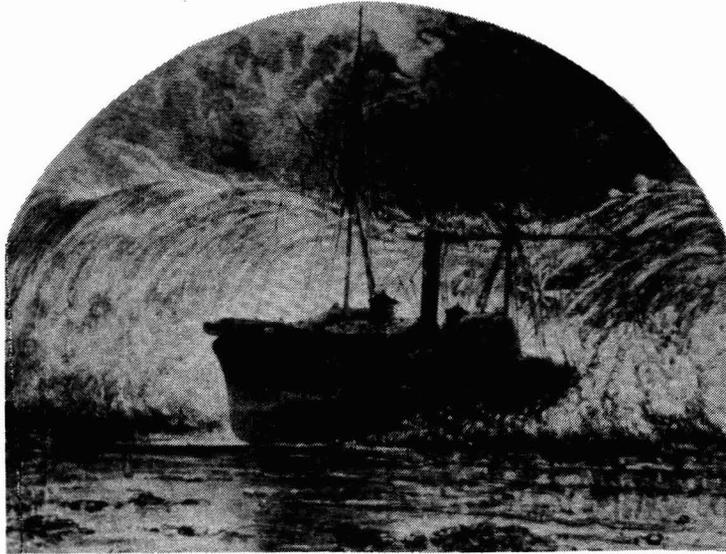


De Volcanes y Erupciones



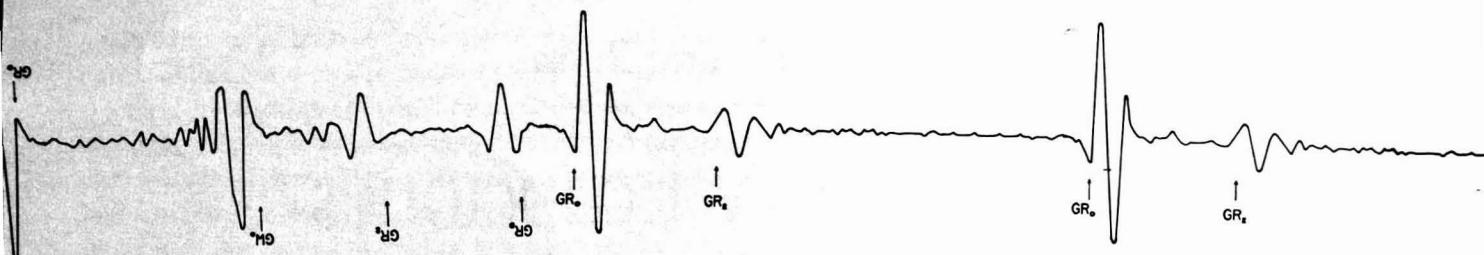
Platón escribe en uno de sus *Diálogos*¹ (Timeo) refiriéndose a un poderoso Estado que dominaba, además de su isla a muchas otras, y a diversas tierras continentales incluyendo partes de Libia y Egipto en África, y Tyrrenia en Europa: "Mas en los tiempos sucesivos, ocurrieron intensos terremotos e inundaciones, y en un solo día, en una noche fatal, todos los guerreros que había en vuestro país fueron tragados por la tierra que se abrió, y la isla Atlántida desapareció entre las olas; éste es el motivo de que todavía hoy día no pueda recorrerse sin explorarse este mar, porque la navegación encuentra un obstáculo invencible en la cantidad de limo que la isla depositó al sumergirse..." Y continúa en Critias: "(Esa isla) ...que sumergida hoy por los temblores de tierra en el fondo del mar, no es más que un légamo impenetrable que constituye un obstáculo a los navegantes y no permite atravesar aquella parte de los mares."

La leyenda de un mítico estado de la Atlántida posiblemente surgió de un hecho real, ocurrido unos mil años antes de que Platón escribiera sus *Diálogos*, no en una gran isla del Atlántico, sino en una isla menor del Mediterráneo, cerca de los grandes centros culturales de la antigüedad. La isla Santorini del archipiélago de las Cícladas en el mar Egeo, a unos 110 Km al norte de Creta, está formada por los restos del volcán Thera, que tuvo una terrible erupción hace unos 3,400 años.

¹ Platón. *Diálogos*. 18a edición, Porrúa, México, 1979.

