

# Peligros volcánicos y gestión de riesgos en Islandia

**Magnús T. Gudmundsson**, profesor de geofísica, Centro Vulcanológico Nórdico, Instituto de Ciencias de la Tierra, Universidad de Islandia

**Hörn Hrafnadóttir**, especialista en hidrología e hidráulica, Verkís Consulting Engineers

**Jón Örvar Bjarnason**, jefe de Seguros, Natural Catastrophe Insurance of Iceland

**Hulda Ragnheiður Árnadóttir**, directora ejecutiva, Natural Catastrophe Insurance of Iceland

## Introducción

La actividad volcánica es común en Islandia y las erupciones, que generalmente duran de días a semanas, se producen, de media una vez cada tres años. Aunque algunas erupciones causan daños significativos, la mayoría no lo hacen. Esto se debe principalmente a que Islandia tiene una población muy escasa, con una media de solo 3-4 personas por kilómetro cuadrado, y la mayoría vive en el suroeste de la isla, justo fuera del límite de la zona de actividad volcánica. Sin embargo, como la amenaza de erupciones volcánicas siempre está presente en Islandia, las autoridades y las instituciones dedicadas a la vigilancia deben permanecer en alerta constante. Este nivel de alerta y el hecho de que la población local, en general, es consciente de los peligros potenciales que representan los volcanes, son la clave del éxito de la coexistencia de personas y volcanes en Islandia. En este artículo se explican los antecedentes y las principales características del vulcanismo en Islandia. Se presentan ejemplos recientes de crisis volcánicas, se describe la monitorización, se analizan los daños y pérdidas y se ofrecen algunas lecciones aprendidas de la actividad volcánica en las últimas décadas.

Islandia está escasamente poblada, con unas 380.000 personas que viven en un país de poco más de 100.000 km<sup>2</sup>. Una consecuencia de este hecho es que, a pesar de las frecuentes erupciones volcánicas, las víctimas mortales no son habituales. Hay únicamente dos muertes que pueden atribuirse directamente a la actividad volcánica (un proyectil de lava que cayó y golpeó a un científico en 1947 y un envenenamiento por gas en 1973) en los últimos 100 años.

## Entorno geológico

El entorno geológico de Islandia es bastante inusual (Einarsson, 2008). Está ubicado sobre la dorsal central oceánica donde dos de las grandes placas tectónicas que forman la superficie de la Tierra se separan entre sí con un índice medio de apertura de 2 cm por año (Figura 1). La parte occidental pertenece a la placa norteamericana, mientras que la parte oriental pertenece a la euroasiática, placa que incluye Europa y la mayor parte de Asia. Además, una pluma mantélica debajo de Islandia se eleva desde las profundidades del manto de la Tierra. Esta combinación de un límite de placa tectónica y una pluma mantélica es la razón de la existencia de Islandia. También explica por qué la actividad volcánica en Islandia produce aproximadamente cuatro veces más magma que una sección comparable de la dorsal mesoatlántica fuera del país.

Las rocas más antiguas de Islandia tienen entre 16 y 18 millones de años (Figura 1) y se encuentran en las zonas del noroeste y este de la isla. El límite de la placa se manifiesta como una zona volcánica de 40 a 80 km de ancho que atraviesa Islandia de suroeste a noreste. La actividad volcánica se limita a estas zonas. En el sur de Islandia, la extensión de la placa se distribuye en dos zonas casi paralelas. En el suroeste se encuentra la zona volcánica occidental, que se fusiona con la dorsal mesoatlántica en alta mar. Desde el centro de Islandia se extiende la zona volcánica oriental, que se expande más allá de la costa en el sur de la isla. El límite de la placa en el norte de Islandia está representado por la zona volcánica septentrional.

Dentro de las zonas volcánicas, la actividad se organiza en sistemas volcánicos (Figura 1). Cada sistema se extiende a lo largo de la zona volcánica y tiene unos 30-190 km de largo y unos 10-30 km de ancho. La mayoría de los sistemas volcánicos tienen un volcán central y enjambres de fisuras que se reparten a lo largo de las zonas volcánicas en ambas direcciones. Los volcanes centrales suelen tener entre 20 y 30 km de diámetro, se elevan entre 500 y 1000 m por encima de su entorno con una caldera en el centro. La mayoría de las erupciones volcánicas tienen lugar dentro de los volcanes centrales, donde el magma erupcionado varía desde basaltos, a través de composiciones intermedias, hasta riolitas. La actividad volcánica es menos frecuente en los enjambres de fisuras y todo el magma erupcionado allí es de tipo basáltico.

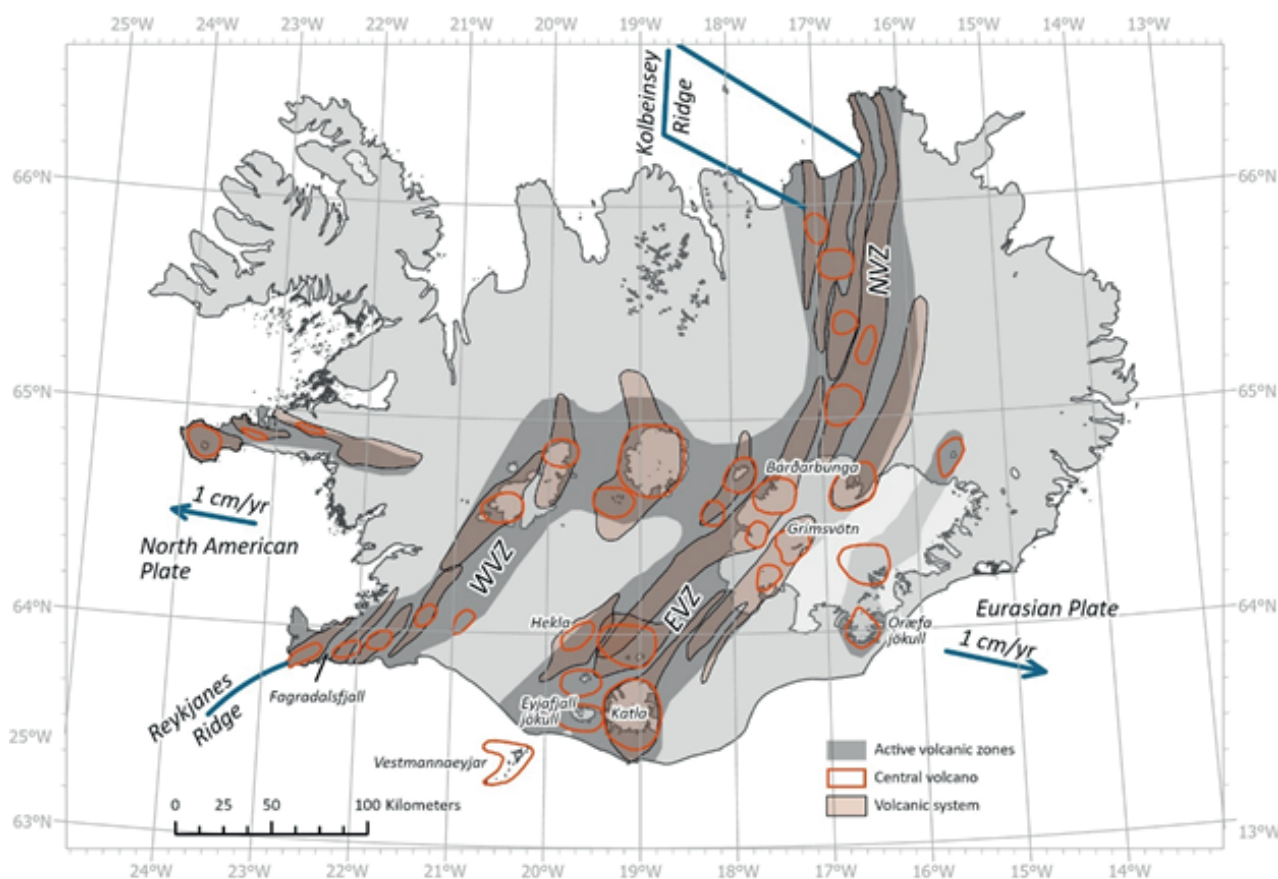


Figura 1. Límites de placas, zonas volcánicas, sistemas volcánicos y volcanes centrales en Islandia.

