

GUÍA METODOLÓGICA

PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD
Y RIESGO POR CAÍDAS DE MATERIAL PIROCLÁSTICO
TRANSPORTADO POR EL VIENTO



GUÍA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y RIESGO POR CAÍDAS DE MATERIAL PIROCLÁSTICO TRANSPORTADO POR EL VIENTO

Roberto Armando Torres Corredor
Patricia Ponce Villarreal
Diego Mauricio Gómez Martínez
Rafael Isaac Cárdenas Santacruz



SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

Oscar Paredes Zapata
DIRECTOR GENERAL

Marta Lucía Calvache Velasco
DIRECTORA DE GEOAMENAZAS

Cristian Mauricio López Vélez
COORDINADOR DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN
Y MONITOREO DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA

AUTORES

Roberto Armando Torres Corredor
Patricia Ponce Villarreal
Diego Mauricio Gómez Martínez
Rafael Isaac Cárdenas Santacruz

COMITÉ EDITORIAL

PRESIDENTE

Virgilio Amaris Ibáñez

INTEGRANTES

Mario Andrés Cuéllar
Gloria Prieto Rincón
Marta Calvache Velasco
Hernán Olaya Dávila
Humberto Andrés Fuenzalida
Hernando Camargo
Margarita Bravo Guerrero
Viviana Dionicio
Teresa Duque
Julían Escallón
Armando Espinosa
Juan Guillermo Ramírez
Manuel Hernando Romero

Diagonal 53 n.° 34-53
Bogotá D. C., Colombia
Teléfono: 220 0200, ext.: 3048
ceditorial@sgc.gov.co

© Servicio Geológico Colombiano
ISBN impreso: 978-958-52794-7-6
ISBN digital: 978-958-52794-8-3
DOI: <https://doi.org/10.32685/9789585279483>

COMITÉ EDITORIAL SGC

Diagonal 53 n.° 34-53
Bogotá D. C., Colombia
Teléfono: 220 0200, ext.: 3048
ceditorial@sgc.gov.co

CORRECCIÓN DE ESTILO

Édgar Ordóñez

DISEÑO

Diana Paola Abadía

DIAGRAMACIÓN

Leonardo Cuéllar

EDITORIA GENERAL

Carolina Hernández O.

FOTOGRAFÍA DE CUBIERTA

Archivo SGC

Agosto, 2020

Las figuras o tablas de este libro que no están atribuidas a fuentes externas son de los autores

Citación: Torres Corredor, R. A., Ponce Villarreal, P., Gómez Martínez, D. M. y Cárdenas Santacruz, R. I. (2020). *Guía metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo por caídas de material piroclástico transportado por el viento*. Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/9789585279483>

Contenido

	05		31
INTRODUCCIÓN		4. ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD	
		4.1 Inventario de elementos expuestos	34
		4.2 Caracterización de elementos expuestos	36
		4.2 Tipo de daños o efectos esperados	38
		4.2 Evaluación y caracterización de la vulnerabilidad	43
	07		47
1. GENERALIDADES		5. ANÁLISIS DE RIESGO	
		5.1 Cálculo del riesgo	50
		5.2 Evaluación del riesgo	54
	19		57
2. DEFINICIÓN DEL ALCANCE Y LA ESCALA DEL TRABAJO		6. CONCLUSIONES	
	25		61
3. BÚSQUEDA Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN		REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

Introducción

Con la promulgación de la ley de gestión del riesgo de desastres (Ley 1523 de 2012), las autoridades regionales y locales deben realizar estudios para la gestión del riesgo de desastres en sus territorios, enmarcados en sus planes de desarrollo y como insumo para actualizar sus planes de ordenamiento territorial (POT, PBOT y EOT), con miras a realizar una planificación que incluya seguridad y protección de la vida y bienes de los habitantes, y sostenibilidad ambiental en sus territorios.

En marzo de 2015 fue celebrada la Tercera Conferencia Mundial de las Naciones Unidas sobre la Reducción del Riesgo de Desastres, en Sendai, Miyagi (Japón), en la cual fue aprobado el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030. Los Estados participantes, entre ellos Colombia, reiteraron su compromiso de abordar la reducción del riesgo de desastres y el aumento de la resiliencia ante los desastres, con un renovado sentido de urgencia, en el contexto del desarrollo sostenible y la erradicación de la pobreza, y de integrar como corresponda tanto la reducción del riesgo de desastres como el aumento de la resiliencia en las políticas, los planes, los programas y los presupuestos de todos los niveles, y de examinar ambas cuestiones en los marcos pertinentes (ONU, 2015).

El Consejo Nacional de Gestión del Riesgo conformado por el presidente de la República, los ministros, el Departamento Nacional de Planeación y el director de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) aprobaron el Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, con vigencia de diez años (UNGRD, 2016), que se adoptó mediante un decreto nacional que lo dota de carácter vinculante. Eso significa que es de cumplimiento obligatorio, y su desacato puede acarrear sanciones. En el documento se consignan las generalidades, objetivos, estructura, estrategias y programas para la implementación del plan y la articulación con los entes territoriales y las entidades. Es el principal instrumento de la Ley 1523 de 2012.

El objetivo general y los cinco objetivos específicos del Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres de Colombia se encuentran alineados con las cuatro prioridades suscritas en el Marco de Sendai 2015-2030, y con el objetivo esperado en los próximos quince años: la reducción sustancial del riesgo de desastres y de las pérdidas ocasionadas por los desastres, tanto en vidas, medios de subsistencia y salud como en bienes físicos, sociales, culturales y ambientales de las personas, las empresas, las comunidades y los países (UNGRD, 2016).

Uno de los objetivos estratégicos misionales del Servicio Geológico Colombiano (SGC) es realizar la investigación, el seguimiento y monitoreo de las amenazas geológicas, actividades que servirán de base para la gestión integral del riesgo, el ordenamiento territorial y ambiental y la planificación del desarrollo. El SGC forma parte del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD). En el Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo, junto con otras importantes instituciones, se encarga de asesorar y planificar la implementación permanente del proceso de conocimiento del riesgo.

En este contexto, como un aporte a los procesos de evaluación del riesgo volcánico, y dado que no existe en la actualidad un documento de este tipo, el SGC hace una propuesta metodológica, a manera de guía, en la que se describen los pasos que deben seguirse para realizar un estudio de evaluación de la vulnerabilidad física y el riesgo volcánico relacionados con las caídas de material piroclástico transportado por el viento. Este trabajo es el punto de partida para generar discusiones con la UNGRD e investigadores de este tema, y concretar una guía final; también puede usarse de base o adaptarlo para generar guías dirigidas a atender otro tipo de fenómenos volcánicos.



» Vista del costado oriental del Complejo Volcánico Galeras con una columna de emisión de cenizas, 25 de octubre de 2004.
Fuente: SGC-OVS Pasto. Pasto, Nariño. 2004. Repositorio de archivos institucional.



1

Generalidades



Vista área del cono activo de Galeras y parte del anfiteatro de uno de los Estadios del Complejo Volcánico Galeras, 14 de enero de 2005.
Fuente: SGC-OVS Pasto. Pasto, Nariño. 2005. Repositorio de archivos institucional.

En la bibliografía del monitoreo y evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo relacionados con el fenómeno volcánico se utiliza el término *volcanic ash*¹, que en idioma castellano se traduciría como *ceniza volcánica*, para referirse de manera general a pequeñas piezas irregulares de roca y vidrio volcánico. La ceniza volcánica es dura, abrasiva, ligeramente corrosiva, conduce electricidad cuando está húmeda y no se disuelve en agua. La ceniza es distribuida sobre extensas áreas de territorio por el viento (USGS, 2019).

En este trabajo nos enfocaremos en la caída de piroclastos de tamaño *lapilli* (menor de 65 mm) y ceniza (menor de 2 mm), que al ser transportados por el viento pueden alcanzar las ciudades o poblados cercanos a un volcán activo en erupción y depositarse sobre los techos de las edificaciones.

En la figura 1 se muestra un esquema simplificado de una erupción volcánica explosiva (USGS, 2008). Nótese la caída piroclástica, que incluye los tamaños de *lapilli* y ceniza.

Existen términos que son de uso común en el estudio del fenómeno volcánico y en los estudios de evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo, que tienen asociado un concepto específico, por lo que a continuación se consignan las definiciones de los mismos, tomadas principalmente de los documentos “Terminología sobre reducción del riesgo de desastres” de las Naciones Unidas (UNISDR, 2009) y “Terminología sobre gestión del riesgo de desastres y fenómenos amenazantes” (SNGRD, 2017).

Amenaza

Un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que pueden ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales (UNISDR, 2009).

Amenaza geológica

Un proceso o fenómeno geológico que podría ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales (UNISDR, 2009).

Capacidad

La combinación de todas las fortalezas, los atributos y los recursos disponibles dentro de una comunidad, sociedad u organización que pueden utilizarse para la consecución de los objetivos acordados (UNISDR, 2009).

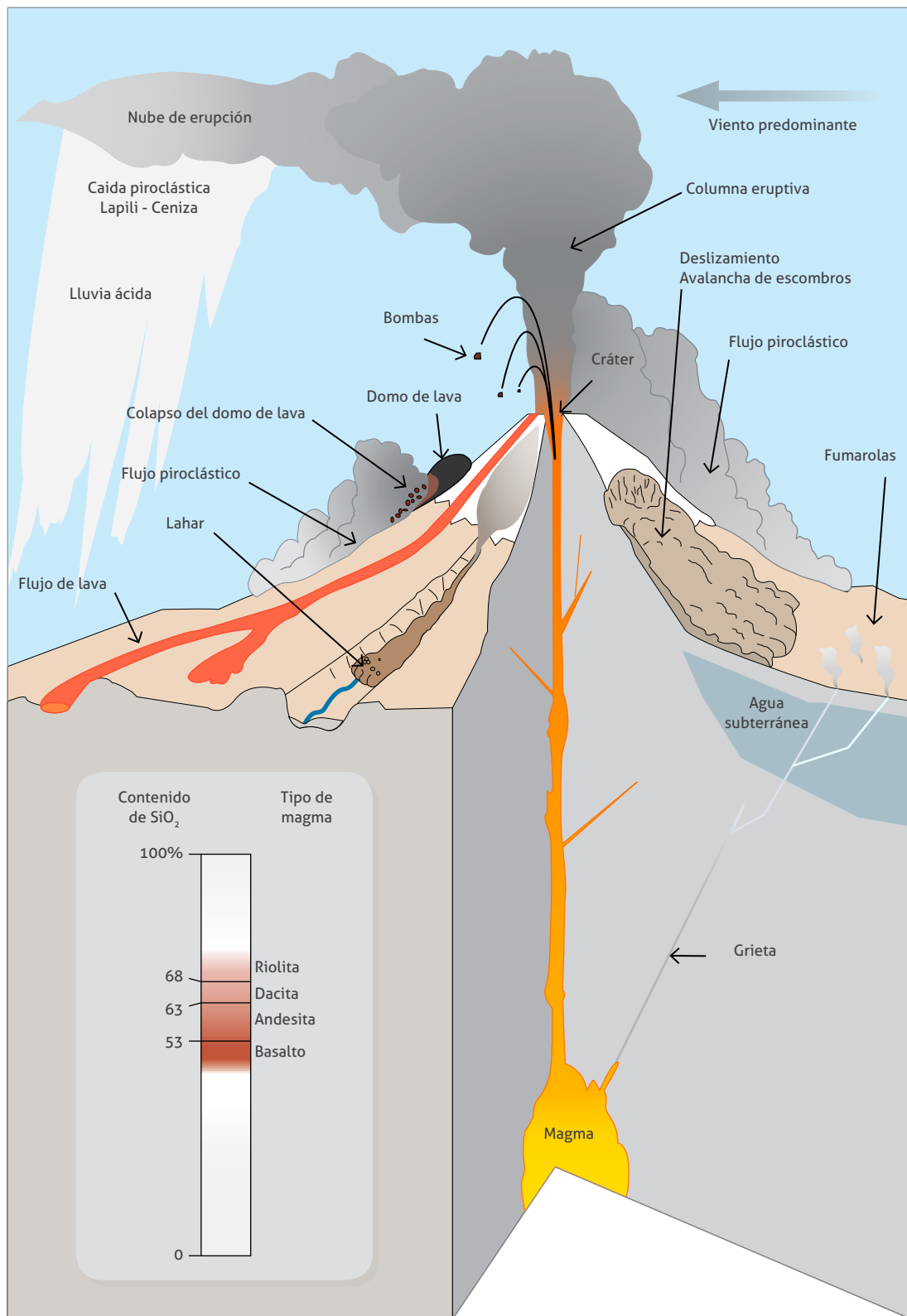
Capacidad de afrontamiento

La habilidad de la población, las organizaciones y los sistemas, mediante el uso de los recursos y las destrezas disponibles, de enfrentar y gestionar condiciones adversas, situaciones de emergencia o desastres (UNISDR, 2009).

Ceniza volcánica

Es material magmático pulverizado o finamente fragmentado, con granos individuales con tamaños menores de 2 mm de diámetro. Pueden ser llevadas por el viento literalmente alrededor del planeta; sus efectos pueden causar importantes

1 https://volcanoes.usgs.gov/volcanic_ash/



» **Figura 1.** Esquema simplificado de una erupción volcánica

Fuente: modificado a partir de USGS (2008)

impactos económicos. Las cenizas volcánicas no son en ningún caso producto de la quema, como lo son otras “cenizas” (Lockwood y Hazlett, 2010).

Código de construcción

Una serie de ordenamientos o reglamentos relacionados con estándares que buscan controlar aspectos de diseño, construcción, materiales, modificaciones y ocupación de cualquier estructura, que son necesarios para velar por la seguridad y el bienestar de los seres humanos, incluida la resistencia a los derrumbes y a los daños (UNISDR, 2009).

Concientización/sensibilización pública

El grado de conocimiento común sobre el riesgo de desastres, los factores que conducen a estos y las acciones que pueden tomarse individual y colectivamente para reducir la exposición y la vulnerabilidad frente a las amenazas (UNISDR, 2009).

Cráter

Una pequeña depresión en forma de embudo en la cima de un volcán, en la parte superior del conducto a través del cual el magma alcanza la superficie (NOAA, 2000). Hay otros tipos de aberturas volcánicas² que son puntos en la corteza terrestre por donde los gases, roca fundida y material piroclástico son eyectados, por ejemplo, fisuras, fumarolas, campos fumarólicos, campos de pequeños cráteres, aberturas de descargas hidrotermales, etc. (USGS, 2019).

Desarrollo de capacidades

El proceso mediante el cual la población, las organizaciones y la sociedad estimulan y desarrollan sistemáticamente sus capacidades en el transcurso del tiempo, a fin de lograr sus objetivos sociales y económicos, a través de mejores conocimientos, habilidades, sistemas e instituciones, entre otras cosas (UNISDR, 2009).

Desastre

Una seria interrupción en el funcionamiento de una comunidad o sociedad que ocasiona una gran cantidad de muertes, al igual que pérdidas

e impactos materiales, económicos y ambientales que exceden la capacidad de la comunidad o la sociedad afectada para hacer frente a la situación mediante el uso de sus propios recursos (UNISDR, 2009).

Domos de lava

Son masas de lava creadas por varios flujos de lava, que sucesivamente construyen una pila en forma de domo sobre el cráter o una abertura volcánica activa (Németh y Martin, 2007).

Erupción volcánica

Proceso mediante el cual materiales sólidos, líquidos y gaseosos con alta temperatura son eyectados en la atmósfera y en la superficie de la tierra por la actividad volcánica. Las erupciones pueden variar desde flujos tranquilos de roca líquida a expulsiones tremendamente violentas de material piroclástico (Németh y Martin, 2007).

Evaluación del riesgo

Una metodología para determinar la naturaleza y el grado de riesgo a través del análisis de posibles amenazas y la evaluación de las condiciones existentes de vulnerabilidad que conjuntamente podrían dañar potencialmente a la población, la propiedad, los servicios y los medios de sustento expuestos, al igual que el entorno del cual dependen (UNISDR, 2009).

Exposición (elementos expuestos)

Presencia de personas, medios de subsistencia, servicios ambientales y recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructura que por su localización pueden ser afectados por la manifestación de una amenaza (Ley 1523 de 2012).

Fragilidad

Indica las condiciones de desventaja o debilidad propias de los elementos expuestos, el ser humano y sus medios de vida frente a una amenaza. A mayor fragilidad, mayor vulnerabilidad. Se relaciona con las condiciones físicas de edificaciones, sistemas, comunidad o sociedad, y es de origen interno. Ejemplos: formas de construcción, no seguimiento de normativa vigente sobre construcción, materiales, etc. (CENEPRED, 2014).