Este evento es aproximadamente contemporáneo (aunque probablemente anterior) a la extinción de la civilización minoica, que floreció en Creta y en algunas otras islas cercanas, y posiblemente esté también relacionado con la decadencia del imperio hitita. Se puede especular que la ocurrencia de otro fenómeno asociado a la erupción, produjo daños tan considerables en los asentamientos costeros y en las flotas de ambos pueblos que los condujo a su ruina económica y al debilitamiento ante sus enemigos. Se trata del tsunami o maremoto, una onda marina generada por la explosión y el movimiento del fondo marino provocados por la erupción volcánica. Esta onda se propaga por el interior del agua, sin manifestarse en la superficie. Pero cuando llega a una costa o litoral donde el espesor de la capa de agua disminuye, la gran energía que acarrea, al concentrarse en volúmenes menores de agua, genera una enorme ola de gran poder destructivo, capaz de alcanzar varias decenas de metros de alto.

Algunos pasajes bíblicos describen otros fenómenos que podrían también asociarse a esa erupción y a los sucesos mencionados por Platón. Por ejemplo, entre las plagas de Egipto, se menciona un oscurecimiento del Sol por tres días, el enrojecimiento de las aguas del Nilo, la ocurrencia de pestes mortíferas y la caída de "granizo" y fuego. Estos fenómenos pueden explicarse como los efectos de una nube de productos volcánicos, ceniza y gases principalmente, producida por la columna eruptiva del Thera, que al ser dirigida por vientos estratosféricos en una dirección preferente hacia el sur y sureste, provocó lluvias de ceniza sobre los asentamientos a lo largo del Nilo, bloqueó la luz solar y contaminó sus aguas.



Algunas de estas descripciones son similares a las que 22 siglos después se reportarían² desde Batavia (hoy Jakarta) refiriéndose a la catastrófica erupción del volcán Krakatau. Los siguientes son extractos de dos telegramas recibidos en Singapur desde la capital de Indias Orientales Holandesas (Indonesia) el 27 y 28 de agosto de 1883: "Durante la noche terribles detonaciones desde Krakatau se escucharon hasta Soerakarta" (reportes posteriores indican que las explosiones se escucharon hasta la Isla Rodríguez en el Océano Índico, a más de 4,650 km): "Serang en la oscuridad total toda la mañana...La temperatura ha descendido diez grados"... "Llueven piedras...varias aldeas devastadas"... "Los botes Actaea y Elisabeth (situados a 193 km al oeste y 32 km al norte del Krakatau respectivamente) reportan el día como muy oscuro y una caída continua de polvo fino"... "Ayer por la mañana enormes olas (posteriormente se determinaron de 40 m de altura) se aproximaron rugiendo...Anjer Tjeringin y Telok Betong destruidos."

El comandante Van Doorn de la marina holandesa reportó las observaciones hechas por el barco Hydrograaf, a fines de septiembre de 1883, sobre la desaparición de la mayor parte de la isla de Krakatau: "Se ordenó a nuestro barco explorar el estrecho de Sunda... Krakatau no ha desaparecido por completo, aunque hasta ahora no se observan nuevos volcanes en las cercanías... las nuevas islas entre Sebesie y Krakatau son como una masa de rocas humeantes." Posteriormente otros barcos reportaron los cambios en el fondo marino que dificultaban la navegación en el estrecho de Sunda y regiones vecinas y concluyeron que se debían al depósito de unos 6.3 km cúbicos de detritos de los materiales que formaban la isla, la cual tenía un volumen de casi 6.8 km cúbicos antes de la erupción.

Del estudio de la erupción del Krakatau, y de los depósitos de materiales volcánicos emitidos durante la erupción del Thera, se pueden inferir algunas características comunes de ambos eventos. Estos volcanes-isla no eran nuevos, sino complejos edificios volcánicos formados por varios episodios anteriores de actividad. Por ejemplo, del Thera se sabe que tuvo otra gran erupción hace unos 100,000 años, y que otras erupciones menores fueron conformando las islas donde se asentaban algunos de los grupos minoicos. Del Krakatau existen reportes de erupciones importantes en el siglo III y en el año 1680.