Islandia se encuentra a unos 65°N y tiene un clima marítimo templado fresco, con precipitaciones relativamente altas. Aproximadamente el 10 % de la isla está cubierto de glaciares, incluyendo partes significativas de las zonas volcánicas. En consecuencia, alrededor del 50 % de todas las erupciones volcánicas en Islandia tienen lugar dentro de los glaciares o en volcanes altos con una capa de hielo considerable (Larsen, 2002). Esta combinación implica que la interacción volcán-hielo sea muy común, con erupciones volcánicas o actividad geotérmica en áreas glaciares que derriten el hielo y provocan inundaciones de origen volcánico.

La combinación de la actividad volcánica asociada con la ruptura a lo largo del límite de la placa, con la existencia de grandes volcanes centrales donde el magma puede evolucionar en la corteza y con las condiciones ambientales altamente variables entre las áreas cubiertas y las libres de hielo, implica que la actividad volcánica en Islandia cubre un espectro muy amplio. Las erupciones basálticas, en su mayoría efusivas, de las fisuras tienen lugar en los enjambres de fisuras, pero los altos niveles de agua subterránea y la capa de hielo pueden ocasionar una actividad hidromagmática altamente explosiva en algunas partes del país y en alta mar. Dentro de los volcanes centrales, la actividad



puede variar desde frecuentes erupciones basálticas relativamente pequeñas hasta erupciones explosivas esporádicas de gran volumen.

Según una estimación reciente de Thordarson y Larsen (2007), el 79 % de todo el magma erupciona como basalto, el 16 % es de composición intermedia y el 5 % es silíceo. Algunas erupciones son mixtas, producen lava y tefra, y otras solo producen lava. Alrededor del 80 % de las erupciones en Islandia son principalmente explosivas. Esto contrasta claramente con p. ej. Hawái y la mayoría de los otros lugares donde predominan los basaltos. La importancia de la actividad explosiva basáltica islandesa se debe principalmente al hecho generalizado de la interacción agua-magma, dentro de los glaciares, en partes de las zonas de rift donde los niveles de agua subterránea son muy altos y los lagos son comunes. Además, de forma ocasional, se dan erupciones en aguas someras del océano frente a la costa de Islandia.

## Magnitud y frecuencia de las erupciones volcánicas en Islandia

El tipo de actividad volcánica más común son las erupciones explosivas o efusivas en los volcanes centrales, siendo los cuatro sistemas volcánicos de Hekla, Katla, Grímsvötn y Bárðarbunga los más activos. La mayoría de las erupciones son de un tamaño moderado, aunque también se producen algunas erupciones explosivas grandes. Las grandes erupciones en los enjambres de fisuras, como la que ocurrió en Holuhraun en el centro de Islandia en 2014-2015 (Pedersen *et al.*, 2017), son menos comunes.

Aparte de los eventos más grandes, las estimaciones del volumen expulsado en las erupciones ocurridas hace más de 100 años son inciertas. La Tabla 1 proporciona cifras sobre las 22 erupciones confirmadas de los últimos 50 años; el intervalo medio entre erupciones en este período es de 2,3 años. De estas, 10 erupciones expulsaron menos de 0,1 km<sup>3</sup> de magma, nueve produjeron entre 0,1 y 0,25 km<sup>3</sup>, y los eventos más grandes produjeron respectivamente 0,45 km<sup>3</sup> y 1,4 km<sup>3</sup>. Es posible que el número de eventos más pequeños no esté completo, ya que algunos podrían haber ocurrido bajo los glaciares en este período. En la Tabla 2 se ofrece una descripción más general de los periodos de retorno de los eventos, basada en el historial de erupciones conocidas de los últimos 1.100 años (Thordarson y Larsen, 2007). Las erupciones más significativas tienen periodos de retorno de 250-1.000 años y son principalmente de dos tipos: (1) Grandes erupciones de basalto causadas por inundaciones que producen hasta 20 km<sup>3</sup> de lava, y (2) erupciones explosivas muy grandes que pueden producir hasta 10 km<sup>3</sup> de tefra.

| Volcán                            | Año  | Depósitos  | Composición del magma | Tipo de erupción | Área de lava (km²) | Volumen de lava expulsado km³ | Volumen de tefra (DRE) km³ | IEV | Daños asegurados - Valor actual (M€) |
|-----------------------------------|------|------------|-----------------------|------------------|--------------------|-------------------------------|----------------------------|-----|--------------------------------------|
| Fagradalsfjall (1)                | 2021 | lava       | basalto               | Efusiva          | 4,85               | 0,15                          |                            | 1   |                                      |
| Holuhraun 2014-2015 (2)           | 2014 | lava       | basalto               | Efusiva          | 84                 | 1,44                          |                            | 1   |                                      |
| Grímsvötn (3)                     | 2011 | tefra      | basalto               | Explosiva        | 0                  |                               | 0,27                       | 4   | 2,1                                  |
| Fimmvörðuháls (4)                 | 2010 | lava       | basalt                | Efusiva          | 1,3                | 0,02                          |                            | 1   |                                      |
| Eyjafjallajökull (5)              | 2010 | tefra/lava | intermedia            | Explosiva        | 0,6                | 0,02                          | 0,18                       | 3   | 2,5                                  |
| Grímsvötn (6)                     | 2004 | tefra      | basalto               | Explosiva        | 0                  |                               | 0,05                       | 3   |                                      |
| Hekla (7)                         | 2000 | lava/tefra | intermedia            | Mixta            | 15                 | 0,095                         |                            | 2   |                                      |
| Grímsvötn (8)                     | 1998 | tephra     | basalto               | Explosiva        | 0                  |                               | 0,05                       | 3   |                                      |
| Gjálpi (9)                        | 1996 | tefra      | intermedia            | Sub-Glacial      | 0                  |                               | 0,45                       | 2   | 9,6                                  |
| Hekla (7)                         | 1991 | lava/tefra | intermedia            | Mixta            | 25                 | 0,24                          | 0,01                       | 3   |                                      |
| Krafla, sept. (10, 11)            | 1984 | lava       | basalto               | Efusiva          | 24                 | 0,13                          |                            | 1   |                                      |
| Grímsvötn (8)                     | 1983 | tefra      | basalto               | Explosiva        | 0                  |                               | 0,01                       | 2   |                                      |
| Krafla, nov. (10, 11)             | 1981 | lava       | basalto               | Efusiva          | 17                 | 0,05                          |                            | 1   |                                      |
| Krafla, January-February (10, 11) | 1981 | lava       | basalto               | Efusiva          | 6,3                | 0,032                         |                            | 1   |                                      |
| Krafla, oct. (10, 11)             | 1980 | lava       | basalto               | Efusiva          | 11,5               | 0,035                         |                            | 1   |                                      |
| Krafla, jul. (10, 11)             | 1980 | lava       | basalto               | Efusiva          | 6                  | 0,025                         |                            | 1   |                                      |
| Krafla, mar. (10, 11)             | 1980 | lava       | basalto               | Efusiva          | ~1                 | 0,003                         |                            | 1   |                                      |
| Hekla 1980-1981 (7)               | 1980 | lava       | intermedia            | Mixta            | 25                 | 0,17                          | 0,026                      | 3   |                                      |
| Krafla, sep. (10, 11)             | 1977 | lava       | basalto               | Efusiva          | <1                 | 0,002                         |                            | 1   |                                      |
| Krafla, abr. (10, 11)             | 1977 | lava       | basalto               | Efusiva          | ~1                 |                               |                            | 1   |                                      |
| Krafla, dic. (10, 11)             | 1975 | lava       | basalto               | Effusiva         | <1                 | <0.001                        |                            | 1   |                                      |
| Vestmannaeyjar (12)               | 1973 | lava/tefra | basalto               | Mixta            | 3,2                | 0,23                          | 0,02                       | 2   | 260-330*                             |