2 <https://volcanoes.usgs.gov/vsc/glossary/vent.html>

Gestión correctiva del riesgo de desastres

Actividades de gestión que abordan y buscan corregir o reducir el riesgo de desastres que ya existe (UNISDR, 2009).

Gestión de emergencias

La organización y la gestión de los recursos y las responsabilidades para abordar todos los aspectos de las emergencias, especialmente la preparación, la respuesta y los pasos iniciales de la rehabilitación (UNISDR, 2009).

Gestión del riesgo

El enfoque y la práctica sistemática de gestionar la incertidumbre para minimizar los daños y las pérdidas potenciales (UNISDR, 2009).

Gestión del riesgo de desastres

El proceso sistemático de utilizar directrices administrativas, organizaciones, destrezas y capacidades operativas para ejecutar políticas y forta-

lecer las capacidades de afrontamiento, con el fin de reducir el impacto adverso de las amenazas naturales y la posibilidad de que ocurra un desastre (UNISDR, 2009).

Gestión prospectiva del riesgo de desastres

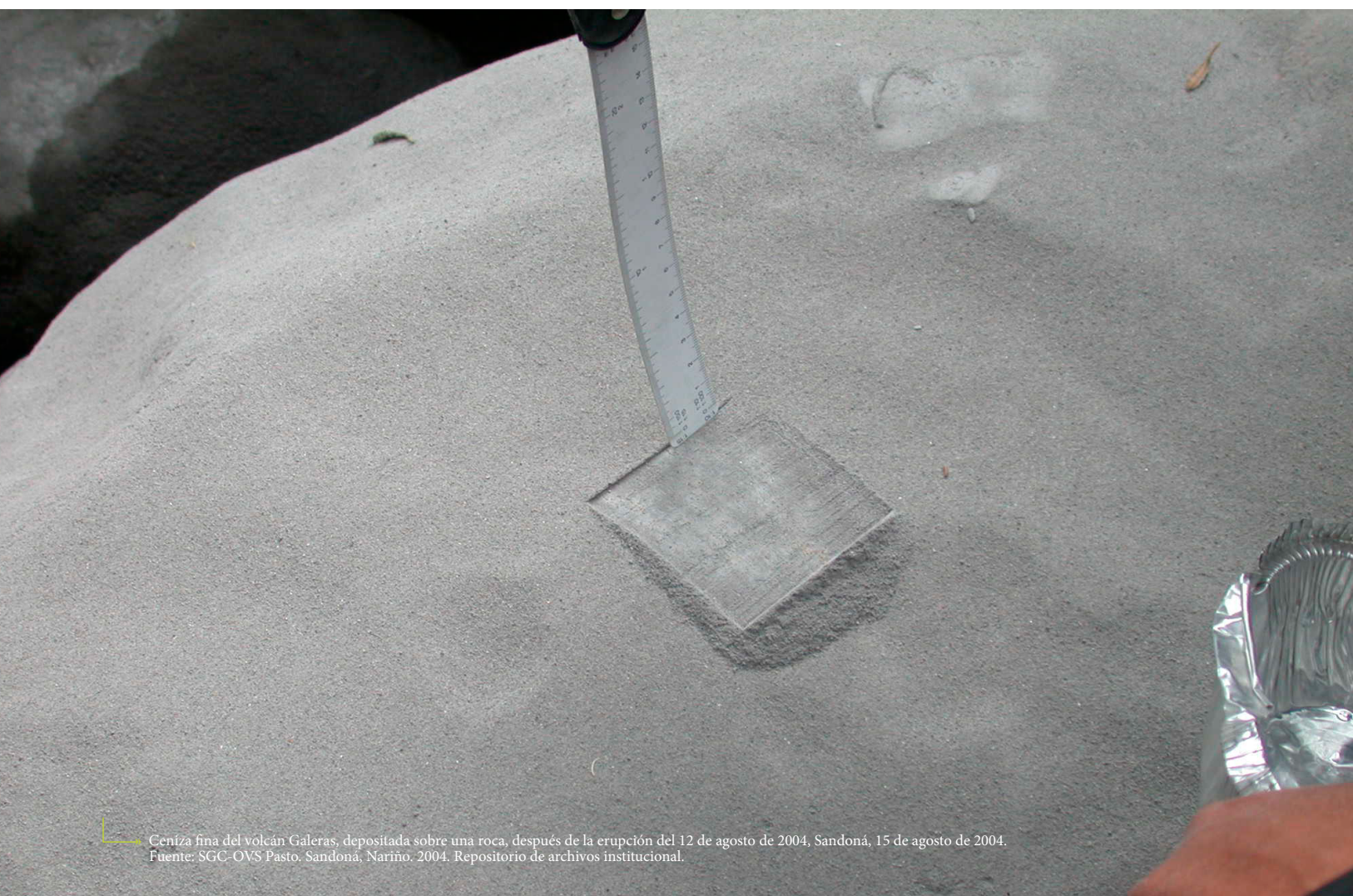
Actividades de gestión que abordan y buscan evitar el aumento o el desarrollo de nuevos riesgos de desastres (UNISDR, 2009).

Grado de exposición

Situación, estado o valor que puede tener una población, las propiedades, los sistemas u otros elementos presentes en las zonas donde existen amenazas, y por consiguiente, están expuestos a experimentar pérdidas potenciales (SNGRD, 2017; UNISDR, 2009).

Instalaciones vitales

Las estructuras físicas, instalaciones técnicas y sistemas principales que son social, económica



u operativamente esenciales para el funcionamiento de una sociedad o comunidad, tanto en circunstancias habituales como extremas, durante una emergencia (UNISDR, 2009).

Intervención

Corresponde al tratamiento del riesgo mediante la modificación intencional de las características de un fenómeno, con el fin de reducir la amenaza que representa, o de modificar las características intrínsecas de un elemento expuesto para reducir su vulnerabilidad (Ley 1523 de 2012).

Intervención correctiva

Proceso cuyo objetivo es reducir el nivel de riesgo existente en la sociedad a través de acciones de mitigación, en el sentido de disminuir o reducir las condiciones de amenaza, cuando sea posible, y la vulnerabilidad de los elementos expuestos (Ley 1523 de 2012).

Intervención prospectiva

Proceso cuyo objetivo es garantizar que no surjan nuevas situaciones de riesgo, a través de acciones de prevención, impidiendo que los elementos expuestos sean vulnerables o que lleguen a estar expuestos ante posibles eventos peligrosos. Su objetivo último es evitar nuevos riesgos y la necesidad de intervenciones correctivas en el futuro. La intervención prospectiva se realiza primordialmente a través de la planificación ambiental sostenible, el ordenamiento territorial, la planificación sectorial, la regulación y las especificaciones técnicas, los estudios de prefactibilidad y diseño adecuados, el control y seguimiento y, en general, todos aquellos mecanismos que contribuyan de manera anticipada a la localización, construcción y funcionamiento seguro de la infraestructura, los bienes y la población (Ley 1523 de 2012).

Lapilli

Son piroclastos con tamaño entre 2 y 64 mm. *Lapilli* se deriva de la palabra latina *lapillus*, que significa “piedra pequeña”. El *lapilli*, cuando está húmedo, se puede soldar con otros fragmentos formando salpicaduras o aglutinados (Lockwood y Hazlett, 2010).

Medidas estructurales

Cualquier construcción física para reducir o evitar los posibles impactos de las amenazas, o la aplicación de técnicas de ingeniería para lograr la resistencia y la resiliencia de las estructuras o de los sistemas frente a las amenazas (UNISDR, 2009).

Medidas no estructurales

Cualquier medida que no suponga una construcción física y que utiliza el conocimiento, las prácticas o los acuerdos existentes para reducir el riesgo y sus impactos, especialmente a través de políticas y leyes, una mayor concientización pública, la capacitación y la educación (UNISDR, 2009).

Magma

Roca fundida bajo la superficie de la Tierra que asciende por los conductos volcánicos. *Lava* es el término para el magma después de que brota de un volcán (NOAA, 2000).

Mitigación

La disminución o la limitación de los impactos adversos de las amenazas y los desastres afines (UNISDR, 2009).

Mitigación del riesgo

Medidas de intervención prescriptiva o correctiva dirigidas a reducir o disminuir los daños y pérdidas que se puedan presentar, a través de reglamentos de seguridad y proyectos de inversión pública o privada cuyo objetivo es reducir las condiciones de amenaza, cuando sea posible, y la vulnerabilidad existente (Ley 1523 de 2012).

Nube eruptiva

La columna de gases, cenizas y fragmentos de roca elevándose sobre el cráter o la abertura volcánica activa, que puede alcanzar varios kilómetros de altura, desde donde los vientos la pueden llevar a largas distancias. La nube volcánica es una masa envolvente de vapor de agua, gases, fragmentos pequeños de roca y ceniza que se encuentra altamente cargada con electricidad, que se forma durante la erupción y sobresale del volcán. Las nubes de erupción pueden adoptar

formas de sombrilla, copas de árboles o coliflores (Németh y Martin, 2007).

Onda de choque

Es una onda de presión que viaja a una velocidad mayor que la velocidad del sonido del medio a través del cual se propaga, producida por una erupción volcánica explosiva (Sigurdsson, 2015).

Piroclastos

Fragmentos de roca incandescente de varios tamaños eyectados durante una erupción volcánica explosiva (Sigurdsson, 2015).

Plan para la reducción del riesgo de desastres

Un documento que elabora una autoridad, un sector, una organización o una empresa para establecer metas y objetivos específicos para la reducción del riesgo de desastres, conjuntamente con las acciones afines para la consecución de los objetivos trazados (UNISDR, 2009).

Planificación de contingencias

Un proceso de gestión que analiza posibles eventos específicos o situaciones emergentes que podrían imponer una amenaza a la sociedad o al medio ambiente, y establece arreglos previos para permitir respuestas oportunas, eficaces y apropiadas ante tales eventos y situaciones (UNISDR, 2009).

Planificación/ordenamiento territorial

El proceso que emprenden las autoridades públicas para identificar, evaluar y determinar las diferentes opciones para el uso de los suelos, lo que incluye la consideración de objetivos económicos, sociales y ambientales a largo plazo y las consecuencias para las diferentes comunidades y grupos de interés, al igual que la consiguiente formulación y promulgación de planes que describan los usos permitidos o aceptables (UNISDR, 2009).

Plataforma nacional para la reducción del riesgo de desastres

Un término genérico para los mecanismos nacionales de coordinación y de orientación nor-

mativa sobre la reducción del riesgo de desastres, que deben ser de carácter multisectorial e interdisciplinario, y en las que deben participar los sectores público y privado, la sociedad civil y todas las entidades interesadas en un país (UNISDR, 2009).

Preparación

El conocimiento y las capacidades que desarrollan los gobiernos, los profesionales, las organizaciones de respuesta y recuperación, las comunidades y las personas para prever, responder y recuperarse de forma efectiva de los impactos de los eventos o las condiciones probables, inminentes o actuales que se relacionan con una amenaza (UNISDR, 2009).

Prevención

La evasión absoluta de los impactos adversos de las amenazas y de los desastres conexos (UNISDR, 2009).

Prevención de riesgo

Medidas y acciones de intervención restrictiva o prospectiva dispuestas con anticipación con el fin de evitar que se genere riesgo. Puede enfocarse a evitar o neutralizar la amenaza o la exposición y la vulnerabilidad ante la misma en forma definitiva para impedir que se genere nuevo riesgo. Los instrumentos esenciales de la prevención son aquellos previstos en la planificación, la inversión pública y el ordenamiento ambiental territorial, que tienen como objetivo reglamentar el uso y la ocupación del suelo de forma segura y sostenible. (Ley 1523 de 2012).

Pronóstico

Una declaración certera o un cálculo estadístico de la posible ocurrencia de un evento o condiciones futuras en una zona específica (UNISDR, 2009).

Recuperación

La restauración y el mejoramiento, cuando sea necesario, de los planteles, instalaciones, medios de sustento y condiciones de vida de las comunidades afectadas por los desastres, lo que incluye esfuerzos para reducir los factores del riesgo de desastres (UNISDR, 2009).

Reducción del riesgo de desastres

El concepto y la práctica de reducir el riesgo de desastres mediante esfuerzos sistemáticos dirigidos al análisis y a la gestión de los factores causales de los desastres, lo que incluye la reducción del grado de exposición a las amenazas, la disminución de la vulnerabilidad de la población y la propiedad, una gestión sensata de los suelos y del medio ambiente, y el mejoramiento de la preparación ante los eventos adversos (UNISDR, 2009).

Reforzamiento

El refuerzo o la modernización de las estructuras existentes para lograr una mayor resistencia y resiliencia a los efectos dañinos de las amenazas (UNISDR, 2009).

Resiliencia

La capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos

de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas (UNISDR, 2009).

Respuesta

El suministro de servicios de emergencia y de asistencia pública durante o inmediatamente después de la ocurrencia de un desastre, con el propósito de salvar vidas, reducir los impactos a la salud, velar por la seguridad pública y satisfacer las necesidades básicas de subsistencia de la población afectada (UNISDR, 2009).

Riesgo

La combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas (UNISDR, 2009).

Riesgo aceptable

El nivel de las pérdidas potenciales que una sociedad o comunidad consideran aceptable, según sus condiciones sociales, económicas, políticas,



culturales, técnicas y ambientales existentes (UNISDR, 2009).

Riesgo de desastres

Las posibles pérdidas que ocasionaría un desastre en términos de vidas, las condiciones de salud, los medios de sustento, los bienes y los servicios, y que podrían ocurrir en una comunidad o sociedad particular en un período específico de tiempo en el futuro (UNISDR, 2009). Según la Ley 1523 de 2012, corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural, tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente, el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad.

Riesgo específico

Cálculo de pérdidas de cualquier tipo que se expresan como proporción del riesgo total. Este cálculo está definido en un periodo de referencia, una región y para una amenaza particular. El riesgo específico también se usa para definir las pérdidas financieras de la propiedad, en cuyo caso se refiere generalmente al coeficiente del costo de reparación o reinstauración de la propiedad, según el costo de remplazo total (SGC, 2016).

Riesgo extensivo

El riesgo generalizado que se relaciona con la exposición de poblaciones dispersas a condiciones reiteradas o persistentes con una intensidad baja o moderada, a menudo de naturaleza altamente localizada, lo cual puede conducir a un impacto acumulativo muy debilitante de los desastres (UNISDR, 2009).

Riesgo intensivo

El riesgo asociado con la exposición de grandes concentraciones poblacionales y actividades económicas a intensos eventos relativos a las amenazas existentes, los cuales pueden conducir al surgimiento de impactos potencialmente catastróficos de desastres que incluirían una

gran cantidad de muertes y la pérdida de bienes (UNISDR, 2009).

Riesgo residual

El riesgo que todavía no se ha gestionado, aun cuando existan medidas eficaces para la reducción del riesgo de desastres y para los cuales se deben mantener las capacidades de respuesta de emergencia y de recuperación (UNISDR, 2009).

Servicios de emergencia

El conjunto de agencias especializadas con la responsabilidad y los objetivos específicos de proteger a la población y los bienes en situaciones de emergencia (UNISDR, 2009).

Servicios de los ecosistemas

Los beneficios que obtienen de los ecosistemas las personas y las comunidades (UNISDR, 2009).

Sistema de alerta temprana

El conjunto de capacidades necesarias para generar y difundir información de alerta que sea oportuna y significativa, con el fin de permitir que las personas, las comunidades y las organizaciones amenazadas por una amenaza se preparen y actúen de forma apropiada y con suficiente tiempo de anticipación para reducir la posibilidad de que se produzcan pérdidas o daños (UNISDR, 2009).

Tefra

Este término describe el material piroclástico eyectado en una erupción que luego cae. Las explosiones volcánicas producen escombros fragmentarios: grandes rocas del tamaño de una casa, material de roca finamente triturado, magma pulverizado explosivamente en una niebla de gotas fundidas y vidrio fragmentario y cristales (Lockwood y Hazlett, 2010).

Transferencia del riesgo

El proceso de trasladar formal o informalmente las consecuencias financieras de un riesgo en particular de una parte a otra mediante el cual una familia, comunidad, empresa o autoridad estatal obtendrá recursos de la otra parte después de que se produzca un desastre, a cambio de beneficios sociales o financieros continuos o

compensatorios que se brindan a la otra parte (UNISDR, 2009).

Volcán

Una abertura o conducto en la corteza de la Tierra a través del cual la roca fundida o caliente, el vapor y la ceniza alcanzan la superficie, incluido el cono construido por las erupciones (NOAA, 2000).