El clímax de la actividad eruptiva de los grandes eventos del Thera y del Krakatau estuvo, en ambos casos, precedido por manifestaciones precursoras, temblores y erupciones menores que, en el caso del Thera, fueron reconocidas como tales y

motivaron una evacuación de la isla Santorini, como lo sugieren los restos de algunas edificaciones bien preservadas por los depósitos volcánicos, y de las cuales en ninguna se han encontrado restos humanos.³ En ambos casos también se generaron tsunamis destructivos y las columnas eruptivas de las erupciones se dispersaron sobre grandes extensiones. Actualmente se piensa que en el caso del Krakatau, este efecto modificó sustancialmente el clima de todo el planeta durante los cuatro años subsiguientes a la erupción, y es muy probable que un fenómeno similar se diera tras la erupción del Thera.

El clímax de las erupciones se desarrolla cuando grandes cantidades de magma, roca volcánica fluida generada a grandes profundidades bajo un volcán, a temperaturas por encima del punto de fusión y muy ricas en gases disueltos, quedan expuestas a presiones relativamente reducidas por ascender a profundidades someras. Al encontrar el magma caminos hacia la superficie, los diversos gases en solución se separan abruptamente de la roca fundida, formando burbujas que se expanden con tal rapidez que en ocasiones se producen explosiones con una potencia equivalente a varias decenas de megatones.

La roca fundida es entonces atomizada por los gases en expansión y el mismo proceso produce una baja en la temperatura que puede solidificar parcial o totalmente los fragmentos de roca, los cuales pueden tener desde la consistencia de un polvo finamente molido (ceniza volcánica), en las fases más explosivas, hasta dimensiones de varios centímetros cuando el proceso explosivo es incompleto. En algunos de estos fragmentos mayores es posible observar las burbujas en el material volcánico vidriado (pómez). La ceniza volcánica puede ser arrastrada a grandes alturas por el proceso eruptivo, penetrar la estratosfera y propagarse horizontalmente, bloqueando la luz solar y produciendo lluvias de fino polvo sobre grandes extensiones.

Los casos de Thera y Krakatau mencionados aquí, aunque no representan de ninguna manera las erupciones más grandes posibles, tienen el doble interés de haber producido una diversidad de manifestaciones y efectos sobre el suelo, la atmósfera y el océano, y debe provocar efectos tan marcados sobre extensas áreas pobladas como para cambiar significativamente el curso de sus historias. Existen también numerosos casos de erupciones con efectos devastadores sobre poblaciones concentradas en áreas relativamente menores alrededor de los volcanes. Tal es el caso de la erupción del año 79 del Vesubio, a la cual se refiere Plinio el Joven en un detallado y objetivo relato, o de las erupciones del Monte Pelée en Martinica, que destruyó la ciudad de St. Pierre en 1902, y de El Chichón en Chiapas que, en 1982, causó cerca de dos mil víc-

² Simkin, T. y Fiske R. Krakatau 1883, *The volcanic eruption and its effects*. Smithsonian Institution Press. Washington D. C., 1983.

³ Heiken G. y McCoy F. (1984) *Caldera development during the Minoan Eruption, Thira, Cyclades, Greece*. Jour. Geophys. Res. 89-B10: 8441-8462.



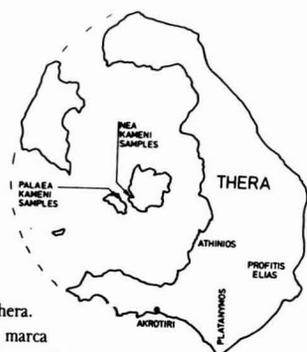
timas. De hecho, durante los siglos XVIII al XX, en los que existen reportes mejor documentados, se estima que en el mundo han perecido más de 250,000 personas por efectos de erupciones volcánicas.

Esta situación nos plantea la necesidad de definir de una manera consistente conceptos como la probabilidad de ocurrencia de un cierto tipo de erupción y el impacto que ésta puede tener sobre el medio y la población. Tales conceptos se pueden reunir en uno solo: riesgo volcánico. El mejor conocimiento del riesgo volcánico (y de cualquier otro riesgo natural) es indispensable para elaborar racionalmente los mecanismos para su mitigación. Dado que las componentes del riesgo pueden analizarse separadamente, tratemos primero algunos aspectos referentes al tamaño o magnitud de las erupciones y sus probabilidades de ocurrencia.