(1) Pedersen *et al.* 2021, (2) Pedersen *et al.* 2017, (3) Hreinsdóttir *et al.* 2013, (4) Edwards *et al.* 2012, (5) Gudmundsson *et al.* 2012, (6) Oddsson *et al.* 2012, (7) Pedersen *et al.* 2018, (8) Gudmundsson 2005, (9) Gudmundsson *et al.* 2004, (10) Einarsson 1991, (11) Sæmundsson 1991, (12) Einarsson, 1974.

\*La erupción de Vestmannaeyjar (islas Vestman) ocurrió antes del establecimiento de NTI. Las pérdidas se han estimado con base en la cobertura existente, proporcionada por NTI al día de hoy.

■ Tabla 1. Erupciones volcánicas en Islandia 1973-2021.

| Todas las erupciones - volumen expulsado (lava y tefra) |       | Erupciones explosivas (Índice de Explosividad Volcánica) |                          |
|---------------------------------------------------------|-------|----------------------------------------------------------|--------------------------|
| Volumen (DRE) km <sup>3</sup>                           | Años  | VEI                                                      | Años                     |
| <0.03                                                   | 5-10  | 1                                                        | 5-10                     |
| 0.03 - 0.1                                              | 10    | 2                                                        | 10-20                    |
| 0.1 - 0.3                                               | 10    | 3                                                        | 10                       |
| 0.3 - 1.0                                               | 20-40 | 4                                                        | 30-50                    |
| 1-3                                                     | ~250  | 5                                                        | 100-200                  |
| 3-10                                                    | ~500  | 6                                                        | ~1000                    |
| >10                                                     | ~1000 | 7                                                        | sin erupciones conocidas |

DRE (Dense Rock Equivalent): material total expulsado compactado a la densidad de una roca sólida.

VEI (Volcanic Explosivity Index): Índice de Explosividad Volcánica, basado en la altura de la nube volcánica y en el volumen total del material en el aire (tefra) expulsado:

VEI 1 < 0.001 km<sup>3</sup> < VEI 2 < 0.01 km<sup>3</sup> < VEI 3 < 0.1 km<sup>3</sup> < VEI 4 < 1 km<sup>3</sup> < VEI 5 < 10 km<sup>3</sup> < VEI 6 < 10 km<sup>3</sup>.

A menudo el volumen total de tefra es aproximadamente tres veces el volumen DRE, ya que la tefra tiene una alta porosidad.

(Tabla modificada de Gudmundsson *et al.* 2008).

Tabla 2. Periodos de retorno de las erupciones en Islandia.

Desde el asentamiento humano en Islandia, hace más de 1.100 años, hay solo cuatro flujos de lava responsables de hasta la mitad del magma total que entró en erupción en este período. Esto incluye la gran erupción de lava del Laki que se formó 1783-1784, durante un importante evento de ruptura en la zona volcánica oriental, cubriendo 600 km<sup>2</sup>. Esta erupción causó enormes dificultades en ese momento, cuyas altas emisiones de gas volcánico asociadas provocaron una alteración generalizada de los patrones climáticos en muchas partes del hemisferio norte (Thordarson y Self, 2003).

## Peligros volcánicos en Islandia

Islandia está escasamente poblada, con unas 380.000 personas que viven en un país de poco más de 100.000 km<sup>2</sup>. Una consecuencia de este hecho es que, a pesar de las frecuentes erupciones volcánicas, las víctimas mortales no son habituales. Hay únicamente dos muertes que pueden atribuirse directamente a la actividad volcánica (un proyectil de lava que cayó y golpeó a un científico en 1947 y un envenenamiento por gas en 1973) en los últimos 100 años. Los principales peligros (Figura 2) son: (1) lluvia de tefra (caída de cenizas), (2) flujos de lava, (3) jokulhlaups (inundaciones causadas por la actividad volcánica o geotérmica bajo de los glaciares), (4) contaminación por gas, (5) corrientes de densidad piroclástica, y (6) rayos.

## Caída de cenizas

La mayoría de las erupciones explosivas en Islandia son basálticas y tienen lugar dentro de los glaciares y, con mayor frecuencia, en el volcán Grímsvötn (Larsen 2002, Thordarson y Larsen, 2007; Gudmundsson *et al.*, 2008). La mayoría de estas erupciones son de tamaño discreto (<0,1>3, Índice de Explosividad Volcánica = 3 – ver Tabla 2), siendo la interacción magma-agua un importante impulsor de la fragmentación del magma que da como resultado la forma-