Vulcanología

Es el estudio del origen y ascenso de magma a través del manto y la corteza terrestre y su erupción en la superficie (Sigurdsson, 2015).

Vulnerabilidad

Las características y las circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza (UNISDR, 2009).





» Vista del costado oriental del Complejo Volcánico Galeras con una columna de emisión de cenizas, 6 de noviembre de 2004.
Fuente: SGC-OVS Pasto. Pasto, Nariño. 2004. Repositorio de archivos institucional.

The background of the slide is a photograph of a city at dusk or dawn. In the foreground, there are silhouettes of trees and a street lamp. In the middle ground, a multi-story building is visible. In the background, there are mountains under a sky with large, dramatic clouds. A vertical green bar is on the left side of the slide.

2

Definición del alcance y la escala de trabajo



» Panorámica aérea del Complejo Volcánico Galeras mostrando el cono activo, tomada desde el Sur, 21 de agosto de 2004.
Fuente: SGC-OVS Pasto, Pasto, Nariño. 2004. Repositorio de archivos institucional.

El artículo 10 de la Ley 388 de 1997 establece que, de acuerdo con la Constitución y las leyes, en la elaboración y adopción de sus planes de ordenamiento territorial, los municipios y distritos deberán tener en cuenta como determinantes de superior jerarquía las relacionadas con la conservación y protección del medio ambiente, los recursos naturales y la prevención de amenazas y riesgos naturales; las políticas, directrices y regulaciones sobre prevención de amenazas y riesgos naturales, el señalamiento y localización de las áreas de riesgo para asentamientos humanos, así como las estrategias de manejo de zonas expuestas a amenazas y riesgos naturales.

El artículo 39 de la Ley 1523 de 2012 establece que los planes de ordenamiento territorial deberán integrar el análisis del riesgo en el diagnóstico biofísico, económico y socioambiental, y considerar el riesgo de desastres como un condicionante para el uso y la ocupación del territorio. De esta forma se procuraría evitar la configuración de nuevas condiciones de riesgo.

Los artículos 2, 3 y 4 del Decreto 1807 de 2014 hacen referencia a estudios técnicos, básicos y detallados que se deben realizar, dependiendo de los contenidos proyectados a mediano y largo plazo de los planes de ordenamiento territorial. El citado decreto incluye los fenómenos amenazantes de inundación, avenidas torrenciales y movimientos en masa, pero también establece que aquellos municipios o distritos que se encuentren expuestos a amenazas por otros fenómenos naturales (sísmicos, volcánicos, tsunamis, entre otros), o de origen tecnológico, deben evaluarlas con base en la información disponible generada por las autoridades y sectores competentes y de acuerdo con la situación de cada municipio o distrito. Por lo tanto, las directrices de este decreto se pueden extrapolar a otros fenó-

menos, como los producidos por las erupciones volcánicas.

El artículo 14 del citado decreto hace referencia a los estudios detallados que deben contener lo siguiente para cada uno de los eventos amenazantes analizados: análisis detallado de amenaza, evaluación de vulnerabilidad, evaluación del riesgo y determinación de medidas de mitigación.

El Decreto 4131 de 2011 establece que el Servicio Geológico Colombiano es un instituto científico y técnico, adscrito al Ministerio de Minas y Energía, que hace parte del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SNCTI). Entre otros, tiene como objeto adelantar el seguimiento y monitoreo de amenazas de origen geológico, y entre sus funciones se encuentran las de asesorar al Gobierno nacional para la formulación de las políticas en materia de geociencias, amenazas y riesgos geológicos, generar e integrar conocimientos y levantar, compilar, validar, almacenar y suministrar, en forma automatizada y estandarizada, información sobre geología, recursos del subsuelo y amenazas geológicas, de conformidad con las políticas del Gobierno nacional; investigar fenómenos geológicos generadores de amenazas y evaluar amenazas de origen geológico que puedan tener un alcance regional o nacional; proponer, evaluar y difundir metodologías de evaluación de amenazas cuyo grado de afectación sea departamental o municipal.

Por lo tanto, el SGC es la entidad gubernamental, científica y técnica encargada de realizar la investigación, el seguimiento, zonificación, caracterización, monitoreo y estudios de evaluación de amenazas geológicas, entre ellas la amenaza volcánica, funciones que realiza con mucho rigor técnico y científico. Los mapas de amenaza volcánica y sus respectivas memorias son un insumo útil para los estudios de vulnerabilidad y riesgo. A la fecha, el SGC monitorea veinte

volcanes activos, diez de los cuales cuentan con mapa de amenaza. Dichos mapas están publicados en línea en la página web de la institución.³

En los estudios realizados para evaluar la vulnerabilidad y el riesgo se requiere de la correcta caracterización de la amenaza y de la vulnerabilidad de los elementos expuestos. En el caso de los volcanes, cada fenómeno originado en una erupción, por sí mismo, es un factor de amenaza; por ejemplo, la caída de piroclastos transportados por el viento, una corriente de densidad piroclástica, un flujo de lodos o un flujo de lava tendrán, por su dinámica propia, un cubrimiento territorial diferente y una afectación específica sobre los elementos expuestos.

Por su parte, los elementos expuestos son de diferente tipo, y su grado de afectación puede variar según cuál sea el factor amenazante. Pueden ser elementos expuestos, las poblaciones, los animales de granja, las viviendas, las obras civiles de diferente tipo, el suelo, los cuerpos de agua, los cultivos, los bosques naturales, los animales silvestres, etc. La vulnerabilidad puede ser de tipo físico, social o psicosocial, económica, ambiental, etc., y su análisis debe ser de tipo interdisciplinario. En esta guía, el enfoque recae en el análisis de la vulnerabilidad física.

Dependiendo de sus características, un volcán puede dar origen a erupciones que pueden alcanzar un cubrimiento regional o uno local. Según sea el caso, las autoridades regionales y locales pueden tomar la decisión de trabajar de manera conjunta o individual en la región afectada en cada territorio, para realizar los estudios de evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo. La escala debe cubrir con el detalle requerido el área que va a ser objeto de la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo. La escala se define como la relación o proporción que existe entre las dimensiones superficiales reales de un territorio y las del croquis, figura o esquema que representa la realidad sobre un plano o un mapa. Comúnmente las escalas de análisis que se usan son una escala pequeña, como la escala nacional, que puede cubrir el territorio de una nación (matemáticamente, 1:1.000.000 o menos); la escala regional, que puede cubrir el territorio de un departamento, una cuenca hidrográfica mayor o una región geográfica (entre

1:100.000 y 1:1.000.000); la escala media, que puede cubrir el territorio de un municipio, una cuenca pequeña (entre 1:25.000 y 1:100.000); la escala grande, que puede cubrir el casco urbano de un municipio, una comuna, una ciudad (entre 1:2.000 y 1:25.000); la escala de sitio de investigación, que puede cubrir una zona determinada objeto de estudio, por ejemplo, la zona cubierta por un deslizamiento, un barrio afectado por un fenómeno de subsidencia, etc. (entre 1:200 y 1:2.000).

El IGAC⁴ considera tres categorías de escalas: la escala pequeña (1:500.000 y menores) para planeamiento general y estudios estratégicos; la escala mediana (más grande que 1:100.000 y más pequeña que 1:5.000) se emplea para el planeamiento más detallado; la escala grande (igual o mayor que la escala 1:5.000) tiene usos urbanos, técnicos y administrativos. Las escalas estándares de los mapas topográficos son 1:500, 1:1.000, 1:2000 y 1:5000 (IGAC, 2018). En la tabla 1 se exponen las relaciones entre mapa y terreno correspondientes a las escalas estándares del IGAC.

En la tabla 2 se indican las escalas que el artículo 5 del Decreto 1807 de 2014 menciona como mínimas, en las que deben elaborarse los estudios técnicos, de conformidad con las clases de suelo establecidas en la Ley 388 de 1997.

También se debe tener en cuenta cada fenómeno por separado, ya que la frecuencia de ocurrencia, el alcance y la afectación que producen en superficie son diferentes en cada caso. En este sentido, no se pueden prever todos los impactos adversos sobre los elementos expuestos o el tamaño del territorio afectado, lo cual implica incertidumbres que los planificadores deben incluir en el análisis, al igual que el porcentaje de los recursos económicos y logísticos que se asignarán para cubrir las incertidumbres.

Con base en lo expuesto, es necesario definir el alcance y la escala del trabajo de la evaluación, definir el o los fenómenos volcánicos que se van a trabajar, el tipo o los tipos de vulnerabilidad y los elementos expuestos que serán objeto de estudio. También habrá que definir si el alcance es regional, departamental, local, municipal, urbano o rural, y de acuerdo con eso asignar los recursos necesarios

3 <https://www2.sgc.gov.co/volcanes/index.html>

4 <https://www.igac.gov.co/es/contenido/areas-estrategicas/formatos-y-escalas-de-mapas>

» **Tabla 1.** Relaciones entre mapa y terreno en las escalas estándares

ESCALAS DE MAPAS	TAMAÑOS DE MAPAS EN CENTÍMETROS	DISTANCIA TERRESTRE EQUIVALENTE A UN CENTÍMETRO EN EL MAPA	ÁREA GEOGRÁFICA CUBIERTA POR CADA PLANCHA EN DIFERENTES UNIDADES DE MEDICIÓN		
			METROS CUADRADOS	HECTÁREAS	KILÓMETROS CUADRADOS
1:500	75 x 50	5 m	93.750	9,375	0,09375
1:1.000	75 x 50	10 m	375.000	38	0,375
1:2.000	75 x 50	20 m	1.500.000	150	1,5
1:5.000	75 x 50	50 m	9.375.000	937,5	9,375
1:10.000	75 x 50	100 m	37.500.000	3.750	37,5
1:25.000	60 x 40	250 m	150.000.000	15.000	150
1:50.000	60 x 40	500 m	600.000.000	60.000	600
1:100.000	60 x 40	1.000 m	2.000.000.000	200.000	2.000
1:200.000	52,5 x 40	2.000 m	8.400.000.000	840.000	8.400
1:500.000	66 x 48	5.000 m	79.200.000.000	7.920.000	79.200

Fuente: IGAC (2018)

» **Tabla 2.** Escalas de trabajo tenidas en cuenta en los estudios técnicos

TIPO DE ESTUDIO	CLASE DE SUELO	ESCALA
Estudio básico	Urbano	1:5.000
	Expansión urbana	1:5.000
	Rural	1:25.000
Estudio detallado	Urbano	1:2.000
	Expansión urbana	1:2.000
	Rural suburbano	1:5.000

Fuente: Decreto 1807 de 2014

y establecer las escalas de trabajo que regirán en los mapas y los estudios. Por ejemplo, un fenómeno volcánico amenazante puede ser la caída de piroclastos transportados por el viento (*lapilli* y ceniza volcánica); la vulnerabilidad que se evalúe puede ser la física; los elementos expuestos pueden ser los techos de las viviendas en la zona urbana, y la escala de trabajo puede ser 1:1.000.

En la definición del alcance y la escala de trabajo también se debe tener en cuenta que se van a producir mapas con resultados del estudio que probablemente van a ser usados como una herramienta de decisión por autoridades y tomadores de decisiones, por agencias de primera respuesta y entes de planificación.

Las planchas geológicas producidas por el SGC manejan la escala 1:100.000. Por ejemplo, la geología de la plancha 429, Pasto, que incluye el

volcán Galeras, o la geología de la plancha 428, Túquerres, que incluye al volcán Azufral. Los mapas geológicos de los volcanes se elaboran en escalas acordes con la longitud y el cubrimiento de los depósitos mapeados. Por lo general se manejan tres planchas con escala 1:25.000 para productos eruptivos proximales, 1:50.000 para los que alcanzan distancias medias y 1:100.000 cuando el complejo volcánico es muy grande o cuando los productos eruptivos, como, por ejemplo, un lahar, logran alcanzar grandes distancias desde su punto de origen (Bernardo Pulgarín, SGC, comunicación personal, 6 de noviembre de 2018).

Esta guía se enfoca en el fenómeno volcánico de depósitos de caídas de material piroclástico transportado por el viento, y su propósito es evaluar la vulnerabilidad física ante este fenómeno y la consecuente valoración del riesgo.



Ceniza del volcán Galeras, depositada sobre la vegetación en el sector de El Barranco, municipio de La Florida, 15 de agosto de 2004.
Fuente: SGC-OVS Pasto. La Florida, Nariño, 2004. Repositorio de archivos institucional.

An aerial photograph of a river meandering through a dense, green forest. The river is a light brown color, contrasting with the vibrant green of the surrounding trees. The forest appears to be a tropical or subtropical rainforest, with a thick canopy of trees. The river flows from the upper left towards the lower right of the frame.

3

Búsqueda y recopilación de información



Ceniza del volcán Galeras, depositada sobre la vegetación, después de la erupción del 24 de abril de 2009, carretera circunvalar Galeras, Sandoná, 25 de abril de 2009.
Fuente: SGC-OVS Pasto, Sandoná, Nariño. 2009. Repositorio de archivos institucional.

Es necesario hacer una búsqueda de información y generar un conjunto de datos que se utilizarán como base para la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo. Este conjunto de datos estará asociado con el fenómeno amenazante, con el tipo de vulnerabilidad, el alcance y la escala del trabajo. Esta guía se enfocará en la evaluación de la vulnerabilidad física ante el fenómeno volcánico de caída de material piroclástico transportado por el viento sobre los techos de las edificaciones que se encuentran en la zona de influencia de un volcán activo. Al establecer el alcance de los estudios, los responsables pueden definir el tipo de edificaciones y el tipo de techos que se tendrán en cuenta. En este trabajo se sugieren lineamientos generales.

Los datos pueden provenir de diferentes fuentes de información, tales como bancos y bases de datos, mapas, libros, artículos científicos, informes técnicos, informes de investigación, informes en general, tesis, monografías, documentos oficiales de instituciones públicas, normas técnicas, catálogos, fotografías, encuestas, etc.

En Colombia, las instituciones públicas custodian fuentes importantes de información en sus bancos y bases de datos, en sus documentos, productos oficiales, etc., y actualmente muchos de ellos se encuentran disponibles en línea en sus páginas web institucionales. Algunas instituciones públicas que pueden suministrar información aprovechable para la evaluación de la vulnerabilidad física y el riesgo por fenó-

menos volcánicos son el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el Servicio Geológico Colombiano (SGC), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), La Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), las corporaciones autónomas regionales, el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), los municipios (oficinas de planeación, direcciones administrativas de gestión del riesgo de desastres, unidades municipales de asistencia técnica agropecuaria (Umatas), entre otros. Las universidades públicas y privadas disponen de tesis o monografías que pueden ser de utilidad en este tipo de estudios, algunas de ellas publicadas en línea.

Con la promulgación de la Ley 1712 de 2014 (ley de transparencia y del derecho de acceso a la información pública nacional), las instituciones públicas están obligadas a dar respuesta a las solicitudes de información para garantizar el derecho de cada persona, consagrado en los artículos 20, 74 y 232 de la Constitución Política de Colombia, a solicitar y recibir información de las Instituciones del Estado, por lo cual se admiten las peticiones de documentos o de información, salvo en los casos que establezca la ley (Gobierno de Colombia, 2016).

