

Riesgo volcánico: estado del arte y desafíos de trabajo

Gemma Gómez-Castillo*

Manuel E. Mendoza**

José Luis Macías*** Erna

López Granados****

Recibido el 28 de abril de 2017; aceptado el 23 de mayo de 2017

Abstract This article has two objectives: (1) provide a conceptual framework of volcanic risk, and (2) review research conducted since 1995 to define the prospects and challenges that exist in this science. A search by title, abstract, and key-words for the phrases “volcanic risk”, “volcanic hazard” and “volcanic vulnerability” returned 161 articles in 39 journals, which are reviewed here.

This review found that continued work is needed to build a general theoretical framework of volcanic risk that can be widely accepted and applied, and that avoids confusion and misuse of various terms. Also vital is continued work on aspects of risk perception, management, and policy, all of which are key elements of disaster prevention and mitigation.

Key words: *Conceptual framework, volcanic hazard, vulnerability, risk, quantitative review.*

* Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Morelia, Antigua Carretera a Pátzcuaro núm. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta, C.P. 58190 Morelia, Michoacán, México, correo electrónico: ggomez@pmip.unam.mx ** Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Morelia, Michoacán, México. Actualmente investigador visitante en el Department of Geography, University of British Columbia, Canada, correo electrónico: mmendoza@ciga.unam.mx *** Instituto de Geofísica, UNAM, Unidad Morelia, Michoacán, México, correo electrónico:

macias@geofisica.unam.mx **** Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edif. U-4, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México. Actualmente investigadora visitante en la School of Community and Regional Planning, University of British

Resumo O presente artigo tem dois objetivos: primeiro, fornecer um quadro conceitual do risco vulcânico e segundo, definir as perspectivas e desafios do trabalho com base na revisão de artigos publicados entre 1995 e 2014. 161 artigos publicados em 39 revistas foram analisados, procurando palavras como: “risco vulcânico”, “perigo vulcânico” e “vulnerabilidade vulcânica”, a pesquisa foi delimitada por título, resumo e palavras-chave.

Recomenda-se construir um quadro teórico conceitual generalizado, que poderá ser amplamente aceito e utilizado, para evitar confusões e maus usos dos termos. Também é importante continuar trabalhando na gestão da percepção, gestão da política dos riscos, sendo elementos chave da prevenção e mitigação.

Palabras clave: *quadro conceptual, perigo vulcânica, vulnerabilidade, risco, re-visão quantitativa.*

Resumen El presente artículo tiene dos objetivos: primero, aportar un marco conceptual del riesgo volcánico y segundo, definir las perspectivas y retos de trabajo en base a la revisión de artículos publicados entre 1995 y 2014. Se revisaron 161 artículos publicados en 39 revistas a partir de las palabras de búsqueda: “volcanic risk”, “volcanic hazard” y “volcanic vulnerability”, la búsqueda se delimitó al título, resumen y palabras clave.

Se recomienda construir un marco teórico-conceptual generalizado, que sea ampliamente aceptado y usado, para evitar confusiones y mal uso de términos. También es importante continuar trabajando en la percepción, manejo, gestión y política del riesgo, elementos claves para la prevención y mitigación.

Palabras clave: *marco conceptual, peligro volcánico, vulnerabilidad, riesgo, re-visión cuantitativa.*

Introducción El vulcanismo ha jugado un papel determinante durante la historia geológica de la Tierra, ya que la corteza oceánica y la continental tienen orígenes volcánicos. En la escala geológica del tiempo, la actividad volcánica ha beneficiado a la humanidad creando terrenos fértiles, permitiendo el surgimiento y desarrollo de civilizaciones. Sin embargo, si se considera la escala humana del tiempo, la actividad volcánica explosiva impacta negativamente, especialmente las áreas pobladas o agrícolas (Tilling, 1993; Sigurdsson *et al.*, 2000; Lookwood y Hazlett, 2010; Witze, 2015).

El origen y ascenso del magma a través del manto y corteza y su erupción en superficie son el objeto de estudio de la vulcanología (Sigurdsson *et al.*, 2000), ciencia que comenzó su desarrollo a principios del siglo XIX, una vez que se habían establecido las bases de la Geología durante el siglo anterior (LooNwood y Hazlett, 2010). En América Latina (AL) hubo algunos intentos por aproximarse al estudio de los volcanes en el siglo XVIII con el nacimiento del volcán Jorullo en Michoacán, México (Ruiz-Guadalajara, 2004; Hurtado Torres, 2009; Urquijo-Torres, 2010; Guilbaud *et al.*, 2011). Sin embargo, los estudios formales comenzaron hasta el año de 1902 con la catástrofe de la Montaña Pelée, en la isla caribeña de Martinica (Fisher y Heinen, 1982; Westercamp y Traineau, 1983; Bourdier *et al.*, 1989; Tanguy, 1994); luego en 1943, los vulcanólogos del mundo centraron su interés nuevamente en México con el nacimiento del volcán Parícutín (Bullard, 1947; Foshag y González-Reyna, 1956; HasenaNa y Carmichael, 1985; Inbar *et al.*, 1994; Garduño-Monroy *et al.*, 2009).

En la década de los ochenta hubo dos eventos trágicos que provocaron serios desastres y marcaron la historia de AL en cuanto a vulcanismo se refiere. El primero en 1982 con la erupción del volcán Chichón al sur de México (Macías *et al.*, 2003; Tilling, 2009; Limón-Hernández y Macías, 2009); el segundo desastre volcánico, ocurrió tres años después con la erupción del Nevado del Ruiz en Colombia (Herd, 1986; Barberi *et al.*, 1990; Pierson *et al.*, 1990; Thouret, 1990; Voight, 1990). Estos eventos aislados hicieron que cada vez un mayor número de científicos se interesaran en el estudio de los volcanes y sus afectaciones directas a la población y a la economía (Sigurdsson y Carey, 1986; Macías y Aguirre, 2006).

Si comparamos la ocurrencia de los desastres volcánicos con otros tipos de desastres de origen natural o antropogénico, los desastres volcánicos suceden con lapsos de recurrencia mayores y provocan menos pérdidas de vidas humanas y daños materiales que el resto de los desastres. Por ejemplo, el desastre natural que más vidas ha cobrado en la historia de la humanidad fue el sismo de Huahsien (China) en 1556, que arrebató la vida de más de 820,000 personas; en contraste, la erupción volcánica con mayor número de muertos fue la del volcán Tambora (Indonesia) en 1815, con 92,000 decesos (Stillwell, 1992; Tilling, 1993). Los desastres naturales han sido importantes en la historia y el desarrollo de AL y las afectaciones por eventos volcánicos han sido cuantiosas; sin embargo, ocupan el sexto lugar en ocurrencia (el primer lugar lo tienen las inundaciones) (Charvériat, 2000).

El presente artículo está dividido en dos partes principales, la primera es un marco conceptual de los peligros volcánicos y otros términos fundamentales empleados en el análisis del riesgo volcánico. La segunda parte consiste en una revisión cuantitativa de la bibliografía más reciente que se ha publicado respecto al tema del riesgo volcánico (1995 al 2014).

Conceptos principales del riesgo volcánico Peligro volcánico

La amenaza o peligro volcánico se refiere a la probabilidad de que ocurra un tipo específico de evento volcánico que pueda afectar cierta área, con una intensidad particular, en un tiempo determinado y cause la muerte, lesiones, daños a la propiedad,

la infraestructura, pérdida de medios de sustento, interrupción del funcionamiento social y económico, o daños ambientales (Sigurdsson *et al.*, 2000; Taubenböck *et al.*, 2008; UNISDR, 2009; LooNwood y Hazlett, 2010; Bignami *et al.*, 2012; Keller *et al.*, 2012).

La mayor actividad volcánica se presenta en los límites de las placas tectónicas (Cottrell, 2014) y los diferentes peligros volcánicos se asocian con tipo de magma y el ambiente tectónico en el que éste se desarrolla (López-Ruiz y Cebría, 2007). Por ejemplo, la actividad volcánica efusiva se relaciona con magma básico, muy fluido, pobre en sílice y bajo contenido de volátiles (baja explosividad), este magma es característico de límites de placa divergentes y puntos calientes (*hot spots*); por el contrario, el vulcanismo explosivo se localiza, principalmente, en márgenes convergentes, donde el magma es ácido, tiene un alto contenido en sílice y volátiles (KusNy, 2008).

El primero en proponer una clasificación de la explosividad de las erupciones fue WalNer (1973), teniendo como criterios la dispersión y la fragmentación del material, partiendo de la caracterización de los depósitos piroclásticos. Posteriormente, para medir la magnitud de explosividad de una erupción volcánica, Newhall y Self (1982) diseñaron un índice que es usado actualmente y se conoce como VEI (Volcanic Explosivity Index), el cual fue determinado teniendo como principales criterios la cantidad de material expulsado, la altura de la columna eruptiva y la duración de la erupción. El VEI asigna valores de 0 (erupciones efusivas muy tranquilas) al 8 (erupciones explosivas colosales). También se manejan otras clasificaciones; por ejemplo, de acuerdo a la viscosidad del magma, (hawaiano, estromboliano, vulcaniano, pliniano y ultrapliniano) (Sigurdsson *et al.*, 2000). Mientras más explosiva sea una erupción, mayor peligro representa; sin embargo, las erupciones más explosivas se presentan en intervalos de tiempo mucho más largos (Newhall y Self, 1982; Tilling, 2008; LooNwood y Hazlett, 2010; Cottrell, 2014); por ejemplo, una erupción de VEI 0-1 puede ocurrir diariamente, una de VEI 8 ocurre cada más de 10,000 años (Newhall y Self, 1982; Sigurdsson *et al.*, 2000; Rothery, 2010; Bignami *et al.*, 2012; Plag *et al.*, 2015). Los peligros volcánicos se clasifican en primarios (directos) (Smith, 2013) y secundarios (asociados) (Keller *et al.*, 2012) (Tabla 1).

Peligros volcánicos primarios Son el resultado de la actividad volcánica directa, están asociados a la forma en la que se emite el material volcánico (Smith, 2013) y se presentan generalmente con la erupción o posterior a ella, pero en un periodo de tiempo corto (Tilling, 2008).

