zuccaro et al. (2008), Corporación OSSO (2009), Jenkins et al. (2014), Blong et al. (2017) y Torres-Corredor et al. (2017). Todos definen funciones de fragilidad al colapso de cubiertas, indexadas a la carga por depósito de material, con excepción de Pomonis et al. (1999) que se indexa al espesor (asumiendo densidades húmedas y secas de ceniza) y Torres-Corredor et al. (2017), el cual también se indexa al espesor y es el único que define, adicionalmente, funciones

de vulnerabilidad. Se optó por emplear este último trabajo por ser el único directamente asociado a los tipos constructivos del área de influencia del volcán Galeras. Dicho trabajo considera tres tipos de cubiertas, tres estados de construcción, de acuerdo con la edad y condición de mantenimiento de la edificación, tres rangos de distancia o luces entre apoyos para las cerchas o elementos de la estructura de cubierta y la altura de las edificaciones. La Figura 5 a modo de ejemplo las funciones de vulnerabilidad que se derivan.

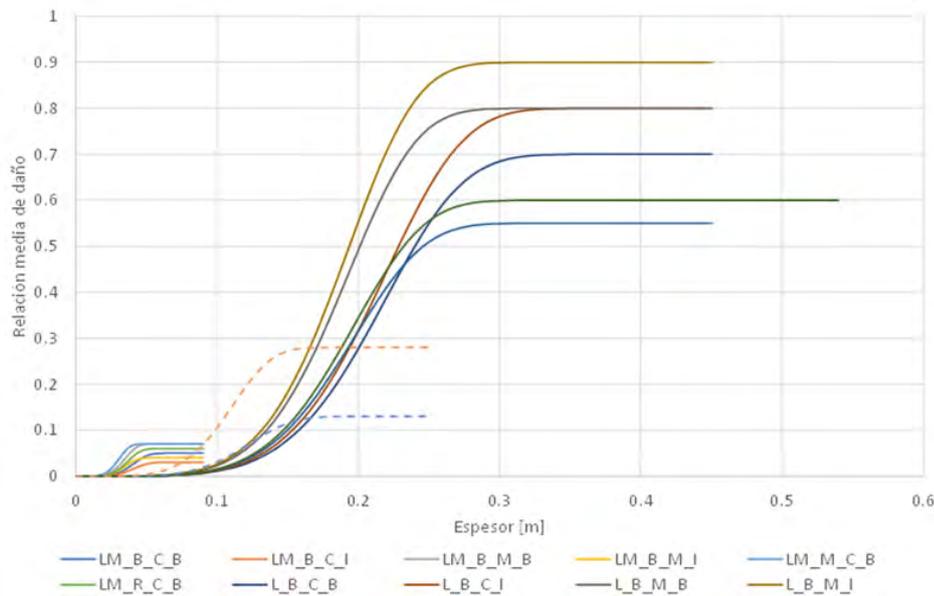


Figura 5. Funciones de vulnerabilidad empleadas ante caída de piroclastos para las tipologías de edificaciones
Fuente: Autores, 2024.

En el caso de los proyectiles balísticos, la medida de intensidad en el modelo de amenaza es la energía de impacto. Desde el trabajo pionero de Blong (1984), es ampliamente reconocido que la energía de impacto es la mejor medida de intensidad para determinar la capacidad de los proyectiles de perforar diferentes materiales de revestimiento en edificaciones. No obstante, la literatura al respecto es muy escasa, y en general se refiere de manera muy somera al problema de fragilidad, definiendo intervalos de energías de perforación y reportando daños observados en eventos históricos. Dentro de esta literatura se destacan los trabajos de Blong (1984), Pomonis et al. (1999), Jenkins et al. (2014) y Biass et al. (2016). Sin embargo, es ampliamente reconocido que el trabajo en la definición de funciones de fragilidad o vulnerabilidad ante proyectiles está todavía en una fase de desarrollo inicial a nivel del estado del conocimiento. El único trabajo existente a la fecha en el cual se proponen funciones de fragilidad al impacto de proyectiles es el publicado por Williams et al. (2017). Estos autores desarrollaron funciones de fragilidad indexadas a la energía balística de impacto (energía cinética al momento del impacto) y la probabilidad de igualar o exceder un nivel de daño para cuatro tipos de materiales de revestimiento, a partir de ensayos de laboratorio complementados con los umbrales de energía de impacto definidos por Blong (1984) y otros datos de erupciones volcánicas con proyectiles balísticos registrados en la literatura.

Para el caso de flujos de lodos y escombros y flujos piroclásticos, es común darle un tratamiento en base similar a ambos fenómenos por tratarse de flujos por gravedad y porque en ambos casos se emplea la presión dinámica como medida de intensidad. Son pocos los trabajos que abordan este problema, debido a que se considera innecesario, dentro de la comunidad científica en vulcanología, el determinar la vulnerabilidad ante fenómenos altamente destructivos, especialmente flujos piroclásticos. Para este último, prácticamente no existen trabajos de modelación de vulnerabilidad, pues la combinación de altas presiones dinámicas con altas temperaturas, los hacen especialmente destructivos y, por lo tanto, los trabajos existentes de cuantificación de consecuencias por flujos piroclásticos asumen una vulnerabilidad binaria. Se destacan los trabajos de Valentine (1998), quien propone una serie de rangos de presión dinámica con valores de probabilidad de falla para diferentes sistemas estructurales, inferidos a partir de efectos observados causados por armas nucleares, y Spence et al. (2004a, 2004b), quienes proponen curvas de fragilidad al colapso de edificaciones por el empuje lateral de una avalancha

seca (flujo piroclástico), considerando de forma marginal su temperatura. Para el caso de los lahares, la literatura es igualmente incipiente por las mismas razones expuestas anteriormente. Se destacan los trabajos de Jenkins et al. (2015) y Moriano et al. (2017), quienes proponen funciones de fragilidad al colapso de edificaciones ante presiones dinámicas por flujos de escombros.

Vulnerabilidad de otros elementos expuestos

La modelación del riesgo en sistemas de infraestructura es aún un campo de aplicación en desarrollo a nivel internacional. Específicamente para el caso volcánico, es muy poco lo que existe en la literatura sobre daños y pérdidas. El enfoque abordado en este trabajo está basado en la propuesta de Wilson et al. (2014), en donde se hace una revisión sobre interrupciones del servicio y daño físico en elementos de infraestructura crítica documentados a causa de erupciones volcánicas durante los cien años anteriores a su publicación. En general, se observó que la caída de piroclastos causa interrupción del servicio en la infraestructura crítica, reduciendo su funcionalidad, mientras que otros productos volcánicos son más destructivos y pueden llegar a causar un daño permanente (i.e. vulnerabilidad binaria). Bajo la definición de infraestructura crítica se incluye la infraestructura del sector energético, redes de acueducto y alcantarillado, transporte y el sector de comunicaciones.

Para el caso de cultivos y como se indica en la Tabla 2, el único modelo de vulnerabilidad especial considerado es ante la caída de piroclastos. Los modelos ante otras amenazas se consideran de vulnerabilidad binaria dada la alta capacidad destructiva de estos fenómenos. La vulnerabilidad de los cultivos ante la caída de piroclastos se basa en la evaluación de las características fenológicas de las plantas que determinan su respuesta biológica a la alteración de su entorno natural (Cardona et al., 2022a,d). Generalmente, las plantas cierran los estomas de sus hojas para reducir la pérdida de agua por transpiración, lo que implica reducir su nivel de fotosíntesis, ritmo de crecimiento y rendimiento final (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia CR2, 2015). Al estar expuestas a caída de piroclastos, la afectación puede basarse en la obstrucción de los estomas e incluso el daño por el peso sobre las hojas. Otros efectos como la temperatura de los piroclastos depositados, no se consideran en este trabajo. La modelación de la vulnerabilidad se realiza siguiendo la metodología de cálculo del rendimiento propuesta por la FAO (modelo AquaCrop). La vulnerabilidad se define en términos de la pérdida de rendimiento que sufre el cultivo durante un período prolongado de afectación. Dado que se aplica un modelo agronómico de respuesta de cultivos, no se emplearon curvas o funciones de vulnerabilidad.

EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL RIESGO

La cuantificación del riesgo consiste en determinar, con el mayor nivel posible de significancia, los parámetros que lo definen. Lundberg (1903) demostró que el proceso de pérdidas, para una ocurrencia de eventos estacionaria, sigue un proceso de Poisson, el cual es un proceso de conteo definido por un único parámetro, λ_p . Por lo tanto, el objetivo de la cuantificación del riesgo es determinar el valor de λ_p . La mejor aproximación se obtiene por medio de la tasa de excedencia de pérdidas (i.e. $v(p)=\lambda_p$). Dado que se desconoce el monto de las pérdidas que causará el próximo evento sobre los elementos expuestos, la tasa de excedencia se calcula cubriendo todo el dominio posible de pérdidas (es decir, desde cero hasta el máximo valor expuesto), con lo cual se construye la curva de excedencia de pérdidas, la cual es la métrica fundamental del riesgo y de la cual se determinan todas las demás métricas usadas. La curva de excedencia de pérdidas es una métrica completa de riesgo en el sentido que establece la estocasticidad en la ocurrencia de los eventos (por medio de los valores puntuales de $v(p)$) y la estocasticidad en los montos de las pérdidas para todos los montos posibles de pérdida (su derivada tiene una asociación matemática a la distribución de probabilidad de las pérdidas causadas, Cardona et al., 2022a,e).

La curva de excedencia de pérdidas se calcula siguiendo el procedimiento presentado en la Figura 6. Se construye una colección de escenarios probabilistas de amenaza, que sean mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos (Cardona et al., 2022a,b,e), la cual se recorre escenario a escenario. Para cada uno de los elementos expuestos se determina la distribución de probabilidad de la intensidad causada por la amenaza en su ubicación, la cual se combina con la distribución de probabilidad obtenida de la función de vulnerabilidad para determinar una distribución conjunta de la cual se cuantifica su función marginal de pérdida. El resultado es la distribución de probabilidad de la pérdida, en el elemento expuesto para el escenario seleccionado. El proceso se repite para cada uno de los elementos expuestos en el portafolio, de tal manera que

para cada uno se determina una distribución de probabilidad de la pérdida dada la ocurrencia del escenario de amenaza. Estas pérdidas individuales se totalizan usando la aritmética correcta, para obtener la distribución de probabilidad de la pérdida total causada por el escenario. El proceso se repite para todos los escenarios del conjunto y se totaliza la probabilidad de las pérdidas causadas en cada escenario por medio de la ponderación con las frecuencias de ocurrencia de los escenarios. En la Figura 6, PDF significa Función de Distribución de Probabilidad (Probability Distribution Function – PDF).

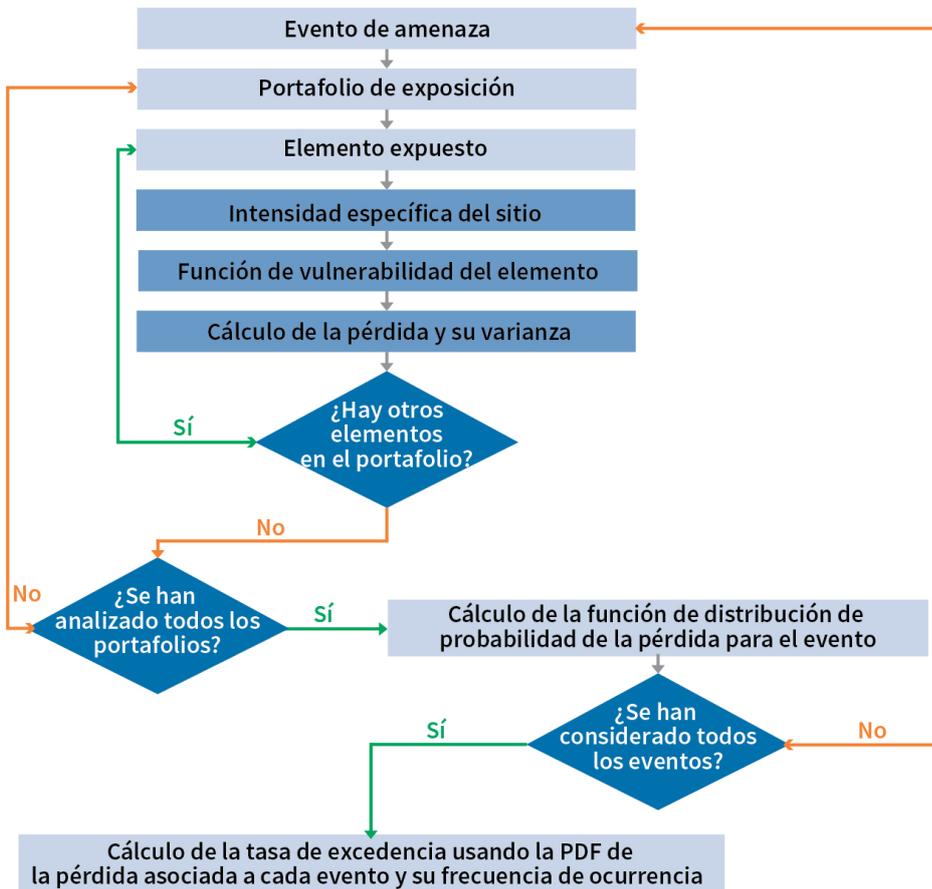


Figura 6. Procedimiento para la evaluación de la curva de excedencia de pérdidas
Fuente: Cardona et al. (2022e)

De la curva de excedencia de pérdidas se deriva una serie de métricas probabilistas de las cuales las más significativas son (Cardona et al., 2022a,e).

- » *La Pérdida Anual Esperada (PAE)*, que corresponde al valor medio de las pérdidas anuales. Es decir, si se contara con un proceso de pérdidas medido en un tiempo suficientemente largo, el valor medio anual de la pérdida correspondería a la PAE.
- » *La Pérdida Máxima Probable (PML por sus siglas en inglés)*, que corresponde a un valor de pérdida de un percentil alto; es decir, asociado a un periodo de retorno largo. En realidad, es posible definir la PML para cualquier valor de periodo de retorno, pero es una métrica que cobra especial interés en periodos de retorno largos (del orden de 1000 años o más). Es común presentarla como una curva de PML (i.e. PML vs periodo de retorno).

Los resultados se obtuvieron en términos de la PAE, la cual es considerada la métrica más robusta de riesgo al condensar, en un único número, todo el proceso simulado de ocurrencia de pérdidas que depende de los eventos de amenaza, la exposición y la vulnerabilidad de los elementos expuestos. La PAE corresponde al valor medio multianual de las pérdidas causadas por la actividad del volcán Galeras y, por lo tanto, debe interpretarse siempre en base anual. Es común presentar la PAE como fracción del valor expuesto y expresada al millar, con el símbolo ‰. Por lo tanto, una PAE de, por ejemplo, 1‰ (uno por mil), significa que se pierde anualmente COP \$1 por

cada COP \$1000 del valor total del elemento expuesto. Esta interpretación es equivalente sobre valores de conjuntos de elementos expuestos; es decir, por portafolios. La PAE es, adicionalmente, la única métrica de riesgo que puede plasmarse en mapas, debido al carácter lineal del operador matemático que la define.

Adicionalmente, se presentan resultados generales expresados en términos de la PML, la cual es una métrica de riesgo que permite dimensionar los montos de pérdida esperados ante eventos grandes o catastróficos derivados de la actividad del volcán Galeras. La PML es una métrica indexada al periodo de retorno, por lo cual corresponde en realidad a una curva y no a un valor puntual. En términos relativos, se presenta como porcentaje sobre el valor expuesto de los portafolios evaluados. A nivel de elementos individuales no se calcula la PML pues en ese caso su cuantificación es altamente incierta, dado que esta métrica corresponde a percentiles altos en una distribución de probabilidad, cuyo coeficiente de variación es mucho mayor en elementos individuales que para el total de pérdida de agrupaciones o portafolios de elementos (ley de los grandes números). La Tabla 4 muestra los resultados generales consolidados para todos los portafolios calculados de los quince municipios del área de influencia del volcán Galeras, y para todos los fenómenos considerados. Se incluye la PAE y los PML de 1000 y 5000 años de periodo de retorno (Cardona et al., 2022e).