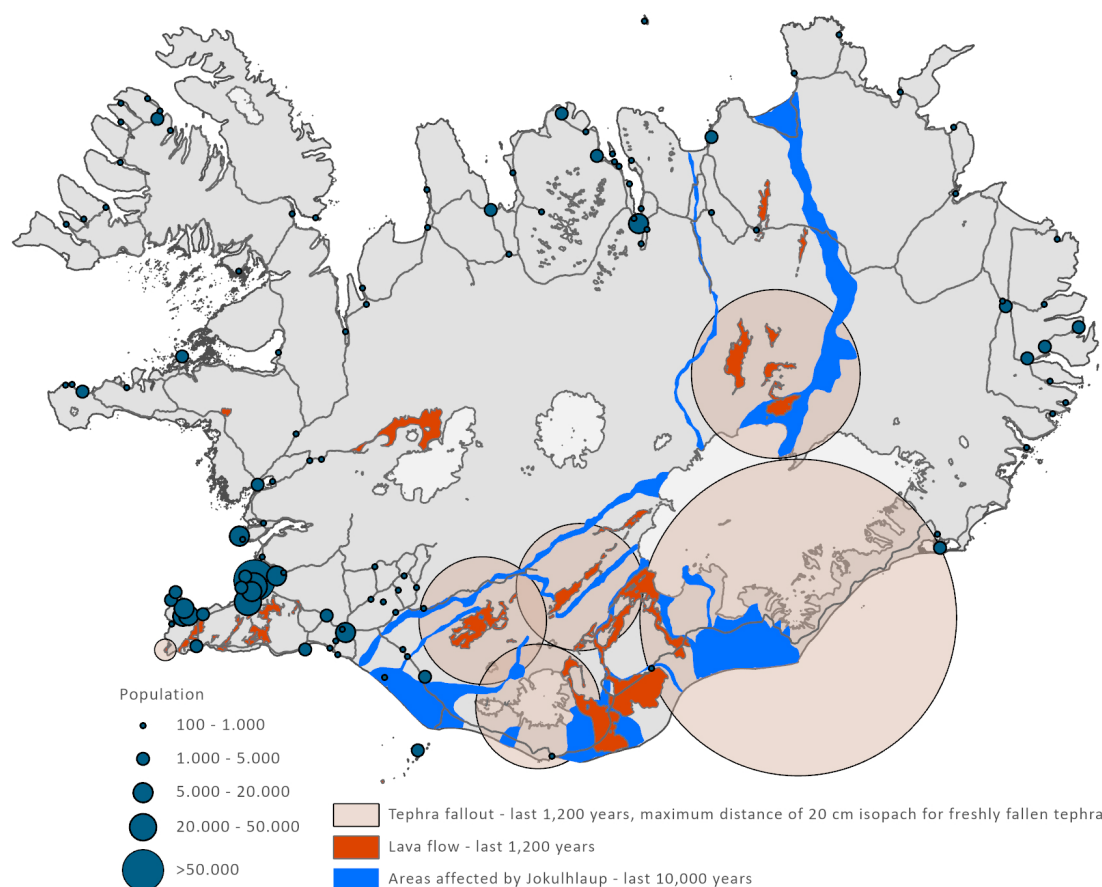


Figura 2. Núcleos de población, carreteras principales y áreas que pueden verse seriamente afectadas por erupciones explosivas y *jokulhlaups* de acuerdo con registros históricos y geológicos (según Gudmundsson *et al.*, 2008).

ción de penachos volcánicos y la difusión de capas de ceniza. La mayoría de estas erupciones tienen un efecto relativamente pequeño en áreas habitadas debido a la ubicación remota del volcán fuente. Las erupciones explosivas importantes (VEI 4) ocurren aproximadamente una vez cada 30-50 años. Las erupciones más grandes (VEI 5) ocurren una vez cada 100-200 años.

## Coladas de lava

Las coladas de lava formadas en los últimos 100 años cubren más de 200 km<sup>2</sup> de terreno, aunque como la mayor parte de esta lava se forma en las tierras altas o en regiones deshabitadas, no causa daños. Sin embargo hay excepciones, en concreto la erupción en la isla de Heimaey en Vestmannaeyjar en la que no se produjeron víctimas ni heridos y los habitantes fueron evacuados de la isla con éxito. No obstante, durante los cinco meses de la erupción, se destruyeron alrededor de 400 edificios y hubo grandes daños a las infraestructuras y trastornos a la economía local. La erupción más reciente en la península de Reykjanes en marzo-septiembre de 2021 ocurrió a solo 8 km de la ciudad más cercana, aunque no hubo daños a los edificios ni a las infraestructuras.

## Jokulhlaups

Los jokulhlaups son las inundaciones causadas por el agua de deshielo liberada desde los glaciares en Islandia. Son principalmente de dos tipos: (a) agua de deshielo liberada que se acumula bajo el glaciar debido a la fusión por la actividad geotérmica, (b) eventos a gran escala causados por la fusión durante las erupciones. El tipo (a) es mucho

más común y estos eventos tienen lugar cada 1-2 años de media. No suelen producirse grandes daños. Sin embargo, los frecuentes jokulhlaups producidos por la actividad geotérmica pueden convertir los terrenos con vegetación en terrenos baldíos susceptibles de formar tormentas de arena, como se observa en una región del sudeste de Islandia. El tipo (b) es menos común pero puede dar como resultado grandes inundaciones, como ocurrió con el catastrófico jokulhlaup durante la erupción del volcán Katla cubierto de hielo, en 1918 (la descarga máxima se estimó en 300.000 m³/s). Otros ejemplos son un gran jokulhlaup que tuvo lugar en el sureste de Islandia, causado por la erupción del Gjalp en 1996, y varias inundaciones mucho más pequeñas durante la erupción del Eyjafjallajökull en 2010. Estas inundaciones pueden destruir puentes, carreteras y otras infraestructuras, pero generalmente tienen lugar en llanuras aluviales deshabitadas.

## Contaminación por gas

Durante las grandes erupciones efusivas pueden liberarse grandes cantidades de gases volcánicos a la atmósfera. Se trata principalmente de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) que en altas concentraciones es perjudicial para las personas. Por lo tanto, se monitoriza la contaminación por gas y se emiten avisos según las concentraciones que haya durante las erupciones (Barsotti et al., 2020). Durante la gran erupción de Holuhraun en 2014-2015, se produjeron altas concentraciones de forma ocasional en poblaciones situadas hasta a 100 km del lugar de la erupción, lo que provocó la interrupción temporal del trabajo al aire libre.

## Corrientes de densidad piroclástica

Durante las grandes erupciones explosivas, las corrientes de densidad piroclástica (PDC, por sus siglas en inglés) son un peligro importante en algunas regiones volcánicas de todo el mundo. Se forman cuando las nubes volcánicas colapsan y las cenizas volcánicas calientes y los gases fluyen ladera abajo del volcán, devastando todo a su paso. Las PDC que ocurren en Islandia son pequeñas en su mayoría y no llegan mucho más allá del área cercana a los cráteres. Sin embargo, en las erupciones muy grandes pero poco frecuentes de VEI 5-6, las PDC pueden llegar a áreas habitadas. La última erupción en la que las PDC llegaron a tierras de cultivo habitadas fue la erupción del Öräfajökull en 1362. Sin embargo, con el aumento del turismo, el peligro de las PDC para los excursionistas en el volcán Hekla está incrementándose, ya que las señales precursoras de las erupciones en el Hekla son muy breves (del orden de 1 hora o menos).

## Rayos

Durante las erupciones explosivas, los rayos pueden representar un grave peligro para las personas. Esto es de aplicación especialmente cuando el magma interactúa con el agua. Ejemplos destacables son las erupciones en el volcán Katla, que suceden de media una vez cada 50 años. Los rayos también pueden dañar las líneas eléctricas y otras infraestructuras similares. Dos personas murieron a causa de un rayo durante la erupción del Katla en 1755, aunque se desconocen otras muertes debido a este peligro en Islandia.

## Monitorización volcánica y respuesta

Las redes de sismómetros y de estaciones GPS monitorizan las regiones volcánicas de toda Islandia. Principalmente es la Oficina Meteorológica de Islandia (OMI) quien maneja estas redes y proporciona datos en tiempo real (sísmicos) y actualizaciones en el día sobre el estado de la deformación de los volcanes seleccionados (la red de estaciones GPS). Una red de estaciones de aforo en tiempo real en los ríos glaciares monitoriza el caudal y las señales geotérmicas en los ríos. Estas redes son de acceso público en la página web de la OMI (<https://vedur.is>). La OMI también tiene radares de banda C y X para rastrear los penachos volcánicos. La Agencia de Medio Ambiente de Islandia controla la



calidad del aire y las concentraciones de gas. El Departamento de Protección Civil del Comisionado de Policía de Islandia coordina la respuesta durante la inestabilidad y la actividad volcánica. Es en esos momentos cuando hace falta la experiencia y para ello la OMI y el Centro Vulcanológico Nórdico del Instituto de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Islandia colaboran de forma activa en el seguimiento y la evaluación. Existe una junta consultiva científica informal en el Departamento de Protección Civil que, durante los periodos de inestabilidad, celebra reuniones frecuentes, exclusivamente en línea a lo largo de los últimos dos años.