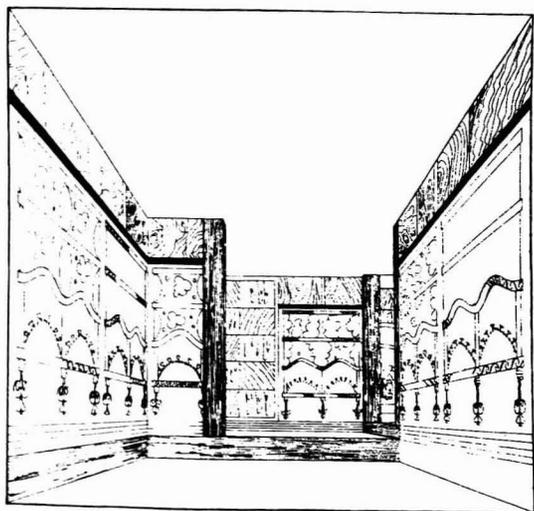
Las erupciones antes mencionadas son sólo algunas de las que han tenido importancia histórica. Actualmente, más de 1,300 volcanes en el mundo son susceptibles de manifestar algún tipo de actividad, y por lo menos unos 600 volcanes han tenido episodios de actividad en tiempos históricos.

Desde luego esas erupciones no siempre tiene un carácter

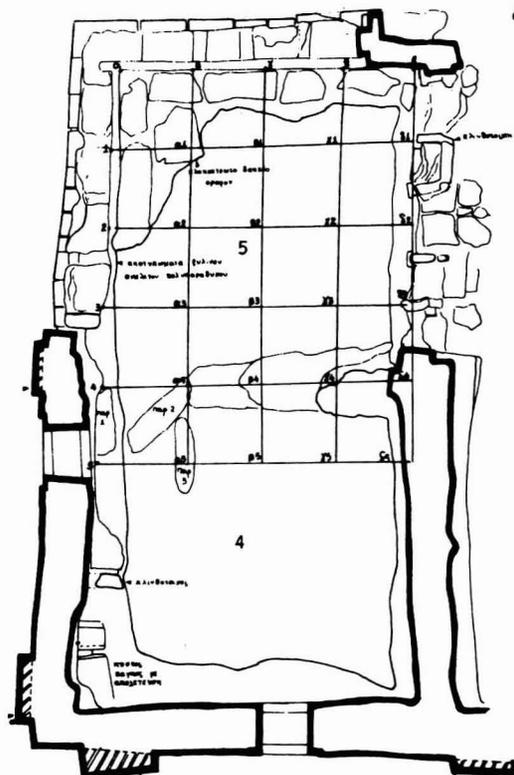
catastrófico. La actividad volcánica se puede dar sobre un amplio rango de formas y de grados de violencia, que pueden manifestarse a través de distintos fenómenos. Así, en la erupción del Krakatau, la destrucción de la isla, la gran columna eruptiva y el tsunami fueron las componentes más destructivas. En erupciones como las del Vesubio, el Monte Pelée o El Chichón, los flujos piroclásticos, nubes ardientes de ceniza volcánica que descienden por los flancos del volcán a gran velocidad, representan el factor más destructivo. Pero también ocurren en el mundo numerosas erupciones de menor violencia. El Paricutin, que nació en 1943, desarrolló una actividad relativamente menos violenta. Si bien hubo explosiones, éstas fueron menores y los flujos de lava que produjeron avanzaron con lentitud y no causaron víctimas. En una erupción del tipo hawaiano, son los flujos de lava que avanzan a velocidades de varios kilómetros o decenas de kilómetros por hora, los que representan el principal mecanismo de transporte de energía, pero carecen de explosividad. Y muchos volcanes del mundo han producido y están produciendo frecuentes erupciones menores, consistentes efusiones moderadas de lava o simplemente en fumarolas.