Fenómeno volcánico	Portafolio	PAE		PML 1000 años		PML 5000 años	
		(COP)	(‰)	(COP)	(%)	(COP)	(%)
Caída de piroclastos	Edificaciones	\$13,400,000	0.001	\$1,614,000,000	0.02	\$2,988,000,000	0.03
	Infraestructura	\$159,700,000	0.038	\$881,500,000	0.02	\$3,476,000,000	0.08
	Cultivos	\$1,113,500,000	0.463	\$4,470,000,000	0.19	\$6,500,000,000	0.27
Proyectiles balísticos	Edificaciones	\$51,300,000	0.005	\$436,000,000	0.005	\$812,000,000	0.01
	Infraestructura	\$290,800,000	0.069	\$15,615,500,000	0.37	\$33,453,500,000	0.79
	Cultivos	\$90,200,000	0.038	\$10,600,000,000	0.44	\$21,300,000,000	0.89
	Servicios ecosis.	\$9,659,100,000	0.670	\$143,000,000,000	0.99	\$273,000,000,000	1.89
Corrientes de densidad piroclástica	Edificaciones	\$91,400,000	0.010	\$3,362,900,000	0.04	\$3,535,300,000	0.04
	Infraestructura	\$79,300,000	0.029	\$2,915,900,000	0.11	\$3,065,400,000	0.11
	Cultivos	\$6,000,000	0.002	\$746,900,000	0.03	\$10,326,700,000	0.43
	Servicios ecosis.	\$23,768,100,000	1.648	\$51,136,700,000	0.35	\$92,664,500,000	0.64
Flujos de lodos y escombros	Edificaciones	\$63,800,000	0.007	\$405,900,000	0.004	\$1,623,400,000	0.02
	Infraestructura	\$211,700,000	0.063	\$1,347,100,000	0.04	\$5,388,800,000	0.16

Tabla 4. Resultados generales consolidados para los diferentes portafolios incluidos en la evaluación
Fuente: Autores, 2024.

Las PAE por amenaza volcánica obtenida es entre 1 y 5 órdenes de magnitud inferiores a las PAE por sismo en la zona (INGENIAR-UNGRD, 2018). Esto se debe a la capacidad del terremoto de causar daños y pérdidas en extensiones geográficas relativamente grandes, a la alta actividad sísmica y a la vulnerabilidad de las edificaciones existentes en el área. Esta comparación resalta la relevancia que tiene visualizar el problema del riesgo desde un punto de vista multiamenaza, que garantice una gestión integral del riesgo y sin un sesgo hacia una sola de las posibles amenazas que se manifiestan en el territorio. El uso de la Zona de Amenaza Volcánica Alta (ZAVA) del mapa de amenaza del SGC (2015), con fines de ordenamiento territorial, ilustra dicha situación.

ORDENAMIENTO TERRITORIAL

El ordenamiento territorial y, en general, las medidas que buscan intervenir el riesgo por medio de la definición de usos del suelo (para riesgo no configurado) y la reducción de la exposición y la vulnerabilidad (para riesgo configurado), son efectivas en rangos de pérdidas relativamente menores, lo que corresponde a tasas de excedencia altas o periodos de retorno cortos. Esto significa que el riesgo derivado de fenómenos frecuentes puede ser gestionado de forma muy efectiva con instrumentos de ordenamiento territorial, pero hasta cierto límite. El riesgo derivado

de fenómenos poco frecuentes que causan grandes impactos en múltiples ubicaciones tendría que ser gestionado por medio de instrumentos diferentes, más efectivos en el segmento de grandes pérdidas muy poco frecuentes.

Los montos de pérdida por riesgo volcánico en los portafolios analizados en este estudio son, en general, bajos. No obstante, es claro que un nivel de riesgo bajo para un portafolio no implica necesariamente riesgo bajo en todos los elementos que lo componen, por lo cual la gestión del riesgo debe orientarse también a nivel de elementos individuales. Para elementos expuestos específicos, no se calcula una curva de excedencia de pérdidas³, por lo cual el riesgo se mide casi exclusivamente en términos de la pérdida anual esperada. Es necesario entonces definir un referente con respecto a los niveles *aceptables* o *tolerables* de riesgo de elementos expuestos individuales, con lo cual sea posible establecer una categorización razonable en función de las acciones que el ordenamiento territorial debe dictar sobre el suelo ocupado por esos elementos expuestos, así como sobre el suelo aún no ocupado.

Aceptabilidad del riesgo

En la planificación y en el diseño de proyectos de ingeniería, es común utilizar un nivel de riesgo como referente, resultado de estudios técnicos de evaluación probabilista del riesgo, con el fin de definir un grado de protección y seguridad que justifique una inversión teniendo en cuenta como referencia la vida útil de lo que se construye. Se utilizan factores de seguridad que cubren *razonablemente* la incertidumbre de la posible severidad de las acciones externas (amenazas), la imprecisión de los modelos analíticos y la aproximación de las hipótesis de análisis y diseño. Estos conceptos son en realidad aplicables a cualquier medida de gestión del riesgo, que tiene un costo, una efectividad y, por lo tanto, una vida útil.

En las anteriores definiciones interviene también el concepto de *lo que se está evitando*. Si lo que se quiere es proteger una región agrícola o ganadera, por ejemplo, los que se está evitando son pérdidas en producción. Si lo que se quiere proteger es la liquidez fiscal, lo que se está evitando es un problema económico derivado del desastre. Así mismo, si lo que se quiere proteger son viviendas y centros poblados, lo que se está evitando es, principalmente, la pérdida de vidas. Es deseable también evitar las pérdidas en propiedades y patrimonio de los ciudadanos; sin embargo, los instrumentos de planificación, en lo que se refiere a riesgo de desastres, se enfocan fundamentalmente en la protección de la vida. Es el caso de la Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR), cuyo objetivo fundamental es la protección de la vida de quienes ocupen una edificación durante terremotos.

A nivel internacional, se han llevado a cabo múltiples investigaciones para establecer cuál es el riesgo que puede considerarse como *razonable*, *factible* o *tolerable*, pensando en protección de la vida. Existen diferentes referentes sobre riesgo de muerte de diferentes actividades humanas y situaciones. En algunos países se han utilizado este tipo de estudios para definir el nivel de seguridad que deben ofrecer ciertas infraestructuras; e.g. las presas, ante las amenazas a las que están expuestas. Las normas NEHRP de los Estados Unidos, por ejemplo, consideran tolerables los siguientes niveles de riesgo en un edificio, ante el sismo de diseño: 1% de probabilidad de daño peligroso para la vida, 0.1% de probabilidad de colapso y 0.01% de probabilidad que cualquier ocupante pierda la vida por el daño estructural ocurrido (i.e. 1.0×10^{-4}). Esto significa que el riesgo anual para una persona cualquiera de morir por un terremoto equivale aproximadamente a una probabilidad de 1.0×10^{-6} . La incorporación del número de víctimas dentro de las definiciones de lo que es tolerable o aceptable, implica que los niveles de probabilidad aceptables cambian según este número. Es usual el uso de una relación potencial inversa entre la severidad y la tolerancia; e.g., afirmar que 100 fatalidades con una probabilidad anual de 10^{-5} son igualmente tolerables como 1000 fatalidades con una probabilidad de 10^{-6} . Esta relación configura lo que se conoce como la curva *F-N*, obtenida de graficar la frecuencia acumulada anual *F* de todos los eventos que provocan *N* o más fatalidades, a partir de un registro histórico. La pendiente de la curva *F-N* representa el grado de aversión a eventos que producen múltiples fatalidades. La curva inicia en un punto de anclaje, que corresponde al riesgo aceptable para una sola fatalidad ($N=1$). Ospina (2018) calculó la curva *F-N* para Colombia, con base en información registrada en DesInventar con datos desde 1915 a 2018, obteniendo un exponente de, aproximadamente, -1 ($y=21.627x^{(-0.987)}$). El punto de anclaje lo define en 1.0×10^{-4} , calculado como el riesgo de morir para las personas entre los 5 y 14 años, entre 2010 y 2016, para todas las causas en el país (rango de edades de menor probabilidad dentro de la distribución etaria).

3. Desde el punto de vista matemático es posible el cálculo de una curva de excedencia de pérdidas a nivel de un único elemento expuesto. Sin embargo, no es práctica común establecer esta métrica para elementos individuales debido a que existe una mucho mayor incertidumbre en su estimación que cuando se considera un conjunto o portafolio de elementos.

Las curvas $F-N$ han sido ampliamente usadas para establecer tolerancia al riesgo en base al concepto ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*), mediante el cual se define una región o franja en la curva $F-N$ en la cual el riesgo puede ser tolerado en la medida que se pueden tomar medidas prácticas razonables para reducirlo. Ospina (2018) define la región ALARP para Colombia como centrada alrededor de la curva $F-N$ definida, con pivotes en 1×10^{-3} como límite superior y 1×10^{-5} como límite inferior. La Figura 7 presenta esta región ALARP, en comparación con regiones ALARP y curvas $F-N$ para otros países. Se presenta adicionalmente la curva empírica obtenida del análisis de frecuencia sobre los eventos reportados en DesInventar. Es posible entonces usar esta región ALARP como referente del nivel de riesgo tolerable o aceptable (Cardona et al., 2022e).

