

LOS PELIGROS VOLCÁNICOS Y SU MITIGACIÓN

Gerardo Carrasco Núñez

Instituto de Geología, U.N.A.M., Cd. Universitaria, circuito científico, 04510 México, D.F.

Email: gerardoc@servidor.unam.mx

INTRODUCCIÓN

Nuestro planeta es afectado por una gran variedad de desastres naturales, así como por otros que resultan de la intervención directa o indirecta del hombre. Las catástrofes naturales más frecuentes se deben a perturbaciones atmosféricas que ocasionan inundaciones e impresionantes tormentas responsables de un gran número de muertes. Las sequías y los terremotos son los desastres naturales más frecuentes y que más muertes ocasionan (Tilling, 1993).

Comparados con estos desastres, la actividad volcánica queda en un segundo plano de importancia, pues los eventos son menos frecuentes y sus efectos sobre la población en términos de muertes y pérdidas materiales son notablemente menores. A pesar de ello, cada día existe un mayor número de personas que se encuentran potencialmente expuestas a la ocurrencia de un desastre ocasionado por una actividad volcánica inesperada. Esto se debe en parte a que, a pesar de los grandes avances científicos y tecnológicos en geociencias, la población ha crecido de manera exponencial y, en muchos casos, ésta ha tendido a concentrarse preferencialmente en las regiones fértiles que se forman como resultado de la actividad volcánica, incrementando así las posibilidades de que al haber un evento eruptivo éste pueda ser cada vez más desastroso.

Existen aproximadamente 650 volcanes que han hecho erupción en tiempos históricos y han afectado a aproximadamente 300,000 personas en todo el mundo. De estos volcanes, aproximadamente 50 entran en actividad cada año, aunque sin causar grandes daños. Alrededor del 70 % de las muertes ocurridas en el presente siglo por causa de erupciones volcánicas están asociadas a solamente dos erupciones catastróficas: Monte Peleé en 1902 y Nevado de Ruiz en 1985 (Tilling, 1993). El promedio de personas muertas por año debido a erupciones volcánicas para este siglo es de 880, lo cual muestra un incremento con relación a los siglos pasados que era de 620 (Blong, 1984), siendo evidente que para épocas pasadas los peligros indirectamente asociados al vulcanismo fueron la causa principal de las muertes. Las cifras anteriores también reflejan los avances en las comunicaciones y la pronta asistencia internacional ante las catástrofes naturales.

Siendo ésta la Década Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales, existe una preocupación a nivel mundial por aplicar programas efectivos para aliviar los efectos originados por los desastres naturales. En México, la violenta reactivación del volcán Chichón en Chiapas en 1982, que causó

la muerte de alrededor de 2,000 personas, ha sido el único evento volcánico reciente de tipo catastrófico. El país cuenta con otros 9 volcanes activos, con mayor o menor actividad, que pueden reanudar su actividad eruptiva en cualquier momento, lo que hace imprescindible la puesta en marcha de programas efectivos de mitigación volcánica.

PELIGROS VOLCÁNICOS

Existen varios tipos de eventos volcánicos de gran peligrosidad que requieren ser estudiados en sus características reológicas, origen y mecanismos de emplazamiento para poder llevar a cabo una evaluación más adecuada de los peligros potenciales que pueden representar para una región volcánicamente activa. Se habla de evaluación de peligros y no de riesgos, ya que este último término implica la posibilidad de pérdidas, sean humanas o materiales. Entonces, el riesgo implica la conjugación de 3 factores: la población y los bienes materiales amenazados, la vulnerabilidad o proporción de posible afectación, y la probabilidad de ocurrencia de un peligro volcánico determinado (Fournier d'Albe, 1979).

Cuando se piensa en volcanes, se considera generalmente que los productos que ellos emiten se restringen primordialmente a flujos de lava y a emisión de cenizas que son comúnmente dispersadas por los vientos prevaecientes al momento de ocurrir una erupción. Esto es verdad si se toma en cuenta la erupción de volcanes pequeños como el Parícutín que, durante un periodo de 9 años, arrojó apreciables cantidades de ceniza, al igual que algunos derrames de lava. Sin embargo, existe una amplia gama de volcanes, desde aquellos a los que se asocia una actividad casi exclusivamente de naturaleza efusiva, consistente en la emisión tranquila de lavas relativamente fluidas (como en el caso de los volcanes hawaianos), hasta volcanes altamente explosivos que emiten volúmenes considerables de materiales volcánicos como las calderas resurgentes del tipo de Los Hornos, Puebla o Amealco, Querétaro. Los volcanes mexicanos de gran tamaño que caracterizan el paisaje de la parte central del país (Popocatepetl, Citlaltépetl, Nevado de Toluca, La Maliche, Volcán de Colima, etc.) están constituidos por capas alternantes de depósitos piroclásticos y lavas, y son conocidos como estratovolcanes. Estos volcanes muestran una evolución muy compleja que les permite tener periodos largos de actividad, separados por periodos prolongados de reposo. Este tipo de volcanes, así como algunos otros de naturaleza explosiva, presentan una gran variedad de otros peligros, algunos de ellos relacionados directamente con la actividad volcánica, mientras

que otros son el resultado indirecto de la misma. Los principales peligros asociados con la actividad volcánica están sintetizados en la Tabla 1 y son descritos más adelante.

Los peores desastres asociados a eventos volcánicos peligrosos, contrariamente a lo que podría suponerse, no se relacionan a la emisión de flujos de lava o de material piroclástico de caída, sino a eventos como los flujos piroclásticos y los flujos de lodo.

En la Tabla 1 se describen los distintos peligros volcánicos.

Tabla 1. Principales peligros volcánicos

A. Peligros directamente asociados a la actividad volcánica:

- a) Flujos de lava y domos volcánicos
- b) Flujos piroclásticos
- c) Oleadas piroclásticas (surges) y explosiones dirigidas
- d) Flujos de lodo y lahares
- e) Avalanchas de escombros
- f) Caída de tefra y de proyectiles balísticos
- g) Gases volcánicos
- h) Sismos volcánicos

B. Peligros indirectamente asociados a la actividad volcánica:

- a) Flujos de lodo e inundaciones
- b) Tsunamis (maremoto)
- c) Efectos atmosféricos
- d) Hambre y enfermedades

A) PELIGROS DIRECTAMENTE ASOCIADOS A LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA

a) Flujos de lava y domos volcánicos

Los flujos de lava son corrientes de material fundido que se desplazan a velocidades que varían dependiendo de su composición. Varían desde unos cuantos metros hasta cientos de metros por hora para lavas de composición silícica, hasta varios kilómetros por hora para lavas basálticas. Sólo en casos excepcionales los derrames de lava pueden alcanzar velocidades que rebasen los 30 km por hora, como las estimadas en el volcán Nyragongo, Zaire, en donde perecieron 300 personas (Tazieff, 1977). La distribución y morfología de los derrames de lava están determinados por la tasa a la que son extrudidas, esto es, a la cantidad de material emitido en un tiempo determinado. Entre mayor sea la tasa de efusión, mayor será el área cubierta por los flujos de lava. Las lavas dacíticas o riolíticas suelen formar lavas gruesas y de corta extensión y tienden a desarrollar estructuras verticales más que horizontales formando los domos volcánicos; en contraste, las lavas basálticas son más extensas y delgadas.

Los flujos de lava pueden causar serios daños materiales por efecto de sepultamiento, destrucción e incendio. En algunos casos pueden bloquear corrientes fluviales, formando represas naturales, cuyo rompimiento puede causar inundaciones a mediana escala. A pesar de ello, todos los flujos de lava son considerados, en general, como materiales relativamente

viscosos, cuyos efectos pueden ser eventualmente controlados, aplicando medidas de mitigación apropiadas.

b) Flujos piroclásticos

Son corrientes incandescentes con una alta concentración de partículas piroclásticas transportadas en un medio gaseoso altamente fluidizado, que se desplazan a grandes velocidades por las pendientes de los volcanes, arrasando y quemando todo lo que se encuentra a su paso. El flujo principal va comúnmente acompañado por una nube compuesta por cenizas que llega a extenderse más allá de los límites del depósito principal de flujo.