Mapa de la isla Thera. La línea punteada marca la forma de la isla antes de la erupción



Reconstrucción de una casa de Akrotiri



Plano de Akrotiri, ciudad therana



De aquí puede percibirse la dificultad en cuantificar el tamaño de las erupciones por medio de la asignación de una magnitud. En contraste con los temblores, en los que la energía generada durante la ruptura de grandes volúmenes de roca es transportada por un solo mecanismo, ondas de energía elástica, y cuyas amplitudes y duraciones pueden darnos una medida unívoca del tamaño de la ruptura, las erupciones volcánicas liberan energía por mecanismos muy diferentes. La energía puede entonces repartirse en distintas proporciones entre las diversas manifestaciones de las erupciones. Sin embargo puede definirse una escala de magnitudes de las erupciones basada, por ejemplo, en la energía total que disipan en diversas formas (térmica, cinética, sísmica, demolición total o parcial del edificio volcánico), y en la rapidez con que ésta es liberada.

Desde el año de 1500 hasta la fecha han ocurrido en el mundo 5,940 erupciones a las que se ha podido asignar una magnitud con estos criterios. Un análisis estadístico reciente de esta actividad, muestra una tendencia muy regular a que la probabilidad de ocurrencia de las erupciones explosivas decaiga exponencialmente con su magnitud⁴. Este análisis muestra que en un periodo de tiempo dado, cada magnitud ocurre con una frecuencia 5 a 6 veces menor que la inmediata inferior. Así por ejemplo, si una erupción de magnitud 6, como la de la del Krakatau de 1883 (correspondiente a una liberación total de energía del orden de 6×10^{25} ergs), ocurre en algún lugar del mundo con un periodo medio de ocurrencia de unos 170 años, en promedio ocurren, en otros volcanes del mundo, 5 o 6 erupciones de magnitud 5 (como la de El Chichón en 1982, con una energía liberada del orden de 10^{25} ergs) y unas 30 de magnitud 4 (como la del volcán de Colima en 1913) en el mismo periodo de tiempo.

¿Existe entonces la posibilidad, aunque sea remota, de que en algún momento de la historia de la humanidad, que hasta el momento representa tan sólo un instante de la historia del planeta, se produzca una erupción tan grande como para afectar sustancialmente la estabilidad de áreas del planeta del tamaño de, digamos, un continente?

Esta pregunta es sin duda relevante al problema de la evaluación del riesgo volcánico global. Pero para poder constatarla es necesario ir más allá de los argumentos estadísticos y buscar una respuesta en los principios mismos que gobiernan los procesos terrestres.

La Tierra es un sistema dinámico que a lo largo del tiempo geológico ha evolucionado a tal grado que nos sería imposible vivir en este mismo planeta tal como era hace 4,000 millones de años. El carácter cambiante del planeta lo percibimos a tra-

vés de numerosos fenómenos que se desarrollan sobre diferentes escalas de tiempo. La deriva de los continentes y la formación de montañas ocurren a velocidades del orden de centímetros por año o por década respectivamente. Los terremotos y las erupciones volcánicas explosivas ocurren sobre tiempos del orden de segundos y horas o días respectivamente.

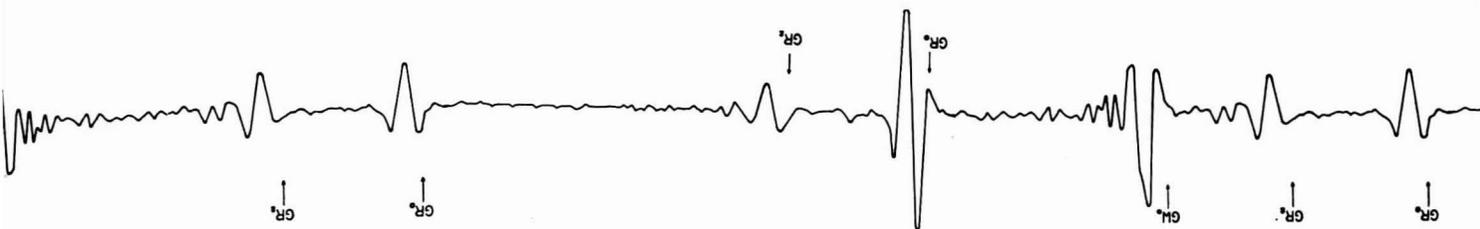
En todos los casos el planeta responde a distintos tipos de esfuerzos mecánicos y procesos termodinámicos manteniendo siempre los principios generales de conservación de masa, energía e ímpetu (o momentum). El balance de las distintas formas de energía disponibles en el interior de la Tierra y la naturaleza de los materiales que la constituyen, es lo que en un momento dado puede poner un límite a la cantidad de energía que puede ser concentrada en una pequeña región de la superficie para ser liberada como un solo evento de corta duración.

