

Capítulo 3

EVALUACIÓN Y PREDICCIÓN DE LA PELIGROSIDAD

Para la planificación a largo plazo de los asentamientos humanos y de las inversiones en áreas volcánicas, es necesario, y de hecho indispensable, tener algún conocimiento del riesgo volcánico, es decir, la posibilidad de que una área en particular pueda ser afectada por uno o más fenómenos destructivos de los descritos en el capítulo primero.

Tal conocimiento se obtiene mediante estudios geológicos sobre los antecedentes de cada volcán. Cada erupción deja sus propias huellas en forma de capas de lava, depósitos estratificados de cenizas y escoria, etc., que pueden ser expresados en un mapa. Cada depósito se puede relacionar con un tipo particular de erupción, y en algunos casos su edad se puede determinar con gran precisión. La frecuencia de las erupciones pasadas y la extensión de las zonas devastadas por ellas pueden ser reconstruidas de esta manera. Se pueden entonces preparar mapas de zonas peligrosas que muestren las áreas en las cuales existen riesgos para la vida y los bienes alrededor de cada volcán, y pudiendo estimarse la probabilidad de que una área en particular sea afectada por una erupción en un período de tiempo dado.

Tal evaluación a largo plazo es el tema de otro manual (Crandell *et al.*, 1984). Este manual trata los problemas que surgen cuando parece inminente una erupción o que ya ha comenzado. En tales emergencias es importante estar en capacidad de prever lo que pueda suceder en el futuro inmediato. En otras palabras, estamos interesados en la predicción de un solo episodio eruptivo, en el cual el elemento tiempo es de vital importancia. El término «predicción» en este contexto significa una aseveración que define el tipo, magnitud, tiempo de iniciación y duración de un fenómeno futuro, y además el área que va a ser afectada.

Como se vio en el capítulo 1, hay distintos productos en las erupciones volcánicas: flujos y oleadas piroclásticas, flujos de lodo, caídas de ceniza, flujos de lava, etc. Durante una erupción no se observan todos estos fenómenos. Cada volcán se puede comportar de distinta manera en diferentes eventos, pero en general sus erupciones caen dentro de uno u otro patrón distinto identificable de acuerdo con la naturaleza de erupciones anteriores. Cuando no se dispone de información más específica, es razonable suponer que las erupciones futuras de cualquier volcán van a ser del mismo tipo que las ocurridas en el pasado, tal como lo revelan los estudios geológicos de los depósitos producidos por ellas.

Queda el problema de la predicción en el sentido antes definido; por lo tanto, se debe actuar acertadamente y a tiempo para proteger la vida de las personas que están en las áreas susceptibles de ser afectadas. Si fuera posible «ver dentro» del volcán, para observar el ascenso del magma hacia la superficie, vigilar su estado químico y físico, medir las presiones dentro de él, mientras que al mismo tiempo se tuvieran datos acerca de las rocas que lo cubren y del edificio volcánico, se podría calcular el momento en el cual el magma alcanzaría la superficie, y cuál sería la magnitud, intensidad y duración de la erupción. Pero no se puede mirar dentro de un volcán, ni se puede esperar obtener, aun con la tecnología actual, datos sobre las condiciones químicas y físicas dentro del volcán que hagan posible calcular su comportamiento futuro. ¿Qué se puede hacer entonces?

Como se podría esperar, un fenómeno de la magnitud y violencia de una erupción volcánica no ocurre espontáneamente, sino que es la manifestación final de un proceso que se ha estado dando por un largo período de tiempo dentro de la corteza terrestre: el ascenso del magma a la superficie. Este proceso tiene ciertos efectos químicos y físicos en la corteza que pueden ser detectados por las técnicas apropiadas, y que aunque ellos mismos no son causa directa o inmediata de una erupción, pueden sin embargo servir de indicadores de que el proceso que conduce a una erupción se está llevando a cabo. Detectando y midiendo estos efectos premonitorios, descubriendo las relaciones entre su ocurrencia y la posterior ocurrencia de una erupción en un volcán determinado, es posible establecer métodos empíricos para predecir erupciones. Pero debe tenerse en cuenta que no existe una relación de causa directa entre los signos premonitorios observados y la erupción misma. Las predicciones basadas en ellos son esencialmente probabilísticas y deben expresarse en términos como estos:

Dada una serie de datos observados sobre la reciente ocurrencia de posibles signos premonitorios, la comparación de estos datos con otros similares observados en el pasado con la posterior ocurrencia de erupciones en el mismo volcán, u otros parecidos, sugiere que la posibilidad de una erupción en este volcán durante los próximos N días (semanas, meses), es P por ciento.