Tabla 1 Los peligros volcánicos

Tipo de peligro

Nombre del

Características Materiales de caída aérea

En este término se engloban la caída de cenizas, piroclastos y productos balísticos. Las principales afectaciones que producen las cenizas son los problemas con el tráfico aéreo, accidentes de tránsito por caminos resbalosos y poca visibilidad, daños a la agricultura, daños a instalaciones industriales, interferencias en radio y televisión, colapso de estructuras y, cuando se humedecen, se transforman en un cemento que se introduce por conductos, llegando a bloquearlos (Ortiz, 2000) Flujos de lava Materiales o productos volcánicos más o menos líquidos que son susceptibles de fluir y derramarse. Los flujos de lava poco viscosa destruyen todo a su paso, pero la mayoría de éstas se mueven lo suficientemente lentas como para que las personas se pongan fuera de su alcance; sin embargo, estos avanzarán y derribarán o enterrarán todo lo que se encuentre a su paso, provocarán incendios por la elevada temperatura de la lava y será más peligrosa si la erupción se produce en una zona en la que exista un glaciar, pues puede llegar a tener como resultado la formación de un lahar Flujos piroclásticos (corrientes piroclásticas de densidad)

Son mezclas calientes de alta densidad de fragmentos de roca, gases y ceniza, que con temperaturas por lo general arriba de 100° C, descienden por los flancos del volcán a velocidades de hasta más de 100 Nm/h. Los flujos piroclásticos destruyen por impacto directo, entierran sitios con restos de rocas caliente, derriten nieve y forman lahares, queman los bosques, cultivos y edificios (Sigurdsson *et al.*, 2000) Gases Son las sustancias volátiles emanadas por un volcán y

constituyen la mayor parte del volumen de las erupciones volcánicas. El CO₂ es un gas incoloro e inodoro que, generalmente, no representa un peligro directo para la vida porque se diluye muy rápidamente; sin embargo, en determinadas circunstancias el CO₂ concentra altos niveles en la atmósfera y puede llegar a ser letal para las personas y animales, ya que puede fluir hacia zonas bajas; cuando una persona respira aire con más de 30% de CO₂, puede provocarle la inconciencia o hasta la muerte (Bignami *et al.*, 2012)

74 ■ *Gemma Gómez-Castillo et al. Riesgo volcánico: estado del arte y desafíos de trabajo*

Sismos Son las vibraciones del terreno, relacionados con el

movimiento del magma o los procesos volcánicos, que pueden ocurrir en o cerca de los volcanes y se caracterizan por ser movimientos someros (de 1 a 9 Nm de profundidad). Los sismos disparados por actividad volcánica pueden causar daños a las construcciones e infraestructura, desencadenar deslizamientos, provocar cortes en la electricidad, generar incendios, licuefacción, etc. (Bignami *et al.*, 2012) Ondas de choque y sonido atmosférico Las ondas de choque corresponden a la presión producida en la explosión volcánica que viaja a una velocidad mayor que la del sonido, su ocurrencia indica que el material expulsado estaba a mayor presión que la atmósfera. El sonido atmosférico se produce durante las fases explosivas, por la rápida expansión y turbulencias de los gases y son uno de los sonidos más fuertes conocidos por el hombre (Smith, 1976). Las grandes ondas de choque pueden dañar o derribar edificios y son tan poderosas que pueden llegar a darle la vuelta al mundo Deformación del terreno Se le llama así a los desplazamientos inducidos por el movimiento del magma hacia la superficie que provoca cambios en la topografía. La deformación pueden ser horizontal (apertura de grietas) y/o vertical (inflamamiento del terreno). Las deformaciones también provocan importantes daños en edificios, estructuras y vías de comunicación. Las modificaciones que sufre el relieve propician que los procesos de erosión y sedimentación afecten negativamente a la zona (Ortiz, 1996) Lahares Es un término indonesio que se refiere a los flujos

generados en los flancos de un volcán, los cuales están constituidos por una mezcla de agua, detritos y fragmentos de suelo (Smith y Fritz, 1989). Son flujos densos producidos por el escurrimiento de agua de ríos y lluvias y materiales volcánicos, especialmente piroclastos. Los principales peligros de los lahares son: deslizamientos súbitos en los volcanes, destrucción por impacto directo, obstrucción de arroyos y enterrar valles (Ortiz, 1996; Lavigne *et al.*, 2000; Sigurdsson *et al.*, 2000) Tsunamis Es un término japonés que se traduce como "onda larga en el puerto", y fue originalmente usado para designar las grandes olas marítimas desencadenadas por terremotos; sin

embargo, el término se ha extrapolado para incluir a las ondas que se presentan en los océanos o en lagos que tienen un disparador volcánico (Sigurdsson *et al.*, 2000) Deslizamientos, avalanchas y derrumbes Son grandes masas de roca y suelo que caen, se deslizan o fluyen rápidamente por la fuerza de la gravedad, pueden alcanzar velocidades hasta de 100 Nm/h y avanzar grandes distancias (LooNwood y Hazlett, 2010; Papale, 2014). Un deslizamiento puede sepultar valles y dejar como evidencia

Revista Geográfica 158 enero-diciembre 2017 ■ 75

de su paso una topografía de montículos caóticos y depresiones cerradas. Si el depósito es lo suficientemente grueso, puede generar represas en las corrientes de agua, hasta formar lagos en los días posteriores; esta agua podría, eventualmente, drenar catastróficamente y generar lahares e inundaciones aguas abajo Inundaciones Las inundaciones volcanogénicas son el represamiento de

alguna corriente de agua que fue anormalmente contenida o retenida por un evento volcánico o por el colapso de una caldera volcánica que contenía un lago Hambruna pos eruptiva

Es la interrupción en el suministro de alimentos por la pérdida inmediata de los cultivos y el ganado, que a largo plazo, se traduce en la nula productividad de las tierras agrícolas. Los gases son inyectados en la atmósfera y producen cambios en el clima de grandes regiones, provocando sequías y pérdida de cosechas (Sigurdsson *et al.*, 2000; Tilling, 2008). Este peligro secundario es el que más vidas ha cobrado en los registros históricos del vulcanismo los gases son inyectados en la atmósfera y producen cambios en el clima de grandes regiones, provocando sequías y pérdida de cosechas (Sigurdsson *et al.*, 2000; Tilling, 2008). Este peligro secundario es el que más vidas ha cobrado en los registros históricos del vulcanismo (Tanguy *et al.*, 1998; Tilling, 2008) Cambios en la temperatura y calidad del agua

Es la alteración y contaminación del recurso hídrico con partículas sólidas, líquidas y gaseosas que afectan sus características organolépticas (sabor, olor y color), además de que generalmente se vuelve nociva para los seres vivos. Los cambios en la temperatura (aumento, generalmente) en las aguas superficiales se presenta por la caída de material piroclástico, o porque la vegetación y los árboles fueron quemados o arrancados y no proporcionan sombra que ayude a disminuir la temperatura del agua. Las afectaciones que producen los cambios en la temperatura del agua son la eutrofización (exceso de nutrientes que favorece el crecimiento de algas que enturbian el agua), menos oxígeno en el agua caliente que en la fría, proliferación de organismos patógenos como bacterias y parásitos, mortandad de la vegetación y de la fauna acuática muy susceptibles a los cambios de temperatura, así como una mayor alteración y desprendimiento de las partículas del subsuelo (Organización Panamericana de la Salud —OPS, 2005) Lluvia ácida y tormentas eléctricas

La lluvia ácida es la condensación de las gotas de lluvia alrededor de los aerosoles volcánicos, producto de la interacción entre gases volcánicos y la atmosfera, donde el pH puede llegar a ser hasta de tres y los principales elementos dañinos son el ácido sulfúrico y el ácido nítrico (Ortiz, 1996; Sigurdsson *et al.*, 2000). Las tormentas

76 ■ *Gemma Gómez-Castillo et al. Riesgo volcánico: estado del arte y desafíos de trabajo*

eléctricas se producen debido a los gases arrojados por el volcán, que cargan el aire con la valencia de los elementos suspendidos y permiten que se origine en las nubes una mayor conducción eléctrica (Ortiz, 1996; Organización Panamericana de la Salud, 2005). Las principales afectaciones que produce la lluvia ácida son el aumento en la acidez del suelo y lixiviación, daños a los cultivos y a los cuerpos de agua, con lo cual se contribuye a la hambruna post-eruptiva. Las tormentas eléctricas aumentan la sensación de alarma entre la población y en el caso de que originen incendios se pueden producir quemaduras y politraumatismos. Además, las tormentas eléctricas facilitan la formación de fuertes aguaceros que pueden desencadenar deslizamientos (OPS, 2005)

Contaminación atmosférica y cambio climático

Durante las erupciones se emiten cenizas y gases, de los cuales, los más perjudiciales para el equilibrio atmosférico son el dióxido de azufre (SO₂) y el ácido clorhídrico (HCl) (Self, 2006), que al reaccionar con el agua formarán ácido sulfúrico (H₂SO₄), un aerosol que puede permanecer en suspensión hasta 3 años y no permite el paso de la energía solar hacia capas inferiores (Parfitt y Wilson, 2008). Las principales afectaciones que resultan de la contaminación atmosférica y el cambio climático son la disminución de la temperatura, provocando pérdidas en la productividad agrícola y éstas a su vez, pueden desencadenar en hambrunas. Por otra parte, si existe calentamiento, también se esperan afectaciones al crecimiento de los cultivos, además de cambios en los patrones de lluvias, que podrían generar inundaciones

Peligros volcánicos secundarios Se les llama también asociados o inducidos, son generalmente

desencadenados o dis- parados por los peligros volcánicos primarios (Keller *et al.*, 2012). Estos pueden ocurrir durante o después de una erupción o inclusive mucho tiempo después. En algunos casos los peligros volcánicos secundarios pueden ser desencadenados por otros fenó- menos naturales como lluvias extraordinarias y sismos (Scott *et al.*, 2001). Estos pe- ligros se presentan, generalmente, unos acompañados de otros o desencadenando, a su vez, otros (véase Tabla 1).

Vulnerabilidad La expectativa de daño o pérdida infligida a un elemento expuesto, se conoce como vulnerabilidad, y está condicionada a la severidad del evento volcánico y las caracte- rísticas de los objetos expuestos al evento. Se expresa en porcentaje de daño, referido a la pérdida total para la acción esperada (DunNley, 1999; Ortiz, 2000; Weichselgart-

Revista Geográfica 158 enero-diciembre 2017 ■ 77

ner, 2001; Adger, 2006). La vulnerabilidad representa la susceptibilidad o predispo- sición física, económica, política o social que tiene una comunidad al daño en caso de un fenómeno desestabilizador, en este caso, un peligro volcánico (Cardona, 2003). Existen diversas perspectivas de análisis de la vulnerabilidad, por ejemplo las apro- ximaciones de manera cualitativa (los factores que nos permiten estimar la capacidad de respuesta de la comunidad al evento volcánico) y de manera cuantitativa (que hace posible medir el impacto directo del fenómeno volcánico en una comunidad y su en- torno) (Aceves-Quesada *et al.*, 2007a). Adicionalmente existe el análisis empírico, el cual examina los impactos adversos que los peligros volcánicos provocaron durante erupciones ocurridas en el pasado, y el analítico, el cual se enfoca en las construc- nes, evaluando los materiales y diseños usados en la edificación, se calculan los efec- tos y fallas que se podrían presentar durante erupciones esperadas (DunNley y Young, 2000).

De acuerdo con Cannon (1994), la evaluación de la vulnerabilidad debe incluir un análisis de: a) la resiliencia, que se define en este caso como la capacidad de re- sistir el impacto de un peligro y se incluye en este aspecto la capacidad de recupera- ción; b) la salud médica, que incluye la salud y bienestar de los individuos, pero también las medidas sociales que se toman al respecto, principalmente la medicina preventiva y c) el nivel de preparación del individuo y de la sociedad, que dependen de la protección disponible, de cómo se comporta el individuo de acuerdo a su for- mación y aprendizaje y a otros factores sociales. Casi 10 años después, Turner II *et al.* (2003) propusieron un análisis de la vulnerabilidad que se enfoca en tres aspectos diferentes: a) la exposición, la cual implica determinar los componentes y las carac- terísticas del sistema, b) la sensibilidad, es decir, conocer cuáles son las condiciones humanas y ambientales previas del sistema y c) la resiliencia, la cual se define como la capacidad de un sistema para recuperarse a un estado previo a la perturbación y de mantener ciertas estructuras y funciones básicas (Pimm, 1984) y se evalúa mediante la determinación de los impactos y sus respuestas, a la vez que

se identifican los ajustes y las adaptaciones que se realizan para volver a esa condición previa.