Así, la magnitud máxima que se ha observado en un terremoto corresponde a una liberación de energía sísmica en el orden de 10^{25} ergs. y una de las erupciones más grandes que se han producido como un solo evento es aquella que formó la caldera volcánica de Yellowstone hace unos 630,000 años, la que liberó del orden de 10^{28} ergs, cantidad que inciden-



El barco Berouw como se encontró, casi intacto, 2 1/2 km. tierra adentro

⁴ De la Cruz Reyna, S. *Poisson-distributed patterns of eruptive activity*. Bulletin of Volcanology, (1990).



talmente corresponde al flujo de calor del planeta en un año.

Podemos concebir a la Tierra como una especie de máquina térmica, obediente de las leyes de la termodinámica, en la cual las fuentes de energía de distinta índole (trazas de materiales radiogénicos, energía interna remanente del colapso gravitatorio primigenio y de la separación manto-núcleo, etcétera) mantiene su interior a muy alta temperatura, estimada en el orden de 4,000 grados absolutos. El calor que fluye desde el interior hacia la superficie, donde es radiado al espacio, es entonces la forma de energía que esta "máquina" transforma en movimiento, fundamentalmente a través de mecanismos convectivos. Este movimiento se manifiesta en la superficie como los lentos procesos que a escala global desplazan las grandes placas tectónicas que conforman su corteza superficial, acarreado continentes enteros como parte ellas.

Pero estos movimientos disipan a su vez energía en forma de calor adicional, dado que los materiales que componen al planeta tienden a oponerse al movimiento por mecanismos disipativos como son la fricción o la viscosidad. Es esta energía secundaria, disipada principalmente en regiones definidas, coincidentes con las márgenes de las placas donde los procesos

de fricción y por ende los esfuerzos son máximos, la que en gran medida contribuye a que la Tierra no se comporte como un sistema casi estacionario, que cambia muy lentamente en el tiempo, como ocurriría en ausencia de esta disipación secundaria. Al concentrarse la disipación de energía en los lugares donde los esfuerzos y las deformaciones son mayores, generan zonas bien definidas de alta actividad sísmica y volcánica que se manifiestan sobre escalas relativamente más cortas de tiempo.

Por la naturaleza misma de los procesos que gobiernan a las máquinas térmicas, tal energía secundaria no puede igualar o exceder a las fuentes primarias de calor. De allí que deban existir límites tanto al tamaño de ese tipo de eventos como a la frecuencia con que pueden ocurrir. Así por ejemplo, una gran erupción como la de Yellowstone aquí mencionada, por haber tomado una cantidad apreciable del monto energético disponible, no puede ocurrir frecuentemente. De hecho, de las consideraciones anteriores se ha podido establecer que el producto de la razón media de ocurrencia global por una magnitud dada es una constante. Esto significa que mientras mayor es la energía disipada por una erupción tanto más rara es su ocurrencia. Esto nos daría un periodo medio global de recurrencia del orden de 10% años para erupciones del tamaño de la de Yellowstone. Ello significaría que estadísticamente es concebible la ocurrencia de una erupción como esa, capaz de producir volúmenes de magma en el orden de los 1000 km cúbicos en un sólo evento (equivalente a una magnitud volcánica de 9.5), sobre periodos de tiempo comparables al que lleva el homo sapiens sobre la Tierra.

Los argumentos anteriores nos han provisto de algunas ideas generales sobre la distribución temporal de las erupciones. En lo que respecta a la distribución espacial de los volcanes activos (y de las regiones de alta sismicidad), es claro que coinciden en general con las márgenes de las placas tectónicas, zonas de mayor disipación que forman largos cinturones que rodean a la Tierra. Krakatau es sólo uno de los más de 120 volcanes que conforman el arco de islas de Sumatra, Java y las Sunda Thera es uno de los seis volcanes activos de Grecia y los 14 volcanes que han mostrado episodios de actividad en tiempos históricos en el cinturón volcánico mexicano son sólo una pequeña proporción de los casi 200 conos que conforman las distintas regiones volcánicas del país.