3.2 Fenómenos premonitorios

Antes de las erupciones se han observado en las cercanías de los volcanes algunos fenómenos físicos y químicos tales como:

a) *Actividad sísmica:*

Aumento en la actividad sísmica local;
Ruidos audibles.

b) *Deformación del suelo:*

Expansión o levantamiento del edificio volcánico;
Cambios en la pendiente del suelo cerca del volcán.

c) *Fenómenos hidrotermales:*

- Aumento de caudal en las fuentes termales;
- Aumento de la descarga de vapor de las fumarolas;
- Aumento en la temperatura del agua en fuentes termales y en el vapor de las fumarolas;
- Aumento de temperatura en los lagos de cráter;
- Fusión de hielo o nieve en el volcán;
- Marchitez de la vegetación en las laderas del volcán.

d) *Cambios químicos:*

Cambios en la composición química de los gases que se desprenden de las fumarolas (por ejemplo, aumento en el contenido de SO_2 o H_2S).

Todos los fenómenos anteriormente enunciados se han observado en un momento u otro antes de erupciones individuales. Desafortunadamente para efectos de predicción, tales fenómenos no han ocurrido *siempre* antes de las erupciones, ni han ocurrido erupciones cada vez que han sido observados. Por consiguiente, no se conoce todavía ningún indicador perfectamente seguro de una erupción inminente. Sin embargo, la detección de tales posibles precursores es valiosa, porque permite estimar la probabilidad de que ocurra una erupción, por comparación con experiencias pasadas, y de esta manera formular predicciones del tipo descrito en la sección anterior.

3.3 Actividad sísmica

La ocurrencia de sismos superficiales frecuentes en el interior de un volcán es uno de los primeros precursores, más comunes y más fácilmente detectables de una erupción. Entonces, la manera más elemental para un monitoreo continuo, es la de mantener un solo sismógrafo en el volcán, o tan cerca como sea posible. La señal de este instrumento debe ser transmitida a un registrador (generalmente a través de una señal de radio), el cual puede ser observado varias veces al día por una persona competente. Es aconsejable también adaptarle un sistema de alarma nocturno que sea disparado por sismos anormalmente fuertes o frecuentes. La presencia de un sismógrafo es suficiente para detectar el comienzo de una actividad sísmica anormal. Tan pronto como ésta ocurra, es necesario instalar una red de por lo menos cuatro sismógrafos alrededor del volcán con el fin de determinar el punto de origen y la magnitud de cada sismo local. El número de sismos diarios con sus respectivas magnitudes indica la tasa de liberación de energía, la cual es un indicador de la cantidad de magma que está haciendo presión sobre las fracturas en su camino hacia la superficie. Un cambio en el patrón de las ondas sísmicas o una disminución progresiva en las profundidades focales, puede indicar que el magma se está aproximando a la superficie. Existen varios tipos de temblores, los cuales se distinguen en los sismogramas, y que corresponden al fractura-

miento de las rocas, movimiento subterráneo o efervescencia del magma, explosiones dentro de un lago de cráter, etc. En algunos casos se presenta un cambio en el tipo de sismos locales durante los días u horas que preceden a un nuevo período eruptivo. La sucesión más común es que los sismos de fractura son reemplazados progresivamente por eventos explosivos, y finalmente por prolongados períodos de tremor armónico previos al comienzo de una erupción.

El nivel de la actividad sísmica local durante los períodos de inactividad volcánica varía ampliamente de un volcán a otro. Por lo tanto, es fundamental mantener por lo menos un sismógrafo en operación continua en cada volcán potencialmente peligroso, para poder así establecer el nivel de actividad normal. Más que todo es la tasa de aumento de la actividad sísmica sobre el nivel normal lo que indica el aumento del peligro volcánico.

Casi todas las erupciones, y especialmente las mayores, están precedidas por un nivel anormal evidente de la actividad sísmica local. En muchos casos éste ha sido detectado muchos meses antes del inicio de una erupción (por ejemplo, Guadalupe, 1976; San Vicente, 1979). En otros casos (Santa Elena, 1980; Kliuchevskoi, 1960), la actividad sísmica local se detectó sólo unos pocos días antes de que explosiones a pequeña escala comenzaran. Durante el período previo a la erupción, la actividad sísmica local a menudo fluctúa considerablemente y se pueden presentar «enjambres» de eventos, que se prolongan por algunas horas o días, dando origen a falsas alarmas. A las dificultades de predicción en muchos volcanes, se puede sumar el hecho de que por cada crisis sísmica local (que podría tardar días, si no meses) seguida por una erupción, ha habido varias que terminaron sin erupción.