Un enfoque más reciente, el análisis espacial de la vulnerabilidad, basado en el modelo SAVE (Spatial Analysis of the Vulnerability Environment) presenta el diseño de un modelo geográfico integral que toma en cuenta múltiples criterios biofísicos y socioeconómicos de la vulnerabilidad, basado en los conceptos de lugar, las relaciones espaciales y los patrones (Morales-Manilla, 2013).

Algunos autores identifican varias dimensiones en la vulnerabilidad, dentro del marco conceptual de riesgo de desastre, estas dimensiones son: a) física, b) social, c) económica y d) ambiental. La vulnerabilidad física es la predisposición de una estructura, infraestructura o servicio a sufrir daños debido a la ocurrencia de un peligro específico. La vulnerabilidad social tiene que ver con la presencia de los seres humanos, individuos o comunidades, así como su capacidad para hacer frente, resistir y

78 ■ Gemma Gómez-Castillo et al. *Riesgo volcánico: estado del arte y desafíos de trabajo*

recuperarse de los impactos de fenómenos. La vulnerabilidad económica se refiere a la estabilidad económica de una región que, ante la ocurrencia de un peligro, podría provocar pérdida de producción, disminución de ingresos o consumo de bienes. La dimensión ambiental se basa en la interrelación entre los diferentes ecosistemas y su capacidad para hacer frente y recuperarse de los efectos de los peligros y de tolerar factores de estrés en el tiempo y en el espacio (Bollin *et al.*, 2003; Ciurean *et al.*, 2013).

La vulnerabilidad puede expresarse en porcentaje del valor total del elemento expuesto al peligro y se debe calcular para todos los elementos similares (tipos de construcciones, cultivos, etc.), en donde el 0 es "sin daño" y el 1 es "pérdida total" (UNDRO, 1980), aunque también es posible usar valores estadísticos, que se agrupan, generalmente, en tres niveles: ligero (0-20%), moderado (10-60%) y grave (50-100%), los cuales se superponen por la dificultad, en la práctica, de distinguir la diferencia, por ejemplo, del 25 o 35% de daño. Cuando una estructura presenta más del 40% de daños, debe ser destruida, ya que no es rentable su reparación (Ortiz, 2000).

Riesgo volcánico Es el resultado de multiplicar el peligro volcánico, la vulnerabilidad y el valor (Scandone *et al.*, 1993), donde el valor se refiere a la cantidad de vidas humanas y bienes materiales que se ponen en riesgo durante una erupción volcánica. Generalmente, el riesgo volcánico se mide en pérdida de vidas humanas. Crandell *et al.* (1984) definen al riesgo volcánico como las consecuencias predecibles de un evento volcánico en términos de daños y pérdida de vidas, destrucción de algunos tipos específicos de propiedad y otras pérdidas económicas.

Debido a que en la mayoría de los casos no es posible reducir el peligro natural, en este caso de tipo volcánico, minimizar el riesgo implica modificar la vulnerabilidad de los elementos expuestos (Cardona, 2003), es decir, en la valoración del riesgo los factores primordiales deben ser de carácter social y económico, tratando de dar más peso a la política regional que a la aproximación científica y técnica de los volcanólogos (Ortiz, 2000).

De acuerdo a Cardona (2003), existen tres niveles de intervención en las políticas públicas para el manejo del riesgo, los cuales son la identificación del riesgo (que incluye la percepción del riesgo, las representaciones sociales y la evaluación objetiva), reducción del riesgo (prevención y mitigación) y manejo del desastre (respuesta inmediata y recuperación).

El riesgo volcánico se debe calcular individualmente para cada peligro, como producto de la probabilidad, la extensión y el efecto; dónde la probabilidad se define como la posibilidad de que un peligro determinado ocurra durante una erupción vol-

Revista Geográfica 158 enero-diciembre 2017 ■ 79

cánica; la extensión es la proporción espacial del área de estudio que puede ser afectada por el peligro y; el efecto es el porcentaje de pérdidas en el área de interés (vidas y construcciones) (Magill y Blong, 2005a; b).

Desastre volcánico Ocurre cuando un peligro volcánico provoca una seria interrupción en el funcionamiento de la sociedad, causando graves pérdidas humanas, materiales y ambientales, con lo cual se excede la capacidad de la sociedad afectada para hacer frente sólo con sus propios recursos (The United Nations Office for Disaster Risk Reduction —UNISDR, 2009). Por tanto, desastre no es sinónimo de fenómeno natural, más bien implica forzosamente una parte social y una física (Witham, 2005). Se menciona este término, porque es importante que no se confunda con peligro o con riesgo, ya que en ocasiones se usan como sinónimos. El desastre es prevenible al aplicar políticas y estrategias de manejo del riesgo, pero ante la ausencia de éstas el desastre se promueve o se construye (Lavell, 2000; Ruiz-Guadalajara, 2005).

Revisión cuantitativa de la literatura del riesgo volcánico El estudio del riesgo volcánico ha tomado gran importancia en las últimas décadas, debido a las considerables víctimas que ha provocado la actividad volcánica alrededor del mundo.

Metodología La búsqueda de artículos se realizó para el intervalo de años de 1995 a 2014, porque el interés de revisión se relaciona con las tendencias de investigación más recientes. La búsqueda se centró en la

frase “volcanic risN” y se realizó con en el buscador Scopus de Science Direct, así como directamente en el catálogo de Elsevier. Dado que se desplegaron más de 1,400 registros, éstos se revisaron detenidamente, y nos percatamos que no eran del tema de riesgo volcánico; entonces, se recurrió a acotar la búsqueda con comillas, obteniendo sólo 115 publicaciones. Debido a la baja cantidad de resultados, se decidió incluir también las condicionantes o temas específicos “volcanic hazard” y “volcanic vulnerability”, las tres búsquedas también se hicieron en español. Finalmente, también se usó el motor de búsqueda de Google Academic para tratar de encontrar más artículos que no se hubieran identificado previamente.

El manejo de la información recabada se realizó en una hoja de Office Excel 2007, donde las columnas representaban el tipo de información que se deseaba obtener. Se agrupó la información en tres principales conjuntos (I, II, III) (véase Tabla 2).

80 ■ Gemma Gómez-Castillo et al. *Riesgo volcánico: estado del arte y desafíos de trabajo*

Tabla 2 Estructura y arreglo de la información recabada de los artículos

ID Nombre del campo Descripción **I. ¿Quién, cuándo?** A Palabras clave Son las palabras de búsqueda con que se encontró ese artículo.

Tres posibles opciones: “volcanic risN”, “volcanic hazard” o “volcanic vulnerability” B Autores Nombre del autor o autores que elaboraron el artículo C Año En que fue publicado el artículo D Título Nombre completo del artículo E Revista Nombre completo de la revista en la cual fue publicado el artículo F Volumen Volumen de la revista en que fue publicado G Número Número dentro del volumen de la revista H Páginas Intervalo de la numeración en la revista I Institución Institución que publica la revista J País País donde se ubica la revista o las oficinas centrales K Institución de adscripción del primer autor Universidad, Centro de Investigación o Dependencia en la cual labora el primer autor del artículo L País donde se encuentra la adscripción del primer autor El país donde se localiza la institución para la cual el primer autor reportó que trabajaba

II. Área de estudio, ¿dónde?

M Escala de estudio En esta celda especificamos si se trata de un volcán, volcanes, campo volcánico, escala mundial, teórico, etc. N Continente En el que se ubicó el estudio físicamente, no el de la pertenencia política O País En el que se localizó el estudio, con referencia a la pertenencia política P Ubicación Provincias, estados, islas, nombre regionales o localizaciones más específicas Q América Se ponía “Si” en caso de que el área de estudio se ubicara en el continente americano R Área en Nm² Área que cubría cada análisis, medida en Nilómetros cuadrados. Para la gran mayoría de artículos que no reportaban una cifra del área de cubrimiento, el dato se obtenía de manera aproximada, por medio de dibujar y medir un polígono en Google Earth Pro, apegándose a las características de las áreas delimitadas en los mapas de los artículos. Los estudios con enfoque teórico y mundial no fueron tomados en cuenta para el total S Resolución Se anotaba en metros cuadrados si se mencionaba en el artículo el tamaño de pixel del modelo digital de elevación o imagen satelital que se haya usado **III. Tipo de trabajo** T Tipo de análisis La manera en que se desarrolló, cómo se llevó a cabo o los enfoques que tuvo el estudio U Tipo de peligro El peligro o peligros principales en que se enfocaba el estudio V Tipo de vulnerabilidad

El tipo de daño y afectaciones que puede provocar el o los peligros

Resultados En las palabras clave de búsqueda se encontraron 115 artículos con el tema “volcanic risk”, 44 “volcanic hazard” y 2 “volcanic vulnerability”. Del total de los 161 artículos analizados, siete fueron escritos en español (Ortiz, 1999; Carracedo *et al.*, 2004; Cuevas-Muñiz y Seefoo-Luján, 2005; Macías, 2005; López-Ruiz y Cebriá, 2007; Roldán-Quintana *et al.*, 2011; Vega Mora y Díaz, 2012) y sólo uno fue escrito en Inglés y Español (Sruoga, 2002).

La búsqueda se concentró en los últimos 20 años (1995-2014). El 55% de los artículos se publicaron en la segunda mitad de ese periodo de tiempo. El año en que más se publicó fue el 2008, probablemente porque hubo un volumen especial en la revista del *Journal of Volcanology and Geothermal Research* dedicado a la percepción del riesgo volcánico; ese volumen (172) constó de 15 publicaciones, de las cuales 13 se analizan en este trabajo (Figura 1).

Figura 1. Número de publicaciones por año.

El artículo con la mayor cantidad de autores fue el escrito por Neri *et al.* (2008) con 16 autores, seguido de Fonseca *et al.* (2003) con 14 autores y, finalmente Bertolaso *et al.* (2009) con 12 autores. La mayoría de artículos fueron escritos por dos (33 artículos) y tres (32 artículos) autores, lo cual representa sumando ambos un 40.4% del total de artículos analizados. Empatados en tercer lugar se encuentran un autor y cuatro autores (26 artículos cada uno) (Figura 2a).

Los 161 artículos analizados en este trabajo fueron escritos por 430 diferentes autores, de los cuáles, el que más frecuente es Macías (con 10 artículos), seguido de Baxter (ocho artículos) y en tercer lugar aparece De la Cruz-Reyna (con seis artículos) (Figura 2b), aclarando que no se tomó en cuenta la posición que ocupaban como autor, sino el número de menciones totales.

Los artículos integrados en esta revisión fueron publicados en 39 revistas diferentes, de las cuales, sólo ocho se publicaron en español y el resto en inglés. El 65% (105) de los artículos analizados en este trabajo fueron publicados en la *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, el 18% (29) del total corresponde a la suma de revistas con una sola publicación de interés para este trabajo, y el resto tuvieron entre dos y cuatro artículos por revista (17% acumulado).

En lo que concierne a las editoriales a las que pertenecen las revistas, la mayor cantidad la tuvo Elsevier Science B.V. con 64.6% del total, después otras instituciones con una sola mención que en total suman 11.8% y en tercer lugar Elsevier B. V., con el 7.45% de las menciones. En este caso, se debe mencionar que Elsevier Science B.V. (Estados Unidos y Europa) y Elsevier Science Ltd. (Asia) se contabilizaron de manera separada, como se muestra en la Figura 4a. El país que tiene más cantidad de editoriales con publicaciones de riesgo volcánico fue Estados Unidos con el 82%, seguido de México con el 4.3 % (Figura 4b).