La tabla 3 contiene una lista de registros asociados con posibles datos e información temática de la zona que se va a trabajar, que se puede encontrar en los bancos de información de entidades y en la web, y cuya disponibilidad puede ser, dependiendo del caso, general o específica:

» **Tabla 3.** Registros, tipos de datos e información temática

REGISTRO	TIPOS DE DATOS E INFORMACIÓN TEMÁTICA
Imágenes	Modelos de elevación digital Imágenes digitales de satélite Imágenes digitales de sobrevuelos Imágenes de seguimiento satelital de columnas eruptivas Fotografías aéreas y ortofotos
Mapas	Cartografía básica del IGAC Mapas Google Mapas topográficos Mapas hídricos Mapas temáticos Mapas geológicos Mapas geomorfológicos Mapas de amenaza Mapas de población y densidad de población Mapas de vivienda Mapas de tipos de vivienda Mapas catastrales Mapas de distribución de infraestructura Mapas de modelos de viento Mapas de depósitos volcánicos de <i>lapilli</i> y ceniza volcánica Mapas de distribución de <i>lapilli</i> , ceniza volcánica, isópacas e isopletras
Censos	Censos de población Censos de vivienda Censos de infraestructura
Bases de datos	Bases de datos de velocidad y dirección del viento Bases de datos de precipitación Bases de datos hidrológicos Bases de datos de crecientes y avenidas torrenciales
Inventarios	Inventarios de cubiertas de viviendas Inventarios de centros de atención hospitalaria por nivel Inventarios de centros educativos Inventarios de edificios gubernamentales Inventarios de líneas vitales Inventarios de subestaciones eléctricas Inventarios de estaciones de almacenamiento y suministro de combustibles Inventarios de puentes Inventarios de distritos de riego Inventarios de tanques de almacenamiento de agua Inventarios de bocatomas Inventarios de plantas de tratamiento de aguas
Informes	Memorias de mapas Informes de erupciones volcánicas Informes de daños por erupciones volcánicas Informes de pérdidas materiales por erupciones volcánicas Informes de afectación y víctimas por erupciones volcánicas Estadísticas de afectación por erupciones volcánicas Informes de investigación
Planes	Planes de contingencia Planes de emergencia Planes de desarrollo
Estudios	Estudios hidrológicos Tesis Artículos de investigación Estudios de la historia eruptiva del volcán e índice de explosividad Otros

En caso de que se requiera información que no se encuentre disponible o no haya sido generada, puede ser necesario obtenerla mediante encuestas en campo, para lo cual la encuesta debe ser diseñada de acuerdo al objeto de estudio, y debe incluir toda la información necesaria para realizar un adecuado análisis; es importante que la información recolectada esté debidamente georeferenciada de acuerdo con los estándares definidos por el IGAC, autoridad máxima en este tema. Por ejemplo, para la evaluación de la vulnerabilidad física por caída de material piroclástico transportado por el viento es necesario conocer las características de las edificaciones en la zona de trabajo, y la encuesta podría incluir datos sobre los tipos de construcción, número de pisos, usos de los edificios, y también datos sobre las cubiertas, como sus tipologías, estado, edades aproximadas, configuración, soportes de las cubiertas, tamaños, luces entre apoyos, materiales de construcción e inclinación, entre otros parámetros.

En el caso de la vulnerabilidad física de edificaciones, las personas que realicen las encuestas en campo deben tener preparación, ser al menos estudiantes de semestres superiores de ingeniería civil o arquitectura, que tienen un conocimiento de la terminología usada en la encuesta y de las tipologías constructivas. Esto es importante para garantizar en alguna medida la calidad y fiabilidad de los datos. Hoy en día, este tipo de consultas se pueden realizar a través de medios digitales, que también requieren de conocimientos específicos.

Por lo general, la información que se encuentra son datos crudos con poca organización, que requieren ser sometidos a procesos de clasificación, organización y depuración. El resultado de ese trabajo generará nuevas bases de datos organizadas y unificadas, de acuerdo al objeto del trabajo, en las cuales se incluirán los datos nuevos producto de las encuestas realizadas.

A manera de ejemplo, en 1991, Spence *et al.* (1996) realizaron una encuesta de campo para estimar el daño causado en 51 edificaciones por la caída de ceniza de la erupción cataclísmica del monte Pinatubo, en la población de Castillejos (Filipinas), ubicada 27 km al suroccidente del volcán, en donde se registraron espesores de

hasta 20 cm de ceniza depositada. La encuesta fue una evaluación de daño basada en una escala derivada de las técnicas de evaluación de daños por sismos. El daño se relacionó con las formas de las edificaciones y las tecnologías constructivas. La encuesta permitió conocer que un tercio de las edificaciones inspeccionadas colapsó o fue seriamente dañado. Se concluyó que los techos fallaron debido a la carga de ceniza, que sobrepasó su capacidad, y que el tipo de estructura que soportaba el techo fue el principal factor de daño. Otros factores de daño fueron el tipo de construcción y la pendiente del techo. El análisis realizado en la encuesta incluyó principales materiales constructivos utilizados, número de pisos, estructura, forma y pendiente del techo, uso de la edificación (residencial o no residencial).

Análisis posteriores realizados por Spence *et al.* (2005) concluyeron que el daño fue mayor cuando el techo tenía luces mayores de 5 m, la estructura era de madera y presentaba amplios voladizos; asimismo, hubo mayores daños en edificaciones no residenciales. Es muy necesario medir el valor de la densidad de la ceniza seca y húmeda. Es muy importante tener en cuenta la sobrecarga de la ceniza en el diseño estructural de la edificación y del techo para evitar colapsos y daños mayores en zonas que se encuentran bajo esta amenaza.

Basado en Pomonis *et al.* (1999) y Zuccaro *et al.* (2008), Jenkins *et al.* (2014) proponen que la encuesta debe obtener los siguientes datos de campo para evaluar la vulnerabilidad de una edificación ante los fenómenos volcánicos: localización con dato de GPS, área construida, uso, edad, huella de la edificación (área de suelo ocupada por la construcción), número de pisos, estructura de muros, estructura del techo, ubicación con respecto al volcán, número, tipo y tamaño de aberturas (puertas, ventanas, etc.).

Con base en lo anterior, para la encuesta en campo se sugiere tener claros los requerimientos de información necesarios para diseñar el cuestionario, determinar la zona de trabajo, el área que se cubrirá, el tamaño de la muestra, los recursos necesarios para el levantamiento de la información, la organización, el análisis y la generación de la base de datos.



Ceniza del volcán Galeras, depositada sobre los flancos de su cono activo, después de la erupción del 17 de enero de 2008, cima Galeras, 23 de enero de 2008.
Fuente: SGC-OVS Pasto. Pasto, Nariño. 2008. Repositorio de archivos institucional.

The background of the slide is a photograph of a volcanic landscape. On the left, a steep, rocky slope of a volcano is visible, with a plume of white smoke or ash rising from a crater. The rest of the image is covered by a semi-transparent green overlay. In the upper left, there is a small yellow rectangular bar. The number '4' is centered in the upper half of the green area, enclosed in a white circle.

4

Análisis de vulnerabilidad



» Ceniza del volcán Galeras, depositada sobre la vegetación y cubiertas de viviendas localizadas en el costado noroccidental del volcán Galeras, en vecindad a la vía circunvalar después de la erupción del 12 de agosto de 2004, Sandoná, 15 de agosto de 2004.
Fuente: SGC-OVS Pasto. Sandoná, Nariño. 2004. Repositorio de archivos institucional.

La metodología para evaluar la vulnerabilidad parte de la caracterización de la amenaza que se considera, con el objeto de establecer el patrón de intensidad que se tendrá como referente para analizar la resistencia del elemento expuesto, que en el caso de las caídas de material piroclástico transportado por el viento, es la carga transferida por cierto espesor de material acumulado sobre la cubierta (Torres *et al.*, 2017).

En este paso se pueden establecer escenarios de impacto de la amenaza (Biass *et al.*, 2016) caracterizando las cargas producidas por el material piroclástico (*lapilli* y ceniza), según el espesor, el peso específico, la humedad, etc. (Spence *et al.*, 2005). Con estos escenarios se procede a caracterizar las cargas sobre las estructuras o sobre los elementos expuestos. Se recomienda tener en cuenta los informes de erupciones volcánicas y el mapa de amenaza para establecer los escenarios. Asimismo, en lo posible hay que obtener los pesos específicos o densidades del *lapilli* y la ceniza volcánica mediante análisis de laboratorios (Spence *et al.*, 2005).

A los elementos ya categorizados se los puede reunir en clases o tipos, y cada elemento tipo se somete a un análisis de resistencia con las cargas categorizadas, con el fin de determinar cuál será la carga máxima que conduce a su falla; luego se procede a evaluar también el impacto sobre toda la edificación (Spence *et al.*, 2005; Jenkins *et al.*, 2014). El análisis de resistencia debe incluir el desarrollo de curvas de fragilidad, para luego encontrar las correspondientes funciones de daño o funciones de vulnerabilidad. Para obtener las curvas de fragilidad pueden ser útiles los informes de daños producidos por la capa de material piroclástico (*lapilli* y ceniza volcánica) depositado sobre las cubiertas y edificaciones en otros lugares, teniendo cuidado de aplicarlos

según el contexto local (Spence *et al.*, 2005; Jenkins *et al.*, 2014).

Se pueden producir mapas de distribución de los daños por escenarios, según la intensidad de la amenaza; en este caso, según la carga categorizada sobre los elementos tipo. Este análisis mostrará cuáles son los elementos más vulnerables o susceptibles de sufrir daño según su tipo y según la carga (Wilson *et al.*, 2012).

Finalmente, este paso conduce a la obtención de los mapas de vulnerabilidad y a las matrices de vulnerabilidad.

Como base para evaluar la vulnerabilidad teniendo en cuenta estimaciones cuantitativas de riesgo, la evaluación se ha de realizar de forma cuantitativa, según el Decreto 1807 de 2014, y, en general, las etapas que se seguirán para evaluar la vulnerabilidad son las siguientes:

- » Inventario, identificación y localización de los elementos expuestos
- » Caracterización de los elementos expuestos: tipología, estado (calidad), exposición y resistencia
- » Tipos de daño o efectos esperados
- » Zonificación, evaluación y categorización de la vulnerabilidad

Según el nivel de detalle, se analizan escenarios de vulnerabilidad ante los fenómenos de amenaza esperados, por ejemplo, las caídas de material piroclástico transportado por el viento (*lapilli* y ceniza volcánica). Estos escenarios incluyen tanto la exposición de los elementos (bienes físicos) como su grado de fragilidad ante el evento amenazante.

Al relacionar la intensidad de las caídas de material piroclástico transportado por el viento (espesor de piroclastos de caída o carga sobreim-

puesta) con la fragilidad de los elementos físicos expuestos, se pueden establecer unos niveles de daño para cada elemento, y con base en esos niveles de daño se definen las categorías de vulnerabilidad física, que permiten realizar los mapas de zonificación de vulnerabilidad.

4.1 Inventario de elementos expuestos

La cobertura y el alcance del fenómeno amenazante sobre el territorio donde se ubican los elementos marcan su grado de exposición. Por tanto, el mapa de amenaza rige el grado de exposición de los elementos. El inventario de bienes expuestos debe tener la información que se requiere para la evaluación de la vulnerabilidad y estimación del riesgo (Jenkins *et al.*, 2014).

Con las bases de datos ya organizadas, mapas base, mapas temáticos y los mapas de amenaza se pueden generar inventarios y mapas de elementos expuestos en general, y elementos expuestos ya caracterizados, que a su vez proporcionan números o porcentajes globales o específicos y áreas de exposición generales y específicas, según los elementos que se vayan a trabajar en

el estudio. Cada paso proporciona nuevas tablas y nuevos mapas. En este trabajo, el enfoque del análisis de riesgo por caídas de material piroclástico transportado por el viento se dirige al componente físico; por tanto, este ítem está orientado al inventario de bienes físicos e infraestructura. No son objeto de este trabajo elementos como el componente social, bienes culturales, servicios ambientales, recursos económicos, y aquellos asociados con la vulnerabilidad funcional relacionada con probables pérdidas por interrupción de los sistemas productivos.

Para el inventario de bienes físicos expuestos se sugiere tener en cuenta las edificaciones que pueden ser de varios tipos o tener varios usos; también la infraestructura crítica, como líneas vitales, estructuras especiales como aeropuertos, presas, sistemas de saneamiento relacionados con plantas de tratamiento de agua potable, residuos sólidos y residuos líquidos; estaciones de almacenamiento y suministro de combustibles, etc. (Wilson, Wilson, Deligne y Cole, 2014). En la tabla 4 se expone un ejemplo de bienes físicos que se pueden incluir en un inventario de elementos expuestos (SGC, 2016), teniendo en cuenta los grupos de uso de edificaciones de la Norma Sismo Resistente Colombiana NSR10 (NSR10, 2010).

» Tabla 4. Elementos expuestos

CLASIFICACIÓN	IDENTIFICACIÓN	USO
Edificaciones (grupos de uso según NSR10)	Indispensables. Grupo IV	Salud
		Terminales aéreos o terrestres
		Centrales y subestaciones eléctricas, gasolineras
		Plantas de tratamiento de aguas
		Refugios o designadas como refugios
	Atención a la comunidad. Grupo III	Seguridad
		Emergencias
		Educación
	Ocupación especial. Grupo II	Gubernamentales
		Centros Comerciales
Líneas vitales	Red vial	Industria
		Residencia y comercio
		Vías
	Servicios públicos	Puentes vehiculares
		Puentes peatonales
		Acueductos, alcantarillados, gasoductos
		Redes eléctricas Telecomunicaciones

Fuente: modificada a partir de SGC (2016)

Se pueden combinar los mapas de amenaza con los mapas de distribución de población para obtener la población expuesta. Los mapas mostrarán zonas de mayor o menor densidad de población en las zonas de amenaza. Lo mismo se puede hacer para obtener mapas sobre la vivienda, la infraestructura, las edificaciones esenciales, las reservas ambientales, etc. Con estas combinaciones de capas temáticas se pueden generar polígonos de exposición dentro del área de trabajo elegida, que se pueden clasificar por grados, teniendo en cuenta la cercanía a la fuente de la amenaza. En este paso se puede hacer la caracterización de los elementos expuestos y de la población, por estrato socioeconómico, por familias, por grupos de edades, por sexo, etc.; las edificaciones, por tipo constructivo, por número de pisos, por uso; las cubiertas, por tipos, por materiales, por extensión, por edad, etc.; las vías de comunicación, por vías primarias, secundarias, terciarias, etc.

Adicionalmente, hasta ahora, en términos de la amenaza y la zona o polígonos de exposición, que pueden incluir zonas rurales y urbanas, en

las que se identificará infraestructura y viviendas, se debe tener en cuenta que la base para el inventario, con identificación y localización de los elementos expuestos, debe ser la información predial o catastral disponible, de acuerdo con la zonificación de la amenaza y de los insumos mínimos para valorar la vulnerabilidad y estimar el riesgo.

A manera de ejemplo sencillo, en la figura 2 se muestra una captura de pantalla del inventario de bienes inmuebles de la Alcaldía de Mosquera (Cundinamarca), que son datos abiertos que el Estado colombiano pone a disposición del público (Datos Abiertos, 2016).

Entre las fuentes de información primaria o secundaria disponible se cuentan el IGAC, Corposso, SGC, Plan Departamental de Aguas, Instituto Departamental de Salud, secretarías del Departamento de Nariño, alcaldías de la zona de influencia del Galeras, administraciones del CDGRD y CMGRD del Departamento de Nariño, y cuando sea posible se debe llevar a cabo levantamiento de datos en campo. El inventario debe estar debidamente georreferencia-

ITEM	CEDULA CATASTRAL	NOMBRE PREDIO	DIRECCION	TERRENO (M2)
1	01-00-0004-0003-000	COLEGIO COOPERATIVO TOMAS CIPRIANO	Carrera 1 No. 2-18	879
2	01-00-0004-0004-000	ESE MARIA AUXILIADORA	CALLE 3 No. 2-15 E	4.184,33
3	01-00-0004-0004-000	JUAN LUIS LONDOÑO	CALLE 3 CARRERA 2	5.946
4	01-00-0284-0001-000	CASA DE LA JUSTICIA	CALLE 2 CARRERA 1	766
5	01-00-0284-0001-000	LOTE INSTITUCIONAL COLISEO	CALLE 2 CON VARIANTE FACA	8.580
6	01-00-0018-0006-000	VILLA OLIMPICA Y CANCHA DE TEJO	CALLE1 NO 2-01	89.014
7	01-00-0284-0001-000	JARDIN DEPARTAMENTAL	CALLE 2 NO 1-47E	1.484
8	01-00-0318-0004-000	LOTE DE BOMBEROS	CALLE 2 CARRERA 4E	2.048
9	01-00-0284-0001-000	PARQUE INFANTIL	CARRERA 1 CALLE1	630.375
10	01-00-0004-0002-000	COLEGIO DEPARTAMENTAL ANTONIO NARIÑO	CALLE 3 NO 1-61E	6.731

» **Figura 2.** Captura de pantalla del Inventario de Inmuebles de la Alcaldía de Mosquera, Cundinamarca

Fuente: Datos Abiertos (2016)

do con ajuste a la cartografía oficial y contener la información requerida para la evaluación de la vulnerabilidad y la estimación del riesgo. En el caso de bienes físicos puede incluir la localización, el tipo de los bienes, su estado de conservación, el precio, el año de construcción, la tipología constructiva, intervenciones constructivas, etc.

4.2 Caracterización de elementos expuestos

Cada bien físico representado de manera cartográfica se debe identificar y caracterizar. El elemento identificado y localizado se debe describir y categorizar en función de sus características de tipología, exposición y fragilidad, con el propósito de evaluar su vulnerabilidad física ante la ocurrencia de un evento volcánico de caídas de material piroclástico transportado por el viento (*lapilli* y ceniza volcánica).