## Casos de estudio - últimos 50 años

### Vestmannaeyjar (1973)

El 23 de enero de 1973 se abrió una fisura volcánica de 1.600 m de longitud a solo 300 m de las casas más cercanas en el pueblo de 5.000 habitantes de esta isla frente a la costa sur (Einarsson, 1974). Se libró una batalla entre el hombre y la lava para proteger el puerto y las casas de la ciudad, para lo que se utilizó tanto el enfriamiento de la lava con agua de mar como diques de desvío y presas de retención. La combinación fue un éxito a pesar de que se perdió una parte de la ciudad.

Las presas y los diques se construyeron con el material disponible que era principalmente de baja densidad, incluidas las cenizas de la erupción. Los diques de desvío se mantuvieron hasta el final de la erupción, pero la presa de retención (con flujo de lava perpendicular a la estructura) se rompió el 18 de marzo, momento en el que el frente de lava se había elevado al doble de la altura de la presa que tenía unos 25 m en su punto más alto (Jónsson, 2013).

El enfriamiento de la lava comenzó a lo largo de la misma línea que el dique de desvío en el borde de la lava utilizando mangueras de extinción de incendios. Cuando la lava comenzó a amenazar la entrada al puerto, los barcos también bombearon agua de mar hacia el frente de lava, especialmente a la parte de la lava que estaba más al noroeste y más cercana al puerto. Para enfriar no solo el frente de lava sino también su interior, se colocó una tubería encima de la lava aún en movimiento que permitía que el agua llegara unos 200 m más dentro del margen de la lava. Se tuvieron que usar buldóceres y maquinaria pesada similar para colocar la tubería, pero como esta avanzaba lentamente como lava a'a<sup>1</sup>, fue posible que tales máquinas operaran en los escombros fríos más altos que cubrían el interior caliente. Esta arriesgada operación pareció ralentizar la progresión de la lava. Partiendo del éxito obtenido con las bombas disponibles en un principio, se adquirieron 32 bombas grandes de los EE. UU. y se comenzó a realizar un enfriamiento del campo de lava a gran escala. Durante esta última fase de enfriamiento, se bombearon alrededor de 5,7 millones de toneladas de agua de mar sobre aproximadamente 0,45 km<sup>2</sup> de superficie de lava, es decir, la parte de lava más cercana a la ciudad y la entrada al puerto (Jónsson & Matthíasson, 1974).

La superficie de la lava a'a, altamente fracturada, de movimiento lento dio como resultado un área de enfriamiento relativamente grande y, por lo tanto, eficiente. Además, este tipo de lava es en muchos casos más fácil de controlar con diques y presas, dado que su alta viscosidad y su límite de elasticidad permiten que la lava se eleve por encima de los obstáculos sin sobrepasarlos.

### Gjálp (1996)

Esta erupción tuvo lugar bajo una capa de hielo que tenía inicialmente 600-750 m de espesor y duró 13 días en octubre de 1996 (Gudmundsson et al., 2004). Tras 31 horas de erupción, se rompió la capa de hielo, aunque la erupción explosiva resultante fue relativamente menor y no causó daños, puesto que el lugar de la erupción estaba situado a más de 60 km de la zona habitada más cercana. Por otro lado, la erupción subglacial fue grande, y produjo una montaña de 400 a 500 m de altura debajo del hielo. La erupción derretió más de 3 kilómetros cúbicos de hielo y toda esta agua de deshielo se almacenó durante cinco semanas en el lago subglacial en la caldera del Grímsvötn, 10 km al sur.

(1) 'A'a (también conocida como a'a) es uno de los tres tipos básicos de lava fluida. 'A'a es una lava basáltica caracterizada por una superficie rugosa compuesta por bloques de lava fragmentados llamados clínker.



Figura 3. El jokulhlaup resultante de la erupción de Gjálp en 1996. Los grandes icebergs arrastrados por el agua de la inundación destruyeron el puente.

Fuente: foto de Magnús T. Gudmundsson.

Toda esta agua de deshielo se liberó después dando lugar a un gran jokulhlaup que alcanzó un pico de descarga de 50.000 m<sup>3</sup>/s aproximadamente. El jokulhlaup arrasó uno de los puentes principales (Figura 3) y causó además daños importantes en la carretera principal que rodea la isla, que estuvo cerrada durante algunas semanas tras el evento. No hubo granjas ni pueblos en peligro, debido a que esta llanura aluvial ha estado deshabitada durante cientos de años.

### Eyjafjallajökull (2010)

La infausta erupción explosiva del Eyjafjallajökull comenzó el 14 de abril de 2010, tras una erupción efusiva del flanco más pequeña en Fimmvörðuháls (Gudmundsson et al., 2012). La erupción continuada duró 39 días, con una actividad ocasional menor en las dos semanas siguientes.



Figura 4. La erupción del Eyjafjallajökull en mayo de 2010.

Fuente: foto de Magnús T. Gudmundsson.

La erupción (Figura 4) tuvo lugar durante un período en el que la dirección predominante del viento se dirigía hacia Europa. Las nubes de ceniza volaron hacia el continente, lo que provocó que esta erupción de tamaño moderado se convirtiera en un evento global, ocasionando la cancelación de más de 100.000 vuelos de pasajeros en Europa y en el Atlántico Norte. En los primeros 2 o 3 días se produjeron jokulhlaups de forma reiterada, aunque las barreras existentes contra las inundaciones resistieron el impacto; al cortar las vías de flujo a las aguas de la inundación a través de la carretera principal, se evitó el daño al puente en la carretera circular. Se aplicaron planes de respuesta para erupciones volcánicas que habían sido adaptados recientemente en la zona, incluidas tres evacuaciones de corta duración. A nivel local, la caída de ceniza causó pérdidas de escasa importancia a las granjas cercanas.

### **Grímsvötn (2011)**

El 21 de mayo de 2011, la erupción explosiva más grande de Islandia en varias décadas comenzó en el Grímsvötn, un volcán cubierto de hielo situado en la parte central occidental de la capa de hielo de Vatnajökull. Hubo un área al sur del volcán que resultó transitoriamente muy afectada por una capa de ceniza. La mayoría de las pérdidas económicas, que no estaban aseguradas, las sufrieron los agricultores. La mayor parte de las pérdidas aseguradas de las granjas fueron poco importantes, tales como daños en revestimientos metálicos, cristales de ventanas, paredes externas y acabados de suelos. A pesar de ser mucho más grande, el impacto general de la erupción del Grímsvötn en 2011 fue mucho menor que el de la del Eyjafjallajökull un año antes. Las principales razones fueron, en primer lugar, que hubo patrones de viento más favorables, lo que tuvo como consecuencia una menor propagación de tefra hacia Europa, y en segundo lugar, que la duración de la erupción explosiva en el Grímsvötn fue corta, de solo unos pocos días, en comparación con los 39 días de la del Eyjafjallajökull.