La adscripción a la que pertenece el primer autor del artículo fue muy variada, contabilizándose 120 diferentes instituciones. La que más científicos registró fue el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, con siete publicaciones, seguido del *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Vesuviano, Napoli* con cuatro artículos, 94 instituciones tuvieron solo una mención, 16 dos menciones y ocho obtuvieron tres registros. Los países de adscripción del primer autor también fueron variados, pero distribuidos de manera más uniforme en 23 diferentes países, obteniendo el mayor registro Italia con el 21% de autores, seguido de Reino Unido y Estados Unidos, ambos con 16% de adscripciones cada uno y en tercer lugar México con 11% de científicos que laboraban para instituciones en ese país (Figura 5).

La escala geográfica de estudio fue principalmente la de un volcán por artículo, lo que representó el 67% de los artículos analizados, seguido del análisis a escala de dos o más volcanes con el 9.3%, los artículos con enfoque teórico representaron el 8.7% y los estudios enfocados en un campo volcánico obtuvieron el 8%, como se muestra en la Figura 6.

Figura 2. a) Número de autores por artículo. b) Autores con mayor número de publicaciones respecto al riesgo volcánico.

Figura 3. Número de publicaciones por revista.

Figura 4. a) Número de menciones por institución. b) Países a los que pertenecen las

instituciones.

Figura 5. Países en los que se encuentra adscrito el primer autor.

Figura 6. Principales escalas de estudio reportadas en los artículos. FVTM= Faja Volcánica

Trans-Mexican

a.

Figura 7. a) Número de publicaciones por localización de volcanes en los distintos continentes. b) Ubicación por país de los volcanes reportados en los

artículos.

86 ■ Gemma Gómez-Castillo et al. *Riesgo volcánico: estado del arte y desafíos de trabajo*

Figura 8. 116 artículos delimitaron algún área de estudio en sus trabajos, a partir de ellos se crearon 56 distintas categorías, reagrupadas en 14 clases para elaborar esta gráfica.

Figura 9. Número de trabajos por grupo, de acuerdo al principal enfoque usado para llevar a cabo su análisis.

La mayoría de los volcanes estudiados en los artículos se ubican en el continente europeo, con el 35.6% del total, seguido de América con 29.2% y en tercer lugar empatados Asia y los estudios a nivel teórico con el 8.1% (Figura 7a). En lo que concierne al país donde se ubican los volcanes estudiados (columna O), Italia ocupa el primer lugar con 25.4%, seguido de los estudios a nivel teórico o mundial (sin ningún país en específico) con el

14.9% y México en tercer lugar con el 13.6% (Figura 7b).

Revista Geográfica 158 enero-diciembre 2017 ■ 87

Figura 10. Principales tipos de peligros reportados en los artículos.

Figura 11. Enfoques en el análisis de la vulnerabilidad para los distintos trabajos.

Las superficies estudiadas varían y se obtuvieron 116 registros, de los cuales sólo nueve fueron mencionados explícitamente en los artículos. Estas superficies se organizaron en 54 diferentes categorías. Debido a que la variabilidad en las áreas era tan grande, se agrupó en una sola categoría las cantidades que sólo eran usadas o mencionadas por solo un artículo y el 43.1% de los registros cae en esa categoría. El segundo lugar fueron las áreas de 500 Nm², con el 12.9% (volcán Vesubio nueve estudios y cuatro

del Monte Etna). Los estudios en superficies menores o iguales a 100Nm^2 corresponden al 6.8% (cuatro registros del volcán Soufriere Hills).

88 ■ Gemma Gómez-Castillo et al. *Riesgo volcánico: estado del arte y desafíos de trabajo*

Figura 12. a) Comparación entre las publicaciones sobre riesgo volcánico (datos de este trabajo) y las erupciones volcánicas anuales (*Global-Volcanism-Program*, 2013). b) Las publicaciones son la suma del año en cuestión y un año previo, para determinar si existe alguna relación más directa con el número de erupciones, ya que las publicaciones generalmente no son inmediatas.

Sólo 28 trabajos (17.1%) mencionan la resolución espacial de los modelos digitales de elevación o las imágenes satelitales con que trabajaron. Las resoluciones espaciales más frecuentemente utilizadas fueron 10 m (7), 30 m (6) y 50 m (3). El tamaño más pequeño de celda fue de 1m y el más grande de 2,000 m.

El tipo de análisis o enfoque varía en cada artículo, y para obtener una representación de los resultados se procedió a agruparlos en siete diferentes categorías: a) artículos basados en los estudios geológicos, volcanoestratigráficos y/o geofísicos como base del análisis del riesgo volcánico (50.1%), b) trabajos enfocados a la percepción del riesgo (14.9%), c) artículos enfocados en metodologías y desarrollo de modelos y simulaciones (11.8%), d) estudios teóricos y de revisión (8.7%), e) contribuciones a la política, manejo y gestión del riesgo volcánico (7.5%), e) análisis de la vulnerabilidad (3.1%), f) otros métodos y enfoques con sólo una mención, por ejemplo arqueología, salud, estadística, etc. (3.1%).

Los artículos que se enfocan en el estudio de un solo peligro corresponden al 55.2%, los que estudiaron dos peligros suman un 14.2%, los artículos que se enfocaron en tres o más peligros contabilizaron el 21.1% y los que no se analizaron ningún peligro en particular ocupan en 9.3%, (estos se enfocaron en el desarrollo de metodologías o trabajos teóricos). A partir de lo anterior, se agruparon el peligro o peligros que más son estudiados (Figura 10). Los peligros más analizados son los ligados a las erupciones explosivas (14.3%), los flujos piroclásticos (10.6%), los flujos de lava (6.8%), etc. Como se puede apreciar en la Figura 9, el 41.6 % de los trabajos presentó sólo un registro, debido tal vez a que realizaron un análisis por peligros específicos (por ejemplo por fragilidad de la roca) o a que abarcaron una amplia variedad de estos.

En cuanto al tipo de vulnerabilidad, el 42.2% de los artículos se enfocan en la vulnerabilidad social; es decir, a tratar de cuantificar las personas afectadas que habría en caso de algún desastre. El segundo lugar en números fueron los trabajos enfocados a analizar la vulnerabilidad social y estructural (14.9%), mientras que el 11.2% de los trabajos no reportaron ningún tipo de vulnerabilidad en concreto, ya que no la abordaban o su enfoque era teórico-metodológico (Figura 11).

Perspectivas y retos de trabajo La información analizada en los artículos fue muy variada, a pesar de que todos ellos tenían como objetivo principal el análisis del peligro y el riesgo volcánico, lo que permite identificar que los peligros se están estudiando desde diversos enfoques, pero con una base teórico-conceptual común. La aplicación práctica en su área de trabajo,

implica realizar ajustes en los procesos de análisis de acuerdo a las necesidades y características propias. En este contexto, sería de gran importancia que existiera una guía que homogeneice, al menos en los primeros pasos, la información o el procedimiento para la elaboración de un estudio de riesgo volcánico, en la cual se explique

90 ■ Gemma Gómez-Castillo et al. *Riesgo volcánico: estado del arte y desafíos de trabajo*

la diferencia entre peligro y riesgo, la importancia de analizar y generar mapas de cada peligro volcánico por separado y que la vulnerabilidad debe tratar de evaluarse desde varios enfoques, para que el resultado final sea un análisis integrado del riesgo. Al comparar el número de publicaciones por año (Figura 1) con el registro de eventos volcánicos realizado por el Programa de Vulcanismo Global (*Global-Volcanism-Program*, 2013), se observa que en la mayoría de los casos existe una relación directa, ya que el número de publicaciones aumenta cuando hay un mayor número de erupciones volcánicas, aunque en algunos casos no coincide ni en la misma proporción (Figura 12a), en este último caso se debe a que los datos adquiridos tardan en ser analizados y o procesados por lo que los resultados demoran en ser publicados.

De los 44 trabajos que fueron encontrados usando las palabras clave “volcanic hazard”, sólo cuatro mencionan las afectaciones que estos peligros pueden tener para la población y sus bienes (Tabla 2.I), el resto se centra específicamente en estudios geológicos, volcanoestratigráficos, geoquímicos y geofísicos para realizar las determinaciones del peligro (Tabla 2.II). Uno más, que en el título contenía la palabra riesgo, en su contenido sólo presentó evaluación de peligros volcánicos (Tabla 2.III). Es de llamar la atención que después del 2009 ya no se identificaron trabajos con el enfoque de “volcanic hazard”.

Tabla 3 Artículos enfocados en el peligro volcánico y algunas temáticas relacionadas

Tipo de análisis Trabajos identificados

I. Afectaciones Hill, 2000; KaraNhanian *et al.*, 2002; Aceves-Quesada *et al.*, 2007b;

Marti *et al.*, 2008 II. Estudios

geológicos

Fisher, 1995; Carracedo, 1996; Ho, 1996; Graziani *et al.*, 1997; Hurtado-Artunduaga y Cortés-Jiménez, 1997;

Martinelli, 1997; Capra *et al.*, 1998; Cole *et al.*, 1999; Gudmundsson *et al.*, 1999; Camus *et al.*, 2000; Carn, 2000;

Gómez-Fernández, 2000; Gourgaud *et al.*, 2000; Lavigne *et al.*, 2000; Castagnolo *et al.*, 2001; Karner *et al.*, 2001;

KataoNa, 2001; De la Cruz-Reyna y Carrasco-Nuñez, 2002; Stevens *et al.*, 2002; Crisci *et al.*, 2003; Cronin *et al.*,

2003; Crowley *et al.*, 2003; Funicello *et al.*, 2003; KaraNhanian *et al.*, 2003; ZimanowsNi *et al.*, 2003; BursiN y Reid,

2004; Carn *et al.*, 2004; Cronin *et al.*, 2004; Gehring, 2004; Hurst y Smith, 2004; Kilburn, 2004; Lanari *et al.*, 2004;

Rocchi *et al.*, 2004; Rolandi *et al.*, 2004; Saucedo *et al.*, 2005; VougiouNalaNis y FytiNas, 2005; Crisci *et al.*, 2008;

Macedonio *et al.*, 2008; Orsi *et al.*, 2009 III. Peligro, no riesgo Sruoga, 2002 IV. Vulnerabilidad

volcánica

Dibben y Chester, 1999; Aceves-Quesada *et al.*, 2007a

Se encontraron sólo dos artículos que hablan específicamente de la vulnerabilidad volcánica (“volcanic vulnerabilty”, Tablas 3.IV), lo cual representa un tema de investigación emergente con una gran variedad de preguntas por contestar, por ejemplo, hasta qué punto la historia socioeconómica de las poblaciones determina el nivel de vulnerabilidad; cómo se pueden

determinar los niveles que tiene un individuo y/o sociedad para prepararse, afrontar, adaptarse o recuperarse de un evento volcánico dañino; las ventajas y desventajas de las diferentes escalas de estudio de la vulnerabilidad, etc.

Respecto a los tipos de análisis con los cuales se abordaban los estudios, el enfoque principal es la determinación de los peligros volcánicos, esto a partir de la caracterización de las erupciones volcánicas o de algún peligro en particular (véase Tabla 3.I).