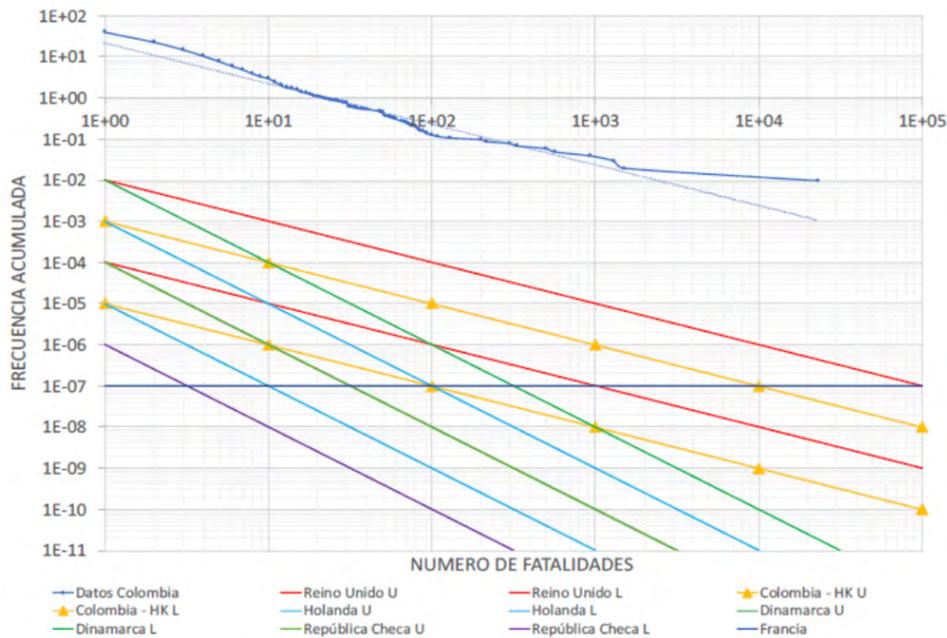


Figura 7. Región ALARP para Colombia comparada con regiones ALARP y curvas $F-N$ para otros países
Fuente: Tomado de Ospina (2018).

Nota: Letras L y U significan inferior y superior, respectivamente.

En la parte baja de esta franja el riesgo no es despreciable, pero es tolerable si el costo de su reducción puede exceder en mucho el mejoramiento obtenido mediante medidas de mitigación. También puede delimitarse una región donde el riesgo se considere *despreciable*; es decir, donde los valores de frecuencia y severidad son lo suficientemente bajos para ser considerados aceptables (Helm, 1996). Este enfoque está en sintonía con el postulado de que el riesgo aceptable decrece con el incremento del número de personas expuestas; aspecto que algunos códigos de construcción lo tienen en cuenta definiendo restricciones adicionales o complementarias en el caso de edificios que alojan un amplio número de personas, pero usualmente sin cambiar los niveles de demanda sísmica.

Dentro de un proceso de ordenamiento territorial, se puede definir como unidad fundamental una vivienda unifamiliar. El número de habitantes en una vivienda de este tipo es del orden de 10; es decir, no necesariamente son 10 habitantes, pero el número sí es de ese orden de magnitud. Por lo tanto, es posible establecer los límites al riesgo aceptable como los mismos límites de la región ALARP para $N=10$ (ver Figura 7). Estos valores se indican en la Tabla 5, la cual presenta las categorías establecidas en este estudio para el riesgo de morir. Como se muestra, una probabilidad inferior a 10^{-6} de que se presenten del orden de 10 fatalidades en un único evento, es aceptable y por lo tanto no se requiere ninguna acción para reducir ese riesgo (i.e., el riesgo de morir por la actividad del volcán, para cada uno de los ocupantes de la vivienda, es menor al riesgo que tienen de morir por cualquier otro motivo). Una probabilidad entre 10^{-6} y 10^{-4} es aceptable, procurando su reducción mediante medidas de gestión del riesgo (en la medida en que sea práctico reducirlo de acuerdo con la definición de la región ALARP). Finalmente, una probabilidad mayor a 10^{-4} es completamente inaceptable y supone intervenir el riesgo para reducirlo. Con estas categorías definidas, es posible determinar cuántas viviendas se encuentran en cada categoría de riesgo por cuenta de los fenómenos volcánicos del volcán Galeras (Cardona et al., 2022e).

Categoría de riesgo	Descripción	Límite inferior de probabilidad	Límite superior de probabilidad
Bajo	Riesgo totalmente aceptable	<	10-6
Medio	Riesgo tolerable	10-6	10-4
Alto	Riesgo totalmente inaceptable	10-4	>

Tabla 5. Categorías de riesgo definidas de acuerdo con los límites de la región ALARP para N=10
Fuente: Autores, 2024.

La evaluación del riesgo se desarrolló a nivel de construcciones, por lo cual se cuenta con una métrica de riesgo para cada construcción (y por lo tanto para cada vivienda) dentro de los municipios incluidos en este estudio. La métrica de riesgo calculada para cada vivienda es la PAE, la cual corresponde al valor medio de las pérdidas anuales. La PAE, si bien es una métrica de riesgo robusta y completa, se debe interpretar siempre en términos económicos y, por lo tanto, no corresponde a la probabilidad que los ocupantes de una vivienda pierdan su vida. Esta probabilidad, expresada como anual, puede determinarse a partir de la PAE haciendo una modificación para considerar la probabilidad que el proceso de pérdidas del cual se obtiene la PAE original, efectivamente se manifieste en tiempos relativamente cortos (Cardona et al., 2022e). Si se considera una amenaza altamente destructiva, para la cual se puede asumir que la vulnerabilidad de los elementos expuestos se satura (i.e. vulnerabilidad binaria), y si se considera un tiempo de exposición equivalente a la expectativa de vida de una persona en Colombia (i.e. 80 años), entonces la PAEm (modificada) equivale a la tasa o frecuencia anual de perder la vida para cualquiera de los ocupantes de una vivienda unifamiliar, por cuenta de la actividad del volcán Galeras, durante todo su tiempo de vida.

Riesgo configurado

Lo anterior permite cuantificar el total de viviendas ubicadas en cada categoría de riesgo del total de viviendas incluidas en la modelación. Esta cuantificación solo se realiza para amenazas que impliquen una posible restricción al uso del suelo debido a la alta capacidad destructiva de los fenómenos. Eso significa que, en este caso, se incluyen únicamente cuantificaciones de riesgo ya existente o configurado, por ser áreas ocupadas, para corrientes de densidad piroclástica, proyectiles balísticos y flujos de lodos y escombros. Las anteriores definiciones no tienen sentido para la caída de piroclastos, la cual es una amenaza resistible por la infraestructura de vivienda y a la cual, por lo tanto, se le debe dar un tratamiento de peligro prescriptivo; es decir, que define ciertos requisitos de diseño y construcción pero que no limita el uso del suelo. En las Tablas 6 y 7 se muestran el número total de viviendas en condición de riesgo bajo, medio y alto (según las definiciones de la Tabla 5), para los diferentes municipios, por corrientes de densidad piroclástica y proyectiles balísticos. Para el caso de flujos de lodos y escombros, la totalidad de viviendas se encuentran en riesgo bajo, por lo cual no se presenta una tabla asociada. En estas clasificaciones solo se listan los municipios en los cuales hay al menos una vivienda en condición de riesgo medio o superior. Si el municipio no se encuentra listado en la tabla significa que la totalidad de sus viviendas están en riesgo bajo.

Municipio	Bajo	Medio	Alto
Pasto	134,022	686	-
Nariño	1,322	63	-
La Florida	5,236	23	-
Consacá	4,283	2	-

Tabla 6. Número de viviendas en cada categoría de riesgo para corrientes de densidad piroclástica
Fuente: Autores, 2024.

Municipio	Bajo	Medio	Alto
Pasto	129,261	5,447	-
Nariño	1,245	140	-
La Florida	5,235	24	-
Sandoná	8,294	4	-
Consacá	4,264	21	-
Tangua	4,004	5	-

Tabla 7. Número de viviendas en cada categoría de riesgo para proyectiles balísticos
Fuente: Autores, 2024.

Como puede observarse, en ningún caso se tienen viviendas en riesgo alto dentro del área de influencia del volcán Galeras. Esto significa que, desde el punto de vista del ordenamiento territorial, el uso actual del territorio en los quince municipios, en el peor de los casos, se encuentra dentro de niveles tolerables de riesgo, por lo cual *no es procedente ninguna acción de reubicación y restricción del territorio actualmente ocupado*; como se determinó usando la ZAVA del SGC (2015). Esto, sin embargo, no significa que todo el territorio se encuentre necesariamente en una condición de riesgo bajo o medio. Es importante evaluar la potencialidad del riesgo también en el territorio no ocupado.

