

¿Qué tan peligrosos pueden ser los volcanes?

En el presente artículo se reflexiona sobre la peligrosidad de los volcanes, con énfasis en el Popocatepetl y el volcán de Colima, mediante una serie de posibles preguntas del público que se responden de manera ágil, sencilla e interesante. Se hace ver que, pese a que un volcán se mantenga aparentemente inactivo, tiene el potencial de generar erupciones peligrosas.

En ámbitos diferentes al académico, al iniciar una conversación con una persona antes desconocida, cuando surge el tema de las profesiones, es frecuente que siga una larga pausa acompañada de una mirada escéptica cuando uno menciona que se dedica a la vulcanología. Si se consigue convencer al interlocutor de que no es una broma y que de alguna manera es posible ganarse el sustento intentando entender cómo funcionan los volcanes y lo que son capaces de hacer, entonces surge una serie de preguntas que por lo general no tienen respuestas breves, precisas, únicas ni claras.

Por ello, intento presentar aquí algunas de las preguntas más comunes y lo que pudiera ser una respuesta razonable, en el entendido de que, por la inaccesibilidad de los sistemas volcánicos activos, muchos de los argumentos involucrados al describir procesos volcánicos son especulativos y sujetos a ajustes conforme se adquiere más y mejor información sobre lo que ocurre bajo esas estructuras, capaces de producir el fenómeno de la naturaleza más impresionante en nuestro planeta: las erupciones volcánicas.

¿Qué es un volcán?

Un volcán es el resultado de una o varias erupciones. Una erupción volcánica es la salida a la superficie de rocas a temperaturas elevadas, con frecuencia superiores a la del punto de fusión de las rocas, acompañadas de gases y materiales fragmentados por efecto del ascenso del magma hacia la superficie. Magma es la roca que, por efecto de algún proceso a profundidades del orden de decenas a centenas



de kilómetros, se ha fundido. Como la roca fundida es una mezcla de minerales, gases y líquidos, por lo general más ligera que la región de donde se deriva, el magma tiende a ascender. Un volcán es la estructura que se forma por la acumulación de los productos emitidos por las erupciones; si la salida de esos productos es por el mismo sitio, pueden construirse grandes edificios volcánicos (volcanes centrales) a lo largo de repetidas erupciones.

Aunque en algunas regiones oceánicas el magma puede salir en forma relativamente libre a la superficie (en este caso, el fondo del mar) desde su zona de origen profunda a lo largo de extensas fisuras, en las áreas continentales es más común que el magma tienda a acumularse en las partes superiores de la corteza terrestre, en “cámaras” o reservorios ubicados a profundidades moderadas (más o menos entre 2 y 15 km), que son estructuras complejas de fracturas y grietas invadidas por el material fundido. Durante el proceso de ascenso a la “cámara magmática” y durante su residencia allí, el magma evoluciona químicamente por efecto de las interacciones con la roca circundante, y por las menores presiones y temperaturas existentes a esas profundidades moderadas, por lo que se van formando complejas mezclas cuyas propiedades fluidas pueden tener rangos muy amplios de comportamiento. Cuando a causa de esa evolución, o por la introducción de nuevo magma, se genera una sobrepresión en el reservorio, el mag-

ma puede reanudar su ascenso. Si éste llega a la superficie, tendremos una erupción magmática; si sólo se acerca lo suficiente para sobrecalentar los mantos acuíferos, puede producirse una explosión freática.

En el caso de una erupción magmática, el tipo e intensidad de la erupción dependen en gran medida de la tasa de ascenso del magma. Si ésta es lenta y los gases disueltos tienen tiempo de separarse, al salir a la superficie el magma ya ha perdido una buena parte de esos volátiles y puede fluir como un material análogo al vidrio fundido, al que se denomina lava. Esto es una erupción efusiva. En cambio, si la velocidad de ascenso es alta, o si el magma es muy viscoso, los volátiles no tienen tiempo de separarse del magma y al acercarse a la superficie forman una gran cantidad de burbujas en el interior del fluido a gran presión. Si el volumen de las burbujas excede cierto valor crítico, el magma pierde su cohesión y puede fragmentarse y estallar con gran violencia, lo que produce una erupción explosiva. Este proceso puede extenderse en el tiempo, conforme nuevo magma asciende hasta la región de fragmentación y genera una explosión continua que puede tener consecuencias devastadoras. Así, las erupciones pueden ser efusivas, (cuando producen flujos de la lava) o explosivas (cuando el magma se fragmenta violentamente y forma la ceniza volcánica).