Los flujos piroclásticos son comúnmente canalizados a través de los valles y barrancas circundantes a un volcán; sin embargo, cuando son muy voluminosos, o contienen gran cantidad de gases, estos últimos le imprimen un carácter altamente energético que permite que los flujos piroclásticos sean capaces de remontar barreras topográficas de hasta cientos de metros (Figura 1). El desastre más importante asociado con el emplazamiento de flujos piroclásticos ocurrió en 1903, en la ciudad de San Pierre, Martinica; en donde alrededor de 29,000 personas perdieron la vida al hacer erupción el volcán Peleé (Tilling, 1993).

c) Oleadas piroclásticas (surges) y explosiones dirigidas

Las oleadas piroclásticas son corrientes turbulentas incandescentes similares a los flujos piroclásticos, pero con mayor cantidad de gases que le imprimen al flujo un carácter altamente energético, que también les permite sobrepasar obstáculos topográficos de hasta cientos de metros de altura. Su capacidad de sobrepasar obstáculos topográficos depende del volumen del material involucrado, su contenido de gases y la distancia del centro emisor. Se ha demostrado que su emplazamiento sigue muchas veces una especie de movimiento ondulatorio turbulento similar a oleajes de gran energía.

Las oleadas pueden ser calientes o frías. Las calientes están asociadas generalmente a flujos piroclásticos (Figura 1) formándose, en su frente una nube de ceniza que acompaña al flujo en su parte superior, o al colapso gravitacional de una columna eruptiva. En cambio, las oleadas piroclásticas frías son el resultado de actividad freática o freatomagmática, cuando el agua subterránea es calentada por una fuente de calor y produce explosiones violentas dirigidas lateralmente que dan lugar a la formación de mares, conocidos en México como xalapascos.

Las explosiones dirigidas lateralmente son ocasionadas por una súbita despresurización del sistema magmático, que arroja de manera violenta corrientes infladas de gases y partículas fragmentarias, las cuales se desplazan a muy altas velocidades (mayores a los 100 km/h). Estos flujos son similares en muchos aspectos a las oleadas y a los flujos piroclásticos. Se ha observado que, en algunas ocasiones, las explosiones dirigidas lateralmente están acompañadas por una gran onda de choque atmosférica que, dependiendo de su intensidad, podría causar

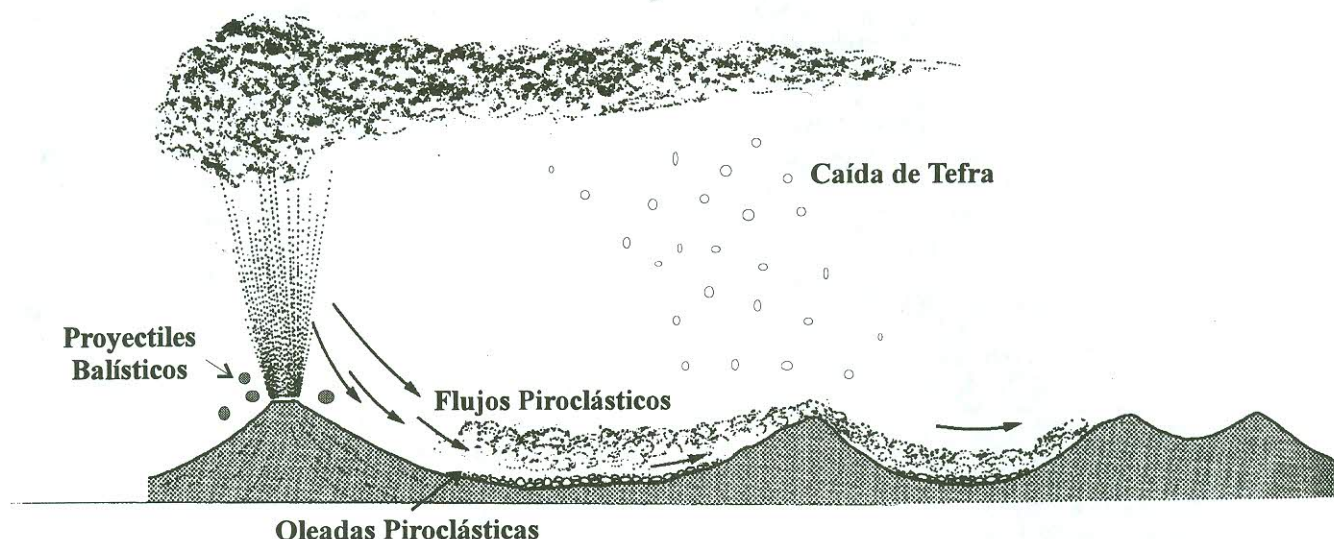


Figura 1. Esquema idealizado de los fenómenos eruptivos principales asociados a un evento volcánico de naturaleza explosiva que produce una columna eruptiva.

daños a estructuras cercanas. El ejemplo más reciente de este fenómeno ocurrió en la erupción del Monte Santa Helena, Washington en 1980 (Hoblitt et al., 1981).

d) Flujos de lodo y lahares

Son corrientes formadas por una mezcla de agua y una alta concentración de fragmentos rocosos derivados de un área volcánica que fluyen rápidamente por el drenaje que rodea a los volcanes. La formación de lahares o flujos de lodo requiere de 3 ingredientes esenciales: 1) agua, 2) materiales sueltos o recién desintegrados por efecto de actividad explosiva y 3) laderas de pendiente alta.

Los flujos de lodo se pueden asociar directa o indirectamente a la actividad volcánica (Tabla 2). Es común que se formen durante las erupciones, cuando cuerpos de agua o nieve son invadidos por flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas o avalanchas de escombros, produciendo una mezcla densa con la consistencia parecida a la del cemento que, a pesar de su alta viscosidad aparente, se mueven a altas velocidades por los canales del drenaje, y pueden extenderse más allá de los radios de distribución de otros productos piroclásticos.

Uno de los desastres volcánicos más recientes fue originado en Armero, Colombia en 1985, cuando el volcán Nevado de Ruiz tuvo una erupción explosiva moderada que emitió flujos piroclásticos que rápidamente erosionaron la parte superior del casquete de hielo que corona su cima. Se formaron lahares que se canalizaron por las barrancas circundantes y alcanzaron en menos de 3 horas la ciudad de Armero, localizada a 72 km del cráter, y mató a más de 23,000 personas (Pierson et al., 1990).

Tabla 2. Origen de los flujos de lodo o lahares.

I. Resultado directo e inmediato de una erupción:

1. Erupción a través de un lago, o de un cuerpo de hielo.
2. Lluvias intensas durante la erupción.
3. Flujo de materiales calientes sobre ríos, o sobre nieve o hielo.

II. Indirectamente relacionado a una erupción:

1. Desplazamiento de detritos saturados en agua provocados por temblores.
2. Desbordamiento y rápido drenaje de lagos cercanos a un cráter.
3. Pérdida de agua de grandes avalanchas originadas por el colapso de un sector del volcán.

III. No relacionado a actividad volcánica contemporánea:

1. Movilización de partículas sueltas por lluvia o agua de fusión de hielo.
2. Colapso gravitacional de detritos inestables saturados en agua y ricos en arcillas.
3. Desbordamiento de presas por sobrecarga.
4. Intemperismo y erosión activos en relieves pronunciados.
5. Colapso súbito por efecto de congelación y fusión de hielo y nieve.

e) Avalanchas de escombros

Son deslizamientos en masa de partes completas del volcán originados por el colapso sectorial del edificio volcánico (Figura 2), inducido ya sea por intrusiones magmáticas, por alteración hidrotermal debido a una intensa actividad fumarólica, por terremotos, o por otras condiciones que favorecen la inestabilidad del edificio (Tabla 3). Estos eventos representan escenarios catastróficos en los que suelen combinarse otros procesos volcánicos en forma casi simultánea (oleadas y flujos piroclásticos) como ocurrió en el caso del Monte Santa Helena, Washington en 1980 (Lipman y Mulineaux, 1981). Aunque estos eventos suelen estar acompañados por actividad sísmica precursora y una notoria deformación del flanco en donde podría

favorecerse su colapso, en muchas ocasiones han ocurrido sin alguna señal premonitoria, por lo que su eventual ocurrencia debe ser evaluada con atención.

Los depósitos de avalancha tienen comúnmente una amplia distribución llegando en algunos casos, como en el Popocatépetl, a alcanzar distancias mayores a los 70 km (Siebe et al., 1995).