Riesgo implícito

El riesgo implícito mide la condición potencial de riesgo en caso de desarrollar el territorio no ocupado actualmente. Se determina suponiendo que existe una exposición en las regiones no ocupadas del territorio y se evalúa el riesgo sobre esa exposición hipotética. Este riesgo corresponde entonces a lo que le implicaría a una vivienda cualquiera ocupar cualquier coordenada en el territorio del área de influencia del volcán Galeras; es decir, es un riesgo implícito a la ubicación. El riesgo implícito se calcula con base en los siguientes supuestos:

- » Se asume una distribución uniforme y densa de elementos expuestos (viviendas) por toda el área de influencia del volcán Galeras.
- » Cada vivienda tiene un valor expuesto unitario, por lo cual la evaluación solo tiene sentido en términos relativos.
- » Dado que se calcula para fenómenos de alta capacidad destructiva, se asume que las viviendas tienen vulnerabilidad binaria ante dichos fenómenos.

Se realiza la modelación del riesgo, con base en estas suposiciones, sobre el portafolio hipotético de viviendas uniformemente distribuidas por el terreno. Se calcula la PAE de cada vivienda y luego se determina la frecuencia anual de perder la vida de cualquiera de sus ocupantes como consecuencia de la actividad del volcán Galeras (PAEm; i.e, modificada). Las Figuras 8 y 9 presentan los mapas de probabilidad anual de morir para corrientes de densidad piroclástica y proyectiles balísticos.

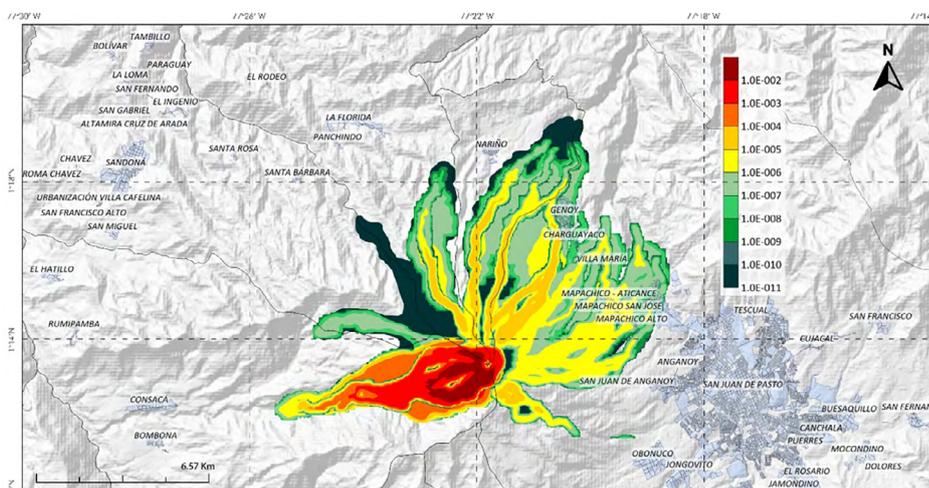


Figura 8. Mapa de probabilidad anual de morir por corrientes de densidad piroclástica (concentradas y diluidas) del volcán Galeras

Fuente: Autores, 2024.

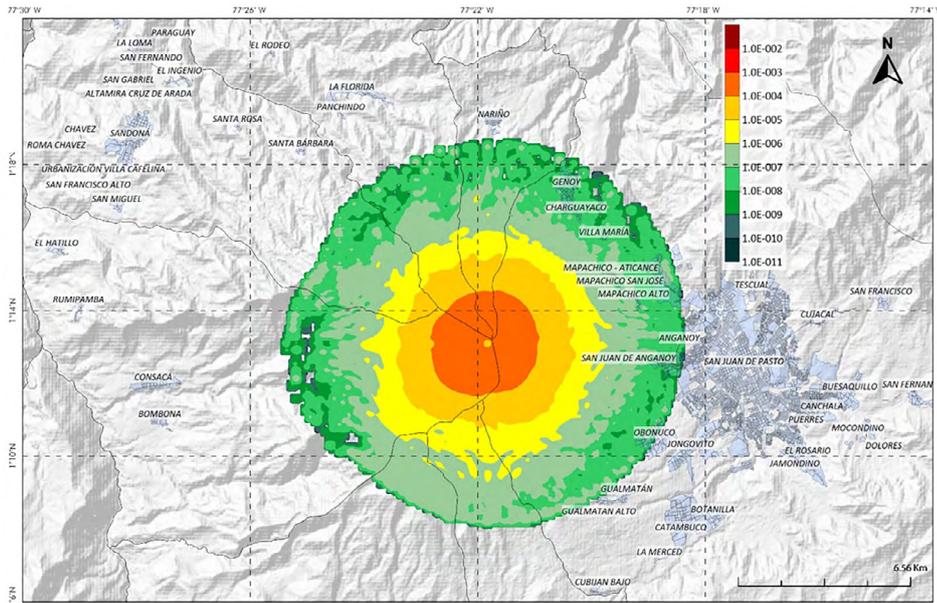


Figura 9. Mapa de probabilidad anual de morir por proyectiles balísticos del volcán Galeras
Fuente: Autores, 2024.

A partir de la probabilidad anual de morir, se clasifica el riesgo de acuerdo con las categorías de riesgo definidas en la Tabla 5. El resultado se muestra de las Figuras 10 y 11.

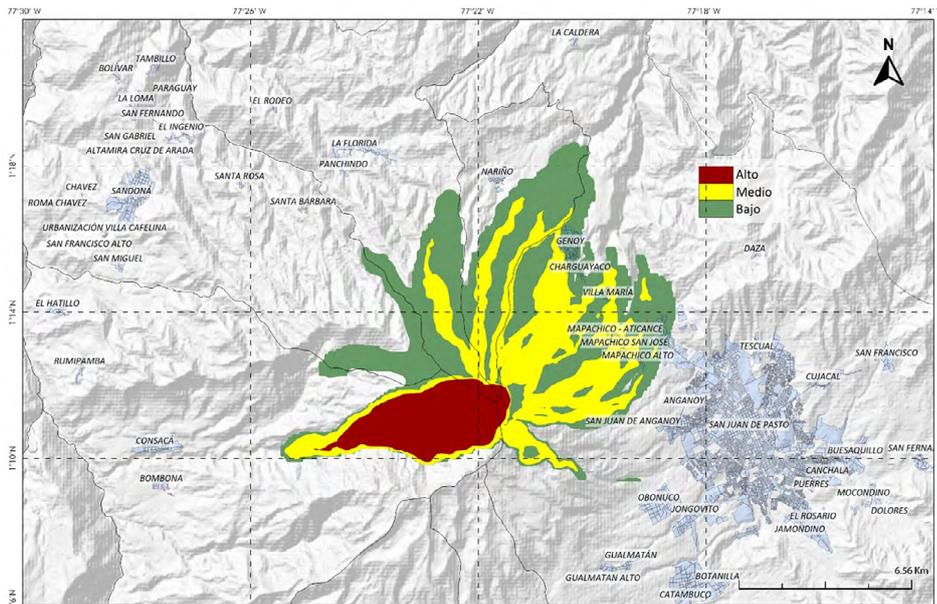


Figura 10. Mapa de riesgo implícito por corrientes de densidad piroclástica (concentradas y diluidas) del volcán Galeras
Fuente: Autores, 2024.

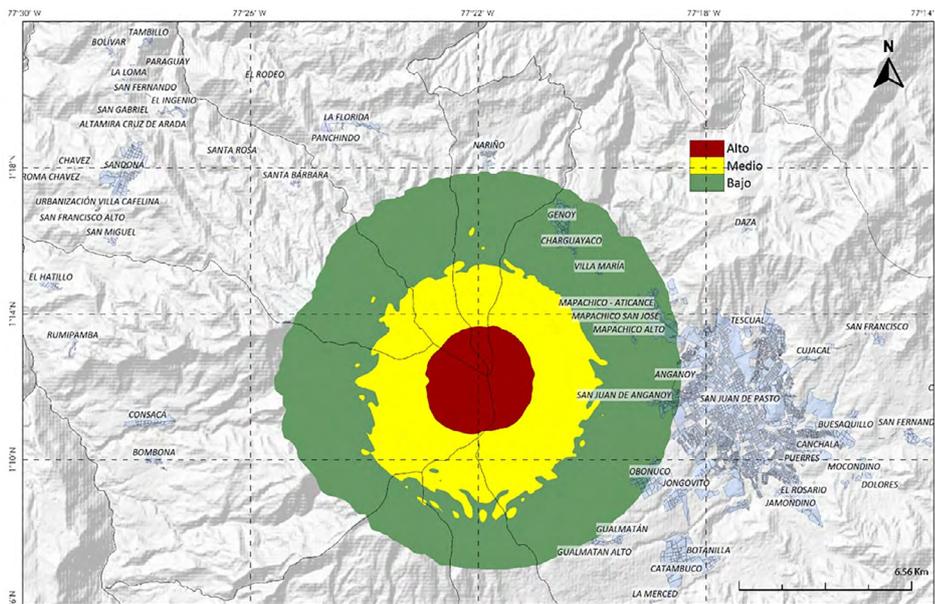


Figura II. Mapa de riesgo implícito por proyectiles balísticos del volcán Galeras
Fuente: Autores, 2024.