### **Bárðarbunga-Holuhraun (2014 - 2015)**

La erupción más grande de Islandia desde la gran erupción del Laki en 1783-84 tuvo lugar en las tierras altas centrales y duró seis meses entre septiembre de 2014 y febrero de 2015. El volumen de lava expulsado fue de 1,4 km<sup>3</sup> y cubrió 84 km<sup>2</sup> (Pedersen et al., 2017). Esta erupción fue consecuencia de un gran episodio de fisura que se produjo cuando un segmento de 40 km de la zona volcánica se separó 2 m. El magma vino de debajo del volcán central Bárðarbunga, donde la caldera se hundió 65 metros. Tales derrumbes de caldera no son comunes, pero pueden suceder una vez cada 100-200 años en Islandia. El último episodio importante de fisura antes del de Holuhraun ocurrió en 1975-1984, los incendios de Krafla en el norte de Islandia, con importantes fisuras, intrusiones de diques y erupciones repetidas. Sin embargo, las erupciones en Krafla fueron de un orden de magnitud más pequeño que la erupción en Holuhraun.

Debido a la remota ubicación del Holuhraun en las tierras altas, en el margen norte de la capa de hielo del glaciar Vatnajökull, no se produjeron daños a las viviendas ni a las infraestructuras. Se trató con mucha seriedad el peligro de que la fisura eruptiva se extendiera hacia el sur y por debajo del glaciar y, así, se cerró a los viajes una buena parte de las tierras altas debido a la posibilidad de que se produjeran grandes inundaciones. La emisión de dióxido de azufre fue muy alta y provocó que una gran área alrededor de la erupción fuera peligrosa. La ubicación remota y el periodo en el que tuvo lugar la erupción, otoño / invierno, con vientos más fuertes que en verano, contribuyeron a que los efectos de esta erupción fueran menores de lo que podrían haber sido. Sin embargo, las altas concentraciones de gas causaron trastornos en ocasiones y, de forma puntual, a las personas que vivían en pueblos a más de 100 km del lugar de la erupción, a las que se les ordenó que permanecieran en el interior.

### **Fagradalsfjall (2021)**

En la noche del 19 de marzo de 2021, comenzó una erupción volcánica en un pequeño valle en la montaña Fagradalsfjall en la península de Reykjanes situada en el suroeste de Islandia, a solo 8 km de la ciudad más cercana, cerca de varias infraestructuras importantes y con más del 75 % de la población total de Islandia viviendo a menos de 40 km de este lugar.



La erupción fue precedida por un enjambre de terremotos intensos (miles de terremotos, el mayor de magnitud 5,7) que comenzó 23 días antes del inicio de la erupción y que fue acompañado por una intensa deformación del suelo cuando se produjo una intrusión de dique de 9 km de largo en la corteza.

Según todos los estándares, fue de baja intensidad y solo produjo lava (Figura 5). Las mediciones de superficie de la lava más recientes, del 30 de septiembre de 2021, muestran que la lava ha cubierto aproximadamente 4,85 km<sup>2</sup> de terreno y que su volumen es de aproximadamente 0,15 km<sup>3</sup> (Pedersen et al. 2021; Instituto de Ciencias de la Tierra, Universidad de Islandia, 2021). Actualmente (1 de diciembre de 2021), no se ha detectado actividad desde el 18 de septiembre.



Figura 5. El flujo de lava en Fagradalsfjall el 15 de septiembre de 2021, vista hacia el norte. La ciudad de Reykjavik se puede ver a lo lejos. A la izquierda está el dique de desvío construido para evitar que la lava fluyera hacia el oeste.

Fuente: foto de Björn Oddsson.

En los días previos a la erupción se llevó a cabo un exhaustivo trabajo sobre las posibles medidas a tomar para minimizar los daños a las infraestructuras y las áreas pobladas en caso de una erupción efusiva, ya que se consideró improbable que hubiera una erupción explosiva en esta área. Este trabajo incluyó el mapeo de las infraestructuras y la maquinaria disponible para una potencial labor de protección a través, por ejemplo, de la posible construcción de presas de protección y diques de desvío; para realizar este trabajo se contó con la ayuda de modelos informáticos que indicaban la posible dirección y extensión de los flujos de lava. Finalmente, la erupción se produjo en un lugar favorable. Se necesitaría la erupción de volúmenes considerables de lava para que se llenaran los valles cercanos a la erupción antes de que la lava avanzara lo suficiente como para causar daños.

La modelización por ordenador de la evolución de las coladas de lava que ayudaran a predecir la evolución del campo de lava se realizó desde el principio, con simulaciones ajustadas a las tasas de efusión observadas (Figura 6). La viscosidad de la lava y el límite de elasticidad tuvieron que ajustarse periódicamente a medida que evolucionaba la erupción. Por ejemplo, alrededor del 19 de mayo, el flujo pasó de ser predominantemente a'a a pahoehoe<sup>2</sup>, lo que provocó cambios en los parámetros de modelización. Dado que los distintos tipos de software tienen diferentes puntos fuertes y débiles, el uso de más de un software de modelización de lava demostró ser beneficioso.

(2) Pāhoehoe (del hawaiano [pa:'howe'howe], que significa «lava suave e ininterrumpida»), también deletreada pahoehoe, es lava basáltica que tiene una superficie lisa, ondulante, ondulada o espesa.