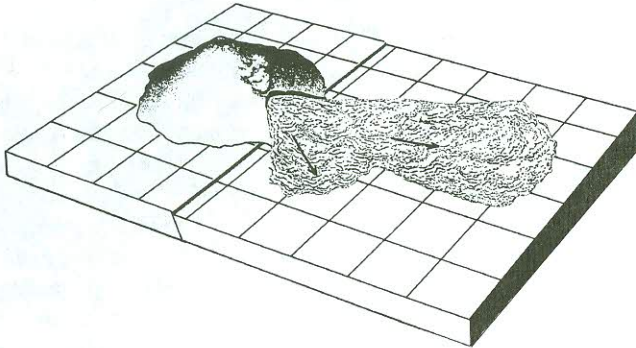


Figura 2. Ocurrencia de un depósito de avalancha producido por el colapso parcial de un edificio volcánico. En este caso particular, la presencia de una zona de falla en el subsuelo favorece la destrucción parcial de uno de los flancos del volcán.

Tabla 3. Inestabilidad de un edificio volcánico.

A. Condiciones que favorecen el colapso estructural de un edificio volcánico.

1. Intrusión magmática
2. Alteración hidrotermal intensa debida a actividad fumarólica
3. Cambios en el gradiente de presión de poro (saturación de agua)
4. Erosión de pendientes de soporte y pendientes muy fuertes
5. Fracturamiento por congelamiento de hielo
6. Carga de hielo y nieve
7. Distribución concéntrica de domos, conos o fracturas
8. Fracturamiento radial y distribución de diques
9. Efecto de contrarefuerzo producido por:
 - a) parejas de volcanes
 - b) orientación del sustrato rocoso

B. Mecanismos que provocan el colapso del edificio volcánico

MAGMÁTICOS

- a) Intrusión magmática y deformación
- b) Erupción
- c) Explosión dirigida lateralmente
- d) Temblores volcánicos

NO MAGMÁTICOS

- a) Inestabilidad de taludes
- b) Estructurales
 1. Denso fracturamiento
 2. Saturación de agua
 3. Fusión de hielo y nieve
- c) Temblores tectónicos

f) Caída de tefra y proyectiles balísticos

El material de caída es proporcionado por una columna eruptiva vertical, cuya altura depende de la temperatura del material expelido, de la tasa de emisión del mismo, del diámetro

del conducto y del carácter energético de la erupción. Estos factores, al igual que la dirección y velocidad de los vientos dominantes, controlan la distribución de las partículas eyectadas, cuyo radio de influencia quedará restringido a unos cuantos kilómetros, comúnmente menos de 15 km del centro emisor (Figura 1). Los fragmentos de gran tamaño y muy densos seguirán trayectorias balísticas.

Las variaciones espaciales (dependientes de la altura de la columna), temporales (dependientes de la época del año) y del comportamiento del viento, deben ser consideradas para pronosticar las posibles áreas de afectación por caída de material piroclástico (Delgado et al., 1995).

El material emitido comprende pómez y fragmentos de roca derivados de la fragmentación de las rocas preexistentes que constituyen parte del conducto volcánico. La fracción más fina (< 2 mm de diámetro) es denominada ceniza y generalmente tiene una amplia distribución en torno al volcán y representa el peligro que mayor alcance presenta.

g) Gases volcánicos

Los sistemas magmáticos activos contienen una gran cantidad de gases en solución que escapan a la superficie a través de los volcanes, tanto en reposo como cuando están en actividad. Los gases más importantes son: vapor de agua, óxidos de azufre, dióxido de carbono, monóxido de carbono, ácido sulfhídrico, cloro y flúor. Algunos de estos gases son tóxicos (óxidos de azufre, cloruros y fluoruros) y al combinarse con el agua pueden formar ácidos venenosos que pueden causar daños importantes al sistema respiratorio, a la piel o a los ojos de seres humanos y animales. También pueden causar severos daños a la vegetación y a los recursos hídricos en general, contaminándolos por completo cuando son absorbidos.

Los óxidos de azufre pueden ser reconocibles por su olor característico, pero otros como el anhídrido carbónico y el monóxido de carbono son inodoros y por lo tanto, comúnmente imperceptibles por el hombre; incluso suelen ser más densos que el aire y, por ello, se desplazan cerca del nivel del suelo, pudiendo causar la muerte por asfixia. Entre mayor sea la concentración de los gases mayor será el efecto que causen, por lo que hace que las zonas más cercanas (comúnmente dentro de un radio de 10 km del punto de emisión) sean las más peligrosas. El efecto de estos gases será disminuido por la combinación con el aire conforme aumente la distancia. Exhalaciones volcánicas con altas concentraciones de dióxido de carbono causaron la muerte de varias personas en el lago volcánico Nyos, Camerún, en 1986 (Kling et al., 1987).

h) Sismos volcánicos

Contrario a lo que mucha gente supone, los sismos asociados a la actividad volcánica son típicamente someros y de baja magnitud ($M \leq 5$) por lo que, salvo algunas excepciones, no llegan a causar daños importantes en las cercanías del volcán. En algunos casos llega a ocurrir la ruptura de los materiales

rocosos superficiales, manifestándose como fallas con desplazamientos pequeños.

B. PELIGROS INDIRECTAMENTE ASOCIADOS CON LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA.

a) Flujos de lodo e inundaciones

Los flujos de lodo también pueden generarse de manera secundaria por lluvias torrenciales que remueven el material suelto que quedó depositado por erupciones anteriores. Muchas áreas tropicales que son comúnmente azotadas por tifones o huracanes son especialmente susceptibles a este tipo de peligros, aún años después de haber ocurrido una erupción explosiva. Tal es el caso del volcán Pinatubo, Filipinas que, aún después de la erupción de 1992, aún sigue desarrollando lahares año con año (Pierson et al., 1992).

b) Tsunamis (maremotos)

Son olas o periodos de oleaje de proporciones gigantescas que se originan por el desplazamiento súbito de masas de agua por efecto de sismos de gran magnitud o deslizamientos inducidos por actividad volcánica. El ejemplo más citado es la erupción del volcán Krakatoa, Indonesia en 1883, en donde más de 30,000 personas murieron por efecto de los tsunamis inducidos por violentas explosiones volcánicas. Algunos sistemas de alertamiento han sido implementados en zonas costeras para procurar la evacuación temprana de los pobladores de áreas amenazadas.

c) Hambre y enfermedades

Las causas que han favorecido la mortandad de la gente han sido, en muchas ocasiones, el hambre y las enfermedades, atribuidos a efectos secundarios o indirectamente relacionados a la actividad volcánica. Posterior a la erupción del volcán Tambora, Indonesia en 1815, se ha estimado que alrededor de 80,000 personas murieron debido al hambre, en tanto que solo cerca de 12,000 personas fallecieron por efectos directos de la erupción.

d) Efectos atmosféricos

Grandes columnas eruptivas pueden inyectar en la estratosfera cantidades importantes de material piroclástico que, por su tamaño pequeño y densidad baja puede permanecer en suspensión por mucho tiempo, causando problemas a la aviación y pudiendo afectar las condiciones climáticas globales al disminuir la incidencia de los rayos solares sobre la superficie de la Tierra. Un ejemplo reciente ocurrió en Alaska en 1989, cuando un avión comercial estuvo a punto de caer estrepitosamente al fallar las turbinas al momento de atravesar una nube de cenizas (Casadevall, 1994).

MITIGACIÓN DE PELIGROS VOLCÁNICOS

Es evidente que es prácticamente imposible impedir que ocurra una erupción volcánica; sin embargo, hay mucho por hacer en cuanto a la reducción y mitigación de los peligros potenciales que pueden amenazar a las áreas que rodean a los volcanes potencialmente activos.