El segundo enfoque con más menciones es la percepción del riesgo volcánico y el primer artículo enfocado a evaluarla fue publicado en el año 2000, posteriormente en 2004 fueron publicados otros dos trabajos enfocados a esta misma área y uno más en 2005. Sin embargo, el auge de este enfoque, se encuentra a partir del año 2008, con 30 trabajos sobre la apreciación y el comportamiento que las personas tienen frente al peligro. En esos trabajos los autores coinciden en que con una adecuada educación y preparación se pueden evitar numerosas víctimas (Tabla 3).

El uso de nuevos modelos y simulaciones han permitido una mejor y más rápida detección y evaluación de las amenazas, así como de la vulnerabilidad de la población. Sin embargo, es de llamar la atención que a partir del 2008 ya no se siguiera publicando este tipo de trabajos enfocados especialmente en el riesgo volcánico (Tabla 3).

El campo de los estudios teóricos, metodológicos y de revisión estuvo principalmente enfocado a describir y cuantificar los impactos de algunas erupciones volcánicas, así como de los daños causados (Tabla 4).

De acuerdo al análisis de la información obtenida, las principales inquietudes y motivaciones en los estudios del riesgo volcánico consisten en crear métodos que contribuyan a mejorar y agilizar la comunicación entre los científicos y las autoridades encargadas de tomar decisiones, de manera que si existe una respuesta rápida se pueda evitar un desastre, en esto se han enfocado algunos artículos motivados en la política, manejo y gestión del riesgo volcánico (Cardona, 1997; Pareschi *et al.*, 2000; Cuevas-Muñiz y Seefoo-Luján, 2005; De la Cruz-Reyna y Tilling, 2008; Solana *et al.*, 2008; Marzocchi y Woo, 2009; Tilling, 2009; Rolandi, 2010; Donovan *et al.*, 2012a; Marzocchi *et al.*, 2012; Hutter y Lloyd-Bostock, 2013; Donovan y Oppenheimer, 2014). Algunos casos se ven agravados por conflictos de interés, en otros desafortunadamente, se ha aprendido de las desgracias que han ocurrido como en los casos del Chichón, México y Nevado del Ruiz, Colombia (Tilling, 2009).

92 ■ Gemma Gómez-Castillo *et al.* Riesgo volcánico: estado del arte y desafíos de trabajo

Tabla 4 Principales temáticas en las que se enfocan los artículos revisados

Temática Artículos I. Peligros volcánicos

Fisher, 1995; Ho, 1995; Sheridan y Macías, 1995; Carracedo, 1996; Hurtado-Artunduaga y Cortés-Jiménez, 1997; Martinelli, 1997; Capra *et al.*, 1998; Lirer y Vitelli, 1998; Cole *et al.*, 1999; Gudmundsson *et al.*, 1999; Johnston *et al.*, 1999; Patella y Mauriello, 1999; Pomonis *et al.*, 1999; White y Schminck, 1999; Araña *et al.*, 2000; Camus *et al.*, 2000; Carn, 2000; Gourgaud *et al.*, 2000; Lavigne *et al.*, 2000; Mastin y Witter, 2000; Thouret *et al.*, 2000; Chester *et al.*, 2001; Karner *et al.*, 2001; KataoNa, 2001; Lirer *et al.*, 2001; Small y Naumann, 2001; De la Cruz-Reyna y

Carrasco-Nuñez, 2002; KaraNhanian *et al.*, 2002; Siebert y G., 2002; Sruoga, 2002; Cronin *et al.*, 2003; Crowley *et al.*, 2003; Funiciello *et al.*, 2003; KaraNhanian *et al.*, 2003; Lane *et al.*, 2003; McBirney *et al.*, 2003; Werner *et al.*, 2003; Zimanowski *et al.*, 2003; BursiN y Reid, 2004; Cam *et al.*, 2004; Carracedo *et al.*, 2004; Cronin *et al.*, 2004; Dominey-Howes y Minos-Minopoulos, 2004; Gehring, 2004; Hurst y Smith, 2004; Kilburn, 2004; Lanari *et al.*, 2004; Petrosino *et al.*, 2004; Rocchi *et al.*, 2004; Rolandi *et al.*, 2004; Macías y Siebe, 2005; Magill y Blong, 2005a; b; Saucedo *et al.*, 2005; Aceves- Quesada *et al.*, 2007b; Cubellis *et al.*, 2007; Armienta *et al.*, 2008; Capra *et al.*, 2008; Quiambao, 2008; Bertolaso *et al.*, 2009; Leone y Lesales, 2009; Martí *et al.*, 2009; Rodríguez-Losada *et al.*, 2009; Armienta *et al.*, 2010; Barsotti *et al.*, 2010; Castruccio *et al.*, 2010; Cortés *et al.*, 2010; Alberico *et al.*, 2011; Pasquarè *et al.*, 2011; Roldán-Quintana *et al.*, 2011; Avellán *et al.*, 2012; Capaccioni *et al.*, 2012; Marrero *et al.*, 2012; Vega Mora y Díaz, 2012; D'Alessandro *et al.*, 2013; Gehl *et al.*, 2013; Bartolini *et al.*, 2014; HicNs *et al.*, 2014; Hutchinson *et al.*, 2014; Syahbana *et al.*, 2014 II. Percepción del

riesgo

BahN y Neuwirth, 2000; Dominey-Howes y Minos-Minopoulos, 2004; Gregg *et al.*, 2004; VougiouNalaNis y FytiNas, 2005; Barberi *et al.*, 2008; Carlino *et al.*, 2008; Chester *et al.*, 2008; Dibben, 2008; Gaillard, 2008b; a; Gregg *et al.*, 2008; Haynes *et al.*, 2008; Kelman y Mather, 2008; Lavigne *et al.*, 2008; Paton *et al.*, 2008; Perry y Lindell, 2008; Gavilanes-Ruiz *et al.*, 2009; Limón-Hernández y Macías, 2009; López-Vázquez, 2009; Orsi *et al.*, 2009; Bird *et al.*, 2010; Njome *et al.*, 2010; Sword-Daniels, 2011; Doyle *et al.*, 2013; Ricci *et al.*, 2013; JenNins *et al.*, 2014; van Manen, 2014 III. Modelos y

simulaciones

Ho, 1996; Graziani *et al.*, 1997; Gómez-Fernández, 2000; Castagnolo *et al.*, 2001; Pareschi *et al.*, 2001; Alberico *et al.*, 2002; Crisci *et al.*, 2003; Jaquet y Carniel, 2003; Spence *et al.*, 2004; Tralli *et al.*, 2005; Damiani *et al.*, 2006; De Natale *et al.*, 2006; Houghton *et al.*, 2006; Felpeto *et al.*, 2007; Crisci *et al.*, 2008; J.-C. *et al.*, 2008; Keating *et al.*, 2008; Macedonio *et al.*, 2008; Neri *et al.*, 2008 IV. Teoría y nuevas

metodologías

(Tanguy *et al.*, 1998; Ortiz, 1999; Chester *et al.*, 2002; Macías, 2005; Witham, 2005; López-Ruiz y Cebriá, 2007; Baxter *et al.*, 2008; Cashman y Giordano, 2008; Chester *et al.*, 2008; Gaillard, 2008b; Gudmundsson *et al.*, 2008; Zuccaro *et al.*, 2008; Gottsman *et al.*, 2011; Donovan *et al.*, 2012b

Revista Geográfica 158 enero-diciembre 2017 ■ 93

Tabla 5 Otros enfoques en los cuales basaron sus estudios algunos artículos

Enfoque Artículos I. Gestión y

política del riesgo volcánico

Cardona, 1997; Pareschi *et al.*, 2000; Cuevas-Muñiz y Seefoo- Luján, 2005; De la Cruz-Reyna y Tilling, 2008; Solana *et al.*, 2008; Marzocchi y Woo, 2009; Tilling, 2009; Rolandi, 2010; Donovan *et al.*, 2012a; Marzocchi *et al.*, 2012; Hutter y Lloyd- BostocN, 2013; Donovan y Oppenheimer, 2014 II. Análisis de la

vulnerabilidad

Dibben y Chester, 1999; SparNs, 2003; Aceves-Quesada *et al.*, 2007a; Martí *et al.*, 2008; Wilson *et al.*, 2014 III.

Otros métodos Hill, 2000; Stevens *et al.*, 2002; Horwell y Baxter, 2006;

Mendoza-Rosas y De la Cruz-Reyna, 2008; Ort *et al.*, 2008

El caso del análisis de la vulnerabilidad es particular, ya que existen muy pocos trabajos enfocados a analizar, cuantificar y proponer alternativas para la reducción de la vulnerabilidad, ya que el peligro no se puede modificar o eliminar (Dibben y Chester, 1999; SparNs, 2003; Aceves-Quesada *et al.*, 2007a; Martí *et al.*, 2008; Wilson *et al.*, 2014). Este también es un atractivo campo de trabajo, donde aún queda mucho por hacer, y es en este rubro dónde el trabajo interdisciplinario y espacial tiene marcos conceptuales sólidos que pueden contribuir significativamente en el desarrollo de estos temas.

Se identificó un número limitado de trabajos enfocados al análisis del riesgo desde una perspectiva diferente a las anteriormente mencionadas. Llamaban la atención los trabajos de (Hill, 2000; Horwell y Baxter, 2006), los cuales se enfocaron en los efectos en la salud que pueden tener algunos peligros volcánicos. Así como la investigación de Ort *et al.* (2008) que, a través de métodos arqueológicos, determinó las afectaciones que provocaron dos erupciones volcánicas al norte de Arizona, Estados Unidos, hace alrededor de 1,100 años, y cómo las sociedades de esos tiempos se adaptaron a los

cambios. También sobresale el trabajo de Mendoza-Rosas y De la Cruz-Reyna (2008), donde usaron métodos estadísticos ligados a series de tiempo geológicas e históricas. Finalmente el trabajo de Stevens *et al.* (2002) quienes compararon entre los resultados de diversos modelos digitales de elevación para determinar el peligro por lahares.

De acuerdo a la Figura 10, podemos apreciar que los peligros volcánicos en los que más se enfocan los artículos corresponden a las erupciones explosivas y a los flujos piroclásticos, esto puede deberse a que son las actividades eruptivas más inmediatas y que más afectaciones y decesos pueden ocasionar, por tanto es muy recomendable seguir haciendo estudios geológicos y volcanoestratigráficos a detalle para conocer el comportamiento de los volcanes.

94 ■ Gemma Gómez-Castillo et al. *Riesgo volcánico: estado del arte y desafíos de trabajo*

Conclusiones La revisión bibliográfica del presente trabajo sugiere que varios conceptos y términos empleados en el análisis del riesgo volcánico, aún se siguen confundiendo y empleando de manera que generan desorientación; por eso es importante tener una base conceptual común. El término riesgo volcánico no se refiere sólo a la descripción de la geología volcánica de una zona de interés, sino que implica el análisis de la vulnerabilidad de la infraestructura, recursos naturales, población y con esta integración se pueda hacer una estimación del riesgo.

Debido a que no se tiene el conocimiento sobre el comportamiento de toda la actividad eruptiva del planeta y a que la población aumenta cada día, el análisis del riesgo volcánico es una actividad con un campo de acción aún muy amplio, en el cual cada contribución conceptual, metodológica o de estudio de caso puede ayudar a salvar vidas, y reducir la pérdida recursos naturales e infraestructura. La evaluación del riesgo volcánico implica comprender, lo mejor posible, el proceso que genera el peligro, identificar y cuantificar el nivel de vulnerabilidad de los recursos, infraestructura, población y consecuentemente reconocer el nivel de riesgos.