Categorías de riesgo en el ordenamiento territorial

Una vez cuantificados el riesgo configurado y el riesgo implícito, es importante definir qué tipo de acciones proceden dentro de cada categoría, desde el punto de vista del ordenamiento territorial. La Tabla 8 muestra un resumen la equivalencia entre las categorías de riesgo definidas en este trabajo y la clasificación dada por el Decreto 1807 de 2014, el cual provee pautas generales para el tratamiento de zonas en condición de amenaza y en condición de riesgo en el ordenamiento territorial. Si bien este decreto es orientado principalmente a procesos de remoción en masa e inundaciones (parágrafo 2 del artículo 3), se entiende la esencia de sus disposiciones y por esta razón se puede hacer una equivalencia.

Categoría de riesgo	Clasificación según Decreto 1807
<i>Riesgo configurado</i>	
Alto	Zona en condición de riesgo alto
Medio	Zona en condición de riesgo medio
Bajo	Zona en condición de riesgo bajo
<i>Riesgo implícito</i>	
Alto	Zona en condición de amenaza alta
Medio	Zona en condición de amenaza media
Bajo	Zona en condición de amenaza baja

Tabla 8. Equivalencias entre las categorías de riesgo definidas en este trabajo y la clasificación dada por el Decreto 1807 de 2014
Fuente: Autores, 2024.

Dicho decreto define una subclasificación para las zonas en condición de amenaza alta y en condición de riesgo alto, asociada con la mitigabilidad del riesgo. Se definen, entonces, zonas en condición de riesgo alto mitigable o no mitigable, y similarmente, zonas en condición de amenaza alta mitigable o no mitigable. El concepto de lo que es o no mitigable, es algo aún en debate y no existen, ni en dicho decreto, ni en general en la literatura especializada, criterios claros para definir la mitigabilidad. Se puede afirmar que el riesgo mitigable es aquel para el cual es práctico y razonable llevar a cabo obras de mitigación que reduzcan la vulnerabilidad o, en algunos casos, la amenaza. Por lo tanto, ante una clasificación de riesgo alto no mitigable procede, casi de forma unívoca, el reasentamiento o reubicación.

Algunos autores definen la mitigabilidad en función del costo de las obras requeridas en contraste con el costo de la reubicación para situaciones de riesgo alto configurado. En general, puede afirmarse que el riesgo alto configurado se considera no mitigable cuando se cumple que el

costo de las obras de mitigación (C_o) es mayor a α -veces el costo de la reubicación (C_r). No existe un consenso claro sobre el valor del coeficiente α , debido a que depende de la realidad del contexto en el cual se manifiesta el problema; α puede ser 1, lo que para algunos puede ser ingenuo y por lo tanto dicho valor podría ser mayor (10 a 100), debido a la complejidad social que implica realizar un reasentamiento. En el contexto del riesgo configurado e implícito alto en el volcán Galeras, puede afirmarse que el coeficiente α puede ser excesivamente grande (i.e., $\alpha > 100$), debido a la alta capacidad destructiva de los fenómenos. Fenómenos como los flujos piroclásticos, los lahares y los proyectiles balísticos, es ampliamente aceptado, tienen una muy alta capacidad destructiva, de forma tal que no resulta razonable ni práctico pensar en obras de mitigación que reduzcan la vulnerabilidad de los elementos expuestos ni, mucho menos, que reduzcan la intensidad del fenómeno. Por esta razón se considera que el riesgo configurado alto y el riesgo implícito alto son siempre, para el riesgo derivado de la actividad del volcán Galeras, no mitigables.

En virtud de lo anterior, todo aquello clasificado como riesgo configurado alto, implica determinarlo como una zona de protección por riesgo alto no mitigable, y todo aquello clasificado como riesgo implícito alto, implica definirlo como zona de protección por amenaza alta no mitigable. Así mismo, todo aquello clasificado como riesgo medio o bajo, sea configurado o implícito, no implica la designación como suelo de protección y, por lo tanto, son áreas en donde el desarrollo puede ser permitido sin restricción. Con respecto al riesgo implícito, existen algunas áreas del territorio en riesgo alto; es decir, en condición de amenaza alta no mitigable en la nomenclatura del Decreto 1807 de 2014 (solo para flujos piroclásticos y proyectiles balísticos). Estas áreas deben considerarse como suelo de protección por riesgo. La Figura 12 muestra el límite de esta región para el caso de los flujos piroclásticos y la Figura 13 presenta la misma información para los proyectiles balísticos (Cardona et al., 2022a).

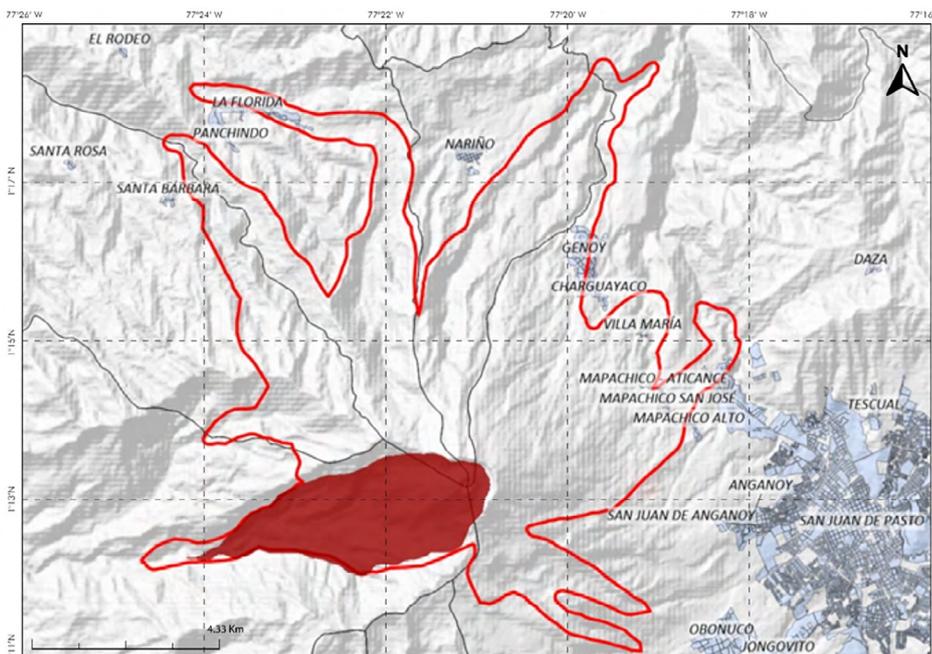


Figura 12. Zona de riesgo implícito alto (en condición de amenaza alta no mitigable) ante flujos piroclásticos del volcán Galeras y el contorno (línea roja) de la ZAVA de este fenómeno del mapa de amenaza del SGC
Fuente: Autores, 2024.

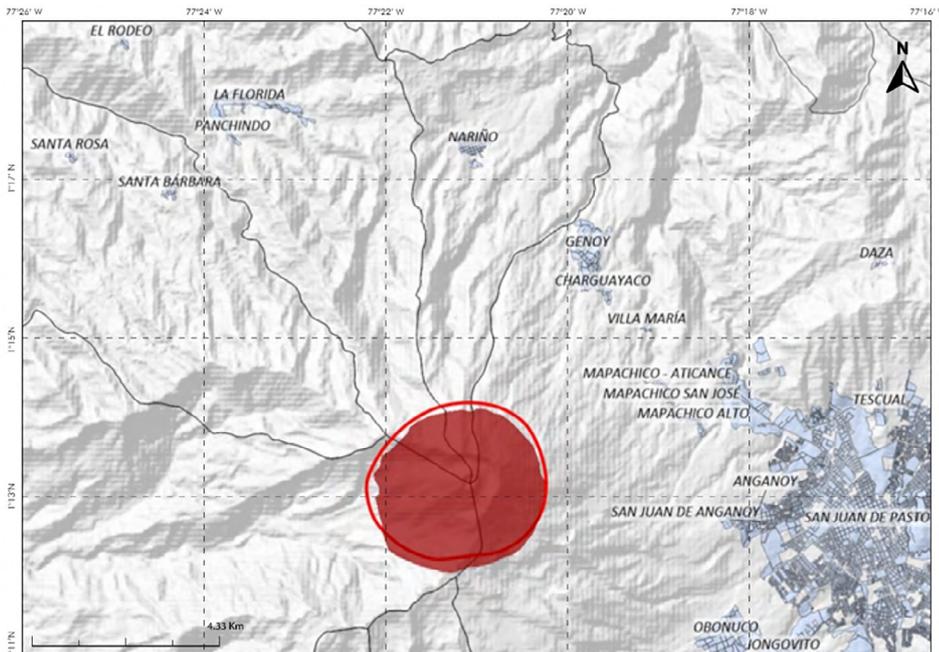


Figura 13. Zona de riesgo implícito alto (en condición de amenaza alta no mitigable) ante proyectiles balísticos del volcán Galeras y el contorno (línea roja) de la ZAVA de este fenómeno del mapa de amenaza del SGC
Fuente: Autores, 2024.