Las características y el grado e intensidad de la actividad histórica y reciente de un volcán permitirán sugerir el tipo de programa de mitigación más apropiado para ser aplicado. Lo ideal es que un volcán se encuentre en un periodo de reposo que permita el desarrollo de programas básicos de investigación geológica y geofísica con los cuales se pueda llevar a cabo una caracterización integral y detallada del volcán en sus aspectos petrológicos, geoquímicos, estratigráficos y evolutivos. Estos estudios proporcionarán una mejor idea sobre el comportamiento eruptivo pasado que permita explicar el comportamiento presente, y con ello hacer pronósticos acerca del comportamiento futuro. Este tipo de investigaciones requieren de meses y hasta años de arduo trabajo que no siempre es posible desarrollar con el debido tiempo pues, en muchas ocasiones, los volcanes son reactivados de manera repentina. También se tiene el caso de aquellos volcanes que han permanecido inactivos por largos periodos, o bien, de aquellos de los que se tiene un conocimiento tan pobre que ni siquiera se les había considerado como volcanes activos de alto riesgo. En tales casos, no hay tiempo para detenerse a examinar las características eruptivas del volcán que sirvan de base para descifrar su historia eruptiva, por lo que es necesario tomar medidas improvisadas de emergencia que puede conllevar a errores serios en las estrategias. En función del carácter prioritario que se requiera, es posible proponer programas de mitigación a corto y a largo plazo.

Conociendo el carácter destructivo de la actividad volcánica en sus diferentes grados e intensidades, se pueden tomar algunas medidas de prevención, reducción y protección para las poblaciones y los bienes materiales que se encuentran amenazados por la potencial reactivación de un volcán. Esto también involucra la adecuada preparación de la población en caso de desastres, planificando las medidas de emergencia en el caso de una contingencia volcánica, desarrollando una efectiva comunicación entre la comunidad científica, las autoridades responsables de la protección civil, y la población que potencialmente puede ser afectada (Figura 3).

A) PROGRAMAS DE MITIGACIÓN A LARGO PLAZO

Los programas a largo plazo deben conducir idealmente a un programa general que contemple todos los pasos que deberían seguirse para una efectiva mitigación del riesgo volcánico. Estos incluyen los estudios preliminares que permiten identificar a los volcanes de mayor peligrosidad, las investigaciones detalladas sobre su historia eruptiva que servirán de base para la elaboración de los mapas de zonificación de los peligros.



Figura 3. Esquema piramidal que muestra las bases sobre las cuales debe estar soportado un programa efectivo de mitigación de los peligros y riesgos volcánicos, indicando las entidades responsables y las acciones que deben ejecutar (modificado de Tilling, 1993).

a) Identificación de volcanes de alto riesgo

A nivel nacional, la primera tarea que debe emprenderse es la de elaborar un catálogo de los volcanes que representan un riesgo alto. Esta es una meta que solo puede ser cubierta en el largo plazo, ya que requiere del estudio cuidadoso de amplias regiones volcánicas, tarea que en México suele tropezarse con numerosos obstáculos, ya que el número de volcanes es muy grande para el reducido grupo de científicos especializados en el tema; además, los equipos y recursos indispensables son escasos, aún en países desarrollados como E.U.A., Islandia, Japón o Italia.

Los criterios hasta ahora propuestos (Tabla 4) para determinar si un volcán se considera o no de alto riesgo (Yokoyama et al., 1984) deben ser revisados cuidadosamente para evitar dejar a un lado volcanes que por sus peculiares características no se ajusten a esos criterios. Así, por ejemplo, el volcán Chichón, siguiendo esos criterios, no hubiera sido identificado en forma previa a su erupción de 1982 como un volcán de alto riesgo.

Una vez identificados los volcanes de alto riesgo, debe desarrollarse una estrategia para realizar una adecuada evaluación de los peligros volcánicos basada en un estudio detallado sobre el comportamiento eruptivo del volcán.

b) Reconstrucción de la historia eruptiva

El conocimiento de la historia eruptiva de un volcán es un aspecto fundamental que debe ser considerado para una efectiva mitigación de sus peligros potenciales. Se realiza compilando la información sobre la actividad histórica del volcán, junto con el registro geológico de las erupciones pasadas.

Los datos históricos son muchas veces difíciles de evaluar, ya que en su mayoría están basados en observaciones realizadas por personas que no fueron entrenadas para ello, o que tienen

Tabla 4. Criterios propuestos por Yokoyama et al. (1984) para la identificación de volcanes de alto riesgo. Se asigna el puntaje de 1 (uno) por cada criterio aplicable y 0 (cero) si el criterio no es aplicable (modificado de Tilling, 1993).

GRADO DE PELIGRO	PUNTAJE
1) Alto contenido de sílice en los productos eruptivos (andesita/dacita/riolita)	
2) Actividad explosiva de importancia en los últimos 500 años	
3) Actividad explosiva de importancia en los últimos 5 000 años	
4) Flujos piroclásticos en los últimos 500 años	
5) Flujos de lodo en los últimos 500 años	
6) Tsunami destructivo en los últimos 500 años	
7) Área afectada por destrucción en los últimos 5000 años es > 10 km ²	
8) Área afectada por destrucción en los últimos 5000 años es > 100 km ²	
9) Ocurrencia frecuente de enjambre sísmicos de origen volcánico	
10) Ocurrencia de deformación significativa del suelo durante los últimos 50 años	
GRADO DE RIESGO	
1) Población bajo riesgo > 100	
2) Población bajo riesgo > 1 000	
3) Población bajo riesgo > 10 000	
4) Población bajo riesgo > 100 000	
5) Población bajo riesgo > 1 000 000	
6) Hubo víctimas en tiempos históricos	
7) Se ha evacuado la zona debido a erupciones en tiempos históricos	
PUNTAJE FINAL	

limitaciones en su manera de describir de manera apropiada y objetiva las observaciones de los fenómenos eruptivos, haciendo muchas veces que la información sea poco confiable y por lo tanto de poca utilidad. En los mejores casos, los depósitos de las erupciones recientes están aún preservados y se tiene una buena documentación en fotografías y reportes detallados que describen las características de las erupciones. Entre más detallados y completos sean los estudios sobre la actividad pasada del volcán, más fácilmente se podrán documentar sus patrones evolutivos y posibles tendencias recurrentes o ciclos de actividad volcánica, así como los rangos de magnitud y frecuencia de los eventos explosivos y efusivos más importantes.

Para llevar a cabo la reconstrucción de la historia eruptiva del volcán es necesario determinar su origen, carácter (texturas y estructuras presentes), composición, distribución, edad, relaciones estratigráficas y frecuencia de ocurrencia los diferentes tipos de depósitos y eventos. Con esta información se puede integrar una secuencia estratigráfica que indique el orden en que ocurrieron los diferentes eventos involucrados, definiendo cual es su magnitud y frecuencia.

c) Zonificación de los peligros volcánicos

Los peligros volcánicos deben ser representados de manera gráfica a través de mapas de peligros en donde se muestren de manera directa cuales son las áreas que deben ser evacuadas o

evitadas en el caso de una reactivación, así como proporcionar las directrices que deben seguirse para una planeación eficiente del uso del suelo a largo plazo. Dichos mapas estarán basados fundamentalmente en estudios geológicos básicos a partir de los cuales es posible inferir el comportamiento pasado del volcán, asumiendo inicialmente que las áreas alcanzadas por eventos eruptivos pasados serán igualmente afectadas por eventos similares, tanto en sus características primordiales como en la frecuencia con la que ocurrieron en el pasado.

Es importante destacar que una evaluación basada exclusivamente en el conocimiento del comportamiento eruptivo pasado del volcán no es suficiente ni recomendable, ya que no debe descartarse en ningún momento la ocurrencia de eventos catastróficos que llegan ocasionalmente a exceder cualquier evento eruptivo precedente en el mismo volcán, como ocurrió en el Monte Santa Helena, Washington en donde el mapa de peligros elaborado en forma previa a la erupción de 1980, no contempló la intensidad de la erupción, misma que excedió varias veces lo que hasta ese entonces se conocía que había ocurrido en el pasado (Miller et al., 1981; Figura 4).

También es necesario reconocer que existen eventos que, aunque se pueden manifestar con gran violencia, dejan depósitos minúsculos y poco consolidados que son fácilmente erosionables

con el tiempo, que no quedan preservados en el registro geológico y por lo tanto, podrían no ser considerados en la elaboración de los mapas de zonificación de peligros. Con estos elementos, es necesario que se considere para la elaboración de los mapas de peligros volcánicos, además de la información sobre la historia eruptiva del volcán, otra información sobre escenarios probables que pudieran presentarse, al compararse con otros volcanes con características similares.