Las edificaciones se pueden tipificar teniendo en cuenta si son estructuras reforzadas (pórticos, sistemas combinados con concreto y acero), de mampostería reforzada (con elementos de refuerzo o confinadas), estructuras con confinamiento deficiente y estructuras híbridas (adobe, bahareque, madera, tapia, piedra natural, bloques de concreto simple), estructuras ligeras (muros cargueros con materiales tradicionales de baja calidad, como adobe, bahareque, madera, tapia, piedra natural, bloques de concreto simple, prefabricados) y construcciones simples (o que tienen una estructura definida, de carácter improvisado, generalmente construidas utilizando materiales precarios o de recuperación, comunes en tugurios, zonas de invasión, etc.). En la tabla 5 se expone un ejemplo de tipologías de edificaciones.

Las categorías para la agrupación y posterior representación de los elementos físicos deben permitir las primeras valoraciones cuantitativas (número edificaciones según su uso y tipo, área construida, valor de la edificación, etc.).

La caracterización de los elementos expuestos, en lo que se refiere a viviendas, debe contener, entre otros aspectos, subgrupo de ocupación,

tipología de las viviendas, tipo de materiales constructivos, número de pisos o niveles; estado de las viviendas (edad, mantenimiento, etc.). Teniendo en cuenta que los efectos y mecanismos de daño sobre los elementos expuestos ocasionados por las caídas de material piroclástico transportado por el viento se centran en las cubiertas, por la transferencia de cargas verticales adicionales, se detalla la caracterización de las cubiertas. En esta caracterización debe establecerse la clase de cubierta, su estado, distancia entre apoyos, inclinación y sus características constructivas, etc. No se deben descartar los casos de elementos en los que el empuje lateral por acumulación de las caídas de material piroclástico transportado por el viento pueda dar lugar a su afectación (muretes, muros, culatas, etc.), así que hay que hacer su respectiva caracterización. En la tabla 6 se expone un ejemplo de tipologías de cubiertas, sin tener en cuenta la estructura de soporte.

En lo referente a sistemas de saneamiento, se deben incluir, entre otros aspectos, localización y distribución de cada uno de los componentes de los sistemas, desde la captación hasta la distribución o disposición final; características constructivas de cada uno de los elementos; descripción de si se trata de elementos abiertos o enterrados; datos de caudal; estado del sistema (edad, mantenimiento, etc.), número de usuarios, etc.

En cuanto a sistemas de energía eléctrica y telecomunicaciones, entre otros aspectos debe contemplarse la localización y distribución de cada uno de los componentes del sistema, desde las subestaciones hasta la distribución, considerando repetidoras; características constructivas de cada uno de los elementos; descripción de si se trata de elementos abiertos o enterrados; capacidad; estado del sistema, número de usuarios, etc.

En lo que concierne a sistemas viales se puede establecer la caracterización, incluyendo su recorrido, orden, características de diseño y constructivas; obras de arte; capacidad; estado, capacidad transitada, etc. Por la relevancia, en la caracterización de los puentes debe incluirse el tipo, año de construcción, estado, capacidad de carga, luz entre apoyos, etc.

» **Tabla 5.** Tipologías de edificaciones

SISTEMA	TIPO	DESCRIPCIÓN
Estructuras ajustadas a la NSR10	Muros de carga	Edificaciones que no disponen de pórticos completos. Las cargas son resistidas por los muros de carga, muros estructurales o pórticos con diagonales
	Pórticos	Edificaciones con sistema estructural compuesto por un pórtico completo resistente a momentos, cargas verticales y horizontales
	Combinado	Edificaciones con pórticos y muros de carga que resisten las cargas verticales y horizontales, que no cumple los requisitos de un sistema estructural dual
	Dual	Edificaciones con un pórtico espacial sin diagonales, resistente a momentos y cargas verticales, combinado con muros estructurales o pórticos con diagonales que resisten las cargas horizontales, que en conjunto deben resistir el cortante total sísmico en la base
	Mampostería estructural	Edificaciones construidas con muros en mampostería estructural definida en el capítulo D2 de la NSR10
Edificaciones no ajustadas a la NSR10	Mampostería sin confinamiento	Edificaciones construidas con muros sin confinamiento, de ladrillo, adobe, bloques de piedra, bloques de mortero
	Madera	Edificaciones elaboradas con madera
	Tapia	Edificaciones cuyos muros han sido construidos con arcilla apisonada
	Bahareque	Edificaciones cuyos muros están formados por palos o cañas entretejidos con recubrimiento de barro
	Combinaciones sin técnica	Edificaciones que incluyen mezclas de diferentes tipos constructivos sin técnica
	Precario	Edificaciones elaboradas con diferentes materiales, sin orden y sin técnica, comunes en invasiones o tugurios
	Ruinas	Edificaciones abandonadas en ruinas o que amenazan ruina

» **Tabla 6.** Tipologías de cubiertas

CLASE	TIPO	MATERIALES
Cubierta inclinada compuesta por faldones con inclinación > 10%	A un agua, a dos aguas o a cuatro aguas	Teja de barro cocido, teja de cerámica, pizarra, asfáltica, láminas de fibrocemento, asbesto cemento, plástica, PVC, metálica, policarbonato, fibra de vidrio, cubiertas industriales
Cubierta plana, con inclinación < 5%	No transitables, transitables, número de juntas	Plásticas, policarbonato, acrílico, cubierta industrial, fibrocemento, asfálticas, placas prefabricadas, hormigón celular, mortero de áridos aligerados
Cubierta curva	Curva suave, semicircular, bóvedas, domos	Plásticas, metálicas, policarbonato, acrílico, cubierta industrial, concreto reforzado
Losas	Macizas, aligeradas	Concreto reforzado

Si en el alcance del estudio, los aeropuertos, los terminales terrestres, estaciones de policía, batallones, estaciones de bomberos, rellenos sanitarios, plantas de gas, hidroeléctricas, subestaciones eléctricas, etc., son elementos expuestos, debe levantarse la información pertinente para su caracterización.

El levantamiento de la información en campo involucra un alto componente ingenieril, así que debe incluir a personal debidamente capacitado en este campo, que permita una correcta descripción de los elementos y una adecuada cap-

tura georreferenciada de la información, para su posterior incorporación en bases de datos. Dependiendo del alcance del estudio en la evaluación de la vulnerabilidad, esta actividad puede ser adelantada por estudiantes de semestres intermedios de carreras afines a la ingeniería civil o arquitectura, que estén entrenados y coordinados por profesionales competentes y con experiencia, con el fin de optimizar el trabajo y los recursos disponibles.

La información secundaria existente sobre elementos expuestos debe validarse verificando

que estén los datos mínimos requeridos para la caracterización y el posterior análisis de vulnerabilidad. Este análisis permitirá saber qué parámetros están incompletos, así como también qué sectores deben ser trabajados directamente con la recolección de información en campo.

El rendimiento del levantamiento de la información del inventario y la caracterización varía dependiendo del nivel de detalle que se pretende alcanzar, de si el trabajo se realiza a partir de datos colectados en campo relativos a cada elemento, de muestreos establecidos estadísticamente, de si se pueden establecer zonas homogéneas de elementos expuestos, del tiempo de inspección o de la encuesta, de si se tienen disponibles fotografías aéreas actualizadas, y del tiempo en que se pueda obtener la información. Vale la pena reiterar que el rendimiento para lograr este tipo de información depende además de la experiencia y pericia de los evaluadores.

Como referencias de rendimiento, obtenidas de experiencias del SGC en levantamientos de este tipo de información, se pueden mencionar los siguientes ejemplos:

- » Trabajo en la Comuna 10 de la ciudad de Pasto. El equipo evaluador estuvo conformado por siete ingenieros civiles, estudiantes de la especialización en Estructuras de la Universidad del Valle, quienes mediante encuestas, registro fotográfico y georreferenciación levantaron la información de manera indicativa, teniendo en cuenta la uniformidad o no uniformidad de las viviendas de ocupación normal. Cada uno trabajó durante dos días, en jornadas de ocho horas. En promedio, cada ingeniero invirtió entre veinte y treinta minutos en cada sitio valorado.
- » Entre las actividades preliminares adelantadas en 2011 por el Ingeominas y la Gerencia Galeras para construir un modelo de evaluación de riesgos probabilísticos del volcán Galeras, en el marco de un proyecto de asistencia técnica financiado por el Banco Mundial, con la utilización de la plataforma y herramienta de análisis CAPRA,⁵ un geógrafo invirtió diez días, con jornadas de ocho horas,

para realizar un inventario de 19.155 cubiertas a partir de ortofotos en un área de siete municipios y para cargar en el Sistema de Información Geográfica (SIG) la información relacionada con la exposición de los edificios a las caídas de material piroclástico transportado por el viento (SGC-UNGRD, 2012).

- » Durante la evaluación de los daños físicos en las viviendas del resguardo indígena inga de Aponte, a raíz del movimiento en masa registrado en ese territorio, realizada por ingenieros civiles y estudiantes de ingeniería, el tiempo de la actividad fluctuó entre veinte y cuarenta minutos por vivienda, e incluyó las actividades de georreferenciación, toma de fotografías, diligenciamiento de encuestas y valoración de los daños.
- » Las autoridades nacionales, regionales o municipales relacionadas con la gestión del riesgo de desastres pueden disponer de información similar de levantamiento de información de elementos expuestos, desde el punto de vista ingenieril, que pueden incorporarse como referente para el tema de rendimientos.

La caracterización es una descripción detallada del elemento expuesto. El alcance del estudio definirá tanto los elementos como el nivel de detalle, la información requerida y los recursos necesarios.

4.3 Tipos de daños o efectos esperados

El daño de un elemento expuesto a la caída de piroclastos transportados por el viento (*lapilli* y ceniza volcánica) depende de la intensidad del fenómeno y de su propia resistencia. Uno de los elementos expuestos más susceptibles de ser afectados por caídas de material piroclástico transportado por el viento son las cubiertas de las edificaciones. La carga ocasionada por la capa de material piroclástico depositado o su espesor equivalente se puede establecer como medida de la intensidad de las caídas de material piroclástico transportado por el viento sobre elementos de cubiertas. En el caso de las cargas, dependiendo del nivel de detalle, se pueden incluir análisis de

5 <https://ecapra.org/es/acerca-de-capra>

cargas variables, si se establece un gradiente, en la zona de amenaza considerada.

Según Jenkins *et al.* (2014), la caída de ceniza volcánica puede causar algunos daños que requieren estimación de la vulnerabilidad de la edificación, como se muestra en la tabla 7.

De la tabla 7, el daño de mayor interés podría ser el colapso de techos, debido a que involucra pérdida de vidas. Un techo o cubierta de edificación puede colapsar cuando la carga estática sobrepuesta de material piroclástico (*lapilli* y ceniza) supera la resistencia del material de la cubierta, de la estructura de soporte o de ambos, especialmente porque los techos no han sido diseñados para soportarla. Los elementos no estructurales son los más susceptibles de fallar (figura 2).

» **Tabla 7.** Daños esperados y parámetros que deben evaluarse por caída de ceniza volcánica

DAÑO ESPERADO	CAUSA DE DAÑO	PARÁMETRO QUE DEBE EVALUARSE
» Pérdida de uso	» Enterramiento	» Espesor acumulado
» Corrosión metálica	» PH ácido de la ceniza volcánica	» Acidez
» Daño o colapso de techos	» Carga por acumulación	» Tamaño de partícula
» Bloqueo o daño de canaletas y desagües	» Ingreso de partículas finas por aberturas	» Peso de ceniza acumulada seca
» Daño de componentes mecánicos y electrónicos	» Ingreso de flujos de ceniza por lluvias	» Peso de ceniza acumulada húmeda

Fuente: modificado a partir de Jenkins *et al.* (2014)



» **Figura 3.** Techos dañados en Ensenada (Chile) por caída de ceniza de la erupción del volcán Calbuco

Fuente: La Prensa (2015)

La carga que ejerce una caída de material piroclástico (*lapilli* y ceniza) depende de su densidad y del espesor acumulado o altura de la capa de ceniza acumulada, y se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$Q = \rho * g * h$$

Donde Q es la carga en Pascales (Pa), ρ es la densidad del material piroclástico (*lapilli* y ceniza volcánica) en kg/m^3 , h es el espesor de la capa en m y g es la aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$). Dependiendo del porcentaje de humedad y del tamaño de las partículas, el material piroclástico húmedo (*lapilli* y ceniza) tiene mayores valores de densidad. Por tanto, la lluvia es un factor que puede incrementar la carga sobre el techo y la vulnerabilidad de las cubiertas.

Se han publicado informes de daños observados en cubiertas de edificaciones por erupciones de volcanes en varios lugares del mundo, que pueden ser usados como referencia. Por ejemplo,

con la erupción del Pinatubo, en 1991, Spence *et al.* (1996) encontraron que, en su orden, las causas de falla y colapso más comunes son: grandes luces entre apoyos ($> 5 \text{ m}$), estructuras de cubiertas de madera y grandes voladizos en techos; adicionalmente, en aquel caso los daños fueron mayores en edificaciones no residenciales. El efecto de la pendiente de las cubiertas resultó ser ambiguo, quizá debido a las condiciones de humedad del material piroclástico depositado (*lapilli* y ceniza) con relación al ángulo de reposo. Con 3 kPa se presentaron daños graves, con una probabilidad de colapso del 33%.

El Ingeominas (1998) realizó un trabajo sobre vulnerabilidad de viviendas de ocupación normal en el área del Galeras con base en estudios analíticos de estimaciones de la respuesta y resistencia de los elementos a cargas de sollicitación con aproximación estática en función de los tipos de materiales, configuraciones geométricas (inclinación de cubierta, longitud entre apoyos y correas, sección de elementos, entre otras),



ensambles-conexiones, la transferencia de las cargas a los diferentes elementos de la cubierta, continuidad de los elementos, estado y edad de las cubiertas, entre otros aspectos. El equivalente en espesor de la capa de ceniza se obtuvo con un valor de densidad $\rho = 1.250 \text{ kg/m}^3$, considerado para material húmedo (Tilling, 1993).

Entre 2001 y 2006, el Ingeominas (Torres R., 2001; Torres y Cárdenas, 2006) implementó un estudio de cargas de colapso de cubiertas con base en los resultados de los estudios de techos en la región del Galeras y las experiencias de daños observados en Filipinas con la erupción del Pinatubo, en 1991, y en la ciudad de Rabaul, en Papúa Nueva Guinea, por la erupción del Tavurvur, en 1994. Este estudio condujo a mostrar el colapso de techos en diferentes escenarios de espesores de ceniza. Estudios de la Corporación OSSO, en la zona de influencia del volcán Galeras (Corposso, 2009), llegaron a estimativos de cargas de colapso similares a las que encontró el Ingeominas en sus trabajos del 2001 y 2006.

Spence *et al.* (2005) realizaron una estimación de la fragilidad estructural de los techos de las edificaciones ante cargas de ceniza, sobre la base de estudios analíticos, ensayos de laboratorio y análisis de daños observados, y derivaron un conjunto de tipologías de edificaciones europeas para cada una de las cuales propusieron una curva de fragilidad (denominada *susceptibilidad* en algunos documentos, y *resistencia*, en otros). Dadas las incertidumbres sobre la resistencia de los materiales, el acople de los elementos que conforman la cubierta, las dimensiones estruc-

turales, la trayectoria de la carga, la distribución de las cargas de ceniza de acuerdo al viento y el estilo de la cubierta, el peso específico de la ceniza y la humedad, entre otras variables, utilizaron una desviación estándar del 20% de la carga media de colapso.

En 2012, el SGC (Torres *et al.*, 2012), en atención a las cargas límite de fallamiento conforme al tipo y estado de la cubierta, y la distancia entre apoyos, y después de una revaluación, revisó y modificó algunos valores para las clases de cubiertas liviana a moderada, teniendo en cuenta experiencias de otros estudios relacionados con cargas de colapso en cubiertas (Spence *et al.*, 2005; Zuccaro *et al.*, 2008). Con base en los trabajos de 2012, Torres *et al.* (2017) publicaron las curvas de fragilidad y curvas de vulnerabilidad para cinco clases de cubiertas de edificaciones identificadas en la zona de influencia del volcán Galeras.