El 21% de las contribuciones asociadas al estudio del riesgo volcánico se realizaron (durante el periodo analizado) en Italia, podría vincularse a que se encuentra en una de las zonas tectónicas más activas del planeta, pero además sugiere que la sociedad y las instituciones tienen memoria histórica de sus desastres y reconocen la importancia de minimizar los daños y pérdidas que los procesos volcánicos pueden desencadenar, optado por generar una política pública que promueve el monitoreo, la investigación y por lo tanto la prevención del peligro volcánico, apostando además por la capacitación y educación de la población ante la ocurrencia de un evento volcánico, aspectos clave en el manejo y gestión del riesgo.

Finalmente, el aumento de los últimos años en los artículos sobre percepción, manejo, gestión, mitigación y política del riesgo nos indican que se está trabajando arduamente en estos aspectos, pero desafortunadamente cada país tiene diferencias políticas, económicas, y demográficas, por lo cual la elaboración

de las políticas y estrategias de gestión del riesgo deben ser particulares y específicas.

Agradecimientos Al CONACYT por la beca doctoral y al proyecto “Evaluación de la importancia relativa de bosque húmedo de niebla bajo un enfoque de paisaje” (0179386).

Bibliografía Aceves-Quesada, J.F.; Díaz-Salgado, J. y López-Blanco, J., “Vulnerability assessment in a volcanic risk evaluation in Central Mexico through a multi-criteria-GIS approach”, *Natural Hazards*, no. 40, pp. 339-356, 2007a.

Revista Geográfica 158 enero-diciembre 2017 ■ 95

Aceves-Quesada, J.F.; Martín-Del Pozzo, A.L. y López-Blanco, J., “Volcanic hazards zonation of the Nevado de Toluca Volcano, Central Mexico”, *Natural Hazards*, no. 41, pp. 159-180, 2007b. Adger, W.N., “Vulnerability”, *Global Environmental Change*, no. 16, pp. 268-281,

2006. Alberico, I.; Lirer, L.; Petrosino, P. y Scandone, R., “A methodology for the evaluation of long-term volcanic risk from pyroclastic flows in Campi Flegrei (Italy)”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 116, pp. 63-78, 2002. Bah, C.M. y Neuwirth, K., “Impact of movie depictions of volcanic disaster on risk perception and judgements”, *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, no. 18, pp. 63-84, 2000. Barberi, F.; Davis, M.S.; Isaia, R.; Nave, R. y Ricci, T., “Volcanic risk perception in the Vesuvius population”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172, pp. 244-258, 2008. Barberi, F.; Martini, M. y Rosi, M., “Nevado del Ruiz volcano (Colombia): Pre-eruption observations and the November 13, 1985 catastrophic event”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 42, pp. 1-12, 1990. Baxter, P.J.; Neri, A. y Blong, R., “Evaluating explosive eruption risk at European volcanoes”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 178, pp. V-IX, 2008. Bertolaso, G.; Bernardini, B.D.; Bosi, V.; Cardaci, C.; Ciolli, S.; Colozza, R.; Cristiani, C.; Mangione, D.; Ricciardi, A.; Rosi, M.; Scalzo, A. y Soddu, P., “Civil protection preparedness and response to the 2007 eruptive crisis of Stromboli volcano, Italy”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 182, pp. 269-277, 2009. Bignami, C.; Bosi, V.; Costantini, L.; Cristiani, C.; Lavigne, F. y Thierry, P.E., “Handbook for volcanic risk management: Prevention, crisis management, resilience”, European Commission, Orleans, France, 2012. Bird, D.K.; Gisláttir, G. y Dominey-Howes, D., “Volcanic risk and tourism in southern Iceland: Implications for hazard, risk and emergency response education and training”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 189, pp.

33- 48, 2010. Bollin, C.; Cardenas, C.; Hahn, H. y Vatsa, K.S., "Disaster Risk Management by Communities and Local Governments", in Network, N.D. (ed.), InterAmerican Development Bank Washington, D.C., 2003. Bourdier, J.-L.; Boudon, G. y Gourgaud, A., "Stratigraphy of the 1902 and 1929 nuée-ardente deposits, Mt. Pelée, Martinique", *Journal of Volcanology and Geo-thermal Research*, no. 38, pp. 77-96, 1989. Bullard, F.M., "Studies on Parícutin volcano, Michoacan, Mexico", *Bulletin of the Geological Society of America*, no. 58, pp. 433-450, 1947.

96 ■ Gemma Gómez-Castillo et al. *Riesgo volcánico: estado del arte y desafíos de trabajo*

Cardona, D.O., "Management of the volcanic crises of Galeras volcano: Social, economic and institutional aspects", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 77, pp. 313-324, 1997. Cardona, O.D., "The Need for Rethinking the Concepts of Vulnerability and Risk from a Holistic Perspective: A Necessary Review and Criticism for Effective Risk Management", in Banoff, G., Frerens, G. and Hilhorst, D. (eds.), *Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People*, Earthscan Publishers, London, 2003. Carlino, S.; Somma, R. y Mayberry, G.C., "Volcanic risk perception of young people in the urban areas of Vesuvius: Comparisons with other volcanic areas and implications for emergency management", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 172, pp. 229-243, 2008. Carracedo, J.C.; Guillou, H.; Pateme, M.; Scaillet, S.; Rodríguez-Badiola, E.; Paris, R.; Pérez-Torrado, F.J. y Hansen-Machín, A., "Análisis del riesgo volcánico asociado al flujo de lavas en Tenerife (Islas Canarias): escenarios previsibles para una futura erupción en la isla", *Estudios Geológicos*, núm. 60, pp. 63-93, 2004. Cashman, K.V. y Giordano, G., "Volcanoes and human history", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 176, pp. 325-329, 2008. Castagnolo, D.; Gaeta, F.S.; De Natale, G.; Peluso, F.; Mastrolorenzo, G.; Troise, C.; Pingue, F. y Mita, D.G., "Campi Flegrei unrest episodes and possible evolution towards critical phenomena", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, núm. 109, pp. 13-40, 2001. Ciurean, R.L.; Schröter, D. y Glade, T., "Conceptual Frameworks of Vulnerability Assessments for Natural Disasters Reduction", in Tiefenbacher, J. (ed.), *Approaches to Disaster Management - Examining the Implications of Hazards, Emergencies and Disasters*, InTech, 2013. Cottrell, E., "Global Distribution of Active Volcanoes", in Papale, P. and Shroder, J.F. (eds.), *Volcanic Hazards, Risks and Disasters*, Elsevier, 2014. Crandell, D.R.; Booth, B.; Kusumadinata, K.; Shimozuru, D.D.; Walner, G.P.L. and Westercamp, D. "Source-book for volcanic zonation", UNESCO, New York, 1984. Crisci, G.M.; Di Gregorio, S.; Rongo, R.; Scarpelli, M.; Spataro, W. y

Calvari, S., "Revisiting the 1669 Etnean eruptive crisis using a cellular automata model and implications for volcanic hazard in the Catania area", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 123, pp. 211-230, 2003. Crisci, G.M.; Iovine, G.; Di Gregorio, S. y Lupiano, V., "Lava-flow hazard on the SE flank of Mt. Etna (Southern Italy)", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 177, pp. 778-796, 2008.

Revista Geográfica 158 enero-diciembre 2017 ■ 97

Cuevas-Muñiz, A. y Seefoo-Luján, J.L., "Reubicación y desarticulación de La Yerbabuena: entre el riesgo volcánico y la vulnerabilidad política", *Desacatos*, núm. 19, pp. 41-70, 2005. Charvériat, C., "Natural Disasters in Latin America and the Caribbean: An Overview of RisN", *Working Paper*. Inter-American Development Bank, Research Department Washington, D.C., 2000. Chester, D.K.; Dikken, C.J.L. y Duncan, A.M., "Volcanic hazard assessment in western Europe", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 115, pp. 411-435, 2002. Chester, D.K.; Duncan, A.M. y Dikken, C.J.L., "The importance of religion in shaping volcanic risk perception in Italy, with special reference to Vesuvius and Etna", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 172, pp. 216-228, 2008. Damiani, M.L.; Groppelli, G.; Norini, G.; Bertino, E.; Gigliuto, A. y Nucita, A., "A lava flow simulation model for the development of volcanic hazard maps for Mount Etna (Italy)", *Computers & Geosciences*, no. 32, pp. 512-526, 2006. De la Cruz-Reyna, S. y Tilling, R.I., "Scientific and public responses to the ongoing volcanic crisis at Popocatepetl Volcano, Mexico: Importance of an effective hazards-warning system", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 170, pp. 121-134, 2008. De Natale, G.; Troise, C.; Pingue, F.; Mastrolorenzo, G. y Pappalardo, L., "The Somma-Vesuvius volcano (Southern Italy): Structure, dynamics and hazard evaluation", *Earth-Science Reviews*, no. 74, pp. 73-111, 2006. Dikken, C. y Chester, D.K., "Human vulnerability in volcanic environments: the case of Furnas, Sao Miguel, Azores", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 92, pp. 133-150, 1999. Dikken, C.J.L., "Leaving the city for the suburbs —The dominance of 'ordinary' decision making over volcanic risk perception in the production of volcanic risk on Mt Etna, Sicily", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 172, pp. 288-299, 2008. Dominey-Howes, D. y Minos-Minopoulos, D., "Perceptions of hazard and risk on Santorini", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 137, pp. 285-310, 2004. Donovan, A. R. y Oppenheimer, C., "Science, policy and place in volcanic disasters: Insights from Montserrat", *Environmental Science & Policy*, no. 39, pp. 150-161, 2014. Donovan, A. R.; Oppenheimer, C. y Bravo, M., "Contested boundaries: Delineating the 'safe zone' on Montserrat", *Applied Geography*, no. 35, pp. 508-514, 2012a. ———, "The use of belief-based probabilistic methods in

volcanology: Scientists' views and implications for risk assessments", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 247-248, pp. 168-180, 2012b.