■ ¿Se pueden predecir las erupciones volcánicas?

■ Una erupción mayor, sea efusiva o explosiva, implica la liberación de grandes cantidades de energía. Esta energía debe acumularse primero bajo el volcán. Los procesos de acumulación y la proximidad a un proceso de liberación de esa energía generan ciertas señales que pueden ser detectadas con la instrumentación adecuada. Uno de los aspectos que más se ha desarrollado en el campo de la vulcanología en las últimas décadas es la modelación de los procesos de ascenso y fragmentación del magma.

Asimismo, se han logrado avances considerables en la tecnología de detección y en las capacidades de reconocimiento de las señales precursoras que pueden anteceder a las erupciones. Las señales precursoras pueden ser de distintos tipos:



- Sísmicas, originadas por los movimientos del magma bajo el volcán, por la invasión de volátiles líquidos y gaseosos en grietas, por la formación de burbujas en el magma y, en términos generales, por la fractura de rocas debido a los esfuerzos inducidos por la intrusión de magma.
- Deformaciones del edificio volcánico, por las mismas causas, que son medibles por métodos geodésicos.
- Geoquímicas, relacionadas con cambios en la composición de los productos volcánicos o influenciados por la actividad, por ejemplo, del agua de manantiales o emisiones de gas, que pueden ser analizadas en laboratorios equipados.
- Geológicas, determinadas por medio del análisis de la composición y mineralogía de los productos volcánicos, como lavas, cenizas, etcétera.
- De percepción a distancia, principalmente, mediante imágenes en bandas visibles e infrarrojas obtenidas con cámaras instaladas en observatorios, aeronaves o satélites.

El análisis e interpretación de todas estas señales puede permitir una identificación positiva de los procesos de acumulación y proximidad de liberación de energía en un volcán activo, y de allí obtener un pronóstico o estimación más precisa de la probabilidad de erupción. Sin embargo, no se ha logrado un grado de precisión en el pronóstico que permita llamarlo predicción. Esto se debe a una dificultad inherente al proceso volcánico y nuestras limitaciones para observarlo en forma directa.

Como se mencionó antes, los procesos de gestación de una erupción ocurren en regiones dentro o bajo la corteza, a las cuales no podemos tener acceso directo; tan sólo se pueden detectar en la superficie algunas de las señales originadas por el proceso. Esto conlleva una seria dificultad, que genéricamente se denomina incertidumbre epistémica. Lo anterior significa que únicamente podemos inferir lo que está ocurriendo a profundidad, ya que no es posible el acceso directo, y el problema es que las combinaciones de señales que recibimos en la superficie pueden ser generadas por una multitud de diferentes interacciones de procesos y condiciones en la profundidad.

En términos generales, se podría reducir el grado de no-unicidad de las posibilidades, pero la complejidad de los procesos involucra un número mayor de variables y parámetros desconocidos que el número de señales que podemos reconocer desde la superficie.

Entonces, se recurre a una metodología que fue planteada en la ciencia moderna desde la primera mitad del siglo XX, descrita principalmente por Karl Popper en *La lógica de la investigación científica* (2008): ante una incertidumbre epistémica, o ante una problema inverso con un alto grado de no-unicidad (cuando muchas explicaciones diferentes describen a un mismo proceso inaccesible), el proceder con los métodos inductivos tradicionales de la ciencia, que consisten en la generalización de resultados parciales y que son de gran valor en los problemas directos, puede ser sumamente peligroso y llevar a conclusiones incorrectas en problemas inversos. Una posible solución consiste en abordar el problema siguiendo criterios de demarcación; esto significa que, en lugar de intentar describir o confirmar la naturaleza del proceso interno del volcán o de desarrollar modelos que los describan a partir de los (generalmente insuficientes) datos disponibles, lo indicado es aplicar un procedimiento que descarte aquellos procesos, configuraciones o modelos que no satisfacen o expliquen la totalidad de los datos que se recaban en la superficie. Al analizar ordenadamente cada uno de los grupos de datos disponibles (sísmicos, geodésicos, geoquímicos, térmicos, visuales, y otros), se proponen diferentes causas que expliquen las observables, que pueden ser apoyadas o descartadas desde la perspectiva de cada tipo de parámetro observado. De esta forma, la multiplicidad de los posibles procesos y de sus consecuencias se reduce.