Las curvas de fragilidad representan la probabilidad de que un elemento expuesto exceda su respuesta de diseño o su resistencia en función de un parámetro que representa la intensidad del fenómeno que lo afecta. Son muy utilizadas en evaluación de resistencia estructural de edificios ante sismos, pero también pueden aplicarse a los fenómenos volcánicos, pues se dispone de una carga de sollicitación que representará, por ejemplo, la acumulación de material piroclástico (*lapilli* y ceniza volcánica) y de una estructura que debe responder a esa carga. La respuesta de la estructura ante la sollicitación puede o no generar daño. En la tabla 8 se ofrece un ejemplo de escala de daño para una cubierta de edificación.

» **Tabla 8.** Escala de daño aplicable a una cubierta de edificación

GRADO DE DAÑO	TIPO DE DAÑO	DESCRIPCIÓN
0	Sin daño	No existe afectación a la cubierta
1	Daño leve	Afectación leve de elementos no estructurales de fácil reparación
2	Daño moderado	Afectación moderada de elementos de la cubierta; requiere reparación técnica o reemplazo de algunos elementos
3	Daño extensivo	Afectación grave de elementos estructurales de la cubierta; requiere reconstrucción
4	Colapso	La cubierta falla en el momento de sollicitación de la carga

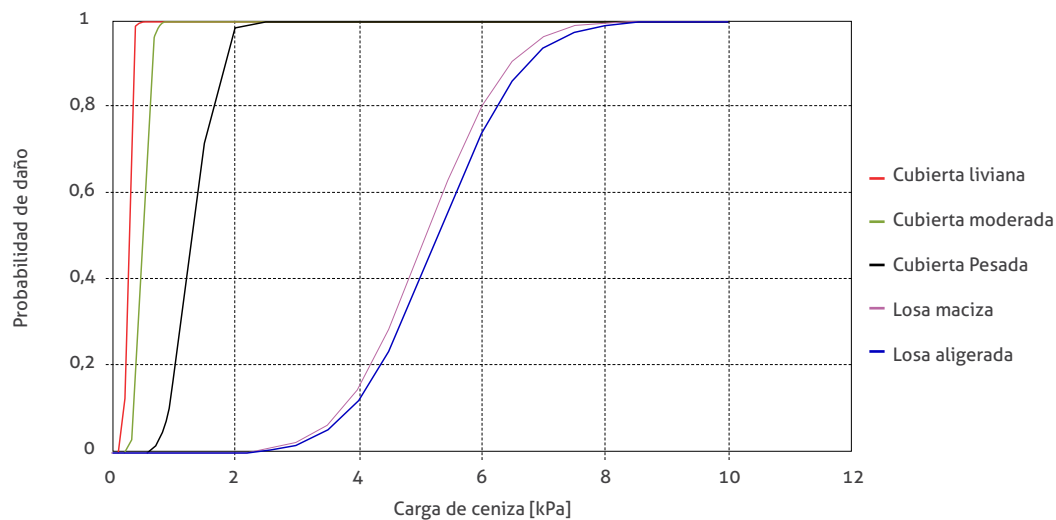
Según Bonett (2003), se utilizan cuatro métodos principales para generar curvas de fragilidad, asociados a los estados de daño, a saber: métodos basados en observaciones de campo, métodos experimentales, métodos basados en la opinión de expertos y métodos analíticos.

Los resultados obtenidos por cualquiera de los métodos que se haya escogido se ajustan generalmente a una función de distribución lognormal $\Phi[\cdot]$. En consecuencia, es posible determinar las probabilidades de exceder o igualar un estado discreto de daño EDi para un determinado valor del parámetro indicador de la intensidad del fenómeno volcánico. Por ejemplo, la sollicitación por carga de material piroclástico (*lapilli* y ceniza) (PCC), con la siguiente expresión:

$$P(ED \geq EDi/PCC) = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{PCC, EDi}} \ln \frac{PCC}{\overline{PCC}} \right]$$

Donde \overline{PCC} es la media y $\beta_{PCC, EDi}$ es la desviación estándar del logaritmo natural de PCC para un estado de daño EDi . Estos valores se determinan por medio de un ajuste de mínimos cuadrados sobre las probabilidades obtenidas con cualquier método de evaluación, analítico, experimental o empírico (Bonett, 2003). En la figura 3 se muestra un ejemplo de curvas de fragilidad para cinco clases de cubiertas de la zona de influencia del volcán Galeras, asociadas con una carga de ceniza (Torres *et al.*, 2017).

La fragilidad no es la vulnerabilidad. La fragilidad mide la probabilidad de daño, y la vulnerabilidad mide la pérdida (Porter, 2018).



» **Figura 4.** Curvas de fragilidad correspondientes a cinco clases de cubiertas de la zona de influencia del volcán Galeras, asociadas con una carga de ceniza

Fuente: Torres *et al.* (2017)

4.4 Evaluación y categorización de la vulnerabilidad

A partir de las curvas de fragilidad se pueden trabajar las funciones de vulnerabilidad o curvas de vulnerabilidad. En las caídas de material piroclástico transportado por el viento (*lapilli* y ceniza) se pueden establecer funciones de vulnerabilidad que generalmente se modelan como una relación de daño total calificado como 1 (100% de daño o destrucción total), o no daño, calificado como 0 (0% de daño), dependiendo de si el elemento expuesto está o no localizado en una zona que puede ser impactada por el fenómeno considerado como amenaza.

Las funciones de vulnerabilidad se pueden expresar mediante curvas que relacionan los valores esperados de la *relación media de daño* (RMD) y su desviación estándar con respecto a una medida de las intensidades del evento considerado (Miranda, 1999).

Como la RMD de un elemento estructural individual no es la misma en toda la edificación, es necesario establecer el comportamiento global. Las funciones de vulnerabilidad varían en este caso en función de la clase de cubierta y el tipo de edificación. El comportamiento global de la edificación puede variar significativamente con respecto al comportamiento de la cubierta. Esta afectación global puede establecerse como la relación del costo de reemplazar el o los elementos afectados (cubierta, entrepisos u otros elementos, e incluso toda la edificación) respecto al costo total de la estructura (la edificación misma). Entonces, debe establecerse el costo de la cubierta respecto al edificio. Cabe decir que este valor podría ser el 100%, si el daño se extiende a la totalidad de la edificación (colapso de todo el edificio), o un porcentaje menor si, aparte de la cubierta, se afecta una parte de la edificación.

Con fines de zonificación de la vulnerabilidad se puede considerar cierto número de niveles de daño. Por ejemplo, en una vulnerabilidad alta los niveles de daño podrían estar entre 60% y 100% (colapso o daño total); en una vulnerabilidad media los niveles de daño podrían estar entre 25% y 50% (daño grave), y en una vulne-

rabilidad baja el nivel de daño podría ser menor del 25%, e implicaría daños moderados o leves. Es decir que estos valores numéricos de vulnerabilidad permiten definir cualitativamente los daños esperados en los elementos expuestos, y describen los efectos del daño, como, por ejemplo, rotura de muros, destrucción de acabados y accesorios, grietas anchas y profundas, posible colapso de elementos no estructurales, entrada de material a la edificación, etc.

Adaptando el enfoque de Porter (2018) a los fenómenos volcánicos, igual que ocurre en las curvas de fragilidad, los métodos para encontrar las funciones de vulnerabilidad tienen tres enfoques generales: datos empíricos, datos analíticos y opiniones de expertos. Las funciones de vulnerabilidad derivadas empíricamente serían las más ajustadas, desde el punto de vista de la gestión de riesgos, ya que parten de las observaciones del desempeño real de los elementos expuestos a los fenómenos volcánicos en erupciones reales. Se pueden recopilar observaciones de muchas instalaciones sin tener en cuenta el grado de daño (es decir, sin seleccionar muestras, porque están dañadas), y registrar:

xi = efecto ambiental (material piroclástico acumulado, velocidad del viento, lluvia, etc.) en cada propiedad *i*

yi = pérdida (costos de reparación, tasa de fatalidad, duración de la pérdida de la función, etc.) en la propiedad *i*

ai = atributos de la propiedad *i* (materiales, estructura, resistencia a la carga vertical, altura, edad, etc.)

Luego se agrupan las muestras según uno o más atributos (por ejemplo, por tipo de cubierta), y de cada grupo se realiza un análisis de regresión para ajustar una función de vulnerabilidad, generalmente a la media y a la desviación estándar como funciones de efecto ambiental. La función de vulnerabilidad se puede expresar en una tabla de media y desviación estándar de pérdida en cada uno de los muchos niveles de efecto ambiental, para la clase de instalación dada.

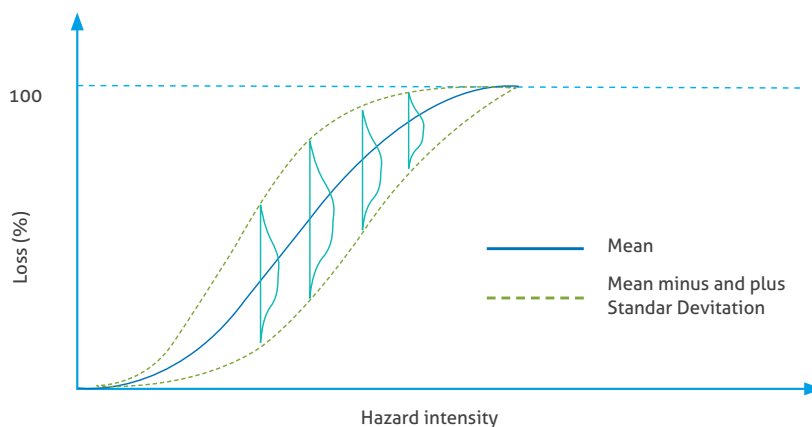
Una función de vulnerabilidad define el nivel de daño como una función de una medida de intensidad del fenómeno volcánico o amenaza.

Una vez que se definen las características físicas de cada clase de elemento expuesto, construcción o bien físico, es posible establecer y asignar el daño probable y, posteriormente, las pérdidas a esa clase de bien físico o construcción específica sujeta a varios niveles de intensidad de fenómeno específico. Esto se hace definiendo las relaciones entre un parámetro medido de la intensidad de la amenaza o fenómeno volcánico (por ejemplo, el espesor de la capa de *lapilli* y ceniza volcánica acumulada en caso de erupción, o la aceleración espectral, en el caso de terremotos) con el nivel de daño probable de la clase de bien físico o edificio en particular. El daño se expresa en términos relativos a su valor de reemplazo. Estas relaciones son las llamadas *funciones de vulnerabilidad* (Maqsood *et al.*, 2014; UNISDR, 2015).

Para cada amenaza o fenómeno volcánico y cada tipología de bien físico o construcción, se define una función de vulnerabilidad. Cada punto de la curva vincula una característica del fenómeno volcánico o amenaza con un valor de pérdida promedio, y para considerar el hecho de que existe una incertidumbre sobre el desempeño de un edificio, la curva también incluye la varianza, que representa la distribución de probabilidad de las pérdidas probables que pueden ocurrir después de la intensidad del fenómeno volcánico o amenaza dada (UNISDR, 2015), como se muestra en la figura 4.

Cuando una función de vulnerabilidad mide el costo de reparación, comúnmente se normaliza con el costo de reemplazo nuevo (CRN). El CRN excluye el valor del terreno y generalmente se refiere a una parte o a todos los componentes fijos del bien físico o edificación (componentes estructurales, arquitectónicos, mecánicos, eléctricos, etc.), o a su contenido. El costo de reparación dividido por CRN se toma como factor de daño (FD), también llamado *relación media de daño* (RMD) o *pérdida fraccionaria*, aunque también se usan otros términos para referirse a él. El valor esperado de FD, condicionado a la intensidad del fenómeno volcánico o amenaza, se denomina comúnmente *factor de daño medio* (FDM). En ocasiones se asume que si el FD excede un determinado umbral, como 0,6 (60%), no vale la pena reparar el bien físico, edificación o propiedad, y se considera como pérdida total, por lo que las funciones de vulnerabilidad de costo de reparación pueden saltar abruptamente desde 0,6, o desde el valor de umbral escogido, a 1,0, con el incremento de la intensidad del fenómeno volcánico o amenaza. El FD puede exceder de 1,0, porque puede costar más reparar un edificio o un bien físico que reemplazarlo (Porter, 2018).

Muchas funciones de vulnerabilidad se expresan con distribuciones de probabilidad condicionales que dan una probabilidad de que la pérdida no exceda algún valor específico, dada la inten-



» **Figura 5.** Ejemplo de curva de vulnerabilidad

Fuente: UNISDR (2015)

sidad del fenómeno volcánico, para una clase de activo particular. A la distribución a menudo se le asigna una forma paramétrica; las más usadas son lognormal y beta, en las que todos los parámetros de la distribución son necesarios, algunos o todos ellos condicionados a la intensidad del fenómeno volcánico (Porter, 2018).

Porter (2018) sugiere los siguientes parámetros para obtener las curvas de vulnerabilidad:

D es la pérdida, $y(c)$ es el valor esperado de la pérdida, dada la intensidad del fenómeno volcánico (carga de *lapilli* y ceniza), llamada *función de vulnerabilidad media*.

$$F_{D|C} = P [D \leq d \mid C = c]$$

$F_{D|C}$ es la función de distribución de probabilidad acumulada de la pérdida $D \leq d$ condicionada a la intensidad del fenómeno (carga de *lapilli* y ceniza) $C = c$. La distribución puede ser lognormal o beta.

A las clases de vulnerabilidad se les asociará un color, que represente la clasificación de vulnerabilidad en alta, media y baja. En la tabla 9 se muestra un ejemplo de clasificación de la vulnerabilidad para edificaciones, asociada con un color, un valor de pérdida y un nivel de daño.

Con base en los valores de vulnerabilidad definidos se preparará un mapa o una capa en la que se identifiquen y clasifiquen los elementos expuestos, de acuerdo con la clasificación de la vulnerabilidad correspondiente.

» **Tabla 9.** Clasificación de la vulnerabilidad de edificaciones

VULNERABILIDAD	COLOR	VALOR	NIVEL DE DAÑO
Alta	Rojo	0,60 – 1,00	Extensivo: colapso
Media	Amarillo	0,25 – 0,59	Moderado
Baja	Verde	0,00 – 0,24	Sin daño: leve



» Panorámica del costado oriental del Complejo Volcánico Galeras donde se aprecia parte del sector Suroriental de la ciudad de San Juan de Pasto. 21 de noviembre de 2016.
Fuente: SGC-OVS Pasto. Pasto, Nariño, 2016. Repositorio de archivos institucional.



5

Análisis de riesgo



Ceniza del volcán Galeras, depositada sobre la vegetación, después de la erupción del 21 de noviembre de 2004, carretera circunvalar Galeras, La Florida, 23 de noviembre de 2004.
Fuente: SGC-OVS Pasto. La Florida, Nariño. 2004. Repositorio de archivos institucional.

El riesgo está relacionado con la probabilidad de que se causen efectos adversos y consecuencias negativas en los bienes materiales, aspecto social y ambiental; existe una necesidad implícita en la toma de decisiones de desarrollar análisis que permitan su estimación cuantitativa. Estos análisis pueden llevarse a cabo de forma determinística, de modo que la estimación del impacto probable se hace con base en un solo evento o escenario, o aleatoriamente, integrando el análisis de escenarios múltiples, cada uno con una frecuencia de ocurrencia dada, para obtener así una estimación genérica del riesgo (Yamín *et al.*, 2013). Otra manera de realizar el análisis es la probabilista, tratando de determinar la distribución de probabilidad de las pérdidas en los elementos expuestos a la amenaza considerada, teniendo en cuenta las incertidumbres que existen en las distintas partes del proceso.

Las cuantificaciones son fundamentales porque permiten hacer determinaciones de una manera objetiva y reproducible, con resultados que se pueden comparar en distintas zonas; más aún, ayudan a identificar vacíos en los datos de entrada y las posibles debilidades o falencias de los análisis realizados. La cuantificación es también útil para gestión del riesgo, debido a que permite integrar análisis de costo-beneficio y proporciona una base para la priorización de acciones de mitigación y designación de recursos; además, facilita la comunicación entre profesionales, tomadores de decisiones y otras personas involucradas (Corominas *et al.*, 2014).

En SGC (2016) se expone que analíticamente el riesgo específico R_s se puede determinar con la siguiente expresión:

$$R_s = P(H_i) * V * E$$

Donde R_s es el riesgo específico o grado de pérdidas esperadas debido a un fenómeno o amenaza de intensidad (H_i) que ha ocurrido en un área específica en un determinado tiempo. $P(H_i)$ es la amenaza o probabilidad de ocurrencia de un fenómeno volcánico, por ejemplo caída de material piroclástico (*lapilli* y ceniza) con una intensidad específica (H_i) en un área específica en un determinado tiempo. V es la vulnerabilidad del elemento expuesto o la proporción de E probablemente afectada en forma negativa por el evento de intensidad (H_i) expresada en una escala entre 0 y 1. E es el valor total o costo de los elementos físicos expuestos al fenómeno volcánico.