En conclusión, se puede afirmar que en la mayoría de los casos, las grandes erupciones están precedidas por sismos locales anormales que continúan durante días o meses antes de que comience la erupción y con frecuencia muestran un aumento dramático en las horas que preceden a una actividad explosiva importante o emisión de lava. Cuanto más detallado y largo sea el registro de la sismicidad de un volcán, mayor es la posibilidad de que se puedan hacer pronósticos fiables.

3.4 Deformación del suelo

Cuando el magma empuja hacia arriba en el interior de un volcán, se espera que cause algún levantamiento o inflación del edificio volcánico y sus alrededores inmediatos, hecho que ha podido observarse en muchos volcanes.

Un levantamiento espectacular ocurrió en el volcán Usu en Japón en 1944-1945. Un área de un kilómetro de diámetro subió 200 metros en once meses, hasta que finalmente fue perforada por una extrusión de lava vis-

cosa que formó un domo de 300 metros de diámetro y 150 de altura. Una inflación local ocurrió durante un período de por lo menos cuatro semanas antes de la devastadora erupción del Santa Elena, Estados Unidos, en 1980: un sector de más de un kilómetro de diámetro en la parte superior del volcán se hinchó a una tasa media superior a un metro por día.

Sin embargo, los movimientos verticales asociados con erupciones son, en general, mucho más pequeños y pueden ser detectados sólo con medidas de alta precisión. Se han desarrollado varias técnicas para medir deformaciones muy leves del suelo tanto verticales como horizontales. Los movimientos verticales pueden medirse, ya sea a través de nivelación óptica usando instrumentos de vigilancia corrientes, o por medio de inclinómetros que registran los pequeños cambios en la pendiente. Los inclinómetros acuatubulares o de mercurio son extremadamente sensibles, pero en vista de que sólo pueden registrar cambios de las pendientes en distancias relativamente cortas, siempre queda la posibilidad de que su reacción se deba puramente a influencias locales. Las nivelaciones ópticas repetidas y efectuadas con las técnicas convencionales pueden abarcar áreas más grandes, siendo éstas más flexibles en operación, aunque menos precisas. Ambos métodos han sido utilizados en Hawaii en los volcanes Kilauea y Mauna Loa con bastante éxito en la predicción de sus erupciones.

Desplazamientos horizontales relativos entre puntos fijos pueden ser rápidamente detectables con técnicas electrónicas de medición de distancia. Se puede, asimismo, usar la triangulación óptica pero es un tanto imprecisa. El establecer una red de dos dimensiones para medir sistemáticamente distancias entre puntos escogidos a través y alrededor del volcán, permite identificar las deformaciones del suelo y determinar sus tasas. Estas técnicas han sido importantes para el monitoreo volcánico en Hawaii, en el Santa Elena y en otros lugares.

3.5 Fenómenos hidrotermales

Aunque la temperatura y tasa de emisión de agua y vapor de las fuentes termales y fumarolas son los indicativos del estado térmico del volcán más obvios y fáciles de medir, son muy difíciles de interpretar. Esto se debe a que ellos dependen no sólo del estado mismo del volcán, sino también de la manera en que el agua circula dentro del edificio volcánico, además de otros factores, especialmente las lluvias. La observación visual de las emisiones de vapor puede ser equívoca, ya que el tamaño y densidad aparente de la columna de vapor depende también de la velocidad del viento, la humedad relativa del aire, la iluminación, etc.

En general, los cambios en el régimen hidrotermal son el resultado de cambios complejos que tienen lugar en los niveles superiores del volcán y

dan sólo evidencia indirecta de lo que está ocurriendo en su interior. Sin embargo, pueden dar alguna indicación de la probabilidad de una erupción freática, es decir, una erupción causada por el contacto de agua subterránea con magma o rocas candentes dentro del edificio volcánico.

Los cambios en la temperatura de los lagos del cráter, cuando éstos existen, son de mayor trascendencia. Por ejemplo, la temperatura anual media en el lago del cráter del volcán Taal en las Filipinas permaneció constante desde 1961 hasta mediados de 1965, oscilando entre 32,5 y 33 °C solamente. A fines de junio de 1965 empezó a aumentar, alcanzando 45 °C a finales de julio, después de lo cual comenzó a bajar lentamente hasta 43 °C el 28 de septiembre, cuando ocurrió una violenta explosión. Durante el período precedente a la erupción, el nivel del agua en el lago también se había comportado de manera anormal, aumentando en mayo y junio, contrariamente a la tendencia estacional usual.

Dieciocho meses antes de la erupción de 1977 del volcán Usu en el Japón se registraron incrementos notables en la temperatura de las fuentes termales, los cuales mostraron estrecha relación con la sismicidad local. Ambos fenómenos se incrementaron inmediatamente antes de la erupción.