Los mapas de peligros se preparan atendiendo a las características particulares de cada volcán; por ejemplo, en el caso de los volcanes hawaianos, los cuales se caracterizan por su actividad predominantemente efusiva, se mostrarán únicamente las áreas que podrían ser afectadas por el emplazamiento de flujos de lava basáltica, indicando diferentes grados de peligrosidad (Figura 5). En el caso de los domos volcánicos como el Volcán Merapi, Indonesia, el mapa de peligros debe considerar la emisión de flujos piroclásticos generados por el colapso gravitacional del domo central bajo condiciones inestables y que produce además otros fenómenos de flujo, como oleadas piroclásticas en las partes cercanas al volcán y lahares en las partes más distantes.

Actualmente se están preparando mapas de peligros para diferentes volcanes en México, de los cuales ya se han publicado

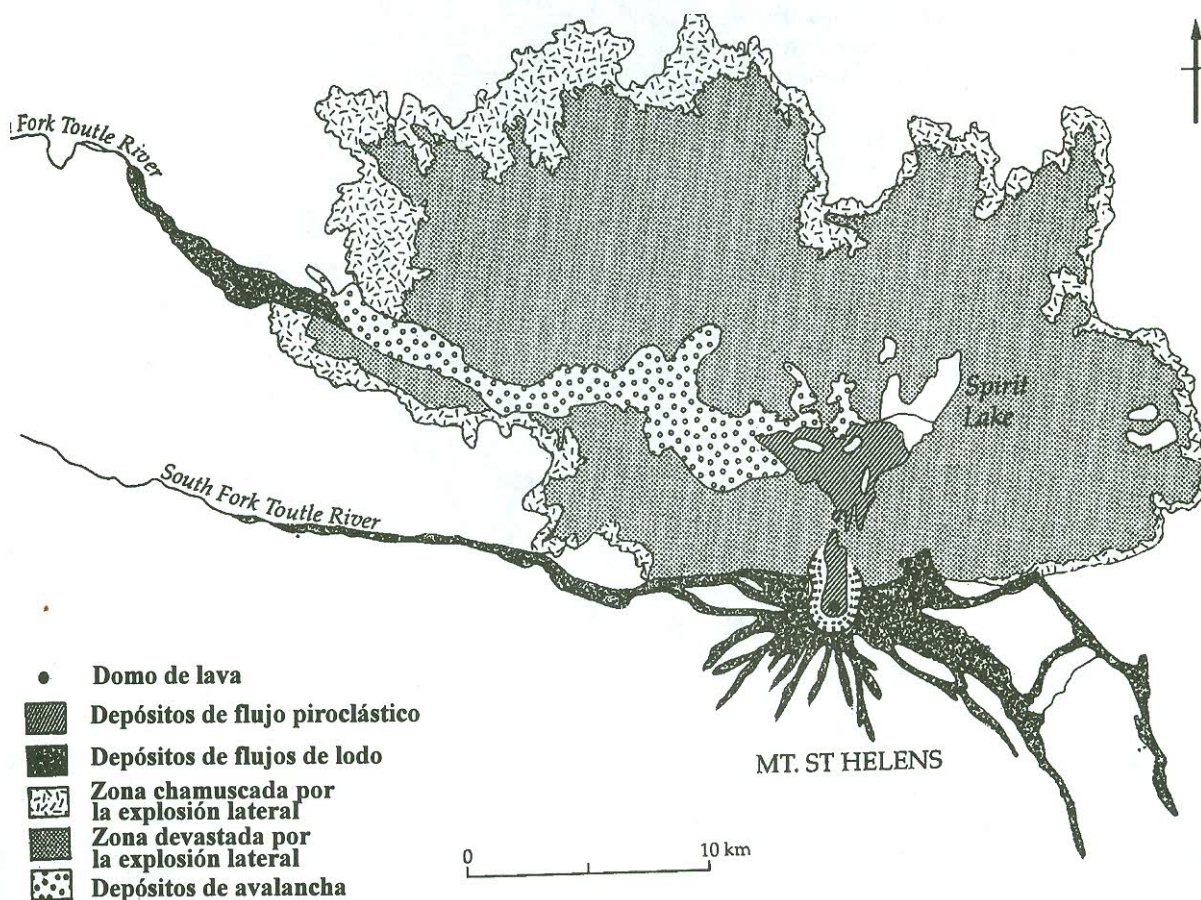


Figura 4. Esquema geológico que muestra la distribución de los principales productos y efectos derivados de la erupción del Monte Santa Helena, Washington ocurrida en mayo de 1980 en el noroccidente de los E.U.A. (modificado de Francis, 1994).

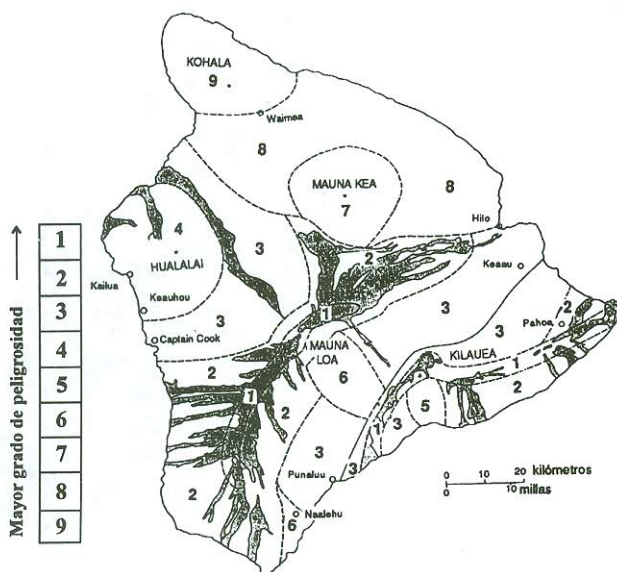


Figura 5. Mapa de zonificación del peligro por flujos de lava en la isla de Hawaii, indicando el grado de peligrosidad con un número en orden decreciente. La línea delgada indica el contacto entre los volcanes Mauna Loa y Kilauea. Las áreas rellenas representan flujos de lava históricos (modificado de Tilling, 1993).

los del volcán Popocatepetl (Macías et al., 1995) y los del volcán de Colima (Martín et al., 1995).

B) PROGRAMA DE MITIGACIÓN A CORTO PLAZO

Cuando un volcán muestra señales de actividad con esporádicos o frecuentes eventos de poca intensidad, reflejados a través de actividad fumarólica constante, como en el caso del Popocatepetl en los últimos años, es necesario tomar medidas inmediatas de mitigación. En muchas ocasiones las emergencias volcánicas ocurren en volcanes en los que apenas se cuenta con un conocimiento muy preliminar del mismo, lo que hace necesaria la implementación de un trabajo urgente de cartografía geológica que sirva de base para la elaboración de un mapa preliminar de peligros. El ejemplo más reciente lo tenemos con la repentina reactivación del volcán Pinatubo, Filipinas en 1991, después de casi 500 años de reposo. En este se tuvo que realizar, en alrededor de tan sólo un mes de trabajo de campo, un mapa preliminar de peligros que sirvió para determinar cuáles áreas deberían ser evacuadas con mayor prioridad.

La actividad de un volcán debe ser monitoreada en todo momento con la ayuda de diferentes técnicas que permitan tener elementos de juicio para anticipar de alguna manera la próxima ocurrencia de un evento eruptivo.

a) Monitoreo de la actividad volcánica

La actividad volcánica suele estar precedida por algunos signos premonitorios asociados principalmente con cambios geoquímicos o geofísicos que reflejan el movimiento o la migración de determinado material en el interior del edificio volcánico. Comúnmente los eventos eruptivos de intensidad

importante muestran una actividad precursora que es registrada por diferentes instrumentos. Los métodos más convencionales que se utilizan para vigilar la actividad volcánica están sintetizados en la Tabla 5.

Tabla 5. Sistemas de vigilancia volcánica

- Microsismicidad, utilizando una red local de sismógrafos.
- Deformación del terreno, medido con distanciómetros e inclinómetros.
- Variaciones en la concentración de gases (SO_2 y CO_2), medidas con un espectrómetro de correlación (COSPEC).
- Variaciones en la composición y concentración de especies químicas en manantiales.
- Métodos geofísicos como microgravimetría, geomagnetismo, radar, radiación térmica y geoelectrónica.