El indicador de riesgo más empleado y de fácil incorporación en la planificación territorial es la pérdida anual esperada (Yamín *et al.*, 2013). Por tanto, se calcula el riesgo en términos de la probabilidad de falla anual para el caso de la amenaza, y la valoración económica de los elementos expuestos con su valor presente (VP) en pesos (\$). En la bibliografía de gestión del riesgo, tanto en el campo económico como en el de los fenómenos naturales, es común ver que el riesgo total se puede calcular como la sumatoria de los riesgos específicos calculados para cada escenario. En este caso, el riesgo total será la sumatoria de los riesgos específicos calculados para cada fenómeno volcánico o para cada escenario de intensidad del fenómeno escogido.

Este capítulo está orientado al cálculo y evaluación del riesgo de los bienes físicos ante caídas de material piroclástico transportado por el viento (*lapilli* y ceniza volcánica).

5.1 Cálculo del riesgo

En consideración a que la frecuencia de los eventos volcánicos de gran intensidad es baja, resulta difícil establecer la frecuencia con que se presentarán pérdidas que excedan un valor dado con base en modelos puramente empíricos del proceso de ocurrencia de estos eventos, de manera que es necesario construir modelos probabilistas (CAPRA ERN-AL, 2009).

El SGC, entre sus tareas misionales y de apoyo, tiene, como experiencia en aproximaciones a valoración de riesgo, su participación, en 2012, en un proyecto de asistencia técnica (TAP) (SGC-UNGRD, 2012), en el que un análisis desarrollado sobre el volcán Galeras se constituyó en un estudio piloto de evaluación probabilista del riesgo volcánico⁶ (EPR). En dicho estudio se empleó la plataforma y herramienta de análisis CAPRA.⁷ Esta experiencia se pone en consideración en este trabajo; no obstante, se pueden utilizar otros tipos de herramientas o metodologías disponibles en la bibliografía sobre el tema o en el mercado, algunas sin costo y otras posiblemente comerciales.

La metodología EPR se describe en el Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-6 (CAPRA ERN-AL, 2009). El procedimiento de cálculo probabilista consiste, en forma resumida, en evaluar las pérdidas en el grupo de bienes físicos expuestos durante cada uno de los escenarios que colectivamente describen la caída de piroclastos (*lapilli* y ceniza), para luego integrar probabilísticamente los resultados obtenidos utilizando como factores de peso las frecuencias de ocurrencia en cada escenario.

En general, para el cálculo de riesgo se requieren los siguientes insumos básicos:

- » La evaluación de la amenaza, tomando como base los estudios elaborados por el Servicio Geológico Colombiano en el marco de su razón misional. Cabe aclarar que para el

evento de caída de piroclastos, en el caso del volcán Galeras, en 2012 se trabajó con los modelos de amenaza obtenidos mediante la utilización del software VHASt (Volcanic Hazard Analysis and Simulation Tool) de CAPRA, y también se contó con los registros reales de mapas de isópacas, lo que permitió observar que el modelo obtenido no se ajusta confiablemente a los valores reales observados en los mapas de isópacas, principalmente en el espesor de las capas o depósitos de material piroclástico (*lapilli* y ceniza), distribuidas a lo largo del área de influencia, y el avance de la distribución o extensión afectada por la caída. Por lo tanto, la herramienta que se decida utilizar para estudiar la amenaza debe permitir incorporar la valoración de amenaza hecha por el SGC.

- » El inventario de elementos expuestos, por ejemplo las viviendas, debe incluir su localización geográfica, sus características tipológicas, más los siguientes parámetros que califican el elemento: el valor físico o costo de reposición del bien, el número de ocupantes estimado o valor humano, las áreas (construida y del predio) y la clase estructural a la que pertenece el bien.
- » Vulnerabilidad de los bienes físicos, que se determina utilizando las funciones de vulnerabilidad resultantes del análisis respectivo. Estas funciones, que definen la distribución de probabilidad de pérdidas como función de la intensidad producida durante un escenario específico, caracterizan el comportamiento del bien durante la ocurrencia del fenómeno amenazante.

En el cálculo de riesgo, uno de los objetivos es el cálculo de las frecuencias de ocurrencia de niveles específicos de pérdidas asociados a los bienes físicos expuestos en lapsos determinados de tiempo y considerando la ocurrencia de la amenaza.

Según Porter (2018), se puede asumir que hay dos valores posibles de que un fenómeno afecte con pérdida una instalación: que ocurra o que no ocurra. Por tanto, se puede aplicar el teorema de probabilidad total, combinando fragilidad o vulnerabilidad y amenaza, para es-

6 <https://ecapra.org/es/documentos/metodolog%C3%A1Da-de-evaluaci%C3%B3n-probabilista-de-riesgos-naturales>

7 <https://ecapra.org/es>



timar la frecuencia media con la que ocurre, o la probabilidad de que ocurra en un período de tiempo especificado. Se puede estimar la pérdida anual promedio o la probabilidad de que ocurra al menos un grado específico de pérdida en un período dado de tiempo.

Siguiendo a Porter (2018), para una sola instalación, una medida simple de riesgo puede incluir los siguientes parámetros: la tasa media λ (número por unidad de tiempo) en que se produce un evento no deseado. $F(c)$ es una función de fragilidad para el evento no deseado, cuya variable independiente es la intensidad del fenómeno (carga de material piroclástico —lapilli y ceniza volcánica—) para un activo con un solo estado de daño. $G(c)$ denota la tasa media de intensidad del evento $C \geq c$ (número promedio de ocurrencias por año, en las cuales la carga de material piroclástico (lapilli y ceniza volcánica) es al menos c en el sitio de interés). Por lo tanto, la tasa media de fallos o número de veces por año

en que el elemento alcanza o supera el estado de daño especificado viene dada por:

$$\lambda = \int_{c=0}^{\infty} -F(c) \frac{dG(c)}{dc} dc$$

Donde $G(c)$ es la frecuencia anual media de una carga de material piroclástico (lapilli y ceniza) que exceda una intensidad c .

Porter (2018) explica la ecuación de esta manera: $G(c)$ es el número promedio de caídas de material piroclástico (lapilli y ceniza) por año que producen cargas de intensidad c o mayor. Por lo tanto, $-dG(c)/dc$ es el número promedio de caídas de material piroclástico (lapilli y ceniza) por año que producen cargas de c de modo exacto. El signo negativo es necesario porque $G(c)$ desciende hacia la derecha (frecuencia más baja a carga de material más alta) en todos los valores de c . $F(c)$ es la probabilidad de que la falla del elemento ocurra con cargas de material

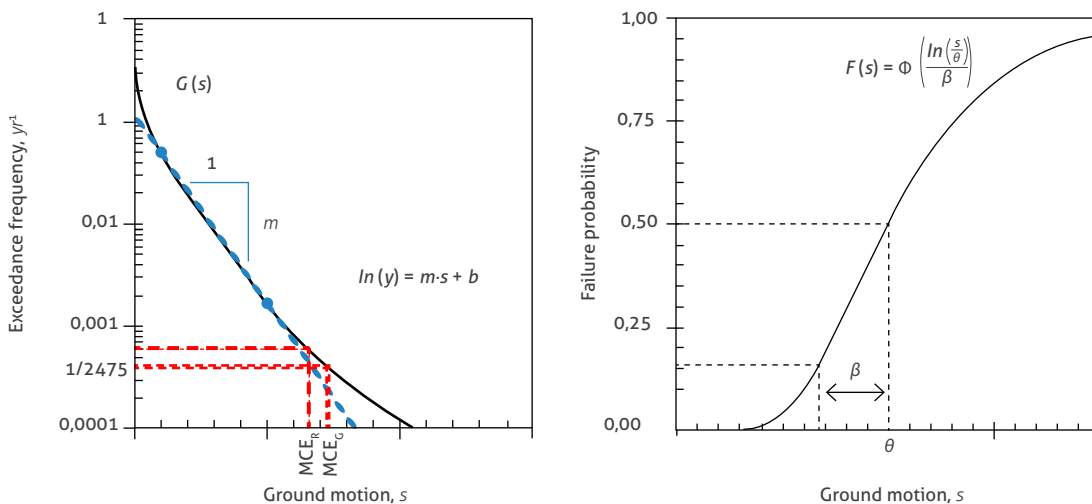
piroclástico c , por lo que el integrando es el número promedio de caídas por año que causan cargas c que resultan en fallas. Se integra en todos los valores de c , porque se quiere tener en cuenta todas las fallas en cualquier valor de c . En la figura 6 se expone un ejemplo con una curva de tasa de falla con amenaza $G(s)$ y la función de fragilidad $F(s)$ para sismos. La figura también incluye una aproximación semilogarítmica para $G(s)$.

Siguiendo la metodología EPR CAPRA, comúnmente, el riesgo por amenazas naturales se describe mediante la denominada *curva de excedencia de pérdidas*, que determina las frecuencias, normalmente anuales, en que ocurrirán eventos en que se exceda un valor especificado de pérdidas. La frecuencia anual de excedencia también es llamada *tasa de excedencia de la pérdida*, y puede calcularse mediante el teorema de la probabilidad total a partir de la frecuencia anual de ocurrencia del evento y de la probabilidad de que la pérdida supere cierto valor, dada la ocurrencia del evento. El periodo de retorno de la pérdida será el inverso de la tasa de excedencia de la pérdida. La siguiente ecuación puede utilizarse para el cálculo mencionado:

$$v(p) = \sum_{i=1}^{\text{Eventos}} \Pr(P > p | \text{Evento } i) F_A(\text{Evento } i)$$

Donde $v(p)$ es la tasa de excedencia de la pérdida p y $F_A(\text{Evento } i)$ es la frecuencia anual de ocurrencia del evento i . $\Pr(P > p | \text{Evento } i)$ es la probabilidad de que la pérdida sea superior a p , al ocurrir el i -ésimo evento. La suma se hace con todos los eventos que potencialmente puedan causar daño. El inverso de $v(p)$ es el periodo de retorno de la pérdida p , identificado como Tr .

La curva de excedencia de pérdidas, o tasa de excedencia de pérdidas, indica con qué frecuencia ocurrirán eventos que producirán pérdidas iguales o superiores a una pérdida dada. La curva de excedencia de pérdidas contiene la información necesaria para describir, en términos de probabilidad, el proceso de ocurrencia de eventos que produzcan pérdidas. La pérdida contempla la suma de las pérdidas que acontecen en todos los bienes físicos expuestos, y en principio es una cantidad incierta, cuyo valor, dada la ocurrencia del evento, no puede conocerse con precisión. Por tanto, la pérdida debe ser tratada como una variable aleatoria, y deben preverse mecanismos para conocer su distribución de probabilidad condicionada a la ocurrencia de un evento dado. Entonces, cada uno de los sumandos de pérdidas que se presentan en cada uno de los bienes es una variable aleatoria, y entre ellos existe cierto nivel de correlación que debe ser incluido en el análisis (ERN-CAPRA-T1-6).



» **Figura 6.** Ejemplo de curva de tasa de falla con la amenaza (izquierda) y función de fragilidad (derecha) para sismos

Fuente: Porter (2018)



Emisión de cenizas desde el cráter adventicio El Pinta, cima Galeras, tomada desde un sobrevuelo, 29 de julio de 2004. Fuente: SGC-OVS Pasto. Cima Galeras, Pasto, Nariño, 2004. Repositorio de archivos institucional.

La secuencia de cálculo probabilista puede establecerse así:

- » Determinar la distribución de probabilidades de la pérdida en cada bien físico expuesto de un escenario.
- » Determinar la distribución de probabilidad de la suma de esas pérdidas, tomando en cuenta la correlación que existe entre ellas, a partir de las distribuciones de probabilidad de las pérdidas en cada bien.
- » Calcular la probabilidad de que esta exceda un valor determinado de pérdida una vez que se tenga la distribución de probabilidad de la suma de las pérdidas en un evento.
- » Determinar la tasa de excedencia de pérdida como el producto de la probabilidad de que esta exceda el valor determinado dado por la frecuencia anual de ocurrencia del evento.

ERN-CAPRA-T1-6 anota que en ocasiones no es práctico utilizar la totalidad de la curva de excedencia de pérdidas, por lo que convie-

ne utilizar estimadores puntuales del riesgo que permitan expresarlo con un solo número. Por ejemplo: la pérdida anual esperada (PAE), que es el indicador de riesgo más empleado y de fácil incorporación en la planificación territorial (Yamín *et al.*, 2013). La PAE es el valor esperado de la pérdida anual, por lo que se debe hacer el cálculo del riesgo en cuanto a la probabilidad de falla anual para el caso de la amenaza y la valoración económica de los elementos expuestos según su valor presente en pesos. Es una cantidad considerable, puesto que indica, por ejemplo, que si el proceso de ocurrencia de eventos dañinos fuera estacionario, es decir, si se mantuviera invariante en el tiempo, su costo equivaldría al valor pagado equivalente a la cantidad PAE de cada año. Por tanto, en un sistema simple de seguro, la pérdida anual esperada sería la prima pura anual justa.

La PAE puede obtenerse por integración de la tasa de excedencia de pérdida vp , utilizando la siguiente expresión.

$$P_{AE} = \sum_{i=1}^{Eventos} E(P | Evento i) F_A(Evento i)$$

La pérdida máxima probable (PML, sigla de *probable maximum loss*), que corresponde a una pérdida que ocurre poco frecuentemente, es decir, que está asociada a un periodo de retorno muy largo o, alternativamente, a una tasa de excedencia muy baja. No existen estándares universalmente aceptados para definir qué quiere decir “poco frecuentemente”. De hecho, la elección de un periodo de retorno u otro para tomar cierta decisión depende del grado de aceptación o rechazo del riesgo por quien lo está tomando. En la industria aseguradora, por ejemplo, los periodos de retorno utilizados para definir la PML varían entre 200 y al menos 1.500 años.

Para cuantificar las pérdidas físicas (PF) se pueden considerar las pérdidas directas en bienes físicos. Para ello se pueden utilizar criterios tales como costos de reemplazo, costos de reparación o mantenimiento y costos del contenido de las edificaciones. La cuantificación de pérdidas indirectas puede incluir costos por interrupción de transporte y servicios, pérdida de producción, pérdida de bienes manufacturados, pérdida de negocios, costos de limpieza, contaminación de agua o tierra y costos por enfermedad y desempleo.

El grado de daño, o pérdida física relativa (PFR), se puede calcular como el costo aproximado de daños, definido como el porcentaje de daño del valor comercial del elemento, que incluye el terreno y la estructura en su condición original o sin daño. Los costos aproximados de daño se pueden establecer como un estimado del costo directo de daño, en el cual se pueden considerar, entre otros, el costo de reintegro de la parte afectada (terreno más estructura), trabajos de estabilización requeridos para llevar el riesgo a un nivel tolerable, de acuerdo con la amenaza potencial, honorarios de profesionales, diseño de medidas y costos indirectos, tales como honorarios y alojamiento temporal.

La metodología EPR CAPRA dispone del program CapraGIS⁸, que puede utilizarse como

“calculadora de riesgo”. Dicho programa puede brindar los siguientes resultados totales:

- » La amenaza (valorada por el SGC e incorporada a la herramienta), teniendo en cuenta los escenarios y, si se desea, la posible ocurrencia simultánea de otros eventos de amenaza, como tormenta eléctrica, inundación por exceso de agua, etc. (temporalidades 1, 2, 3, etc.), si es un solo escenario; por ejemplo, la caída de material piroclástico aerotransportado (*lapilli* y ceniza) (temporalidad 1).
- » La frecuencia anual de ocurrencia, el valor esperado de la pérdida, la varianza de la pérdida, los parámetros de la distribución de probabilidad empleada, así como el valor expuesto en pesos.
- » Las pérdidas globales, discriminando la frecuencia de ocurrencia de la pérdida (total) y la frecuencia de ocurrencia de la pérdida, teniendo en cuenta la temporalidad, que resulta igual a la *total* si la temporalidad es 1 (un solo escenario).
- » La prima total y los escenarios más críticos.
- » La curva de pérdida máxima probable (PML), que representa el valor de pérdida global para una tasa de excedencia dada, y el valor de la prima total referida. Dependiendo de los tomadores de decisiones, se define el periodo de retorno (200 a 1.500 años).

Adicionalmente, en los resultados se pueden obtener las pérdidas físicas (PF), que corresponden a la pérdida física anual esperada de cada elemento (edificación o bien físico) y los grados de daño o las pérdidas relativas físicas (PFR) que corresponden a la relación de la pérdida física y al valor físico de la edificación.