98 ■ Gemma Gómez-Castillo et al. *Riesgo volcánico: estado del arte y desafíos de trabajo*

- Doyle, E.E.H.; McClure, J.; Johnston, D.M. y Paton, D., "Communicating likelihoods and probabilities in forecasts of volcanic eruptions", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 271, pp. 1-15, 2013.
- DunNley, P., "Volcanic Hazards-Hazard, Vulnerability and Risk Assessment", *Geohazards*, Earthwise, pp. 4-5, 1999.
- DunNley, P. y Young, S.R., "Volcanic hazard mapping for development planning", BGS Technical Report WC/00/20, 2000.
- Felpeo, A.; Martí, J. y Ortiz, R., "Automatic GIS-based system for volcanic hazard assessment", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 166, pp. 106- 116, 2007.
- Fisher, R.V. y Hein, G., "Mt. Pelée, martinique: may 8 and 20, 1902, pyroclastic flows and surges", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 13, pp. 339-371, 1982.
- Fonseca, J.F.B.D.; Faria, B.V.E.; Lima, N.P.; Heleno, S.I.N.; Lazaro, C.; Nicolás, F., D.O.; Ferreira, A.M.G.; Barros, I.J.M.; Santos, P.; Bandomo, Z.; Day, S.J.; Osorio, J.P.; Matos, J.L.G. y Baio, M., "Multiparameter monitoring of Fogo Island, Cape Verde, for volcanic risk mitigation", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 125, pp. 39-56, 2003.
- Foshag, W.F. y González-Reyna, J., "Birth and development of Parícutin volcano", *U.S. Geological Survey Bulletin*, no. 965, pp. 355-489, 1956.
- Gaillard, J.-C., "Alternative paradigms of volcanic risk perception: The case of Mt. Pinatubo in the Philippines", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 172, pp. 315-328, 2008a.
- Gaillard, J.-C., "Volcanic risk perception and beyond", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 172, pp. 163-169, 2008b.
- Garduño-Monroy, V.H.; Chávez-Hernández, J.; Aguirre-González, J.; Vázquez-Rosas, R.; Mijares Arellano, H.; Israde-Alcántara, I.; Hernández-Madrigal, V. M.; Rodríguez-Pascua, M. A. y Pérez López, R., "Zonificación de los periodos naturales de oscilación superficial en la ciudad de Pátzcuaro, Michoacán, México, con base en microtemores y estudios de paleosismología", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, no. 26, pp. 623-637, 2009.
- Gavilanes-Ruiz, J.C.; Cuevas-Muñiz, A.; Varley, N.; Gwynne, G.; Stevenson, J.; Saucedo-Girón, R.; Pérez-Pérez, A.; AbouNhalil, M. y Cortés-Cortés, A. "Exploring the factors that influence the perception of risk: The case of Volcán de Colima, Mexico", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 186, pp. 238-252, 2009.
- Global-Volcanism-Program. *Volcanoes of the World*, v. 4.4.1. Venzne, E. (ed.), Smithsonian Institution, descargado el 26 de octubre de 2015.

<<http://dx.doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4-2013>>.

Revista Geográfica 158 enero-diciembre 2017 ■ 99

- Gómez-Fernández, F., "Application of a GIS algorithm to delimit the areas protected against basic lava flow invasion on Tenerife Island", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 103, pp. 409-423, 2000.
- Gottsmann, J.; De Angelis, S.; Fournier, N.; Van Camp, M.; SacNs, S.; Linde, A. y Ripepe, M., "On the geophysical fingerprint of vulcanian eruptions", *Earth and Planetary Science Letters*, no. 306, pp. 98-104, 2011.
- Graziani, G.; Martilli, A.; Pareschi, M.T. y Valenza, M., "Atmospheric dispersion of natural gases at Vulcano island", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 75, pp. 283-308, 1997.
- Gregg, C.E.; Houghton, B.F.; Johnson, D.M.; Paton, D. y Swanson, D.A., "The perception of volcanic risk in Kona communities from Mauna Loa and Hualalai volcanoes, Hawaii", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 130, pp. 179-196, 2004.
- Gregg, C.E.; Houghton, B.F.; Paton, D.; Swanson, D.A.; Lachman, R. y BonN, W.J., "Hawaiian cultural influences on support for lava flow hazard mitigation measures during the January 1960 eruption of Kīlauea volcano, Kapoho, Hawaii", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 172, pp. 300-307, 2008.
- Gudmundsson, M.T.; G., L.; Hösnuldsson, Á. y Gylfason, Á.G., "Volcanic hazards in Iceland", *Jökull*, no. 58, pp. 251-268, 2008.
- Guilbaud, M.-N.; Siebe, C.; Layer, P.; Salinas, S.; Castro-Govea, R.; Garduño-Monroy, V. H. y Le Corve, N., "Geology, geochronology and tectonic setting of the Jorullo Volcano region, Michoacán, México", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 201, pp. 97-112, 2011.
- HasenaNa, T. y Carmichael, I.S.E., "The cinder cones of Michoacán-Guanajuato, Central Mexico: Their age, volume and distribution, and magma discharge rate", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 25, pp. 105-124, 1985.
- Haynes, K.; Barclay, J. y Pidgeon, N., "Whose reality counts? Factors affecting the perception of volcanic risk", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 172, pp. 259-272, 2008.
- Herd, D.G., "The 1985 Ruiz volcano disaster", *Eos, Transactions American Geophysical Union*, no. 67, pp. 457-460, 1986.
- Hill, P.M., "Possible asphyxiation from carbon dioxide of a cross-country skier in eastern California: a deadly volcanic hazard", *Wilderness and Environmental Medicine*, no. 11, pp. 192-195, 2000.
- Ho, C.-H., "Volcanic time-trend analysis", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 74, pp. 171-177, 1996.
- Horwell, C.J. y Baxter, P.J., "The respiratory health hazards of volcanic ash: a review for volcanic risk mitigation", *Bulletin of Volcanology*, no. 69, pp. 191-233, 2006.

Houghton, B.F.; Bonadonna, C.; Gregg, C.E.; Johnson, D.M.; Cousins, W.J.; Cole, J.W. y Del Carlo, P., "Proximal tephra hazards: Recent eruption studies applied to volcanic risk in the Auckland volcanic field, New Zealand", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 155, pp. 138-149, 2006. Hurtado Torres, L., "Infierno en el paraíso. Nacimiento y evolución del volcán El Jorullo", *Investigaciones Geográficas*, núm. 68, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 143-145, 2009. Hutter, B.M. y Lloyd-Bostock, S., "Risk, interest groups and the definition of crisis: the case of volcanic ash", *The British Journal of Sociology*, no. 64, pp. 383-404, 2013. Inbar, M.; Lugo Hubp, J. y Villers Ruiz, L., "The geomorphological evolution of the Parícutin cone and lava flows, Mexico, 1943-1990", *Geomorphology*, no. 9, pp. 57-76, 1994. J.-C., K.; Legendre, Y.; Caron, B. and Boudon, G., "Reconstruction and analysis of sub-plinian tephra dispersal during the 1530 A.D. Soufrière (Guadeloupe) eruption", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 178, pp. 491-515, 2008. Jaquet, O. y Carniel, R., "Multivariate stochastic modelling: towards forecasts of paroxysmal phases at Stromboli", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 128, pp. 261-271, 2003. JenNins, S.F.; Spence, R.J.S.; Fonseca, J.F.B.D.; Solidum, R.U. y Wilson, T.M., "Volcanic risk assessment: Quantifying physical vulnerability in the built environment", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 276, pp. 105-120, 2014. Karahanian, A.; Djrbashian, R.; Trifonov, V.; Philip, H.; Aranelian, S. y Avagian, A., "Holocene-historical volcanism and active faults as natural risk factors for Armenia and adjacent countries", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 113, pp. 319-344, 2002. Keating, G.N.; Pelletier, J.D.; Valentine, G.A. y Statham, W., "Evaluating suitability of a tephra dispersal model as part of a risk assessment framework", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 177, pp. 379-404, 2008. Kelman, I. y Mather, T.A., "Living with volcanoes: The sustainable livelihoods approach for volcano-related opportunities", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 172, pp. 189-198, 2008. Keller, E.A.; Devecchio, D.E. y Blodgett, R.H., "Natural hazards: Earth's processes as hazards, disasters, and catastrophes", Prentice Hall, United States of America, 2012. KusNy, T., "Volcanoes: Eruptions and Other Volcanic Hazards", Facts On File, Inc., New York, USA, 2008.

- Lavell, A., "Desastres y desarrollo: hacia un entendimiento de las formas de construcción social de un desastre: el caso del huracán Mitch en Centroamérica", in Cidhs, B.Y. (ed.), *Del desastre al desarrollo sostenible: el caso de Mitch en Centroamérica*, 2000. Lavigne, F.; De Coste, B.; Juvin, N.; Flohic, F.; Gaillard, J.-C.; Texier, P.; Morin, J. y Sartohadi, J., "People's behaviour in the face of volcanic hazards: perspectives from Javanese communities, Indonesia", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 172, pp. 273-287, 2008. Lavigne, F.; Thouret, J.C.; Voight, B.; Suwa, H. y Sumaryono, A., "Lahars at Merapi volcano, Central Java: an overview", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 100, pp. 423-456, 2000. Limón-Hernández, C. y Macías, J.L., "Volcanic hazards and risk perception at the "Zoque" community of Chapultenango: El Chichón volcano, Chiapas, México", *Geofísica Internacional*, no. 48, pp. 113-132, 2009. LooNwood, J.P. y Hazlett, R.W., "Volcanoes: global perspectives", United Kingdom,
2010. López-Ruiz, J. y Cebriá, J.M., "Procesos y riesgos volcánicos", *Estudios Geológicos*, no. 63, pp. 41-65, 2007. López-Vázquez, E., "Risk perception and coping strategies for risk from Popocatepetl Volcano, Mexico", *Geofísica Internacional*, no. 48, pp. 133-147, 2009. Macedonio, G.; Costa, A. y Folch, A., "Ash fallout scenarios at Vesuvius: Numerical simulations and implications for hazard assessment", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 178, pp. 366-377, 2008. Macías, J.L., "Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, núm. 57, pp. 379-424, 2005. Macías, J.L.; Arce, J.L.; Mora, J.C.; Espíndola, J.M.; Saucedo, R. y Manetti, P., "A 550-year-old Plinian eruption at El Chichón Volcano, Chiapas, Mexico: Explosive volcanism linked to reheating of the magma reservoir", *Journal of Geophysical Research*, no. 108, pp. ECV 3-1 - ECV 3-18, 2003. Macías, J.M. y Aguirre, B.E., "A Critical Evaluation of the United Nations Volcanic Emergency Management System: Evidence from Latin America", *Journal of International Affairs*, no. 59, pp. 43-61, 2006. Magill, C. y Blong, R., "Volcanic risk ranking for Auckland, New Zealand. I: Methodology and hazard investigation", *Bulletin of Volcanology*, no. 67, pp. 331-339, 2005a. ———, "Volcanic risk ranking for Auckland, New Zealand. II: Hazard consequences and risk calculation", *Bulletin of Volcanology*, no. 67, pp. 340-349, 2005b. Marti, J.; Spence, R.; Calogero, E.; Ordoñez, A.; Felpeto, A. y Baxter, P., "Estimating building exposure and impact to volcanic hazards in Icod de los Vinos, Tenerife

(Canary Islands)", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 178, pp. 553-561, 2008. Marzocchi, W.; Newhall, C. and Woo, G., "The scientific management of volcanic crises", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 247-248, pp. 181- 189, 2012. Marzocchi, W. and Woo, G., "Principles of volcanic risk metrics: Theory and the case study of Mount Vesuvius and Campi Flegrei, Italy", *Journal Of Geophysical Research*, no. 114, p. 12, 2009. Mendoza-Rosas, A.T. and De la Cruz-Reyna, S., "A statistical method linking geological and historical eruption time series for volcanic hazard estimations: Applications to active polygenetic volcanoes", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 176, pp. 277-290, 2008. Morales-Manilla, L.M., "The definition of a minimum set of spatial relations", tesis

de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2013. Neri, A.; Aspinall, W.P.; Cioni, R.; Bertagnini, A.; Baxter, P.J.; Zuccaro, G.; Andronico, D.; Barsotti, S.; Cole, P.D.; Esposti Ongaro, T.; HincN, T.K.; Mace- donio, G.; Papale, P.; Rosi, M.; Santacroce, R. y Woo, G., "Developing an Event Tree for probabilistic hazard and risk assessment at Vesuvius", *Journal of Vol- canology and Geothermal Research*, no. 178, pp. 397-415, 2008. Newhall, C.G. y Self, S., "The Volcanic Explosivity Index (VEI): An Estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism", *Journal of Geophysical Re- search*, no. 87, pp. 1231-1238, 1982. Njome, M.S.; Suh, C.E.; Chuyong, G. and De Wit, M.J., "Volcanic risk perception in rural communities along the slopes of mount Cameroon, West-Central Africa", *Journal of African Earth Sciences*, no. 58, pp. 608-622, 2010. Organización Panamericana de la Salud (OPS), "Guía de preparativos de salud frente a erupciones volcánicas. Módulo 4: Salud ambiental y el riesgo volcánico". Área de preparativos para situaciones de emergencia y socorro en casos de desastre, Quito, Ecuador, 2005. Orsi, G.; Di Vito, M.A.; Selva, J. and Marzocchi, W., "Long-term forecast of eruption style and size at Campi Flegrei caldera (Italy)", *Earth and Planetary Science Let- ters*, no. 287, pp. 265-276, 2009. Ort, M.H.; Elson, M.D.; Anderson, K.C.; Duffield, W.A. and Samples, T.L., "Varia- ble effects of cinder-cone eruptions on prehistoric agrarian human populations in the American southwest", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 176, pp. 363-376, 2008. Ortiz, R., *Riesgo volcánico*, Servicio de publicaciones del Exmo. Cabildo Insular de

Lanzarote, 1996. Ortiz, R., "¿Cuándo y cómo se producirá una erupción?", *Enseñanza de las Ciencias*

de la Tierra, núm. 7, pp. 210-221, 1999.