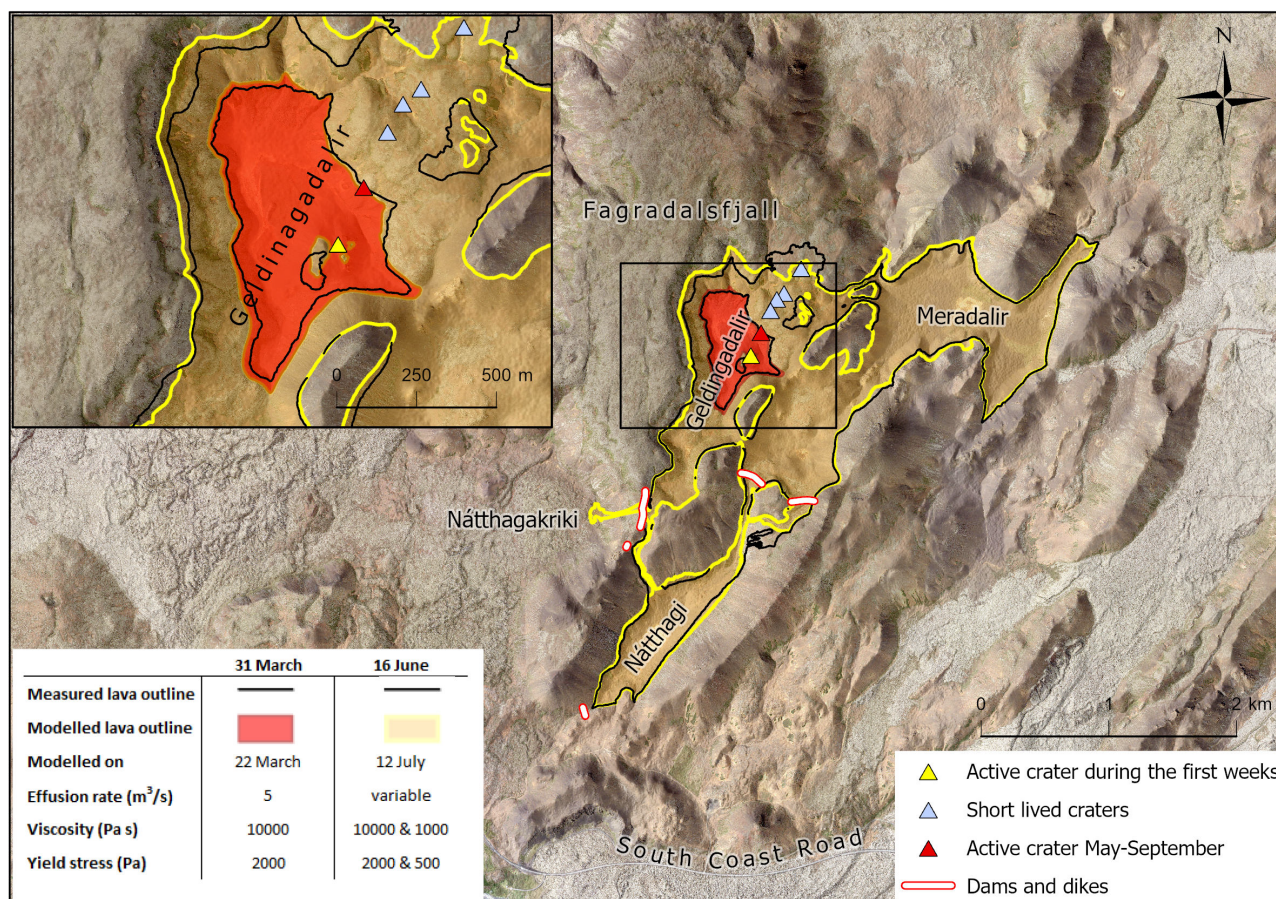


Figura 6. Comparación de la extensión de lava medida y simulada para la erupción en Fagradalsfjall en 2021. Extensión de lava simulada de Verkís Consulting Engineers, simulada en HEC-RAS. El contorno de lava medido se basa en datos del Instituto Islandés de Historia Natural, el Instituto de Ciencias de la Tierra, la Universidad de Islandia y el Servicio Geológico Nacional de Islandia.

Se llevaron a cabo cinco obras de protección: tres presas de retención y dos diques de desvío. Además, se construyeron tres barreras de protección del lugar de trabajo (Work Site Protection Barriers, WSPB) para proteger el área donde se estaba construyendo la presa o el dique.

Los dos primeros WSPB (de 1,5 a 2 m de altura) retrasaron el avance de la lava a'a, permitiendo que el frente de lava se elevara de 2 a 4 m por encima de las barreras. Después de que la lava cambió a pahoehoe (Figura 7), la lava más fluida avanzó tan pronto como superó las barreras.

Los diques de desvío están ubicados a lo largo de una cresta con objeto de prevenir que la lava fluyera hacia el oeste. Los diques evitaron este desbordamiento en tres ocasiones, pero en ese momento la lava era tan alta que es posible que no hubieran resistido una cuarta.

La experiencia obtenida con estos esfuerzos muestra que la progresión de la lava puede verse influida por presas y diques de desvío. Las presas retrasan el avance y son mucho más efectivas contra los flujos a'a que son más viscosos, mientras que los diques de desvío pueden tener un efecto importante en la dirección de propagación, por ejemplo, cuando la lava fluye hacia abajo desde una prominencia topográfica.





Figura 7. Elevación de emergencia de la presa oriental, un día antes del desbordamiento.

Fuente: foto de Ari Guðmundsson.

## Seguros contra el riesgo volcánico

Tras la erupción volcánica en Vestmannaeyjar, el gobierno islandés estableció el fondo de ayuda nacional para compensar a los propietarios de edificios por sus daños. Tres años más tarde, el fondo fue reemplazado por el Natural Catastrophe Insurance of Iceland, NTI (Seguro de Catástrofes Naturales de Islandia), que fue fundado como una empresa pública por una ley especial del Alþingi (parlamento) de Islandia. NTI funciona como una compañía de seguros que cobra primas para la prestación de cobertura aseguradora. La compra de un seguro de catástrofes para terremotos, erupciones volcánicas, avalanchas de nieve, deslizamientos de tierra e inundaciones es obligatoria para todos los edificios, así como para contenidos que hayan sido asegurados contra incendios. Los edificios están asegurados de acuerdo con su tasación contra incendios según la evaluación de la Oficina del Registro de la Propiedad y el contenido está asegurado de acuerdo con la autoevaluación de sus propietarios. Dado que el seguro contra incendios de los edificios es obligatorio en Islandia, todos los edificios están igualmente asegurados contra los peligros naturales cubiertos por el programa. La cobertura de catástrofes es una póliza independiente; las compañías de seguros contra incendios cobran las primas junto con las primas contra incendios a cambio de una comisión de cobro. Existe una prima única del 0,25 ‰ del capital asegurado.

Las infraestructuras como obras hidráulicas, sistemas de calefacción geotérmica, sistemas de alcantarillado, instalaciones eléctricas, puentes, instalaciones portuarias y remotes, que normalmente no están asegurados contra incendios, están asegurados por separado (prima de 0,2 ‰) con esta institución.

La póliza solo asegura contra los daños directos resultantes de las catástrofes antes mencionadas. Hay una franquicia del 2 % por daño, así como una franquicia mínima.

A principios del siglo XX se creó un fondo de recursos especiales (Bjargráðasjóður). El fondo es una institución independiente que pertenece por partes iguales al gobierno islandés y a la Asociación de Agricultores de Islandia. El fondo obtiene sus recursos de los presupuestos del Gobierno. Una de las principales funciones del fondo es apoyar financieramente a los agricultores que han sufrido daños relacionados con catástrofes naturales (incluidas las erupciones volcánicas). El sistema incluye propiedades, cercas, campos de césped y tendidos eléctricos relacionados con el sector agrícola. El fondo no cubre daños que sean asegurable, por ejemplo, por NTI.

A pesar de que existe un seguro obligatorio contra erupciones volcánicas proporcionado por NTI y hay establecido un fondo de recursos especial, la protección no es completa. Por ejemplo, la pérdida de beneficios no está cubierta por las compañías de seguros privadas ni por NTI. La póliza de seguro de automóvil a todo riesgo que proporcionan las compañías de seguros privadas tampoco incluye las erupciones volcánicas.

## Observaciones finales

La actividad volcánica en Islandia es frecuente y, en ocasiones, provoca eventos de gran magnitud. Algunas partes importantes del país se ven afectadas por determinados fenómenos, en particular por la lluvia de cenizas en las erupciones explosivas. La coexistencia de glaciares y volcanes genera peligros de inundación cuando el hielo se derrite por la actividad geotérmica o durante las erupciones. La densidad de población es muy baja y las tierras altas, donde se desarrolla la mayor parte de la actividad, están despobladas. Como resultado, la mayoría de los eventos de tamaño pequeño a moderado causan poco o ningún daño. Sin embargo, hay ocasiones en las que las erupciones tienen lugar cerca o casi dentro de áreas pobladas, como lo muestra claramente el ejemplo de Vestmannaeyjar (islas Vestman) en 1973.

Una de las principales lecciones aprendidas de los últimos 50 años es que la preparación es muy importante. Los planes de respuesta deben estar preparados de antemano para utilizarse en caso de que ocurra una erupción volcánica. Los planes de respuesta deben estar basados en un sólido conocimiento científico de los peligros. Esto incluye la realización de estudios detallados de las características de las erupciones anteriores, de los tiempos de recurrencia, y de los tipos y magnitudes de eventos esperados para cada volcán.