Aunque los métodos sísmicos y de deformación del terreno han probado ser los más confiables y de uso generalizado en el monitoreo volcánico, lo más recomendable es combinar varias técnicas, ya que las condiciones de emplazamiento de magma hacia la superficie pueden variar de un volcán a otro, siendo más efectivo para unos volcanes la aplicación de un método particular.

b) Manejo de las emergencias volcánicas.

El manejo de las emergencias volcánicas es de vital importancia para llevar a cabo una efectiva mitigación del riesgo volcánico. Toda la información técnico-científica que se obtiene como resultado de las investigaciones geológicas y geofísicas debe ser traducido apropiadamente para las autoridades de protección civil y para la población en general, utilizando un lenguaje accesible, sencillo y común a todas las entidades involucradas. Esto permitirá que exista un entendimiento que facilite la operación rápida y precisa de las autoridades de protección civil y así ejecutar las acciones conducentes para salvaguardar la vida y los bienes de las comunidades.

Una de las acciones concretas que se deben realizar durante el manejo de una emergencia volcánica es la propuesta de un sistema de alertamiento que permita a los científicos comunicar sus recomendaciones sobre las medidas que deberán tomarse conforme evolucione la actividad volcánica. En respuesta a la reciente reactivación del volcán Popocatepetl, fue propuesto un código de alerta (De la Cruz, 1995) como vínculo de comunicación entre científicos y autoridades de protección civil (Tabla 6) con una estructura de 5 niveles, que difiere del código utilizado para la población en general, para la cual se propuso una estructura más simple de solamente 3 niveles de alerta.

C) MEDIDAS DE PROTECCIÓN CONTRA PELIGROS VOLCÁNICOS

En países que enfrentan de manera cotidiana los riesgos inherentes a la actividad volcánica, como en Japón, se aplican programas nacionales de mitigación que comprenden la construcción, mantenimiento y mejoramiento de refugios tanto subaéreos como subterráneos para diferentes propósitos, así como espacios para ser usados como helipuertos, etc. También

Tabla 6. Niveles de alerta aplicados para una contingencia en el Volcán Popocatepetl propuestos por De la Cruz (1995).

Niveles de alerta. Nomenclatura para Comunicación entre PC y CT*	Fenómenos asociados	Tiempo que puede transcurrir hasta la ocurrencia del fenómeno	Posibles acciones a considerar según la información disponible	Nivel de alerta para la población y acciones recomendadas
Nivel 0	El volcán se encuentra en estado de reposo	Meses, años, siglos	Desarrollar planes de preparación. Educación a la población. Implementación de dispositivos de monitoreo.	
Nivel 1	Aumento anormal pero moderado de la actividad fumarólica o de la temperatura de fumarolas o manantiales. Cambios en su composición.	Meses o años	Aumento en los niveles de monitoreo. Reuniones. esporádicas o periódicas del comité técnico. Nivel aumentado de comunicación entre b y c. Revisión de planes operativos de emergencia. Mayor información a a para mantener altos niveles de concientización.	<u>Verde</u> mantenerse informado sobre el estado del volcán. Simulacros anuales "Día del volcán"
Nivel 2	Aumento significativo de los parámetros anteriores. Alguna deformación. Presencia clara de pluma o fumarola	Semanas o meses	Reuniones frecuentes del comité técnico. Consultas diarias (o más frecuentes) entre PC y CT*. Verificación de la disponibilidad de personal y equipos de evacuación. Preparación de albergues. Verificación de la disponibilidad de vehículos para la evacuación especialmente en la zona 1 del mapa de riesgos.	
Nivel 3	Aumento grande de los parámetros anteriores. Inicio de alguna actividad eruptiva débil, o no magmática (freática)	Día, días o semanas	Anuncio público de la posible emergencia y de las medidas tomadas. Mobilización de personal y equipo de evacuación. Implementación de medidas específicas en las regiones más vulnerables (zona 1 o 1 y parte o toda la zona 2 del mapa de riesgos)	<u>Amarillo</u> Mantenerse alerta y en contacto frecuente con la autoridad local. Escuchar frecuentemente el radio o la tv. Obedecer las instrucciones de la autoridad local o de protección civil o de las fuerzas armadas. Estar preparado para una posible evacuación.
Nivel 4	Aceleración en los parámetros anteriores o emisión explosiva de material juvenil.	Horas o días	Evacuación de las zonas vulnerables de acuerdo con el mapa de riesgos: zona 1, toda o en parte, o zona 1 y parte de la zona 2; o zonas 1 y 2 y parte de la zona 3, dependiendo de la evolución e intensidad de la actividad.	<u>Rojo</u> Obedecer las instrucciones de las autoridades civiles o militares. En caso de evacuación acarrear solo lo indispensable. Dirigirse al albergue asignado en caso de autoevacuación. Avisar a las autoridades correspondientes.
Nivel 5	Evidencias sólidas de la presencia de cantidades importantes de magma dentro del cono volcánico. Grandes deformaciones o desarrollos de actividad eruptiva explosiva a gran escala		Evacuación de las zonas 1, o de las zonas 1 y 2, o de las zonas 1, 2 y 3. Según el desarrollo e intensidad de la actividad.	

*PC= Protección Civil; CT= Comité Técnico; a= Población vulnerable; b=Autoridades responsables; c=Organismos responsables del monitoreo volcánico

existen sistemas de alertamiento regionales y locales que paran automáticamente el tráfico carretero cuando se detecta una señal que indica la ocurrencia de un flujo de lodo o un flujo piroclástico en las cercanías de un volcán activo.

A continuación se describen algunas de las medidas de mitigación más importantes que comúnmente se consideran contra los peligros volcánicos más frecuentes.

a) Flujos de lava

Los flujos de lava no representan un peligro importante en la mayor parte de los casos; sin embargo, para algunas regiones los daños que puede causar en términos económicos pueden ser muy costosos. En Hawaii se realizan monitoreos frecuentes de las variaciones en la tasa de efusión y de otros parámetros físicos con la finalidad de predecir la posible extensión y trayectorias esperadas de los flujos de lava. Recientemente se han propuesto varios modelos matemáticos basados en datos empíricos relacionados con la morfología y carácter reológico de los flujos de lava para estimar su máxima extensión (Kilburn, 1996; Carrasco-Núñez, 1997). Desde luego, el conocimiento de los centros de emisión existentes y de los que potencialmente se puedan formar es importante para predecir sus posibles trayectorias de acuerdo con la topografía.

Se han hecho serios intentos por aplicar diversas metodologías para controlar el avance de los flujos de lava, entre las que destacan la construcción de barreras para desviar los flujos, la aplicación de explosivos para frenar, bloquear o desviar los flujos, y el empleo de agua para enfriar los flujos y detener o disminuir su avance (UNDRO/UNESCO, 1985). En muchos casos, la combinación de estos métodos ha sido efectiva, como en el Monte Etna, Italia en 1983 (Lockwood y Romano, 1985), o en el Heimaey, Islandia, en 1973 (Williams y Moore, 1973; 1983), evitando costosas pérdidas de viviendas y diversas obras de infraestructura. En otros casos, la efectividad de las obras de ingeniería que se construyeron no han sido aún probadas, o bien, como en el caso del volcán Mauna Loa (Lockwood et al., 1987), los bloqueos a los flujos de lava coincidieron con el cese de la actividad. En erupciones recientes del Monte Etna, la barreras construidas fueron superadas debido a la alta tasa de efusión de las lavas, por lo que fue necesario aplicar otros métodos, como canales de desvío y la incorporación de grandes bloques de concreto para inducir una mayor dificultad al avance de la lava.

b) Flujos piroclásticos, oleadas y explosiones dirigidas

Es muy difícil aplicar alguna metodología efectiva para contrarrestar el peligro de estos fenómenos explosivos dado su carácter destructivo y altamente energético, que llega a causar la destrucción total de los alrededores, provocando la muerte no sólo por calcinación, sepultamiento o impacto, sino también por asfixia. A pesar de ello, se puede recomendar la construcción de refugios subterráneos debidamente edificadas, ubicados y acondicionados, similares a los refugios nucleares. Algunas construcciones sólidas podrían ser reforzadas con ventanas y puertas selladas apropiadamente para evitar el ingreso de polvo y gases volcánicos dañinos.

