

CAPÍTULO 1

VOLCANISMO Y SISMICIDAD

BENJAMIN VAN WYK DE VRIES
DANIEL ANDRADE

1.0 Introducción

Todos sabemos algo sobre los volcanes. Todos hemos visto uno, al menos desde lejos, o en un libro, o en la televisión o en Internet. En Centroamérica, la mayor parte de la población vive cerca de un volcán y tiene cierta experiencia sobre su actividad. En ciertos casos, ¡incluso es posible conducir hasta el cráter de los volcanes activos y mirar en su interior! En Costa Rica, por ejemplo, los volcanes Póas e Irazú pueden visitarse fácilmente; en Nicaragua se puede conducir hasta el Masaya y tomar un refresco en su cráter; en El Salvador, los cráteres del Izalco o del Santa Ana pueden ser observados desde una carretera cercana. En Guatemala se pueden visitar de cerca el Fuego o el Pacaya tras una corta caminata. En Honduras, en cambio, es necesario buscar un poco los volcanes, pero ahí están, especialmente en el Golfo de Fonseca. Incluso para los panameños hay volcanes, por ejemplo El Valle o el Cerro Baru, aunque no sean tan evidentes en el paisaje.

Así, todos tenemos en mente la imagen de un volcán y una cierta idea sobre su significado, sobre lo que pueden hacer y sobre su relación con la humanidad.

Sin embargo, para el lector puede ser difícil dar una “definición formal” sobre lo que es un volcán; e incluso puede ser más difícil que un grupo de personas coincidan en su definición si se le pide a cada una que dibuje un volcán en una hoja de papel. También hay poco acuerdo entre la gente de la calle cuando se le pregunta ¿qué es un volcán? Incluso entre los geólogos, cuyo trabajo es estudiar los volcanes, existen visiones variadas. Así, es importante empezar por definir lo que es un volcán de forma clara y precisa, para luego entender cómo es posible que dicho objeto pueda ser visto de formas tan diversas.

Un volcán es una montaña que crea una interfase entre el interior de la Tierra y su exterior. Esta es una de las razones por las que los volcanes son vistos de formas tan diversas. De hecho, los volcanes están cubiertos por un “ambiente” superficial y complejo que esconde su naturaleza más profunda (Figura 1.1).

1.1 ¿Qué es un volcán?

La que sigue, es mi definición personal sobre lo que es un volcán: *“Un volcán es un sistema natural para trasladar energía desde el interior de la Tierra hacia el exterior, por medio de la transferencia de magma. La creación de dicho magma ocurre en profundidad, por fusión de rocas que luego se mueven hacia la superficie hasta, eventualmente, erupcionar material rocoso, formar un edificio volcánico e inyectar materiales (rocas y gases) en la atmósfera”*.

Antes de nada, se ha de hacer notar que, según la definición, un volcán es algo natural. Es decir que no existen volcanes “hechos por los hombres”, si bien es posible construir pequeños modelos análogos (a escala) para estudiar diferentes problemas científicos. Si al lector le interesa explorar esta idea, puede construir los modelos presentados en la figura 1.2.

Un volcán transfiere energía en forma de calor y materia (magma y rocas). El interior de la Tierra está caliente, y el magma que se forma allí puede alcanzar temperaturas de hasta 1200° C (para comparación, el aluminio funde a 660 °C). Este magma caliente es extraído desde la profundidad y es transferido hacia la superficie de la Tierra, donde pierde su calor rápidamente al entrar en contacto con la atmósfera o con los océanos. Si alguna vez el lector visita de cerca un volcán, se dará cuenta de que, cuando no está en erupción, el calor también se difunde por recalentamiento del suelo en las cercanías, por aguas termales o por fumarolas de gases calientes. Todas estas formas de calor pueden ser agrupadas bajo la denominación de “calor geotérmico” (Figura 1.3).

“Magma” es otro término que vale la pena definir con claridad. “Magma” es simplemente cualquier roca fundida, en estado líquido, mientras que “lava” es el nombre que se da al magma una vez llega a la superficie de la Tierra. Los magmas contienen casi siempre fragmentos en estado sólido, como por ejemplo cristales de varios minerales que crecen durante el enfriamiento y pedazos de roca que son arrancados del conducto durante el ascenso a la superficie.

Los magmas contienen también grandes cantidades de **gases disueltos**, que se liberan cuando el magma pierde presión al acercarse a la superficie. Este fenómeno es idéntico al que se da en una botella de cerveza: la cerveza contiene gases disueltos (dióxido de carbono) que se liberan y aparecen solamente cuando se abre la botella, es decir cuando la cerveza pierde presión. La diferencia es que el magma está muy caliente y la presión liberada es generalmente enorme. Varias manifestaciones peligrosas de la actividad volcánica, por ejemplo las grandes explosiones, se deben a la liberación violenta de gases volcánicos.

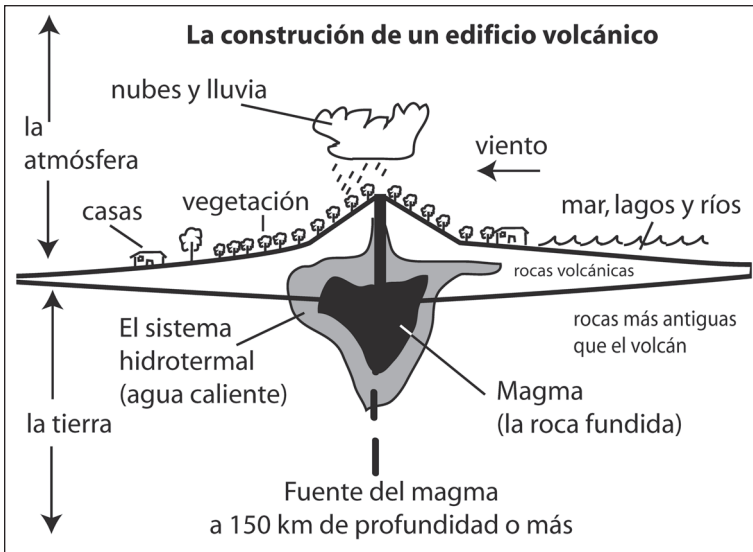


Figura 1.1.- ¿Qué es un volcán? Este esquema muestra un volcán en su ambiente natural. El volcán no es solamente un objeto geológico, sino un sistema ambiental que incluye fauna, flora, poblaciones humanas (edificios, casas, etc.), agua y ríos. El volcán también es una fuente de interacciones con la atmósfera.

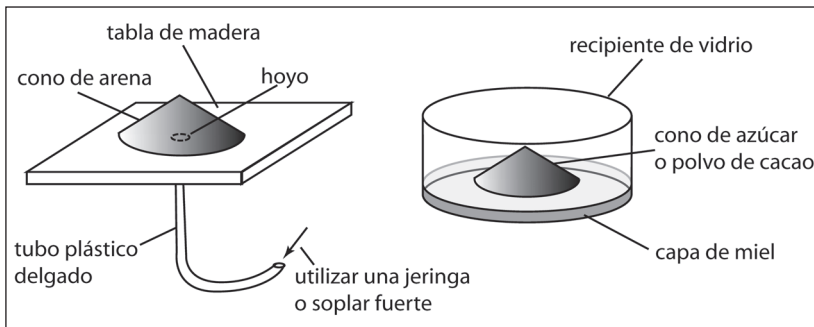


Figura 1.2.- Modelos de volcanes para preparar fácilmente en casa. El primer modelo es un simple tubo unido a una placa de madera a través de un hoyo. Se debe construir un volcán de arena seca por encima del hoyo. Si se sopla por el tubo o se bombea aire con una jeringa, va a ocurrir una "erupción" en el cono. El segundo modelo sirve para observar el efecto del peso de un cono volcánico sobre las rocas de basamento deformables. Se debe verter un poco de miel en un recipiente y luego construir un cono de azúcar por encima. Al hacer varios experimentos con capas de miel de diferente espesor y con conos de tamaño constante se podrán observar resultados interesantes. Cuando la capa de miel es poco espesa, el cono de azúcar se aplanará lentamente; en cambio, con un gran espesor de miel, (mayor que el radio del cono) el volcán de azúcar se va hundirá un poco, ¡pero su forma no cambiará!