- Ortiz, R., "Riesgo volcánico", in Astiz, M. y García, A. (eds.), *Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica*, Servicio de publicaciones del Exmo. Cabildo Insular de Lanzarote, 2000. Papale, P.E., *Volcanic Hazards, Risks and Disasters*, Elsevier, 2014. Pareschi, M.T.; Cavarra, L.; Favalli, M.; F., G. and A., M., "GIS and Volcanic Risk Management", *Natural Hazards*, no. 21, pp. 361-379, 2000. Pareschi, M.T.; Ranci, M.; Valenza, M. and Graziani, G., "Atmospheric dispersion of volcanic CO₂ at Vulcano island", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 108, pp. 209-235, 2001. Parfitt, E. y Wilson, L., *Fundamentals of physical volcanology*, Blackwell, Malden, Mass., USA, 2008. Paton, D.; Smith, L.; Daly, M. and Johnston, D., "Risk perception and volcanic hazard mitigation: Individual and social perspectives", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 172, pp. 179-188, 2008. Perry, R.W. y Lindell, M.K., "Volcanic risk perception and adjustment in a multi-hazard environment", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 172, pp. 170-178, 2008. Pierson, T.C.; Janda, R.J.; Thouret, J.-C. and Borrero, C.A., "Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 41, pp. 17-66, 1990. Pimm, S.L., "The complexity and stability of ecosystems", *Nature*, no. 307, pp. 321-326, 1984. Plag, H.-P.; BrocNlebanN, S.; Brosnan, D.; Campus, P.; Cloetingh, S.; Jules-Plag, S. y Stein, S., "Extreme Geohazards: Reducing the Disaster Risk and Increasing Resilience", *A Community Science Position Paper*, European Science Foundation, 2015. Ricci, T.; Barberi, F.; Davis, M.S.; Isaia, R. y Nave, R., "Volcanic risk perception in the Campi Flegrei area", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 254, pp. 118-130, 2013. Rolandi, G., "Volcanic hazard at Vesuvius: An analysis for the revision of the current emergency plan", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 189, pp. 347-362, 2010. Roldán-Quintana, J.; Aguirre-Díaz, G.D.J. y Rodríguez-Castañeda, J.L., "Depósito de avalancha de escombros del volcán Temascalcingo en el graben de Acambay, Estado de México", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, núm. 28, pp. 118-131, 2011. Rothery, D., "Volcanoes, Earthquakes and Tsunamis", Teach Yourself, 2010. Ruiz-Guadalajara, J.C., "Para confusión de los pecadores. Dos testimonios en torno al nacimiento del volcán Jorullo, y su impacto en la religiosidad de Pátzcuaro,

- 1759-1761", *Relaciones. Estudios de historia y sociedad*, vol. XXV, pp. 145-176, 2004. ———, "De la construcción social del riesgo a la manifestación del desastre: Reflexiones en torno al imperio de la vulnerabilidad", *Desacatos*, no. 19, pp. 99-110, 2005. Scandone, R.; Arganese, G. and Galdi, F., "The evaluation of volcanic risk in the Vesuvian area", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, núm. 58, pp. 263-271, 1993. Scott, K.M.; Macias, J.L.; Naranjo, J.A.; Rodriguez, S. y McGeehin, J.P., "Catastrophic debris flows transformed from landslides in volcanic terrains: mobility, hazard assessment, and mitigation strategies", *U.S. Geological Survey Professional Paper 1630*, pp. 59, 2001. Self, S., "The effects and consequences of very large explosive volcanic eruptions", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, no. 364, pp. 2073-2097, 2006. Sigurdsson, H. y Carey, S., "Volcanic disasters in Latin America and the 13th November 1985 eruption of Nevado del Ruiz volcano in Colombia", *Disasters*, no. 10, pp. 205-216, 1986. Sigurdsson, H.; Houghton, B.F.; McNutt, S.R.; Rymer, H. y Stix, J., "Encyclopedia of Volcanoes", Academic Press, San Diego, 2000. Smith, G.A. y Fritz, W.J., "Volcanic influences on terrestrial sedimentation", *Geology*, no. 17, pp. 375-376, 1989. Smith, K., "Environmental Hazards: Assessing Risk and Reducing Disaster", Routledge, Reino Unido, 2013. Smith, P.J., "Sounds volcanic", *Nature*, no. 263, pp. 93, 1976. Solana, M.C.; Kilburn, C.R.J. y Rolandi, G., "Communicating eruption and hazard forecasts on Vesuvius, Southern Italy", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 172, pp. 308-314, 2008. Sparks, R.S.J., "Forecasting volcanic eruptions", *Earth and Planetary Science Letters*, no. 210, pp. 1-15, 2003. Spence, R.J.S.; Baxter, P.J. y Zuccaro, G., "Building vulnerability and human casualty estimation for a pyroclastic flow: a model and its application to Vesuvius", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 133, pp. 321-343, 2004. Sruoga, P., "El volcanismo reciente y riesgo asociado en la provincia de Mendoza", *IANIGLA. 30 años de investigación básica y aplicada en Ciencias Ambientales*, pp. 255-260, 2002. Stevens, N.F.; Manville, V. y Heron, D.W., "The sensitivity of a volcanic flow model to digital elevation model accuracy: experiments with digitised map contours and interferometric SAR at Ruapehu and TaranaNi volcanoes, New Zealand", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 119, pp. 89-105, 2002.

- Stillwell, H.D., "Natural hazards and disasters in Latin America", *Natural Hazards*, no. 6, pp. 131-159, 1992.
- Sword-Daniels, V., "Living with Volcanic Risk: The Consequences of, and Response to, Ongoing Volcanic Ashfall on Montserrat", *New Zealand Journal of Psychology*, no. 40, pp. 131-138, 2011.
- Tanguy, J.-C., "The 1902–1905 eruptions of Montagne Pelée, Martinique: anatomy and retrospection", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 60, pp. 87-107, 1994.
- Tanguy, J.-C.; Ribière, C.; Scarth, A. y Tjetjep, W.S., "Victims from volcanic eruptions: a revised database", *Bulletin of Volcanology*, no. 60, pp. 137-144, 1998.
- Taubenböck, H.; Post, J.; Roth, A.; Zosseder, K. y Strunz, G., "A conceptual vulnerability and risk framework as outline to identify capabilities of remote sensing", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, no. 8, pp. 409-420, 2008.
- Thouret, J.-C., "Effects of the November 13, 1985 eruption on the snow pack and ice cap of Nevado del Ruiz volcano, Colombia", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 41, pp. 177-201, 1990.
- Tilling, R.I., "Los peligros volcánicos", World Organization of Volcano Observatories (WOVO), International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth Interior (IAVCEI), California, EE.UU., 1993.
- Tilling, R. I. "Volcano hazards", in Marti, J. and Ernst, G.G.J. (eds.) *Volcanoes and the Environment*, Cambridge University Press, 2008. ———, "El Chichón's "surprise" eruption in 1982: Lessons for reducing volcanic risk", *Geofísica Internacional*, no. 48, pp. 3-19, 2009.
- Tralli, D.M.; Blom, R.G.; Zlotnicki, V.; Donnellan, A. y Evans, D.L., "Satellite remote sensing of earthquake, volcano, flood, landslide and coastal inundation hazards", *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, no. 59, pp. 185-198, 2005.
- Turner, I.; B.L.; Kasperson, R.E.; Matson, P.A.; McCarthy, J.J.; Christensen, L.; Ecclesley, N.; Kasperson, J.X.; Luers, A.; Corell, R.W.; Martello, M.L.; Polunin, C.; Pulsipher, A. y Schiller, A., "A framework for vulnerability analysis in sustainability science", *PNAS*, no. 100, pp. 8074-8079, 2003.
- UNDRP, "Natural disasters and vulnerability analysis", Report on the Expert Group Meeting, 9-12 July 1979, Geneva, Switzerland, 1980.
- UNISDR, "Terminología sobre reducción del riesgo de desastres", Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas, Ginebra, Suiza, 2009.
- Urquijo-Torres, P.S., *Humboldt y el Jorullo. Historia de una exploración*, Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial, México, 2010.

- Van Manen, S.M., "Hazard and risk perception at Turrialba volcano (Costa Rica); implications for disaster risk management", *Applied Geography*, no. 50, pp. 63-73, 2014. Vega Mora, L. y Díaz, F.J., "Evaluación integral del riesgo volcánico del Cerro Machín, Colombia", *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, núm. 81, pp. 66-78, 2012. Voight, B., "The 1985 Nevado del Ruiz volcano catastrophe: Anatomy and retrospect", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 44, pp. 349-386, 1990. Vougiouklakis, G.E. y Fytianos, M., "Volcanic hazards in the Aegean area, relative risk evaluation, monitoring and present state of the active volcanic centers", *Developments in Volcanology*, no. 7, pp. 161-183, 2005. Walker, G.P.L., "Explosive volcanic eruptions - a new classification scheme", *Geologische Rundschau*, no. 62, pp. 431-446, 1973. Weichselgartner, J., "Disaster mitigation: the concept of vulnerability revisited", *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, no. 10, pp. 85-95, 2001. Westercamp, D. y Traineau, H., "The past 5,000 years of volcanic activity at Mt. Pelee martinique (F.W.I.): Implications for assessment of volcanic hazards", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 17, pp. 159-185, 1983. Wilson, G.; Wilson, T.M.; Deligne, N.I. y Cole, J.W., "Volcanic hazard impacts to critical infrastructure: A review", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 286, pp. 148-182, 2014. Witham, C.S., "Volcanic disasters and incidents: A new database", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 148, pp. 191-233, 2005. Witze, A., "Global volcano risk quantified: UN assessment aims to save lives by aiding planning", *Nature*, no. 519, pp. 16-17, 2015. Zuccaro, G.; Cacace, F.; Spence, R.J.S. y Baxter, P.J., "Impact of explosive eruption scenarios at Vesuvius", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 178, pp. 416-453, 2008.