DISCUSIÓN

Los resultados de riesgo obtenidos con el enfoque de evaluación probabilista, aquí descrito, son sustancialmente diferentes a los que se establecieron, en el área de influencia del volcán Galeras, utilizando como referente de riesgo no mitigable el contorno de la ZAVA del mapa de amenaza del SGC (2015), el cual se realizó con un enfoque fundamentalmente determinista. La decisión de restringir el desarrollo territorial y plantear la reubicación o reasentamiento de las comunidades en toda el área de dicho contorno (línea roja, Figura 12), en el caso de las corrientes de densidad piroclástica, así como la delimitación de amplias franjas de posible incidencia de lahares o flujos de lodo y escombros, que en el caso de la evaluación probabilista significó un riesgo insignificante (y que no ameritó incluirse en esta descripción), ha sido una decisión excesiva, si se considera la probabilidad de perder la vida por fenómenos volcánicos. Dicha decisión ha tenido considerables implicaciones económicas y sociales, dado 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 desde hace cerca de 18 años, cuando se declaró la situación de desastre; desastre que además no se presentó.

Las comunidades, varias de ellas indígenas, durante todo este tiempo han controvertido y polemizado, principalmente, las decisiones en materia de ordenamiento territorial, solicitando la realización de nuevos estudios, siguiendo las determinaciones jurídicas establecidas, por la Corte Constitucional y el juez promiscuo municipal del municipio de La Florida; resultado de la problemática social e institucional y en que derivaron las determinaciones desde 2005 (Caracol Radio, 2015; Martínez, 2022).

La determinación de la ZAVA se realizó con la mejor información posible y resultado de un trabajo técnico científico de vanguardia en materia de vulcanología y del monitoreo del volcán desde el Observatorio Vulcanológico de Pasto, que se considera uno de los más avanzados a nivel internacional. Sin embargo, los mapas de amenaza que se han realizado, sin utilizar un enfoque probabilista, parece que 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 ha sido usual, en la mayoría de los países, teniendo en cuenta otras amenazas, como las inundaciones, avenidas torrenciales, deslizamientos, ciclones tropicales, tsunamis e incluso sismos, cuyo enfoque no es normalmente restrictivo sino prescriptivo; entre otras.

CONCLUSIONES

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 reino de lo incierto. Las mejores métricas del riesgo están asociadas con la probabilidad de excedencia de posibles consecuencias y por esa razón es preferible expresarlas en tasas de excedencia –anual– o, su inverso, el período de retorno. 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, con fines de gestión del riesgo responder acerca de qué medidas y acciones inmediatas y de mediano y largo plazo se pueden tomar.

El principal propósito de la modelación probabilista del riesgo es revelar los desastres latentes; más cuando la mayoría de los eventos catastróficos no han ocurrido aún. Es hacer explícito el riesgo. Un enfoque probabilista y estocástico permite invitar a los interesados a preguntarse en lo que se puede hacer para lograr un mayor grado de resiliencia. Ningún modelo puede incluir todas las variables, pero puede ser lo suficientemente robusto para informar el efecto de la incertidumbre y para lograrlo es ineludible utilizar la probabilidad lo que más se pueda; no hay que sobre simplificar y es necesario lograr que los tomadores de decisiones aprecien la complejidad y que comprendan lo que está en juego, teniendo en cuenta que las decisiones y acciones son lo que realmente importa. Sin que sean infalibles, los modelos probabilistas son la forma más eficaz de evaluar las amenazas y el riesgo. Permiten categorizar el riesgo, no solo de la forma tradicional en alto, medio y bajo, con un criterio cuantitativo, sino también de otra forma quizás mejor; e.g. en inaceptable, considerable, limitado, mínimo, despreciable.

La teoría de la probabilidad es la manera de expresar la verosimilitud. La medida de incertidumbres con precisión es a menudo un dato importante para tomar decisiones con consecuencias sustanciales; entonces la pregunta se traslada a ¿cuál es el mejor proceso de medición? Dado que ninguna medida es perfecta la cuestión se traslada a ¿cómo manejar la imprecisión? Esto implica llegar incluso a probabilidades imprecisas, a intervalos y a admitir incertidumbre entre sus límites, sabiendo que no todos los valores dentro de un intervalo son igualmente plausibles (Bernal et al., 2021). En rigor, lo mejor implica minimizar la imprecisión en las medidas y distribuciones de probabilidad y hacer análisis de sensibilidad para reflejar dicha imprecisión; si el cambio es mucho no hay una respuesta definitiva. Si una nueva información puede cambiar la decisión óptima, la incertidumbre es relevante y debe ser claramente comunicada. Si no, información detallada sobre la incertidumbre podría no ser necesaria. Finalmente, la ausencia de una evaluación probabilista y robusta del riesgo ha tenido al menos dos implicaciones relevantes. No se cuenta con una valoración cuantitativa del riesgo y por lo tanto no se tiene una estimación creíble de las posibles consecuencias o pérdidas que se pueden presentar, pero sobre todo no se cuenta con la principal razón o argumento para llevar a cabo las acciones necesarias y apropiadas de reducción del riesgo.

RECOMENDACIONES

Algunas recomendaciones para tomadores de decisiones y comunidades en relación con el uso de enfoques probabilistas para la evaluación de las amenazas volcánicas y del riesgo que se deriva, con fines de ordenamiento territorial, de acuerdo con esta experiencia, son las siguientes:

- » *Fomentar la adopción de enfoques probabilistas:* Es crucial que los tomadores de decisiones y las comunidades comprendan la importancia de los enfoques probabilistas en la evaluación de las amenazas y el riesgo. Esto implica reconocer la naturaleza aleatoria de los eventos y la necesidad de definir frecuencias y obtener probabilidades para comprender la verosimilitud de diferentes escenarios.
- » *Promover la transparencia y la comunicación efectiva:* Los resultados de los análisis probabilistas deben ser comunicados de manera transparente y comprensible para todos los interesados. Es importante asegurarse de que los tomadores de decisiones y la comunidad en general comprendan la complejidad y la incertidumbre asociadas con los resultados, lo que permitirá tomar decisiones informadas.

- » *Integrar múltiples perspectivas y conocimientos:* Los modelos probabilistas no pueden incluir todas las variables, por lo que es esencial integrar diferentes perspectivas y conocimientos, tanto científicos como locales. La colaboración con expertos y comunidades locales en la recolección de datos y la interpretación de resultados fortalecerá la validez de los análisis.
- » *Realizar análisis de sensibilidad y manejar la incertidumbre:* Dado que ninguna medida es perfecta, se deben realizar análisis de sensibilidad para evaluar cómo los cambios en los parámetros afectan los resultados. Además, es importante abordar la incertidumbre en las mediciones y distribuciones de probabilidad, admitiendo la posibilidad de probabilidades imprecisas y rangos plausibles.
- » *Establecer medidas y acciones de gestión del riesgo:* Los resultados de la evaluación probabilista deben ser utilizados para identificar medidas y acciones tanto inmediatas como a mediano y largo plazo para la reducción del riesgo. Esto exige definir la aceptabilidad del riesgo y no solo calificaciones como alto, medio y bajo.
- » *Fortalecer la investigación y la actualización constante:* La ciencia y la evaluación del riesgo están en constante evolución. Es necesario promover la investigación continua y mantener los análisis actualizados con nuevos datos y conocimientos para mejorar las evaluaciones y realizar actualizaciones de usos del suelo si es pertinente.
- » *Fomentar la cooperación interinstitucional:* La evaluación de amenazas y del riesgo en el ordenamiento territorial requiere de la cooperación entre diferentes instituciones, agencias gubernamentales y expertos. Esta cooperación puede fortalecer los análisis y facilitar la implementación de medidas eficaces de gestión del riesgo.
- » *Capacitar y sensibilizar a los actores involucrados:* Es importante brindar capacitación y sensibilización sobre la importancia de los enfoques probabilistas en la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial. Esto permitirá una mejor comprensión y toma de decisiones fundamentadas en datos científicos.