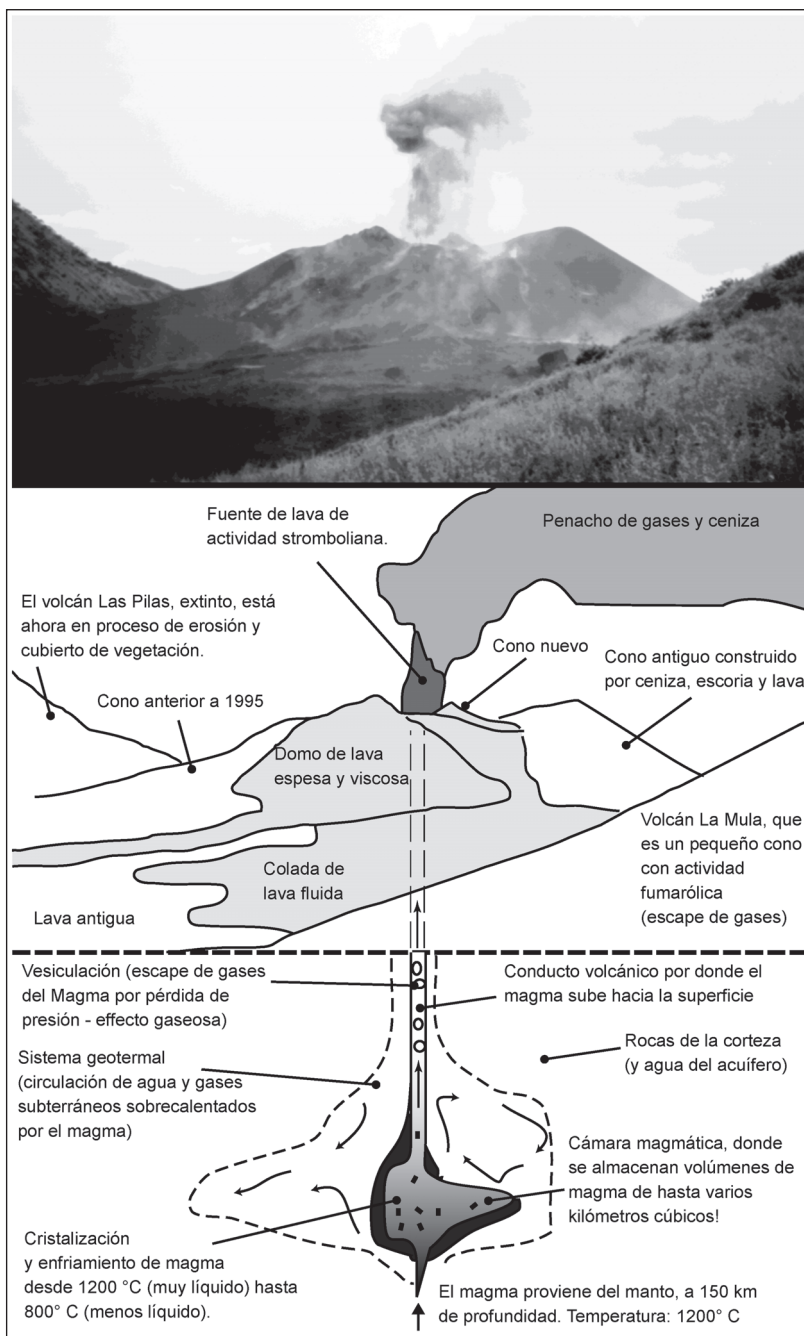


Figura 1.3.- Un volcán generalizado. Foto del Cerro Negro (Nicaragua) en erupción en 1995, con una fuente de lava (erupción estromboliana), domos y coladas de lava. El diagrama muestra también el sistema volcánico y magmático bajo el volcán.

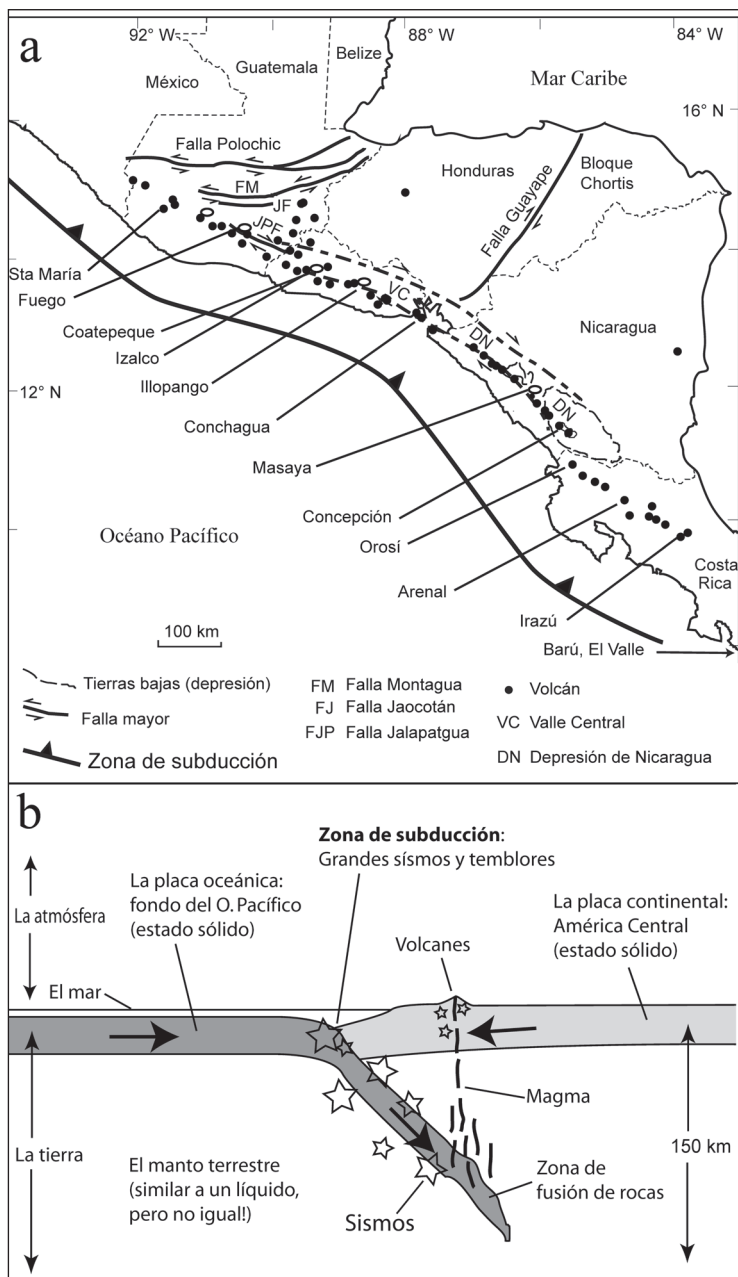


Figura 1.4.- Contexto de la tectónica de placas. a) Mapa de América Central con los mayores volcanes y fallas. Nótese la “Zona de Subducción”, que es una enorme falla que separa el Océano Pacífico de la corteza de la Placa del Caribe (América Central). b) Corte esquemático mostrando la placa del Pacífico hundiéndose por debajo de la placa del Caribe (América Central). Los volcanes son abastecidos por magmas que provienen de la fusión de rocas a 150 km de profundidad.

Los magmas se forman por fusión de la roca en el interior de la Tierra, a profundidades de entre 100 y 200 Km. La roca se funde de diversas maneras; una de ellas ocurre simplemente cuando las rocas llegan a zonas tan calientes del interior que empiezan a fundirse: es lo que sucede bajo gran parte de Centroamérica. Otra ocurre cuando una roca que se encuentra a gran profundidad es llevada rápidamente hacia zonas de menor presión, lo que también causa fusión. El diagrama de la figura 1.4 muestra las maneras en que se forma el magma en el interior de la Tierra bajo América Central.

Existen también algunos tipos “extraños” de magma como, por ejemplo, fangos que pueden formar “**volcanes de lodo**” en superficie. A veces, antiguas capas de fango enterradas en la Tierra se saturan tanto de agua subterránea que se vuelven líquidas de nuevo y pueden empezar a fluir hacia la superficie y erupcionar de forma similar a la de un volcán. En planetas diferentes del nuestro, los volcanes se forman a partir de otros tipos de líquidos, por ejemplo agua o dióxido de carbono, aunque estos hechos no afectan a nuestra actividad en la Tierra y pueden considerarse una curiosidad científica.