El nivel de riesgo, en el sentido mencionado aquí, combinación de probabilidad de ocurrencia con impacto sobre el medio, que puede asociarse a distintos volcanes mexicanos, no ha sido del todo determinado... ¿Cuál es la probabilidad de que un volcán dado produzca una erupción de cierto tamaño y características? ¿Cuáles serían los efectos de tal actividad sobre el medio, los asentamientos humanos y los medios de producción? La respuesta a estas preguntas requiere sin duda





un enfoque multidisciplinario que involucre aspectos vulcanológicos, sociales y políticos.

La vulcanología misma no puede considerarse como una sola disciplina, dada la gran diversidad de ramas que en ella convergen. Así por ejemplo, mientras el petrólogo describe el origen, evolución y clasificación de las rocas volcánicas, los geofísicos se concentran en el proceso eruptivo considerado como fenómeno termodinámico, o en analizar la dinámica del mismo o bien en estudiar e interpretar las manifestaciones sísmicas, anomalías gravimétricas, magnéticas y otras asociadas a la actividad volcánica o sus precursores. El estratígrafo ígneo estudia los depósitos de los productos de las erupciones volcánicas y reconstruye la historia y desarrollo de una erupción en detalle, mientras el geoquímico analiza e interpreta las distribuciones de elementos, isótopos y compuestos básicos de los productos volcánicos y el físico atmosférico o el especialista en radiaciones solares se interesa en el efecto de las cenizas y gases volcánicos sobre la atmósfera y el clima.

El número de especialistas en México ha sido suficiente para cubrir estos aspectos en todos los volcanes del país que lo

ameritan, con la profundidad que se hace en los países desarrollados con niveles de riesgo comparables y aun menores que el nuestro, los cuales cuentan con cuadros de investigación en las diversas ramas de la vulcanología entre 50 y 100 veces más numerosos que los nuestros. Y no sólo los aspectos propiamente vulcanológicos requieren mayor desarrollo. El estudio del impacto de un fenómeno eruptivo marca una frontera entre los aspectos formalmente vulcanológicos y aquéllos pertinentes a las ciencias sociales. ¿Cómo es la respuesta pública antes, durante y después de una crisis volcánica? Sólo la comprensión del fenómeno mismo y sus efectos pueden permitir al investigador social y al funcionario responsable analizar y modelar la respuesta del sistema social y económico ante una crisis. Lamentables experiencias recientes se tienen, cuando la falta de preparación y la poca comunicación y credibilidad de la comunidad científica se traducen en inacciones que conducen al desastre, como fue el caso de la actividad del volcán Nevado de Ruiz en Colombia. Allí, una erupción volcánica relativamente pequeña (a la que podría asociarse una magnitud cercana a 3) disparó una avalancha de lodo producido por la mezcla de ceniza, nieve y agua, que devastó un área considerable y produjo 25,000 víctimas.

El desarrollo actual de todos los aspectos de la vulcanología y de las tecnologías de detección y reconocimiento de fenómenos precursores a las erupciones permiten, si se cuenta con los fondos adecuados, instalar en los volcanes que se consideren de riesgo equipos de vigilancia y monitoreo con una alta capacidad de pronóstico de las erupciones, aun de las menores. Pero esto puede ser de poco valor si el sistema social no cuenta con los mecanismos que le permitan responder ante tales señales. En el Nevado de Ruiz se detectaron los precursores del evento destructivo casi seis semanas antes de su ocurrencia, y probablemente cualquier otro país latinoamericano hubiera adolecido de la misma falta de respuesta pública que Colombia.

Sin embargo aún estamos a tiempo de conseguir lo que aparentemente lograron aquellos antiguos habitantes de Santorini hace 34 siglos: reconocer cuándo existe un riesgo y aprender a tomar una decisión cuando las circunstancias indican que éste excede un valor aceptable. Actualmente diversos organismos están instalando algunos dispositivos de monitoreo en los volcanes Colima, Tacaná, Popocatepetl y El Chichón. Se han establecido también mecanismos de protección civil a los niveles federal y estatal que no existían antes del terremoto de septiembre de 1985. Esta situación es, sin duda alguna, mucho mejor que la que se tenía al inicio de la década de los ochentas. Pero aún no alcanza el nivel de prevención y preparación que corresponden a un país con el nivel de riesgo volcánico que tiene México. Confiamos que en la década de los noventas se logre. ◇