Aplicar estas metodologías requiere de una inversión importante de equipo humano e instrumental especializado, dedicado a la función de vigilar continua y persistentemente a los volcanes que se sospecha puedan producir una erupción mayor. La experiencia global muestra que en los sitios de riesgo volcánico donde se utilizan estos métodos se ha logrado un alto número de pronósticos exitosos que han motivado acciones preventivas para proteger a la población. Algunos ejemplos son: Pinatubo, en



Figura 1. Uno de los domos de lava que se ha emplazado en el interior del cráter del volcán Popocatepetl.

Filipinas, 1991; Soufriere Hills, en Monserrat, 1997; o bien la reciente actividad del Popocatepetl, especialmente durante su marcado incremento en 2000 y 2001.

**Si el Popocatepetl hiciera una erupción mayor...
¿desaparecería la Ciudad de México?**

De ninguna manera. Como en el caso de los sismos, las erupciones pueden tener diferentes magnitudes e intensidades; si bien estos conceptos tienen un significado diferente en el caso de los volcanes. En el ámbito volcánico, la magnitud describe la cantidad (masa o volumen) de magma emitido durante una erupción; en tanto que la intensidad se refiere a la tasa de emisión de los materiales volcánicos. La combinación de estos factores determina el poder destructivo de una erupción. Se puede citar el ejemplo de la erupción del volcán de Colima en 1913, que fue de magnitud moderada, pero de intensidad alta. En contraste, la erupción del Parícutín, que se extendió desde su nacimiento en 1943 hasta 1952, fue de mayor magnitud, pero de mucho menor intensidad.

El estudio de erupciones pasadas permite estimar las tasas a las que se han presentado las erupciones de diferentes tamaños a lo largo de tiempo, y de allí calcular sus probabilidades de ocurrencia. Ese estudio arroja un resultado que no es sorprendente, ya que se presenta en diferentes fenómenos naturales: existe una relación inversa entre el tamaño de las

erupciones y la frecuencia con que se presentan. En otras palabras, las erupciones menores y moderadas son más frecuentes y probables que las grandes erupciones. En forma análoga, en una región determinada, los sismos pequeños son mucho más abundantes que los grandes terremotos.

Las evidencias de erupciones extremas del Popocatepetl ocurridas en los últimos 25 000 años (Sosa-Ceballos y cols., 2012; Siebe y cols., 2017) indican que durante erupciones extremas han llegado a caer considerables lluvias de ceniza, arena y fragmentos de pómez (ya fríos) hasta acumular varios centímetros sobre el valle de México. Esto ocurre si las condiciones del viento lo favorecen, en el caso de que durante el desarrollo de la erupción soplen vientos relativamente fuertes hacia el noroeste del volcán en un amplio rango de altitudes. Por lo tanto, se requiere la probabilidad combinada de una erupción extrema con un viento propicio para que ocurra una caída de ceniza del orden de 10 cm de espesor depositado en una región determinada, a distancias de 60 a 80 km del volcán, lo cual, si bien no mejoraría para nada las condiciones en las zonas urbanas de la capital mexicana, está muy lejos de causar la destrucción o desaparición de la ciudad. Su impacto en ciertos aspectos podría compararse con el de una granizada muy intensa, con el añadido de las propiedades erosivas de los fragmentos volcánicos de cualquier tamaño. Cabe señalar que éste no sería el caso de las regiones en el entorno del volcán marcadas en los “Mapas de peligros del volcán Popocatepetl”

(disponible en español y en náhuatl)¹ en las que los efectos de manifestaciones asociadas a erupciones mayores, como flujos piroclásticos y flujos de lodo, entre otros, requerirían tomar medidas de evacuación para proteger a la población.