Sin embargo, ciertos volcanes pueden erupcionar azufre puro, lo que representa una importante fuente de recurso mineral. Ocasionalmente, se pueden encontrar coladas de lava de azufre en el Póas (Costa Rica) y en el Momotombo (Nicaragua), aunque son bastante raras.

Así pues, los magmas erupcionan al llegar a la superficie de la Tierra y forman los volcanes. Los magmas pueden erupcionar en forma de lava, lo que significa que simplemente salen del cráter como un líquido muy caliente que se mueve lentamente sobre el suelo hasta perder su calor y solidificarse (Figura 1.5.c). Esto es típico de los magmas que contienen pocos gases disueltos. En cambio, cuando los magmas son ricos en gases, pueden liberarlos de forma muy violenta y dar lugar a explosiones de magnitudes muy variadas. Durante este proceso, el magma suele romperse en pedazos y conformar una mezcla de gases y fragmentos de roca que son expulsados por el cráter durante las explosiones volcánicas (Figura 1.5.b). Estos fragmentos de roca son conocidos como **piroclastos**. De hecho, los volcanes están formados en gran parte por piroclastos. A veces, los magmas pueden perder sus gases sin dar lugar a una erupción. Es el caso del Masaya (Nicaragua), donde se han medido enormes cantidades de gases saliendo del volcán sin que ocurra ninguna erupción. Esto significa que hay un gran volumen de magma líquido estancado bajo tierra, rellenando una **cámara magmática**.

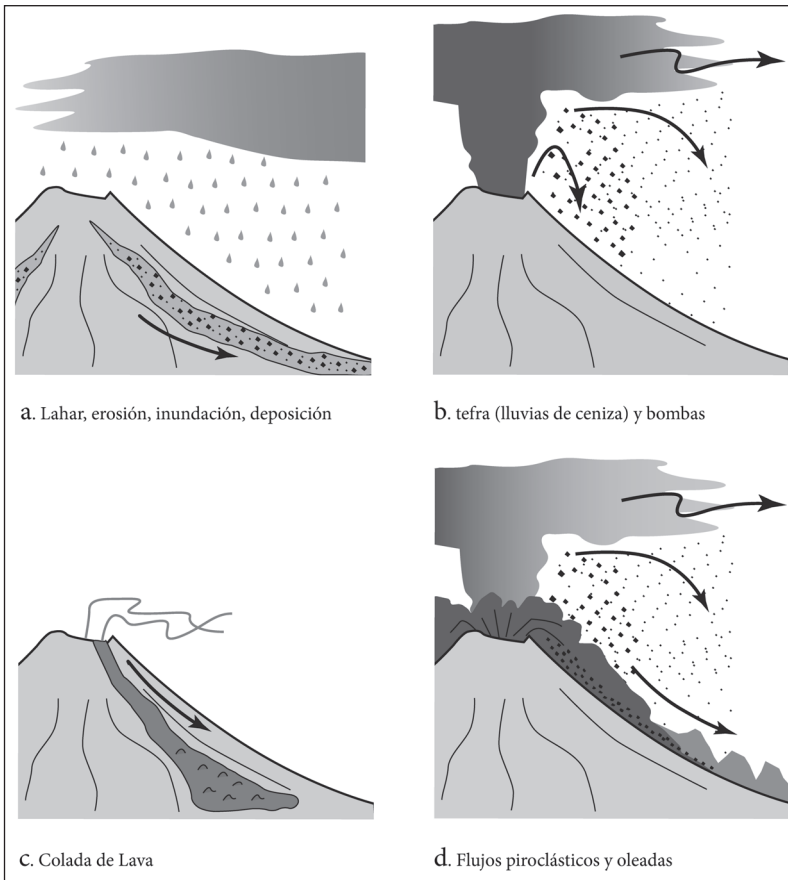


Figura 1.5.- Actividad volcánica y fenómenos eruptivos. **a)** Actividad sin erupción. Este tipo de actividad está normalmente asociada a efectos climáticos. Deslizamientos y derrumbes son muy frecuentes sobre las laderas de un volcán, que normalmente pueden tener capas de rocas poco resistentes (cenizas o tefras). La lluvia se mezcla fácilmente con fragmentos de roca sueltos, para provocar flujos de lodo, o lahares. Estos flujos se depositan sobre las planicies al pie del volcán, donde causan daños en cultivos y estructuras humanas (ver también la Figura 1.7b). **b)** Tefra y “bombas volcánicas” son productos comunes de las erupciones explosivas. Las bombas normalmente no alcanzan a más que un kilómetro del cráter, y son peligrosas solamente para personas que viven o trabajan sobre los flancos del volcán (¡los volcanólogos por ejemplo!). La ceniza volcánica no es peligrosa en sí misma, pero sus efectos casi siempre son muy costosos ya que puede ser acarreada por el viento a grandes distancias y así afectar zonas muy lejanas al volcán en erupción. **c)** Coladas de lava. Normalmente viajan unos pocos kilómetros desde el volcán antes de detenerse. Son flujos muy lentos (menos de 1 km por hora hasta 1 m por día), no son peligrosas de inmediato, pero pueden destruirlo todo a su paso. **d)** Los flujos piroclásticos son avalanchas de rocas y gases, muy calientes y muy rápidas, que ocurren durante erupciones grandes y explosivas. Hay dos tipos principales: “flujos densos”, con muchos bloques, que fluyen dentro de valles y quebradas de forma similar a una corriente rápida. El otro tipo son las “oleadas piroclásticas”, que son nubes de ceniza de alta temperatura, más densas que el aire y que fluyen como una corriente de viento o nube ardiente. Son muy energéticos y pueden sobrepasar fácilmente obstáculos topográficos; es decir que pueden salir de los valles o quebradas.

Las cámaras magmáticas son zonas de acumulación de magma bajo tierra (Figuras 1.1 y 1.3). Se forman cuando o donde los magmas ascendentes se detienen o son bloqueados por alguna razón. Pueden ser bloqueados por formaciones rocosas resistentes que impiden su paso, o simplemente porque el magma es más denso que las rocas que lo rodean y no puede subir. De hecho, la mayor parte de los magmas creados en profundidad nunca alcanzan la superficie. Puede que el magma de los volcanes represente menos del 10% del volumen total de magma que se crea en las profundidades, lo que significa que, en el interior de la Tierra, bajo los volcanes, ocurren constantemente grandes cambios que no observamos directamente en superficie.

Cuando el magma se acumula bajo tierra, empieza a enfriarse muy lentamente y a formar cristales. Los elementos más pesados del magma, como el hierro, el calcio o el magnesio, forman rápidamente cristales como el “**olivino**” (un mineral verdoso), el “**piroxeno**” (un mineral oscuro) y la “**plagioclasa**” (un mineral blancuzco). Este proceso, llamado “**crystalización**”, hace que el magma se vuelva menos denso y que pueda continuar su ascenso hacia la superficie. Además, estos cristales no atrapan los gases del magma y, en consecuencia, el magma se enriquece en gases y se vuelve cada vez menos denso, pero también más explosivo. Al llegar a la superficie, provocará importantes explosiones.

Así, un volcán es una secuencia de coladas de lava erupcionadas y de capas de piroclastos acumuladas durante las explosiones. Los gases liberados por los volcanes modifican la atmósfera de la Tierra. Así mismo, una vez que un volcán empieza a crecer, el viento y la lluvia empiezan a erosionarlo. A menudo, las erupciones ocurren con intervalos de cientos de años y, así, flora y fauna pueden desarrollarse alrededor del volcán y formar ecosistemas que pueden modificar el volcán original. De esta forma, las superficies volcánicas frescas y jóvenes se convierten en ambientes complejos.

La ocurrencia sucesiva de erupciones modifica el paisaje cercano a los volcanes, así como sus suelos, su agua y su atmósfera, creando complejas interrelaciones con el entorno. Los volcanes pueden permanecer activos y no permitir el desarrollo de ecosistemas maduros cerca de sus cráteres, o presentar largos periodos de calma durante los cuales pueden ser colonizados por flora y fauna e incluso por civilizaciones. Eventualmente, los volcanes también “**mueren**”, se extinguen y no tienen más actividad, aunque sus conos, su ambiente y su paisaje permanecerán tanto tiempo como perduren las **rocas volcánicas** erupcionadas. Gran parte del paisaje de Centroamérica está formado de estos **ambientes volcánicos**, en los que ya no se puede esperar que ocurran erupciones, si bien el conjunto del ecosistema está construido sobre el antiguo material volcánico.