En las partes bajas del volcán Unzen, Japón, se han construido diversas barreras laterales con el propósito de canalizar los flujos piroclásticos principales en un cauce artificial, y se ha proyectado que la operación ingenieril sea operada con maquinaria a control remoto para no exponer a los

trabajadores de la obra a una catástrofe inesperada (Figura 6). Sin embargo, esta operación al parecer no considera la ocurrencia de nubes piroclásticas diluidas que suelen acompañar a los flujos piroclásticos, y que pueden elevarse varias decenas y hasta cientos de metros de altura.

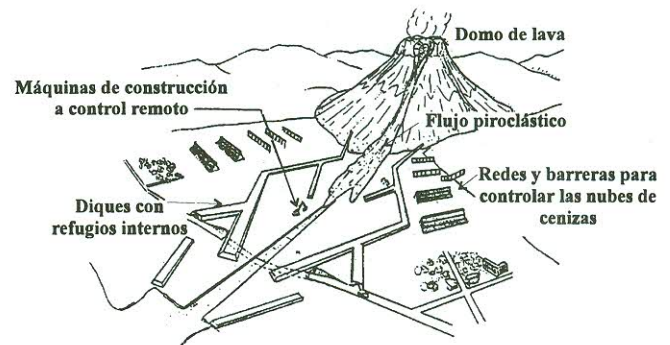


Figura 6. Medidas de emergencia contra flujos piroclásticos en el volcán Unzen, Japón (modificado de Ichikawa, 1995). Estos flujos se asocian al colapso de un domo de lava que crece en la cima del volcán y es disparado por una erupción explosiva.

c) Caída de tefra

Los principales efectos que ocasiona la caída de grandes cantidades de tefra incluyen el completo oscurecimiento y reducción de la visibilidad, la obstrucción del drenaje que propiciaría inundaciones en áreas urbanas, el sepultamiento parcial o total de pequeñas estructuras, de la vegetación y de terrenos de cultivo, y el sobrepeso de techos en edificaciones diversas. Importantes daños pueden ser causados a las vías de comunicación, líneas telefónicas o eléctricas, carreteras, vías férreas o al tráfico aéreo, ya que el carácter abrasivo de las cenizas daña las turbinas de aviones y de cualquier tipo de maquinaria que se encuentre desprotegida. Aunque las partículas piroclásticas generalmente caen por el efecto aerodinámico del aire atmosférico, algunas de mayor tamaño suelen conservar más calor, e incluso pueden ser capaces de iniciar incendios, en cuyos casos se recomendaría emplear aislantes metálicos en las construcciones.

Una de las medidas que debe tomarse durante o inmediatamente después de ocurrir la caída de material piroclástico es la inmediata remoción del material acumulado en los techos, especialmente cuando la erupción está acompañada por lluvias, pues el agua aumenta considerablemente la densidad de los materiales acumulados, y favorece el colapso de las superficies en donde se depositan. Antes de que ocurra una erupción pueden reforzarse los techos de las construcciones, así como las paredes para soportar la carga y el impacto de los proyectiles; en algunos casos, podrían realizarse modificaciones al ángulo de inclinación de los techos, como se hizo cuando entró en actividad el volcán Heimaey, Islandia en 1973, donde las construcciones con techos de más de 20° de inclinación no sufrieron daños sustanciales. También es importante que el material acumulado en ciertas áreas sea removido y redistribuido adecuadamente para evitar su posterior

acarreo formando catastróficos lahares. Se recomienda también el uso de filtros para la maquinaria y el uso de máscaras para evitar cualquier problema respiratorio.

Por otra parte, son bien conocidos los efectos atmosféricos que conyeve la inyección de grandes volúmenes de ceniza en la estratosfera, ocasionando una disminución global de la temperatura; sin embargo, no hay medidas de mitigación que puedan aplicarse para contrarrestar estos efectos.

d) Flujos de lodo

Debido a que los flujos de lodo son preferentemente canalizados a través de los valles fluviales, sus áreas de afectación pueden predecirse con cierta precisión. No obstante, sus áreas de inundación dependen del volumen de material involucrado, de sus características granulométricas y de las características geométricas del canal por donde circula. Los flujos de lodo pueden causar el sepultamiento de áreas pobladas y la muerte de sus habitantes, la destrucción de puentes, el bloqueo de carreteras, el enterramiento de áreas cultivadas y de infraestructura.

Como medida de protección se pueden construir diversas presas u otras obras civiles que pretendan retener, desviar o disminuir la mayor cantidad de sedimentos, así como barreras laterales a los cauces principales. En algunos casos se realizan obras civiles consistentes en sistemas de túneles o en el bombeo y canalización del agua, aplicado a grandes embalses de lagos cercanos o en el interior del volcán para controlar y disminuir su nivel medio, ya que de otra manera se podrían almacenar grandes cantidades de agua y sedimentos que, en un momento dado, estarían disponibles para formar voluminosos flujos de lodo o avenidas (Figura 7).

Existen también algunos sistemas de alertamiento consistentes en equipos automatizados acústicos que pueden captar aceleraciones pequeñas del terreno en forma anticipada a la ocurrencia del flujo. En otros casos, existen también sistemas de cables que, con el paso de flujos grandes, envían una señal a las áreas que se encuentran aguas abajo tiempo antes de su arribo, según la distancia a la que se encuentren. Esto podría alertar a la población, para ponerse a salvo en las partes altas más cercanas al sitio amenazado.

REFERENCIAS

- Blong, R., 1984. Volcanic hazards: a sourcebook on the effects of eruptions, Academic Press. Orlando, Florida, 424 pp.
- Carrasco-Núñez, G., 1997. Lava flow growth inferred from field flow characteristics: a case of study of Citlaltepétl volcano, Mexico, Geological Magazine 133 (7) (en prensa).
- Casadevall, T., 1994. The 1989-1990 eruption of Redoubt volcano, Alaska: impacts on aircraft operations. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 62, 301-316.

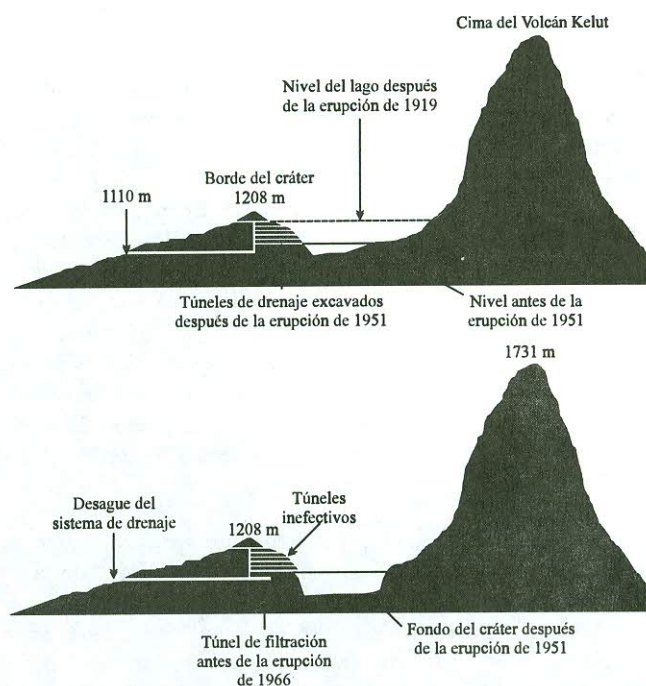


Figura 7. Sección esquemática que muestra el proyecto de túneles en el lago-cráter del volcán Kelud, al este de Java, con el fin de controlar el nivel del lago y evitar avenidas catastróficas. Arriba se muestra la situación prevaleciente antes de la erupción de 1951; abajo, la situación antes de la erupción de 1966 (modificado de Francis, 1994).