■ **¿El Popocatepetl y el volcán de Colima están conectados?**

■ Tanto el Popocatepetl como el volcán de Colima han tenido actividad eruptiva en las últimas décadas. Ambos volcanes son del mismo tipo continental, pero cada uno con sus reservorios magmáticos propios e independientes. Si bien la zona de génesis que alimenta a ambos reservorios puede tener una fuente regional común (la subducción de la placa de Cocos bajo la placa Norteamericana), los recipientes magmáticos que controlan los procesos eruptivos de cada volcán se encuentran a pocos kilómetros (menos de 10) de la superficie. Como la distancia horizontal entre los volcanes excede 500 km, es mucho más razonable pensar que los magmas viscosos en ambas cámaras busquen su camino hacia la superficie, y no a lo largo de una distancia horizontal cien veces mayor, por lo que es difícil concebir la existencia de un conducto que una a ambos volcanes.

Existen, sin embargo, estructuras volcánicas “conectadas”, que pueden cubrir distancias de decenas

¹ Véase: «<http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/357-CARTELMAPASDEPELIGROSDDELVOLCNPO-POCATPETL.PDF>»

de kilómetros. Esto ocurre cuando hay un sistema magmático profundo dominado por magmas de menor viscosidad que alimenta a numerosos centros eruptivos. En estos casos, más bien puede hablarse de un solo edificio volcánico con numerosos sitios de salida de magma. Estas estructuras son más abundantes en el ambiente oceánico, por ejemplo, en Islandia y muchas otras zonas de *rift*, o en algunos volcanes de tipo hawaiano.

■ **¿Es posible que el volcán Xitle vuelva a hacer erupción?**

■ Ubicado al sur de la ciudad de México, el Xitle es parte de un campo volcánico monogenético, lo que significa que es un volcán alimentado directamente desde un sistema magmático profundo, situado en el manto terrestre, bajo la corteza, que busca varias salidas hacia la superficie. Cada salida es un volcán que nace, se mantiene en erupción por varios años (por lo general menos de 10) y se extingue. Cuando el sistema magmático del campo volcánico está listo para una nueva erupción, le es más fácil buscar un nuevo camino a la superficie que reactivar alguno de los conos existentes. Así, nace otro volcán monogenético. El Xitle forma parte del campo volcánico Chichinautzin, que comprende cerca de 220 conos monogenéticos ubicados entre el valle de México y los valles de Cuernavaca y Toluca. Otros volcanes monogenéticos conocidos son el Paricutín (1943-1952) y el Jorullo (1759-1774), que forman parte del



Figura 2. El volcán Xitle (cono más oscuro) visto desde la zona arqueológica de Cuicuilco. En el fondo, el Ajusco, un volcán más antiguo.

campo volcánico de Michoacán-Guanajuato, en el que se pueden contar más de 1 000 conos de ese tipo. En resumen, por su naturaleza, es más fácil que nazca otro volcán en algún lugar del campo volcánico monogenético, a que uno de ellos, como el Xitle, vuelva a hacer erupción y repita la inundación por flujos de lava de Cuicuilco y las zonas aledañas.

¿Qué tan alto es el riesgo volcánico en México?

Para contestar esto, hay que distinguir entre dos conceptos diferentes: peligro y riesgo. En el caso de un volcán en particular, el peligro se define como la probabilidad de que ocurra algún tipo de actividad en un intervalo de tiempo determinado, y que una manifestación volcánica particular, como un flujo de ceniza o un flujo de lodo, se presente en un sitio específico en ese intervalo. Así, puede decirse que, en un lugar (digamos, una barranca que pudiera canalizar flujos de ceniza caliente desde un cráter activo hasta una región determinada), el peligro es más alto que en otro sitio que, aunque cercano, esté elevado o protegido por barreras topográficas. Esto sig-

nifica que, si se trata de un volcán con una alta tasa eruptiva, la probabilidad de que el sitio de la barranca pueda ser alcanzado por flujos es más alta. Si se cuenta con datos precisos de las erupciones pasadas, es posible establecer cuantitativamente la función de peligro.