Así, vemos que un volcán es un ambiente muy complejo, a través del cual el interior de la Tierra entra en contacto con la biosfera y con la atmósfera. Cualquier persona que observe un volcán lo hará desde su propio contexto de

percepción. Para un vulcanólogo, lo importante será el volcán “básico”, para un agricultor, la fertilidad de sus suelos; para un biólogo, su flora y su ecosistema; para un agente de la defensa civil, sus amenazas potenciales; para un periodista, el reportaje para el periódico de mañana; para los hombres de negocios y los operadores de turismo, los beneficios económicos que puedan obtener; para un guerrillero, la oferta de escondite; para los religiosos, el volcán será de inspiración divina o una señal del diablo, etc. En realidad, ¿no es sorprendente que los volcanes sean apreciados de forma tan diversa por gente tan diversa!

1.1.1 Tipos de actividad volcánica

1.1.1.1 Fumarolas

Las fumarolas son zonas donde los gases volcánicos llegan a la superficie de la Tierra tras haber escapado del magma y haber atravesado las rocas del subsuelo. Son muy comunes en los cráteres de los volcanes activos. Incluso los volcanes dormidos o extintos pueden conservar mucho calor remanente y formar aguas termales y fumarolas.

Las fumarolas son importantes, ya que transfieren gases desde el magma hacia la atmósfera y así constituyen un aporte de gases al medio atmosférico. La mayor parte de los gases están compuestos por vapor de agua, dióxido de carbono y dióxido de azufre (que huele a huevos podridos), pero también se encuentran trazas de muchos otros elementos, algunos de ellos muy tóxicos, como plomo, arsénico, flúor y cloro y otros económicamente importantes como cobre, plata y oro. No es muy buena idea hacer minería en volcanes activos pero, en cambio, los volcanes extintos suelen ser grandes fuentes de recursos minerales. El problema es que los trabajos de minería a menudo liberan también los elementos tóxicos contenidos en los minerales, que luego constituyen fuentes de contaminación ambiental.

Los gases calientes que escapan de los magmas se mezclan a veces con el agua subterránea, lo que da lugar a la formación de **fuentes termales**. Tales zonas representan importantes reservas de energía, que a veces son aprovechadas para producir electricidad, como en el Miravalles (Costa Rica) o en el Momotombo (Nicaragua). A menudo, estas zonas calientes están asociadas a volcanes extintos o a cámaras magmáticas que se han solidificado pero que están aún calientes.

1.1.1.2 Gases volcánicos

Cuando los volcanes son más activos, los gases salen del magma a través del cráter y pasan directamente a la atmósfera formando una nube alargada llamada “**pluma**”. El mejor ejemplo lo constituye el Masaya en Nicaragua aunque, a lo largo de Centroamérica, se pueden observar plumas de gases en

el Arenal (Costa Rica), en el San Cristóbal (Nicaragua), en el San Miguel (El Salvador) y en el Pacaya (Guatemala). Estos gases son relativamente inofensivos, pero al entrar en contacto con el agua atmosférica (las nubes) pueden formar ácidos agresivos que luego caen sobre la Tierra en forma de **lluvias ácidas**. Las lluvias ácidas pueden ser dañinas para la agricultura y para la salud en general. En el Masaya (Nicaragua), por ejemplo, las permanentes emisiones de gases han provocado indirectamente la destrucción de extensas zonas de cultivo, volviéndolas infértiles. Las lluvias ácidas también destruyen objetos metálicos, como cables de telecomunicaciones, techos de cinc o los refuerzos de hierro de los muros. Los gases volcánicos pueden causar problemas respiratorios en hombres y animales, así como contaminar fuentes de agua superficiales provocando pérdidas en el rendimiento de la agricultura y de la ganadería y problemas de salud.

1.1.1.3 Ceniza y tefra

Durante las erupciones, los magmas pueden perder sus gases de forma muy violenta y formar así una gran cantidad de fragmentos de roca de todos los tamaños (**piroclastos**). Los fragmentos grandes (mayores de 2 mm de diámetro) caen directamente sobre el volcán, mientras que los fragmentos más finos, llamados “**ceniza**”, pueden ser acarreados por el viento a través de largas distancias (Figura 1.5.b). Al depositarse, la ceniza volcánica puede tener los mismos efectos nocivos que los gases volcánicos, ya que contiene compuestos sulfurosos tóxicos. Varios tipos de cultivos mueren rápidamente al contacto con la ceniza. El ganado que se alimenta de pasto o agua contaminados por ceniza puede sufrir graves problemas de salud. En los humanos, lo más común es que la presencia de ceniza en la atmósfera cause problemas respiratorios e irritación de los ojos.

Además, la ceniza puede infiltrarse fácilmente en cualquier maquinaria y provocar daños en motores o sistemas eléctricos. Existen varios ejemplos de aviones que han atravesado nubes de ceniza volcánica durante el vuelo y que han sufrido serios daños en sus turbinas. Alrededor del mundo, se ha desarrollado un sistema de alerta temprana que sirve para evitar que ocurran desastres de tráfico aéreo ligados a nubes de ceniza.

La cantidad de ceniza producida por un volcán depende del tipo de erupción (ver más abajo), pero es siempre un peligro sea cual sea el tipo de actividad volcánica. El término “**tefra**” sirve para denominar a cualquier tipo de fragmento de roca expulsado por un volcán, y que es transportado por la atmósfera antes de caer al suelo; es un término genérico.

1.1.1.4 Erupciones freáticas

Las erupciones freáticas ocurren cuando un magma provoca, indirectamente, el calentamiento brusco de un cuerpo de agua y la subsiguiente explosión de vapor. Esto ocurre a menudo cuando un magma llega cerca de la superficie y recalienta el agua subterránea que está bajo el volcán: el agua se transforma en vapor y provoca una explosión. Erupciones de este tipo son bastante comunes y producen importantes cantidades de ceniza, como es habitual en el San Cristóbal (Nicaragua) o en el Póas (Costa Rica) (Figura 1.7.a). Las erupciones freáticas son relativamente pequeñas, y solamente son peligrosas cuando se está cerca del punto de emisión. Cuando ocurren durante largos periodos de tiempo, pueden provocar un importante deterioro de las condiciones ambientales en la zona de influencia del volcán. Además, dado que ocurren cuando un magma se acerca rápidamente a la superficie, las erupciones freáticas pueden ser un anuncio de que se avecinan eventos más importantes.

1.1.1.5 Erupciones freatomagmáticas

Un magma puede entrar en contacto directo con un cuerpo de agua (un lago, por ejemplo). Cuando esto sucede, el intenso calor del magma provoca que el agua se transforme en vapor casi instantáneamente, dando lugar a una explosión. Esta explosión, a su vez, provoca que el magma se rompa en muchos fragmentos. Pero estos fragmentos calientes vuelven a entrar en contacto con el agua, la cual vuelve a explotar y a formar fragmentos de magma más pequeños. Este proceso se repite hasta que el magma se rompe en fragmentos muy pequeños (tipo ceniza) que ya se han enfriado, o hasta que ya no hay más agua disponible. Este tipo de reacciones provocan algunas de las explosiones volcánicas más potentes. Son muy peligrosas, ya que pueden lanzar fragmentos de roca a grandes distancias, pero también porque el material eyectado está menos caliente y es más denso. Así, estas rocas pueden formar más fácilmente flujos piroclásticos (ver más abajo).