5.2 Evaluación del riesgo

La evaluación del riesgo permite establecer criterios generales para definir las categorías de riesgo y los tipos de intervención y alcances en su reducción, una vez culminada la etapa de cálculo de riesgo, cuyo resultado se ha presentado en términos cuantitativos (SGC, 2016).

8 <https://ecapra.org/es/topics/capra-gis>

Los criterios fijados para la aceptabilidad del riesgo en bienes físicos se basan en comparaciones de pérdidas anuales o en probabilidad de afectación anual, en ese orden.

Una vez calculado el riesgo anual y comparado con el costo aproximado de daños, se pueden generar categorías de riesgo (alta, media y baja) en bienes físicos, con base en la valoración del costo aproximado de daño y el grado de afectación. Con cada categoría se asocian algunas medidas de intervención o reducción del riesgo. En el caso de la categoría de riesgo alto, se plantea adicionalmente la evaluación con medidas de intervención o estrategias de gestión, con el propósito de definir su viabilidad técnica, financiera y urbanística (SGC, 2016).

Dependiendo de esta categorización, se pueden establecer criterios para definir los niveles de riesgo inaceptable, tolerable en ciertas circunstancias o riesgo aceptable, de acuerdo con las regulaciones existentes y los procesos sociales que se generen con las comunidades involucradas. Por otra parte, es posible plantear medidas de intervención prospectiva o correctiva para

cada categoría de riesgo. Resulta conveniente presentar los resultados mediante un mapa de zonificación de riesgo asignando colores a cada categoría. En la tabla 10 se muestra un ejemplo de categorización del riesgo enfocado en cubiertas de edificaciones.

El estudio de riesgo debe producir un informe técnico final que contenga la información de base y elaborada en que se sustenta, con los mapas y anexos respectivos; además, debe incluir un resumen ejecutivo, dirigido a los tomadores de decisiones y a la comunidad en general, en el que se señalen los aspectos más importantes del estudio, así como sus resultados, conclusiones y recomendaciones.

No sobra reiterar que los estudios aplicados a procesos de gestión del riesgo, por su concepción de proceso social, deben basarse en los conceptos, principios y directrices establecidos en la Ley 1523 de 2012, “Por medio de la cual se adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones”.

» **Tabla 10.** Categorización del riesgo que enfrentan cubiertas de edificaciones

RIESGO	COLOR	COSTO DEL DAÑO	NIVEL DE DAÑO
Alto	Rojo	60%-100%	Riesgo inaceptable, debido al daño extensivo o colapso de la estructura. El costo es muy alto e involucra pérdida de vidas
Medio	Amarillo	25%-59%	Riesgo tolerable. El costo de recuperación es moderado
Bajo	Verde	0%-24%	Riesgo aceptable, sin daño o con daños leves. El costo es bajo, se recupera relativamente fácil



» Vista del costado oriental del Complejo Volcánico Galeras con una columna de emisión de cenizas, 3 de noviembre de 2007.
Fuente: SGC-OVS Pasto. Pasto, Nariño. 2007. Repositorio de archivos institucional.

The background of the slide features a photograph of a mountain range under a cloudy sky. A thick green semi-transparent overlay covers the right two-thirds of the image. A vertical yellow bar is positioned on the left side, separating the photograph from the green overlay. The number '6' is centered within a white circle in the upper left area of the green overlay.

6

Conclusiones



Se ha elaborado esta guía enfocándola en la caída de material piroclástico transportado por el viento de tamaños *lapilli* (menor de 65 mm) y ceniza volcánica (menor de 2 mm).

Los procedimientos sugeridos están basados en trabajos del SGC realizados en el marco de su objetivo misional, en la participación en proyectos internacionales como la iniciativa CAPRA, y en otros trabajos que se encuentran en la bibliografía sobre el tema.

Algunos enfoques se han adaptado del análisis de vulnerabilidad de edificaciones ante otros fenómenos amenazantes que han sido más utilizados en la bibliografía, como las sacudidas sísmicas. La intensidad del fenómeno amenazante se ha relacionado con el espesor de la capa de material piroclástico (*lapilli* y ceniza) depositado sobre las cubiertas, que se convierte en carga de solicitación que puede variar, dependiendo del tamaño de la partícula y de la humedad.

Se han presentado algunas tablas como ejemplos sugeridos de inventarios y tipologías de ele-

mentos expuestos, enfocadas en edificaciones y cubiertas de edificaciones, que pueden cambiar, dependiendo del alcance o detalle planteado en el estudio.

Se han presentado ejemplos de categorizaciones de vulnerabilidad y riesgo, que pueden cambiar de acuerdo con el alcance o detalle requerido.

Se sugiere que la valoración de la amenaza se haga con base en los estudios y mapas de amenaza volcánica del SGC, que cuentan con el rigor académico y científico requerido para sustentar un estudio confiable de vulnerabilidad y riesgo.

Se sugiere que los estudios aplicados a procesos de gestión del riesgo estén basados en los conceptos y directrices establecidos en la Ley 1523 de 2012, “Por medio de la cual se adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones”.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Biass, S., Bonadonna, C., Di Traglia, F., Pistolesi, M., Rosi, M. y Lestuzzi, P. (2016). Probabilistic evaluation of the physical impact of future tephra fallout events for the Island of Vulcano, Italy. *Bulletin of Volcanology*, 78 (37). <https://doi.org/10.1007/s00445-016-1028-1>.
- Bonett, R. (2003). *Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios: aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada (tesis doctoral)*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- CAPRA ERN-AL. (2009). *Informe técnico ERN-CAPRA-T1-6 componentes principales del análisis de riesgo*. Bogotá, México y Barcelona: CAPRA ERN Consorcio Evaluación de Riesgos Naturales América Latina.
- CENEPRED. (2014). *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales – 2da Versión*. Lima: Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED).
- Corominas, J., Van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J., Fotopoulou, S. et al. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, 209-263. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>.
- CORPOSSO. (2009). *Evaluación de la vulnerabilidad física y funcional a fenómenos volcánicos, en el área de influencia del volcán Galeras*. Pasto: Convenio de Cooperación n° 1005-08-12-07 entre el Fondo Nacional de Calamidades y la Corporación OSSO.
- Datos Abiertos. (18 de octubre de 2016). *Datos Abiertos Gobierno Digital de Colombia*. Consultado el 11 de enero de 2019, en Inventario de bienes inmuebles de la Alcaldía (Mosquera Cundinamarca). Disponible en <https://www.datos.gov.co/Ordenamiento-Territorial/INVENTARIO-DE-BIENES-INMUEBLES-DE-LA-ALCALD-A/8equ-b5wn/data>.
- Decreto 1807. (2014). Relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial. Bogotá: Diario Oficial, 49279, 19 de septiembre.
- Decreto 4131. (2011). Por el cual se cambia la naturaleza jurídica del Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas). Bogotá: Diario Oficial, 48242, 3 de noviembre.
- Gobierno de Colombia. (2016). *Guía para responder a solicitudes de acceso a información pública*. Bogotá: Secretaría de Transparencia de la Presidencia de la República.
- IGAC. (2018). *Instituto Geográfico Agustín Codazzi*. Consultado el 7 de noviembre de 2018, en Geografía y Cartografía. Formatos y Escalas de Mapas. Disponible en <https://www.igac.gov.co/es/contenido/areas-estrategicas/formatos-y-escalas-de-mapas>
- Ingeominas. (1998). *Evaluación de la vulnerabilidad de cubiertas de viviendas expuestas a la caída de ceniza en la zona de influencia del volcán Galeras*. Pasto: Ingeominas.
- Jenkins, S., Spence, R., Fonseca, J., Solidum, R. y Wilson, T. (2014). Volcanic risk assessment: Quantifying physical vulnerability in the built environment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 276, 105-120. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.03.002>
- La Prensa. (27 de abril de 2015). *La Prensa/Mundo*. Consultado el 14 de enero de 2019, en Calbuco sigue expulsando ceniza, temen llegada de lluvias. Disponible en https://www.prensa.com/mundo/Calbuco-expulsando-ceniza-llegada-lluvias_0_4195080594.html
- Ley 1523. (2012). Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. Bogotá: Diario Oficial, 48411, 24 de abril.
- Ley 1712. (2014). Ley de transparencia y del derecho de acceso a la información pública nacional. Bogotá: Diario Oficial, 49084, 6 de marzo.
- Ley 388. (1997). Por la cual se modifica la Ley 9 de 1989 y la Ley 3 de 1991 y se dictan otras disposiciones. Bogotá: Diario Oficial, 43091, 24 de julio.

- Lockwood, J. P. y Hazlett, R. W. (2010). *Volcanoes: Global Perspectives*. Oxford, UK: Wiley Blackwell.
- Maqsood, T., Wehner, M., Ryu, H., Edwards, M., Dale, K. y Miller, V. (2014). *GAR15 Vulnerability Functions: Reporting on the UNISDR/GA SE Asian Regional Workshop on Structural Vulnerability Models for the GAR Global Risk Assessment, 11-14 November, 2013, Geoscience Australia* (Vol. Record 2014/38). Canberra, Australia: Geoscience Australia.
- Miranda, E. (1999). Approximate seismic lateral deformation demands in multistory buildings. *Journal of Structural Engineering*, 125 (4), 417-425. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1999\)125:4\(417\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:4(417))
- Németh, K. y Martin, U. (2007). *Practical Volcanology*. Budapest: Geological Institute of Hungary.
- NOAA. (2000). *National Oceanic and Atmospheric Administration*. Consultado el 10 de octubre de 2018, en National Centers for Environmental Information: A Teachers Guide to Stratovolcanoes of the World. Disponible en <https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/stratoguide/stratoguide.pdf>
- NSR10. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente. *Decreto 926 de 2010*. Bogotá: Diario Oficial, 47663, 19 de marzo.
- ONU. (2015). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030*. Sendai: Oficina para la Reducción del Riesgo de Desastres, UNISDR.
- Pomonis, A., Spence, R. y 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 (1-2), 107-131. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(99\)00071-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(99)00071-2).
- Porter, K. (2018). *A beginner's guide to fragility, vulnerability and risk*. University of Colorado, Boulder. Consultado el 23 de octubre de 2018, en SPA Risk LLC. Disponible en <http://www.sparisk.com/pubs/Porter-beginners-guide.pdf>
- SGC. (2016). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- SGC-UNGRD. (2012). *Análisis probabilista de riesgo volcánico para el volcán Galeras - Colombia*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano, Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, Technical Assistance Project con fondos del Banco Mundial y el Global Facility for Disaster Reduction and Recovery.
- Sigurdsson, H. (2015). *Enciclopedia de volcanes* (2a ed.). London: Academic Press.
- SNGRD. (2017). *Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes. Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres - Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo*. Bogotá: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.
- Spence, R., Kelman, I., Baxter, P., Zuccaro, G. y Petrazzuoli, S. (2005). Residential building and occupant vulnerability to tephra fall. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5 (4), 477-494. <https://doi.org/10.5194/nhess-5-477-2005>.
- Spence, R., Pomonis, A., Baxter, P., Coburn, A., White, M., Dayrit, M. y otros. (1996). Building damage caused by the Mount Pinatubo eruption of June 15, 1991. En C. Newhall y R. Punongbayan, *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines* (pp. 1055-1061). Quezon City, Seattle and London: Philippine Institute of Volcanology and Seismology - University of Washington Press.
- Tilling, R. (1993). *Volcanic Hazards*. Santa Fe, New Mexico: World Organization of Volcano Observatories (WOVO, IAVCEI).
- Torres, R. (2001). *Vulnerabilidad estructural de edificaciones de uso general ante eventos eruptivos del volcán Galeras en su zona de influencia*. Pasto: Ingeominas.
- Torres, R. y Cárdenas, R. (2006). Vulnerability of normal occupation houses before the ash fall of the Galeras volcano. *Fourth Conference Cities on Volcanoes* (pág. 141). Quito: International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior.
- Torres, R., Ponce, P. y Gómez, D. (2012). *Estimación de funciones de vulnerabilidad ante erupciones volcánicas*. Pasto: Servicio Geológico Colombiano (SGC). Technical Assistance Project (TAP) con fondos del Banco Mundial y el Global Facility for Disaster Reduction and Recovery (GFDRR). Asistencia técnica del Consorcio ERN-AL.
- Torres, R., Ponce, P. y Gómez, D. (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), 67-82. <https://doi.org/10.18273/revbol.v39n2-2017005>.
- UNGRD. (2016). *Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres: una estrategia de desarrollo 2015-2025*. Bogotá: Unidad Nacional para la Gestión de Riesgo de Desastres.
- UNISDR. (2009). *Terminología sobre reducción del riesgo de desastres*. Ginebra, Suiza: Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas.

- UNISDR. (2015). *Making Development Sustainable: The Future of Disaster Risk Management. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. Geneva, Switzerland: United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR).
- USGS. (2008). *USGS Publications Warehouse*. Consultado el 18 de noviembre de 2019, en What are Volcano Hazards? Disponible en <https://pubs.usgs.gov/fs/fs002-97/fs00297.pdf>
- USGS. (2019). *Volcano Hazards Program*. Consultado el 18 de noviembre de 2019, en Volcanic Ash Impacts & Mitigation. Disponible en https://volcanoes.usgs.gov/volcanic_ash/
- Wilson, G., Wilson, T., Deligne, N. y Cole, J. (2014). Volcanic hazard impacts to critical infrastructure: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 286, 148-182. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.08.030>.
- Wilson, T., Stewart, C., Sword-Daniels, V., Leonard, G., Johnston, D., Cole, J. et al. (2012). Volcanic ash impacts on critical infrastructure. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 45-46, 5-23. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.06.006>.
- Yamín, L., Ghesquiere, F., Cardona, O. y Ordaz, M. (2013). *Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastres: el caso de Bogotá, Colombia*. Bogotá: Banco Mundial y Universidad de los Andes.
- Zuccaro, G., Cacace, F., Spence, R. y Baxter, P. (2008). Impact of explosive eruption scenarios at Vesuvius. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178 (3), 416-453. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.01.005>.



Vista del costado oriental del Complejo Volcánico Galeras con una columna de emisión de gases y cenizas, 24 de enero de 2009.
Fuente: SGC-OVS Pasto. Pasto, Narino. 2009. Repositorio de archivos institucional.

ÍNDICES

FIGURAS

Figura 1. Esquema simplificado de una erupción volcánica	10
Figura 2. Captura de pantalla del Inventario de Inmuebles de la Alcaldía de Mosquera, Cundinamarca	35
Figura 3. Techos dañados en Ensenada (Chile) por caída de ceniza de la erupción del volcán Calbuco	39
Figura 4. Curvas de fragilidad correspondientes a cinco clases de cubiertas de la zona de influencia del volcán Galeras, asociadas con una carga de ceniza.	42
Figura 5. Ejemplo de curva de vulnerabilidad	44
Figura 6. Ejemplo de curva de tasa de falla con la amenaza (izquierda) y función de fragilidad (derecha) para sismos.	52

TABLAS

Tabla 1. Relaciones entre mapa y terreno en las escalas estándares	23
Tabla 2. Escalas de trabajo tenidas en cuenta en los estudios técnicos	23
Tabla 3. Registros, tipos de datos e información temática	28
Tabla 4. Elementos expuestos	34
Tabla 5. Tipologías de edificaciones	37
Tabla 6. Tipologías de cubiertas	37
Tabla 7. Daños esperados y parámetros que deben evaluarse por caída de ceniza volcánica	39
Tabla 8. Escala de daño aplicable a una cubierta de edificación	41
Tabla 9. Clasificación de la vulnerabilidad de edificaciones	45
Tabla 10. Categorización del riesgo que enfrentan cubiertas de edificaciones	55

En el contexto de la gestión del riesgo de desastres y dentro de su marco normativo, esta *Guía metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo por caídas de material piroclástico transportado por el viento*, publicación del Servicio Geológico Colombiano, es un aporte para los procesos de evaluación del riesgo volcánico, y de utilidad para los gestores del riesgo de desastres a nivel técnico, profesional, administrativo y de formulación de políticas.

En esta guía se describen los pasos para realizar estudios de evaluación de la vulnerabilidad física y la estimación del riesgo de elementos expuestos ante este tipo de amenaza volcánica. Se toman en consideración experiencias en otras partes del mundo, así como trabajos adelantados con la participación del Servicio Geológico Colombiano, y se propone como punto de partida para su enriquecimiento y concertación, a través de discusiones con pares investigadores en esta temática, que conlleven a proponer nuevas versiones de acuerdo con la evolución del estado del arte.