Por otro lado, el riesgo conlleva un concepto adicional: la vulnerabilidad de los sitios amenazados por un volcán. Así, un volcán con alta probabilidad de hacer erupciones mayores frecuentes, pero ubicado en un lugar desierto, es de alto peligro, pero de bajo o nulo riesgo. De forma recíproca, un volcán con una tasa baja eruptiva, donde rara vez se presentan manifestaciones volcánicas de carácter destructivo, pero que está rodeado por una alta densidad de población, es de alto riesgo, aunque de peligro moderado o bajo, como es precisamente el caso del Popocatepetl y de otros grandes volcanes centrales de México, como el Citlaltépetl o el Nevado de Toluca. En contraste, el volcán de Colima puede considerarse como de relativamente alto peligro, pero de relativamente menor riesgo, ya que hay una menor vulnerabilidad de la población en su entorno.



En el mundo hay cerca de 1300 volcanes que han tenido erupciones en los últimos 10000 años, de los cuales hasta 60 o 70 llegan a producir nuevas erupciones cada año. Es probable que en cualquier momento haya unas 20 erupciones en marcha en diversos lugares del planeta. En esos términos, considerando que México representa 1.7% de la población mundial y que tiene cerca de 1% de la actividad volcánica global, puede decirse que es un país de riesgo intermedio. Países con más alto riesgo serían, por ejemplo, Indonesia, Ecuador o Filipinas.

■ ¿Puede alguno de los grandes volcanes de México producir una erupción mayor?

■ Ya las han producido y pueden volver a ocurrir. Los grandes edificios, como el volcán de Colima, el Popocatepetl, el Pico de Orizaba, el Nevado de Toluca y otros más, se han construido de los productos acumulados de numerosas erupciones. Con frecuencia, los productos de erupciones efusivas (lavas) se alternan con los de erupciones explosivas (productos fragmentados), por lo que se forman estratos bien definidos. Estos estratovolcanes pueden tener vidas largas en las que durante decenas o centenas de miles de años los episodios eruptivos se alternan con periodos de inactividad. Por ello, se denominan volcanes activos aquellos que, aunque se encuentren en un periodo de reposo, sin actividad externa aparente, mantienen el potencial de producir erupciones de cualquier tipo. Tanto el volcán de Colima como el Popocatepetl, el Pico de Orizaba y cerca de una decena de volcanes más en México se consideran activos en ese sentido.

En el siglo XX en México tuvimos seis erupciones importantes: el volcán de Colima (intensa en 1913 y moderada de 1960 al presente), el Popocatepetl (1919-1927 y 1994-presente, ambas moderadas) y el Chichón (muy intensa en 1982). Esta última produjo el peor desastre volcánico de la historia de

nuestro país. En el caso de volcanes monogenéticos, se han formado el Parícutín (1943-1952) y –en el siglo XVIII– el Jorullo (1759-1774), ambos en el campo volcánico de Michoacán-Guanajuato, donde se mantiene la posibilidad del nacimiento de un nuevo volcán.

En conclusión, los volcanes han producido erupciones desde las primeras etapas de la formación de la Tierra, mucho antes de la aparición de la humanidad, y continuarán produciéndolas mientras habitemos este planeta. Lo importante es que la ciencia cada vez genera mejores herramientas para reducir sus efectos.

Servando de la Cruz Reyna

Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.
sdelacr@geofisica.unam.mx

Referencias específicas

- Grupo de trabajo para la actualización de los mapas de peligro del Volcán Popocatepetl (2016), “Mapas de peligros del volcán Popocatepetl”. Disponible en: «<http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/357-CARTELMAPASDEPELIGROSDDELVOLC-NPOPOCATPETL.PDF>», consultado el 24 de agosto de 2021.
- Popper, K. (2008), *La lógica de la investigación científica*, 2.^a ed., Madrid, Tecnos.
- Siebe, C. *et al.* (2017), “The ~23,500 y 14C BP White Pumice Plinian eruption and associated debris avalanche and Tochimilco lava flow of Popocatepetl volcano, México”, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 333: 66-95.
- Sosa-Ceballos, G., J. E. Gardner, C. Siebe y J. L. Macías (2012), “A caldera-forming eruption ~14,100 14C yr BP at Popocatepetl volcano, México: Insights from eruption dynamics and magma mixing”, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 213:27-40.