1.1.1.6 Erupciones estrombolianas

La isla de Estrómboli, al sur de Italia, ha dado nombre a este tipo de erupciones, que ocurren cuando un magma se encuentra cerca de la superficie, dentro de un conducto volcánico, y los gases que son liberados salen en forma de grandes burbujas. Mientras las burbujas de gas estallan violentamente en el cráter, los fragmentos de magma son expulsados al aire. Normalmente, hay una columna de burbujas ascendiendo por el conducto, y así las erupciones estrombolianas ocurren a intervalos bastante regulares. El Pacaya (Guatemala) y el Cerro Negro (Nicaragua) son muy conocidos por su actividad estromboliana (Figuras 1.6.a, 1.7.c). Generalmente, este tipo de erupciones no son muy peligrosas y es posible acercarse bastante al punto de emisión para hacer observaciones. Son eventos espectaculares y muy emocionantes, por lo que representan atractivos turísticos. Las erupciones estrombolianas forman cantidades importantes de ceniza, que son

depositadas en las cercanías del volcán provocando los problemas ya mencionados. La ciudad de León (Nicaragua), por ejemplo, se ve habitualmente afectada por la ceniza de las erupciones estrombolianas del Cerro Negro.

1.1.1.7 Erupciones vulcanianas

La isla de Vulcano, también en el sur de Italia, ha dado nombre a este tipo de erupciones, que ocurren cuando una parte del magma se ha enfriado dentro de su conducto, cerca de la superficie, y ha formado un tapón. La presión de los gases liberados a mayor profundidad aumenta por detrás del tapón hasta que éste se rompe y ocurre una explosión. Esta explosión puede ser muy potente, como en el Arenal (Costa Rica) o en el Santiaguito (Guatemala) y puede ser bastante peligrosa para las zonas cercanas al volcán (Figura 1.6.b). A menudo, estas erupciones forman flujos piroclásticos (ver más abajo).

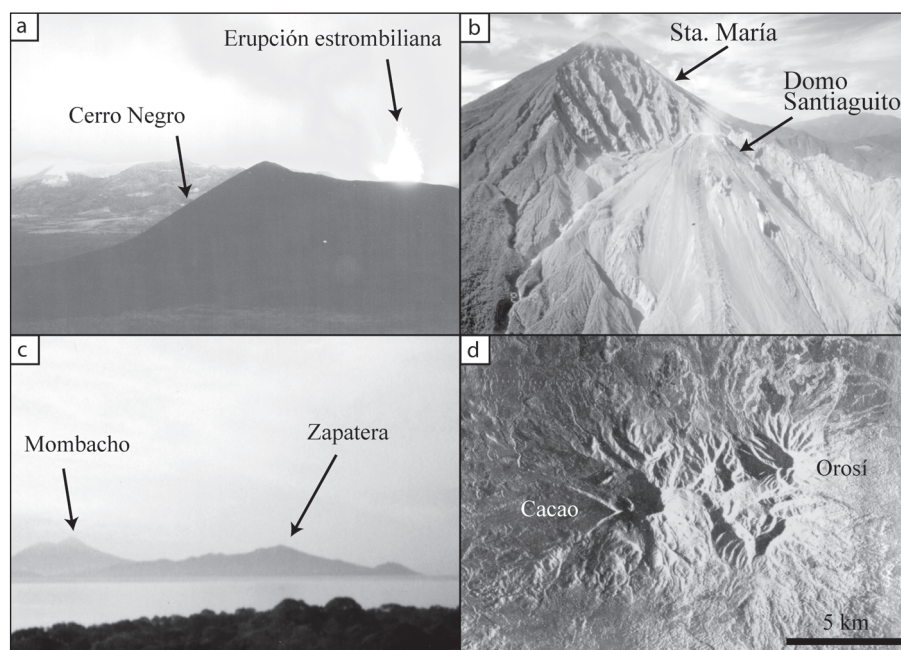


Figura 1.6.- Volcanes en Centroamérica. Tipos de volcanes. **a)** El Cerro Negro, un pequeño cono de 300 metros de altura, compuesto por escoria, bloques, y algunas lavas. Este volcán es muy joven: nació en 1850. **b)** El Santa María. Un gran estratovolcán guatemalteco de 2 500 metros de altura. El Santiaguito es un domo de lava que nació en 1926 después de la gran erupción del Santa María de 1902. El cráter de esa erupción no se formó en la cumbre del volcán, sino al pie. **c)** El Mombacho, el Zapatera, y el lago de Nicaragua. El Zapatera es un escudo volcánico, con pendientes muy suaves (en contraste con el Santa María, por ejemplo). El Mombacho es un volcán mucho más cónico pero está quebrado por tres avalanchas de escombros (ver también la Figura 1.7.f). **d)** Imagen satelital de los volcanes Orosí y Cacao; se observa claramente la forma muy erosionada de este volcán. Sobre Cacao hay relieves con forma de 'V' y escarpes anulares, que son evidencias de grandes deslizamientos antiguos.

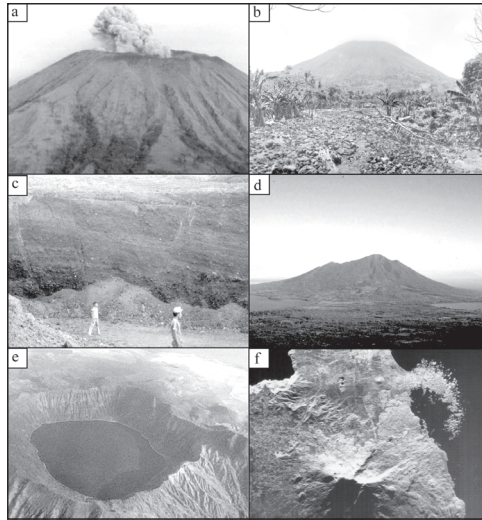


Figura 1.7.- Formas y tamaños de los volcanes. Tipos de erupción. **a)** Volcán San Cristóbal (Nicaragua), con una pequeña erupción de cenizas subiendo unos 300 m por encima del cráter. Este tipo de erupción es fréatomagmática o fréatica, es decir un producto del sobrecalentamiento del agua en contacto con magma, o simplemente del agua en forma de vapor escapando a gran presión. Normalmente, este tipo de actividad es una señal de reactivación del volcán, si bien no siempre alcanza al nivel de una erupción fuerte. El San Cristóbal ha mostrado este tipo de actividad durante 30 años sin mayores cambios. **b)** Volcán Concepción, Lago de Nicaragua. Esta vista del volcán fue tomada desde un depósito de lahar (flujo de lodo y rocas) que bajó del volcán durante una lluvia fuerte. Se ve un chagüite a los dos lados, que fue destruido parcialmente por el lahar. Este tipo de actividad no está asociada directamente con una erupción del volcán, pero es un fenómeno peligroso muy común: en el volcán Casita en 1998, más de 2000 personas murieron atrapadas por un lahar después del Huracán Mitch. **c)** Canteras abiertas en un cono de escoria, cerca de Managua. Se ven las capas de escoria (piedra pómez de color negro). Las capas están cortadas por pequeñas fallas normales (Figura 1.8), asociadas con las fallas de Managua (Figura 1.9). Este tipo de depósito viene de una erupción estromboliana similar a las del Cerro Negro (Figuras 1.3 y 1.6.a). **d)** Estratovolcán en estado de reposo: volcán Maderas, Lago de Nicaragua. El volcán está completamente cubierto de vegetación, y no ha tenido erupciones desde hace más de 8 mil años. El relieve del volcán está quebrado por fallas asociadas con el efecto del peso de este cono sobre su base, que está formada por una gruesa serie de capas de arcilla (ver también la Figura 1.2). Mientras el volcán está inactivo, las fallas siguen creciendo y, de vez en cuando, dan lugar a derrumbes y a lahares dañinos. **e)** Caldera de Apoyeque (Chiltepe, Nicaragua). Este hoyo de más que dos kilómetros de diámetro y 500 m de profundidad fue formado por una erupción pliniana. Una gran cantidad de magma salió rápidamente desde la cámara magmática, lo que provocó la formación de esta enorme depresión. Se ha calculado que durante la erupción, la nube de ceniza pudo haber alcanzado unos 30 km de altura y que los flujos piroclásticos recorrieron 20 km desde el volcán. Al caer y depositarse, la nube de cenizas formó una capa de pómez de hasta 1m de espesor, visible en Managua y sus alrededores. **f)** El volcán Mombacho. Este volcán, construido principalmente por erupciones estrombolianas y coladas de lava, ha sufrido varios derrumbes mayores. El archipiélago de Las Isletas, visible en el Lago de Nicaragua, es el producto de un deslizamiento, que llegó a 12 km del volcán. Se ve muy claramente la cicatriz del colapso. Este colapso y avalancha ocurrió en la época precolombina. Un evento similar ocurrió en el flanco sur del volcán y destruyó completamente el antiguo pueblo indígena de Mombacho en el año 1570. Ninguna de estas avalanchas fue acompañada por una erupción de volcán, lo que indica que la ocurrencia de estos eventos es muy difícil de predecir.