3.6 Cambios químicos

Muy pocos volcanes permanecen totalmente inactivos durante los intervalos entre las erupciones. Los gases desprendidos del magma subyacente continúan subiendo a la superficie a través de conductos en el cráter o las laderas, y estos gases traen consigo valiosa información de lo que sucede debajo, que se puede revelar mediante análisis químicos.

Los principales constituyentes de los gases volcánicos, aparte del vapor de agua (H_2O), son el dióxido de azufre (SO_2), ácido sulfhídrico (H_2S), ácido clorhídrico (HCl) y dióxido de carbono (CO_2). A medida que estos gases suben a la superficie, se enfrían gradualmente y se produce una cierta diferenciación, de tal modo que la temperatura y composición de la mezcla de gases que llega a la superficie da información de la profundidad del magma que se encuentra debajo. Los cambios en las concentraciones relativas, y particularmente un aumento en la relación azufre/cloro, se pueden interpretar como ascenso del magma alcanzando la superficie. Por ejemplo, la relación S/Cl en las emisiones de gases de las fumarolas se incrementó por un factor de tres durante los meses anteriores a las erupciones explosivas del Asama (Japón) en 1958 y del Kliuchevskoi (Kamchatka) en 1951. Sin embargo, tal efecto no se ha observado antes de las erupciones del Kilauea (Hawaii).

La interpretación de los cambios en la composición química de los gases de las fumarolas es bastante difícil, primero por la variedad de factores que pueden afectarlos durante su trayecto hacia la superficie, y

segundo porque no se puede estar siempre seguro de que cualquier muestra de gas es representativa de las condiciones del volcán como un todo. A menudo se pueden observar diferencias sustanciales entre muestras tomadas con poco tiempo o espacio entre ellas. Las técnicas de vigilancia continua, tales como las desarrolladas para SO₂ o H₂S, permiten estudiar las fluctuaciones rápidas en estos gases.

Los análisis químicos de los gases y aguas volcánicas no han aportado todavía una base para identificar precursores inmediatos de actividad volcánica. Sin embargo, pueden dar indicaciones valiosas del estado general del volcán y de cualquier tendencia de actividad.

3.7 Resumen

A pesar de que la ciencia de predecir erupciones volcánicas está todavía en su infancia, se puede no obstante esperar, si la historia del volcán ha sido estudiada minuciosamente y si se efectúan las medidas científicas de manera sistemática y periódica tanto durante los períodos de quietud como de erupción, que sea posible predecir su comportamiento con suficiente precisión para que los pronósticos sean útiles al tomar decisiones sobre medidas de protección.

Para que una predicción sea beneficiosa, debe cumplir con los siguientes requisitos:

a) El *anticipo* de la predicción, es decir el tiempo que se espera que transcurra entre el anuncio de la predicción y el comienzo del fenómeno predicho, debe ser *más largo* que el tiempo necesario para llevar a cabo las medidas de protección adecuadas;

b) La *ventana de tiempo* de la predicción, es decir el lapso de tiempo durante el cual se espera que el fenómeno predicho ocurra, debe ser *tan corto* como sea posible.

c) La predicción debe ser *segura*, en el sentido de que la probabilidad de que se convierta en una falsa alarma esté dentro de los límites aceptables por la comunidad involucrada; por otra parte, la posibilidad de fallar en predecir una erupción destructiva debe ser la mínima posible.

Es importante que los científicos tengan estos criterios en cuenta al decidir cuándo y en qué forma comunicar sus conclusiones a las autoridades civiles o al público.

BIBLIOGRAFÍA

(Capítulo 3)

- Booth, B., 1979. «Assessing volcanic risk», *Jour. Geol. Soc. Lond.*, vol. 136, pp. 331-340.
Crandell, D. R., et al., 1984. *Source book for volcanic hazards zonation*, UNESCO, Paris, 97 pp.

- Fournier d'Albe, E. M., 1979. «Objectives of volcanic monitoring and prediction», *Jour. Geol. Soc. Lond.*, vol. 136, parte 3, pp. 321-326.
- Lowestein, P. L., 1982. «Problems of volcanic hazards in Papua New Guinea», *Geological Survey of Papua New Guinea*, Report 82/7.
- McKee, C. O., *et al.*, 1983. «Rabaul Caldera, Papua New Guinea: Volcanic hazards and eruption contingency planning», *Report 83/17 of the Department of Minerals and Energy*, Papua New Guinea, 38 pp.
- UNESCO, 1972. *The surveillance and prediction of volcanic activity: a review of methods and techniques*, 166 pp.