- De la Cruz, S. 1995. Un código de alerta para el manejo de emergencias antes y durante potenciales erupciones del volcán Popocatepetl. en "Volcán Popocatepetl. Estudios realizados durante la crisis de 1994-1995", CENAPRED-UNAM, 327-334.
- Delgado, H., Carrasco, G., Cervantes, P., Cortés, R. y Molinero, R., 1995. Patrones de viento en la región del Volcán Popocatepetl, en "Volcán Popocatepetl. Estudios realizados durante la crisis de 1994-1995", CENAPRED-UNAM, 295-324.
- Fournier D'Albe, E.M., 1979. Objectives of volcanic monitoring and prediction. Journal of the Geological Society of London, 136, 321-326.
- Francis, P., 1994. Volcanoes. A planetary perspective. Oxford, 443 pp.
- Hoblitt, R., Miller, C.D. and Vallance, J., 1981. Origin and stratigraphy of the deposit produced by the May 18 directed blast, in the 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington, P. Lipman and D.R. Mullineaux, (editors) U.S. Geological Survey Professional. Paper, 1250, 401-419.
- Ichikawa, Y., 1995. Developing a system for preventing pyroclastic flow disaster. Proceedings of the Workshop on Debris Avalanche and Debris Flow of Volcano. Tsukuba, Japan, 167-172.
- Kilburn, C., 1996. Patterns and predictability in the emplacement of subaerial lava flows and flow fields, UNESCO/IAVCEI Volume on Hazard and Surveillance, R. Scarpa and R.I. Tilling, (editors) 1996.

- Kling, G.W., Clark, M.A., Compton, H.R., Devine, J.D., Evans, W.C., Humprey, A.M., Koenigsberg, J.P., Lockwood, J.P., Tuttle, M.L. and Wagner, G.N., 1987. The 1987 Lake Nyos gas disaster in Cameroon, west Africa, *Science*, 236, 169-175.
- Lipman, P y Mulineaux, D.R., editors, 1981. The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington, U.S. Geological Survey Profesional Paper, 1250, 844 pp.
- Lockwood, J. and Romano, R., 1985. Diversion of lava during the 1983 eruption of Mount Etna, *Earthquake Information Bulletin*, 17, 124-133.
- Lockwood, J.P., Moore, H.P., Robinso, E. and Wu, S., 1987. Lava diversion structures to protect the Mauna Loa Observatory, Hawaii. Cordilleran Section Meeting, Geological Society of America Abstracts and Programs, 19, 339.
- Macías, J.L., Carrasco, G., Delgado, H., Martín, A.L., Siebe, C., Hoblitt, R.P., Sheridan, M.F. y Tilling, R., 1995. Mapa de peligros del Volcán Popocatepetl, Instituto de Geofísica, U.N.A.M.
- Martín, A.L., Sheridan, M.F., Barrera, D., Lugo, J. y Vázquez, L., 1985. Mapa de peligros del Volcán de Colima, Instituto de Geofísica, U.N.A.M.
- Miller, C.D., Mullineaux, D.R. and Crandell, D.R., 1981. Hazards assessments at Mount St. Helens, *en* "The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington, U.S. Geological Survey Profesional Paper, 1250, 789-802.
- Pierson, T., Janda, R., Thouret, J.C. and Borrero, C., 1990. Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41, 17-66.
- Pierson, T., Janda, R., Unbal, J. and Daag, A., 1992. Immediate and long-term hazards from lahars and excess sedimentation in rivers draining Mt. Pinatubo, Philippines. U.S. Geological Survey, Water-Resources Inves., 92-4039, 35 pp.
- Siebe, C., Abrams, M. y Macías, J.L., 1995. Derrumbes gigantes, depósitos de avalancha de escombros y edad del actual cono del Volcán Popocatepetl, *en* "Volcán Popocatepetl, Estudios realizados durante la crisis de 1994-1995". CENAPRED-UNAM, 195-220.
- Tazieff, H., 1977. An exceptional eruption: Mt. Nyiragongo, January 10th, 1977. *Bulletin of Volcanology*, 40, 189-200.
- Tilling, R.I., 1993. Los Peligros Volcánicos. (Traducido por B. Beate). American Geophysical Union, Washington D.C., 123 pp.
- UNDRO/UNESCO, 1985. Volcanic Emergency Management, United Nations, New York, 86 pp.
- Williams, R.S. and Moore, J.G., 1973. Iceland chills a lava flow, *Geotimes*, 18, 14-17.
- Williams, R.S. and Moore, J.G., 1983. Man against volcano: The eruption on Heimaey, Vetmannaeyjar, Iceland. U.S. Geological Survey General Interest Publications Series, 28 pp.
- Yokoyama, I., Tilling, R.I. and Scarpa, R., 1984. International mobile early-warning system(s) for volcanic eruptions and related seismic activities. UNESCO (Paris), FP/2106-82-01(2286) 102 pp.

GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS TRAZA Y SU RELACIÓN CON LA PETROGÉNESIS DE ROCAS ÍGNEAS: MODELOS CUANTITATIVOS DE PROCESOS MAGMÁTICOS

PARTE I

María del Sol Hernández Bernal, Gustavo Tolson y Gabriela Solís Pichardo
Instituto de Geología, UNAM., México D.F. 04510
E-mail: msol@servidor.unam.mx

RESUMEN

El origen y la evolución de las rocas ígneas pueden ser descritos desde un punto de vista químico mediante ecuaciones sencillas que modelan los principales procesos magmáticos: fusión parcial, cristalización fraccionada, asimilación y la combinación de ellos. Uno de los factores más importantes en el modelado es el valor de los coeficientes de distribución de cada elemento, el cual depende de la composición del líquido, la temperatura y la presión. La presencia de ciertos minerales en determinado proceso magmático imprime un patrón característico a su espectro de elementos traza, el cual es útil para determinar, junto con otros parámetros petrográficos y geoquímicos, la evolución de un conjunto de rocas. Se muestran tres ejemplos que permiten visualizar la aplicación de estas ecuaciones en diferentes rocas parentales para modelar la posible trayectoria de evolución, la litología resultante y la comparación con la roca en estudio.

INTRODUCCIÓN

La formación de las rocas ígneas se ha explicado en términos de etapas idealizadas de generación y evolución de magmas. La interpretación de los patrones de elementos traza y de las propiedades isotópicas de las rocas ígneas busca explicar de forma simplificada la evolución de dichas etapas.

Para lograr una buena interpretación a partir del análisis químico de las rocas ígneas, los datos obtenidos experimentalmente deben ser comparados con los obtenidos mediante modelos matemáticos. Además es necesario tener suficiente precisión y sensibilidad en el análisis de elementos traza debido, entre otras cosas, a su baja concentración y a la variabilidad de su presencia en diferentes ambientes geológicos. Los coeficientes de distribución (o coeficiente de partición) de los elementos traza son parámetros clave para los modelos matemáticos de procesos petrogenéticos.

El coeficiente de distribución mineral-líquido (K_d) es la fracción en peso de un elemento traza en un mineral dividido por la fracción en peso de ese mismo elemento en un líquido coexistente. Si se asume que el mineral y el fundido se encuentran en equilibrio, entonces el coeficiente de distribución está dado por:

$$K_d = \frac{C_s}{C_l}$$

en donde:

K_d = coeficiente de distribución del elemento

C_s = concentración del elemento en la fase sólida

C_l = concentración del elemento en el líquido

Se considera que el elemento es *compatible* si $K_d > 1$, es decir, el elemento "prefiere" residir en el cristal; si $K_d < 1$, el elemento es *incompatible* y tiende a residir en el líquido. Por ejemplo, si se tiene un fenocristal de feldespato potásico que contiene 600 ppm de Ba, embebido en una matriz vítrea con 100 ppm de Ba, resulta un coeficiente de distribución de 6 para el Ba en el feldespato. Bajo condiciones de equilibrio, el coeficiente de distribución es independiente de las proporciones relativas del mineral / líquido y de la concentración del elemento en la roca. El coeficiente de distribución de un elemento es dependiente de la presión, temperatura y la composición del mineral y del fundido. Por ejemplo, se observa que los coeficientes de distribución de las tierras raras son generalmente más grandes en líquidos graníticos que en líquidos basálticos.

También es conveniente describir al *coeficiente de distribución volumétrico modal* D como el valor del coeficiente de distribución de un elemento en el total del sistema en estudio, dependiendo de las proporciones de cada uno de los componentes en el sistema original:

en donde:

D = coeficiente de distribución volumétrico modal,

X^i = fracción en peso de la fase i en el sólido,

K_d^i = coeficiente de distribución de un elemento para la fase i .

Por otra parte, el *coeficiente de distribución volumétrico*