1.1.1.8 Erupciones plinianas

Los “Plinios” pertenecieron a una familia romana que fue testigo de la erupción del volcán Vesubio (Italia) que, en el año 79, enterró la ciudad de Pompeya. “Plinio el Viejo”, que estaba a cargo de algunos barcos romanos en la zona, murió en su intento de salvar gente de la erupción. En cambio, “Plinio el Joven” escribió una descripción detallada de la erupción, cuyo texto ha sobrevivido hasta nuestros días: es la descripción escrita más antigua que se conoce de una erupción.

Lo que sucede durante una erupción pliniana es que los fragmentos de magma son eyectados de forma continua mezclados con los gases, que son liberados con mucha energía durante una explosión de larga duración en el conducto. Este fenómeno puede durar varias horas o hasta días, de forma estable, permanente y con gran fuerza. Los fragmentos de magma y los gases calientes emitidos se mezclan con el aire de la atmósfera, que se calienta y empuja el conjunto hasta decenas de kilómetros de altura. Por sus características, las erupciones plinianas pueden transportar ceniza a distancias enormes y cubrir extensas zonas con sus depósitos. Las erupciones más recientes de este tipo en Centroamérica ocurrieron en el Santa María (Guatemala) en 1902 y en el Cosigüina (Nicaragua) en 1835 (Figura 1.6.b). En ambos casos, murió mucha gente y se provocaron enormes daños. Se conocen también erupciones plinianas más pequeñas, llamadas “micro-plinianas”, como por ejemplo en el Cerro Negro en 1992.

1.1.1.9 Coladas de lava

Cuando el magma llega a la superficie y no explota por falta de gases, forma una colada de lava (Figura 1.5.c). A pesar de que esta sea una de las imágenes más clásicas de un volcán en erupción, en realidad no es un fenómeno peligroso, al menos para la vida humana. Sin embargo, las coladas de lava pueden destruir o inutilizar todo lo que encuentren a su paso, cubriendo lentamente el suelo, las casas y los caminos con una capa de roca. Para la mayor parte de Centroamérica, las coladas de lava representan peligros menores, ya que son muy pocas las rutas de estos flujos que alcanzan zonas urbanas. No obstante, grandes extensiones de tierra han sido cubiertas de lava por los volcanes Arenal, Masaya, Cerro Negro, Izalco y Pacaya en tiempos históricos.

Las coladas de lava fluyen de forma similar a cualquier líquido, siguiendo quebradas o valles y evitando muros o colinas. Las coladas de lava pueden tomar formas variables, dependiendo de su **viscosidad**, antes de enfriarse. La viscosidad es una medida de la resistencia a fluir de un líquido. Por ejemplo, la leche es menos viscosa que la miel. De forma similar, hay coladas de lava que fluyen fácilmente (son poco viscosas) y forman largas lenguas; y también hay otras lavas que fluyen con mucha dificultad y forman aglutinamientos conocidos

como “**domos de lava**” sobre el punto de emisión. Por ejemplo, en el Santiaguito (Guatemala), ha estado creciendo un domo durante por lo menos 70 años (Figura 1.6.b). A veces, este domo da lugar a explosiones vulcanianas.

Algunas lavas viscosas (que fluyen con dificultad), tienen en superficie la apariencia de aglutinamientos de bloques filudos e irregulares: se las llama “**lavas A'a**”, que es un término de origen hawaiano. En cambio, las coladas de lavas poco viscosas forman texturas lustrosas y relativamente lisas, similares a las de la melaza cuando se enfría: se las llama “**lavas pahoe-hoe**” y pueden ser observadas en el Masaya y en El Hoyo (Nicaragua). Cuando un cráter se llena de lava que permanece líquida durante largo tiempo, se dice que tiene un “**lago de lava**”; el Masaya tiene a veces un lago de lava, en el que se puede ver la lava poco viscosa burbujeando.

1.1.1.10 Flujos piroclásticos

Cuando se producen erupciones explosivas como cualquiera de las descritas más arriba (estrombolianas, vulcanianas o plinianas), los fragmentos de magma son enviados a la atmósfera y luego caen a tierra como ceniza o tefra. Pero, a veces, ocurre un fenómeno muy curioso: la mezcla de gases y fragmentos que sale del cráter es tan densa que no puede ascender en la atmósfera y, más bien, se derrumba en su conjunto para formar una especie de avalancha que desciende a gran velocidad por los flancos del volcán. Estas avalanchas son conocidas como “**flujos piroclásticos**” (Figura 1.5.d).

Hay varios tipos de flujos piroclásticos, que llevan asociados importantes peligros:

- **Flujos de bloques y ceniza.** Son avalanchas de bloques, ceniza y gases calientes, que se forman cuando las coladas o los domos de lava se derrumban, o cuando ocurren explosiones vulcanianas de gran tamaño. Generalmente, viajan unos pocos kilómetros, sobre los flancos del volcán, pero se detienen rápidamente en las zonas planas. Tienen velocidades de entre 30 y 100 km/h, temperaturas de entre 100 y 600° C y son muy peligrosos localmente.
- **Oleadas piroclásticas (surges).** Son mezclas de ceniza fina, gases volcánicos y aire caliente, que forman una nube densa que puede viajar fácilmente sobre los flancos del volcán a gran velocidad (más de 100 km/h). Estas nubes son muy calientes (más de 200 °C) y pueden carbonizar fácilmente cualquier material orgánico que encuentren a su paso. Son flujos muy peligrosos. Las oleadas piroclásticas se crean también durante erupciones freatomagmáticas, cuando estas tienden a ser menos calientes pero igualmente destructivas. Mientras estos flujos se mueven, van depositando los fragmentos más grandes, sin perder

- mucho calor. En un momento dado, se vuelven más ligeros que el aire y se elevan para formar una nube muy alta, conocida como “**nube fénix**”, que puede transportar ceniza a enormes distancias.
- **Flujos de pómez y ceniza.** Son flujos producidos durante las erupciones plinianas. Tienen temperaturas y velocidades similares a las oleadas piroclásticas, por lo que pueden deslizarse cubriendo grandes distancias sobre el suelo, superando con facilidad desniveles topográficos. Sus depósitos son llamados “**ignimbritas**”. Una gran parte de Centroamérica está cubierta por depósitos de ignimbritas de antiguas erupciones (Figura 1.7.e). Afortunadamente, este tipo de erupción es poco frecuente. La erupción pliniana del Illopango, en el año 300, envió flujos de pómez sobre una gran parte del valle Central de El Salvador, destruyendo la civilización pre-maya que habitaba la zona. Los flujos de pómez del Santa María (Guatemala), en 1902, mataron a mucha gente.

1.1.1.11 Lahares

A menudo, en Centroamérica, tras una lluvia muy fuerte, la gente habla u oye hablar de “*lavas que bajaban del volcán*”. En realidad, estos flujos no son verdaderas “lavas”, en el sentido de roca fundida, sino mezclas muy densas de rocas volcánicas, ceniza y agua. Estas mezclas son conocidas como “**lahares**”, una palabra de Indonesia, donde estos fenómenos son también comunes, y que significa “río de lodo” (Figuras 1.5.a y 1.7.b). Estos flujos son muy destructivos. Su trayectoria es previsible, ya que se mueven por los cursos de agua (valles y quebradas), pero son tan impetuosos que pueden destruir puentes y edificios y cubrir fácilmente campos y pueblos al desbordarse de sus cauces. Dado que muchos volcanes están formados por materiales sueltos y fácilmente erosionables (ceniza, tefra, pómez), hay potencialmente mucho material disponible para mezclarse con el agua y formar lahares. Un volcán no necesita estar en erupción para formar dichos eventos: lo único que se necesita es suficiente agua. El lahar más destructivo ocurrido recientemente en Centroamérica tuvo lugar en un volcán inactivo, el Casita (Nicaragua), en 1998, tras el huracán Mitch.

1.1.1.12 Inundaciones

Como cualquier montaña, un volcán puede provocar inundaciones después de fuertes lluvias. Los volcanes tienden a concentrar agua en áreas pequeñas como quebradas y valles profundos, y así durante las épocas lluviosas dan lugar a inundaciones.