Los siguientes puntos resumen algunos de los elementos básicos para la preparación y la respuesta en Islandia:

1. Investigación rigurosa, básica y aplicada de los volcanes y sus consecuencias que proporciona una información de vital importancia en la que se basa cualquier respuesta.
2. Planes de respuesta, incluidas las posibles medidas de mitigación para reducir los impactos de eventos, que para Islandia pueden variar desde flujos de lava hasta inundaciones de agua de deshielo glacial.
3. Diálogo activo con los residentes, informándoles de los resultados científicos y asegurando su participación en los planes de respuesta.
4. Colaboración eficaz y fluida entre investigadores, ingenieros y las autoridades de protección civil locales y nacionales; algo que es muy importante cuando se trata de minimizar los daños materiales y económicos.
5. Sistema de seguro sólido para desastres naturales que mejore la resiliencia de la sociedad ante tales eventos.

## Agradecimientos

Páll Einarsson y Tinna Hallbergsdóttir leyeron el borrador e hicieron muchos comentarios útiles.



## Referencias

- Edwards, B., Magnússon, E., Thordarson, T., Gudmundsson, M.T., Höskuldsson, A., Oddsson, B., Haklar, J. 2012. Interactions between snow/firn/ice and lava/tephra during the 2010 Fimmvörðuháls eruption, south-central Iceland. *J. Geophys. Res.*, 117, B04302. doi:10.1029/2011JB008985.
- Barsotti, S., B. Oddsson, M.T. Gudmundsson, M.A. Pfeffer, M. Parks, B.G. Ófeigsson, F. Sigmundsson, V. Reynisson, K. Jónsdóttir, M.J. Roberts, E.P. Heiðarsson, E.B. Jónasdóttir, P. Einarsson, T. Jóhannsson, Á.G. Gylfason, K. Vogfjörð. 2020. *Operational response and hazards assessment during the 2014-2015 volcanic crisis at Bárðarbunga volcano and associated eruption at Holuhraun, Iceland*. *JVGR*, 390, 106753.
- Einarsson, P. 1991. Umbrotin við Kröflu 1975-89. In: Gardarsson, A., and Einarsson, Á. (eds.). *Náttúra Mývatns*, 96-139.
- Einarsson, P. 2008. Plate boundaries, rifts and transforms in Iceland. *Jökull*, 58, 35-58.
- Einarsson, Th. 1974. Gosið á Heimaey. *Heimskringla*, 55 pp.
- Gudmundsson, M.T. 2005. Chapter 6: Subglacial volcanic activity in Iceland. In: Caseldine, C.J., Russell, A., Hardardóttir, J., and Ó. Knudsen (ed.): *Iceland: Modern processes, Past Environments*, Elsevier, 127-151.
- Gudmundsson, M.T., Sigmundsson, F., Björnsson, H., and Högnadóttir, Þ. 2004. The 1996 eruption at Gjálp, Vatnajökull ice cap, Iceland: efficiency of heat transfer, ice deformation and subglacial water pressure. *Bulletin of Volcanology*, 66: 46-65. DOI: 10.1007/s00445-003-0295-9.
- Gudmundsson, M.T., G. Larsen, Á. Höskuldsson, Á.G. Gylfason. 2008. Volcanic hazards in Iceland. *Jökull*, 58, 251-268.
- Gudmundsson, M.T., Thordarson, T., Höskuldsson, Á., Larsen G., Björnsson, H., Prata, A.J., Oddsson, B., Magnússon, E., Högnadóttir, T., Pedersen, G.N., Hayward, C.L., Stevenson, J.A., Jónsdóttir, I. 2012. Ash generation and distribution from the April-May 2010 eruption of Eyjafjallajökull, Iceland. *Scientific Reports*. 2, 572; DOI:10.1038/srep00572
- Institute of Earth Sciences University of Iceland. 2021. Eruption in Fagradalsfjall Mountain. (7th of November 2021). [http://-jardvis.hi.is/eldgos\\_i\\_fagradalsfjalli](http://-jardvis.hi.is/eldgos_i_fagradalsfjalli)
- Jónsson, B. 2013. Að verjast hraunrennsli með varnargörðum. Í J. Sólmes, F. Sigmundsson, & B. Bessason (Ritstj.), *Náttúruvá á Íslandi: Eldgos og jarðskjálftar* (bls. 420-421). Reykjavík.
- Jónsson, V. K., & Matthíasson, M. 1974. Hraunkæling á Heimaey: Verklegrar framkvæmdir. *Tímarit verkfræðingafélags Íslands*, 59(5), 70-83.
- Hreinsdóttir, S., F. Sigmundsson, M.J. Roberts, H. Björnsson, R. Grapenthin, P. Arason, T. Árnadóttir, J. Hólmjárn, H. Geirsson, R.A. Bennett, M.T. Gudmundsson, B. Oddsson, B.G. Ófeigsson, T. Villemin, T. Jónsson, E. Sturkell, Á. Höskuldsson, G. Larsen, T. Thordarson, B.A. Óladóttir. 2014. Volcanic plume height correlated with magma pressure change at Grímsvötn Volcano, Iceland. *Nature Geoscience*, 7, 214-218. doi:10.1038/ngeo2044
- Larsen, G. 2002. A brief overview of eruptions from ice-covered and ice-capped volcanic systems in Iceland during the past 11 centuries: frequency, periodicity and implications. In *Volcano-Ice Interactions on Earth and Mars* (eds. Smellie, J.L. and Chapman, M.G.) Geological Society, London, Special Publications 202, 81-90.
- Oddsson, B., Gudmundsson, M.T., Larsen, G., Karlsdóttir, S. 2012. Monitoring the plume from the basaltic phreatomagmatic 2004 Grímsvötn eruption – application of weather radar and comparison with plume models. *Bull. Volc.* 74, 1395-1407. DOI:10.1007/s00445-012-0598-9.

Pedersen, G.B.M., A. Höskuldsson, T. Dürig, T. Thordarson, I. Jónsdóttir, M.S. Riishuus, B.V. Óskarsson, S. Dumond, E. Magnússon, M.T. Gudmundsson, F. Sigmundsson, V.J.B. Drouin, C. Gallagher, R. Askew, J. Gudnason, W.M. Moreland, P. Nikkola, H.I. Reynolds, J. Schmith. 2017. Lava field evolution and emplacement dynamics of the 2014-2015 Holuhraun eruption, Iceland. J.V.G.R. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2017.02.027

Pedersen, G.B.M., *et al.* 2018. Hekla volcano, Iceland, the 20th Century: Lava volumes, production rates and effusion rates. Geophys. Res. Letters, 45, <https://doi.org/10.1002/2017GL07688>

Pedersen, G.B.M, M.T. Gudmundsson, B.V. Óskarsson, J.M.C. Belart, N. Gies, Th. Högnadóttir, Á.R. Hjartardóttir, T. During, H.I. Reynolds, G. Valsson, C.W. Hamilton, A. Gunnarsson, V. Pinel, E. Berthier, E. Magnússon, P. Einarsson, B. Oddsson. 2021. Volume, discharge rate and lava transport at Fagradalsfjall eruption 2021: Results from near-real time photogrammetric monitoring. American Geophysical Union Fall Meeting. December 2021.

Sæmundsson, K. 1991. Jarðfræði Kröflusvæðisins. In: Gardarsson, A., and Einarsson, Á. (eds.). Náttúra Mývatns, 24-95.

Thordarson, T., S. Self. 2003. Atmospheric and environmental effects of the 1783-1784 Laki eruption, Iceland: a review and reassessment. J. Geophys. Res., 103, 27411-27445. 108(D1), 10.1029/2001D002042.

Thordarson, T., G. Larsen. 2007. Volcanism in Iceland in historical time: Volcano types, eruption styles and eruptive history. J. Geodyn., 43, 118-152.