Y, es fundamental, definir estándares y realizar guías e instructivos desde la perspectiva del conocimiento del riesgo, que integren estas recomendaciones, para que los tomadores de decisiones y las comunidades estén mejor preparados para enfrentar las amenazas y el riesgo de manera informada y efectiva, contribuyendo así a la reducción de posibles consecuencias o pérdidas en sus territorios.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se llevó a cabo por parte de INGENIAR CAD-CAE LTDA. en el marco del proyecto 9677-VOGA005-059-2021, financiado por Fondo Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y la UNGRD. Se agradece al equipo de especialistas y colaboradores sus contribuciones, dedicación y compromiso, al igual que al equipo de supervisión técnica.

REFERENCIAS

- Bernal, G.A. (2010). VHAST: Volcanic Hazard Analysis and Simulation Tool. Programa de computador para el cálculo probabilista de la amenaza volcánica. <https://www.ingeniar-risk.com/servicios/software/capra/vhast>
- Bernal, G.A., Rincón, D., Cardona, O.D. (2017). Drought Pro. Programa de computador para la simulación estocástica de fenómenos hidrometeorológicos. <https://www.ingeniar-risk.com/servicios/software/capra/drought-pro>
- Bernal, G.A., Cardona, O.D., Marulanda, M.C., Carreño, M.L. (2021). Dealing with Uncertainty Using Fully Probabilistic Risk Assessment for Decision-Making. In: S. Eslamian, F. Eslamian (eds.), *Handbook of Disaster Risk Reduction for Resilience*. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61278-8_14
- Blong, R.J. (1984). *Volcanic Hazards: A Sourcebook on the Effects of Eruptions*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-21853-8>
- Caracol Radio (2015). Habitantes cercanos al volcán Galeras celebran. La decisión la tomó la Corte Constitucional después de que en el 2005 fuera declarada zona de desastre. https://caracol.com.co/radio/2015/06/30/regional/1435647300_829120.html

- Cardona, O.D. (1996). Manejo de las crisis volcánicas del Galeras: Aspectos sociales, económicos e institucionales. *Desastres y Sociedad*, Especial: Predicciones, pronósticos, alertas y respuestas Sociales. Red de estudios sociales en prevención de desastres de Latino América, La RED, ITDG, Lima, Perú.
- Cardona, O.D. (1997). Management of the volcanic crises of Galeras volcano: Social, economic, and institutional aspects. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77(1-4), 313-324 [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(96\)00102-3](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(96)00102-3)
- Cardona, O.D. (2022). Medir la Verosimilitud del Futuro. *Convergencia de Saberes*, Especial Aleph No. 200. Carlos-Enrique Ruiz (Ed).
- Cardona, O.D., et al. (2022a). Metodología de evaluación probabilista del riesgo volcánico. En: *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*, INGENIAR Risk Intelligence Ltda., UNGRD, Bogotá. Disponible en: <https://idrv.ms/b/s!AvYNdx4t4FZnK-17AiUZBGqCV7oiQ?e=DATugh>
- Cardona, O.D., et al. (2022b). Evaluación probabilista de la amenaza volcánica. En: *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*, INGENIAR Risk Intelligence Ltda., UNGRD, Bogotá. Disponible en: <https://idrv.ms/b/s!AvYNdx4t4FZNIJtIs99Lq4EpOviU5g?e=syXh9>
- Cardona, O.D., et al. (2022c). Modelación de la exposición. En: *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*, INGENIAR Risk Intelligence Ltda., UNGRD, Bogotá. Disponible en: <https://idrv.ms/b/s!AvYNdx4t4FZNIJtPvWY9FIEoiyLuyA?e=YYPG6G>
- Cardona, O.D., et al. (2022d). Modelación de la vulnerabilidad. En: *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*, INGENIAR Risk Intelligence Ltda., UNGRD, Bogotá. Disponible en: <https://idrv.ms/b/s!AvYNdx4t4FZNIJtZjSDLmp12Ho3KSQ?e=OZyADo>
- Cardona, O.D., et al. (2022e). Evaluación del riesgo. En: *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*, INGENIAR Risk Intelligence Ltda., UNGRD, Bogotá. Disponible en: <https://idrv.ms/b/s!AvYNdx4t4FZNIJcwe3evT-ciROlgbQ?e=5e4Y3E>
- Corporación OSSO. (2009). *Estudio de vulnerabilidad física y funcional a fenómenos volcánicos en el área de influencia del volcán Galeras*. Pasto.
- Freitas Guimarães, L., Nieto-Torres, A., Bonadonna, C. Frischknecht, C. (2021). A New Inclusive Volcanic Risk Ranking, Part 2: Application to Latin America. *Front. Earth Sci., Sec. Geohazards and Georisks*, 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.757742>
- Helm, P. (1996). Integrated Risk Management for Natural and Technological Disasters, *Tephra* 15, June, Number 1, Ministry of Civil Defence of New Zealand.
- INGENIAR, UNGRD. (2018). *Atlas de Riesgo de Colombia: Revelando los Desastres Latentes*. <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/27179>
- Jenkins, S. F., Magill C. R., McAneney J., & Blong R. J. (2012). Regional ash fall hazard I: A probabilistic assessment methodology. *Bulletin of Volcanology*. 74(7), 1699-1712.
- Jenkins, S.F., Phillips, J.C., Price, R., Feloy, K., Baxter, P., Hdmoko, D., Bélizal, E. (2015). Developing building-damage scales for lahars: application to Merapi volcano, Indonesia. *Bull Volcanol.*, 77, 75. <https://doi.org/10.1007/s00445-015-0961-8>
- Martínez, L.A. (2022). *Riesgo y conflicto por el territorio en un volcán activo: Galeras-Colombia*, 9ª Conferencia Latinoamericana y Caribeña de Ciencias Sociales. CLACSO, UNAM, México.
- Moriano, D., Paredes, P., Córdoba, G., Delgado, H., (2017). Evaluación de la vulnerabilidad de edificaciones ante la génesis de lahars: Caso de estudio en la población de Santiago Xalitzintla, en el flanco NE del volcán Popocatepetl (México). *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*.
- Lundberg, F. (1903) *Approximerad Framställning av Sannolikehets-funktionen. Återförsäkring av Kollektivrisiker* (Producción aproximada de la función de probabilidad. Reaseguro de Riesgos Colectivos), Almqvist & Wiksell, Uppsala.

- 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*. Universidad de Los Andes. UNGRD.
- Pomonis, S.A. Spence, R., Baxter, P. (1999). Risk assessment of residential buildings for an eruption of Furnas Volcano, Sao Miguel, the Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 107–131.
- Servicio Geológico Colombiano – SGC. (2015). *Actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras – Colombia*. Dirección de Geoamenazas. San Juan de Pasto.
- Spence, R., Baxter, P., Zuccaro, G., (2004a). Building vulnerability and human casualty estimation for a pyroclastic flow, a model and its application to Vesuvius. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 133(1), 321–343.
- Spence, R., Zuccaro, G., Petrazzuoli, S., Baxter, P., (2004b). Resistance of buildings to pyroclastic flows, analytical and experimental studies and their application to Vesuvius. *Natural Hazards Review*, 5(1), 48–59.
- Spence, R., Kelman, I., Calogero, E., Toyos, G., Baxter, P., Komorowski, J. (2005). Modeling expected physical impacts and human casualties from explosive volcanic eruptions. *Nat. Haz. Earth. Sci.* 5, 1003–1015.
- Torres-Corredor, R.A., Ponce-Villareal, 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. *Boletín de Geología*, 39(2).
- Valentine, G. (1998). Damage to structures by pyroclastic flows and surges, inferred from nuclear weapons effects: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 87(1), 117–140.
- Wilson, G., Wilson, T.M., Deligne, N.I., Cole, J.W. (2014). Volcanic hazard impacts to critical infrastructure: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 286, 148–182. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.08.030>
- Wilson, L., Sparks, R.S.J., Huang, T.C., Watkins, N.D. (1978). The Control of Volcanic Column Heights by Eruption Energetics and Dynamics. *Journal of Geophysical Research*, 83, B4.
- 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. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 343, 171–180. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.06.026>
- Williams, G., Jenkins, S., Lee, D.W., Wee, S.J. (2021). How rainfall influences tephra fall loading - an experimental approach. *Bulletin of Volcanology*, 83, 42.
- Zuccaro, G., Santo, A., Cacace, F., Gregorio, D., Crescenzo, G. (2012). Building vulnerability assessment under landslides actions: Castellammare di Stabia case study, Italia: *Online report of Italian Geological Society*, 21, 470–472.