1.1.1.13 Deslizamientos

Los volcanes están muy a menudo constituidos por rocas sueltas y poco compactas. En ellos, la erosión crea zonas con pendientes muy fuertes e inestables, que pueden deslizarse fácilmente. Como en cualquier parte, este tipo de deslizamientos está a menudo asociado a fuertes lluvias, como fue el caso del Casita (Nicaragua) en 1998. Sin embargo, en los volcanes pueden ocurrir en cualquier momento otros deslizamientos de gran envergadura, no necesariamente asociados con la lluvia, sino más bien con inyecciones de magma, terremotos, o simplemente con el hecho de que la estructura del volcán se ha vuelto tan débil con el tiempo que ya no puede soportar su propio peso. Estos colapsos pueden ser gigantescos, con volúmenes de varios kilómetros cúbicos de roca y pueden devastar extensas áreas. Ejemplos de colapsos volcánicos ocurridos en el pasado pueden ser claramente observados en el Mombacho (Nicaragua) o en el Santa Ana (El Salvador) (Figuras 1.6.c, 1.7.f).

1.1.2 Tipos de volcanes

Los volcanes tienen formas y tamaños variados. En el caso de Centroamérica los podemos dividir en volcanes escudo, estratoconos, calderas, conos de escoria, anillos de toba y maares (“maares”, con dos “a”). Los **volcanes escudo** se caracterizan por tener flancos con pendientes débiles, como el Póas (Costa Rica), el Telica y el Zapatera (Nicaragua) (Figura 1.6.c). Generalmente, están conformados por muchas coladas de lavas superpuestas y por unas pocas capas de piroclastos. Los **estratoconos** son volcanes como el Fuego, el Pacaya (Guatemala), el San Miguel (El Salvador), el San Cristóbal, Maderas y Mombacho (Nicaragua) y el Arenal (Costa Rica) (Figura 1.7.d, 1.7.f). Están conformados, en mayor proporción, por capas de piroclastos, pero también tienen coladas de lava. Las **calderas** son enormes depresiones de la superficie, de varios kilómetros de diámetro y de forma circular u oval, que se forman durante grandes erupciones que evacúan el magma contenido en una cámara magmática. Algunos ejemplos son El Valle (Panamá), Miravalles (Costa Rica), Illopango (El Salvador), Atilán (Guatemala) y Apoyeque (Nicaragua) (Figura 1.7.e).

Las erupciones relativamente pequeñas forman edificios llamados **conos de escoria**, como por ejemplo el Cerro Negro (Nicaragua), que luego pueden crecer hasta estratoconos (Figura 1.7.c). Los **anillos de toba** y los **maares** son creados durante erupciones freáticas y freatomagmáticas. Estos edificios tienen cráteres más grandes y más profundos que los conos de escoria, a causa de la gran fuerza de las explosiones. Tales formas pueden ser vistas en Managua, en el cráter y cono de toba de Tiscapa, o en los cráteres de Nejapa y Asosca.

1. 2 Temblores de tierra y sismos

Los temblores y terremotos (sismos) se producen cuando ocurren movimientos de la corteza de la Tierra a través de fallas o fracturas. Si bien los volcanes pueden ser muy explosivos, casi nunca provocan grandes movimientos en las fallas, y por eso no producen grandes temblores.

1.2.1 Tipos de sismos

Los temblores o sismos de origen volcánico raramente causan daños. Hay varios tipos de sismos:

1.2.1.1 Sismos tectónicos

Son producidos cuando la corteza de la Tierra se rompe y se mueve a lo largo de una falla o fractura. Al igual que en otras partes del mundo, la corteza de la Tierra en Centroamérica está fracturada en grandes segmentos que se mueven en varios sentidos y a diferentes velocidades, empujándose o estirando los unos de los otros. Al principio, las rocas de la corteza resisten dichos movimientos pero, a medida que las presiones aumentan, la corteza empieza a romperse. El sismo es el movimiento que se produce durante esas rupturas. Si la ruptura es grande, se puede sentir un temblor de tierra. Igualmente, si uno está cerca del sitio de ruptura, es más posible que sienta el temblor que si está alejado de él. Para simular un sismo se puede, por ejemplo, deslizar un bloque de madera sobre una superficie áspera y sentir claramente las vibraciones que este movimiento provoca. Un temblor de tierra es similar, pero de tamaño mucho mayor. Los sismos ocurren en superficie o más comúnmente en profundidad. El **epicentro** es el punto de la superficie terrestre bajo el cual ocurrió un sismo, es decir que se define con dos coordenadas: latitud y longitud. El **hipocentro**, en cambio, es el punto de la Tierra donde ocurrió el sismo, es decir que se define con tres coordenadas: latitud, longitud y profundidad.

1.2.1.2 Sismos volcano-tectónicos

Son sismos provocados por rupturas de la corteza de la Tierra pero, en este caso, las rupturas están relacionadas con el movimiento de los magmas. Generalmente, son de tamaño muy pequeño, solo perceptibles con instrumentos especialmente diseñados, por lo que no son peligrosos. Más bien, cuando estos sismos son detectados, pueden constituir señales preventivas, ya que indican que un volcán puede estar reactivándose.

1.2.1.3 Tremor

Es un tipo de sismo causado por el movimiento de un magma en la corteza. Como cualquier fluido que se mueve por un canal (por ejemplo, el aire en una trompeta), el magma causa vibraciones y ruido al moverse por una fractura o un conducto subterráneo. El tremor no es peligroso y es muy útil, ya que ofrece información a los vulcanólogos sobre el movimiento del magma en profundidad (Figura 1.8).

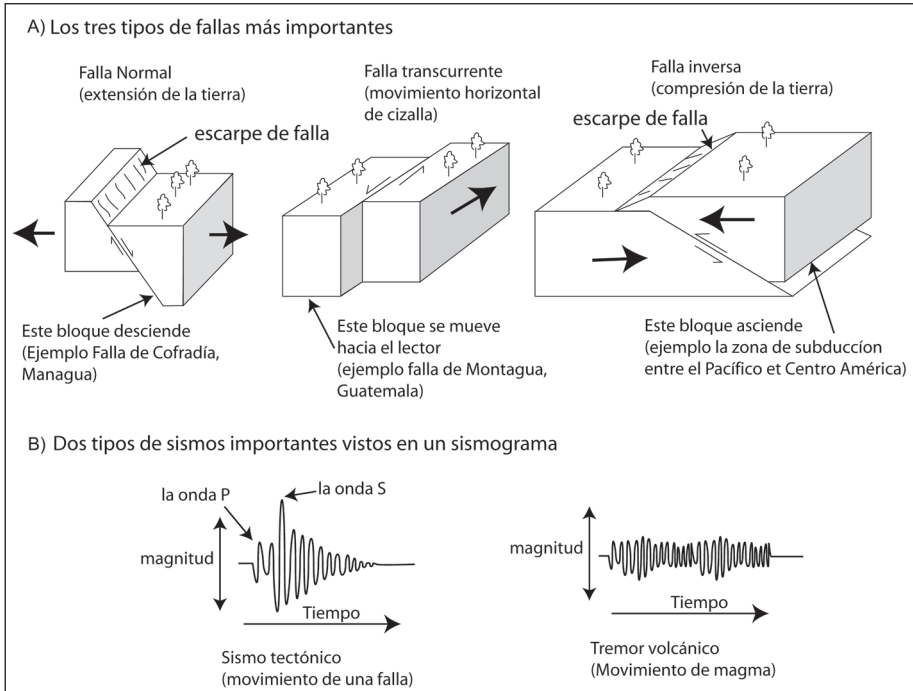


Figura 1.8.- Tipos de fallas y sismos. **A.** Los tres principales tipos de fallas, asociados con la extensión, compresión y movimientos transcurrentes de la corteza de la Tierra. **B.** Dos tipos de sismos importantes. La mayoría de sismos son combinaciones de los dos tipos mostrados (tectónicos y volcánicos). Un sismo tectónico (movimiento de una falla) da lugar a la formación simultánea de dos ondas llamadas "P" y "S". Las ondas "P" viajan siempre más rápido y llegan al sismómetro antes que las ondas "S". La diferencia del tiempo de llegada entre las dos ondas permite estimar la distancia entre la fuente del temblor (una falla) y el sismómetro. Con las medidas simultáneas de varios sismómetros distribuidos en una región es posible localizar con buena precisión la fuente del temblor. La duración y la amplitud máxima de la onda registrada por el sismómetro permiten calcular la magnitud del sismo. El tremor volcánico está formado por vibraciones más continuas: se ha observado que este tipo de señal sísmica puede durar un tiempo largo (entre horas y días) durante una erupción. El tremor es producido por el movimiento de fluidos (magma o gases volcánicos) en los conductos volcánicos; su magnitud en la escala de Richter es siempre inferior a 3 (ver Tabla 1).

1.2.2 Tamaño de un sismo

El tamaño de un sismo se mide utilizando la “escala de Richter”, que es una estimación de la energía liberada por el sismo. La escala no tiene límite superior ni inferior; sin embargo, las dimensiones y las características físicas de nuestro planeta impiden que existan sismos naturales superiores al grado 10 o inferiores al grado -2. Es importante hacer notar que la escala de Richter es de tipo logarítmico, lo que quiere decir, por ejemplo, que un sismo de grado 6 es diez veces más fuerte que un sismo de grado 5, cien veces más fuerte que uno de grado 4, mil veces más fuerte que uno de grado 3, etc. (Tabla 1.1). Los sismos volcánico-tectónicos tienen un grado máximo de 3 o 4, y el temblor es menor, por lo que solo se detectan con instrumentos especiales (sismómetros). Normalmente, los sismos de grado 5 ya son sentidos con bastante fuerza, y los sismos de grado superior al 6 empiezan a provocar serios daños. Cuanto más cerca estemos del epicentro, mayores serán los efectos de un sismo. Estos efectos se estiman mediante la *escala de Mercalli* que va del I al XII (Tabla 1.2). Durante los grandes sismos (superiores al grado 7), los daños pueden ser enormes, como lo muestran claramente la experiencia y la historia.

Magnitud de Richter	Masa de TNT equivalente	Energía equivalente cotidiana
-1,5	1 gramo	Golpe de un mazo
1	170 gramos	Explosión de una granada
2	29 kg	Explosión de un tanque de gas
3	181 kg	Explosión de bomba mediana
4	6 toneladas	Pequeña bomba atómica
5	199 toneladas	Terremoto de San Salvador 2001 (5,5 Richter)
6	1 270 toneladas	Terremoto de Managua 1972 (6,5 Richter)
7	200 000 toneladas	Terremoto de Guatemala 1976 (7,5 Richter)
8	6 millones de t	Terremoto de México 1985 (8,1 Richter)
9	200 millones de t	Terremoto del Océano Índico 2004 (9,1 Richter)
10	260 millones de t	Terremoto de Valdivia Chile 1960 (9,6 Richter)

Tabla 1.1.- Magnitud de Richter. La escala de Richter es una medida de la cantidad de energía liberada por un sismo; se la puede comprender también al compararla con la cantidad de energía liberada por una determinada masa de TNT durante una explosión.

1.2.3 Fallas

Las fallas son fracturas de la corteza de la Tierra, formadas por el movimiento de segmentos adyacentes de la misma. En Centroamérica, las fallas más grandes se encuentran en la “zona de subducción”, que es donde la corteza del fondo del océano Pacífico se hunde bajo el continente (Figura 1.4). En Guatemala, la falla de Montagua forma el borde geológico entre Norte y Centroamérica.

Fallas más pequeñas cruzan la mayoría de los volcanes de Centroamérica. Estas fallas son más pequeñas y producen sismos menos grandes pero, a menudo, están muy cerca de pueblos y ciudades y pueden causar importantes daños. Managua está construida sobre fallas, así como San Salvador y la ciudad de Guatemala (Figura 1.9).

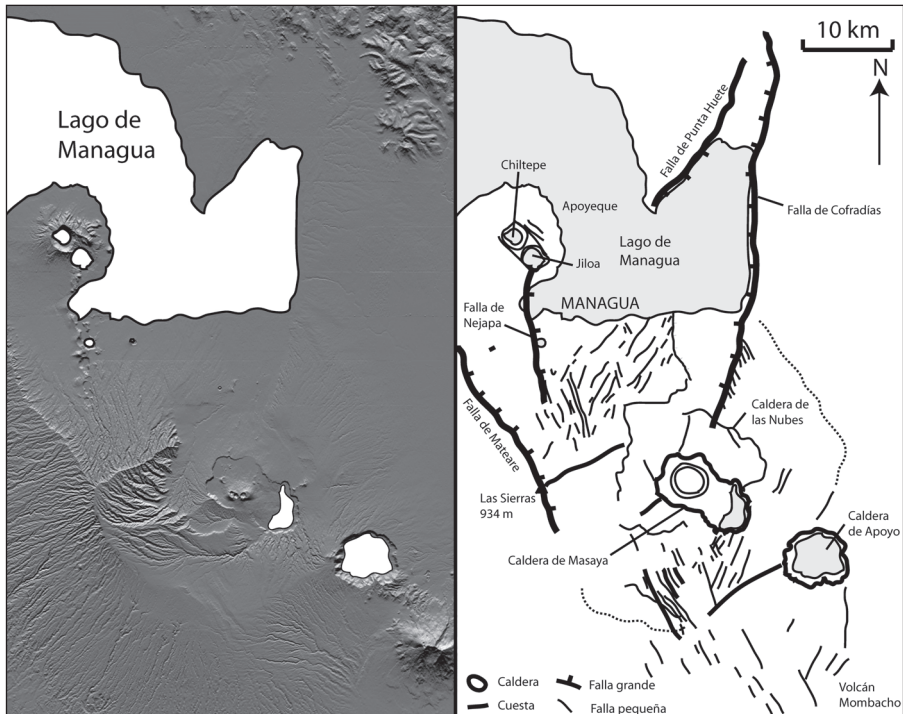


Figura 1.9.- Ejemplo de una zona de fallas: El Graben de Managua. La imagen de la izquierda corresponde a la topografía de la zona de Managua. El mapa muestra las fallas y las estructuras volcánicas más importantes de la zona. La actividad de las fallas y de los volcanes están seguramente muy interrelacionadas, pero hasta la actualidad no se entiende muy bien cómo ocurren estas relaciones.

1.2.4 Peligros sísmicos

En Centroamérica se conocen dos tipos principales de sismos peligrosos. Los primeros son los sismos de la zona de subducción, que ocurren costa afuera, bajo el mar. Pueden ser tan energéticos que causen daños en grandes zonas. Dado que ocurren en el mar, pueden también formar tsunamis, que son grandes olas, como en el caso de Nicaragua en 1992. El segundo tipo de sismo peligroso es el que ocurre en fallas locales. A lo largo de toda Centroamérica, hay una gran cantidad de fallas locales, menos grandes. Por

su tamaño, estas fallas provocan, como máximo, sismos de grado 6 en la escala de Richter. Pero, dado que los hipocentros se encuentran cerca de la superficie (a menos de 10 Km), sus efectos pueden sentirse muy fácilmente en las poblaciones cercanas. Como ya se había mencionado, las ciudades de Managua, San Salvador y Guatemala están ubicadas sobre este tipo de fallas. La gran falla de Montagua, en Guatemala, es un sitio donde también ocurren grandes sismos, dado que es un límite geológico importante entre Norte y Centroamérica (Figura 1.4).

1.2.5 Mitigación del peligro sísmico

Al igual que las erupciones, los sismos no pueden ser evitados, si bien ambos tipos de fenómenos son diferentes. Los sismos sacuden la Tierra durante pocos minutos, pero no cubren el suelo con capas de roca o ceniza, ni causan deterioros continuos en el medio ambiente, como hacen las erupciones. Los sismos terminan rápidamente y causan diferentes problemas. En primer lugar, es necesario localizar dónde se encuentran las fallas, determinar su tamaño y estimar su potencial para causar sismos, ya que no todas las fallas provocan sismos. Luego, se debe procurar que las construcciones (edificios, puentes, casas) de las cercanías sean lo suficientemente fuertes para resistir los potenciales sismos. Comúnmente, los grandes sismos provocan deslizamientos de tierras, por lo que la estabilidad de los terrenos debe ser también considerada. A menudo, tras los grandes sismos ocurren incendios que pueden causar severos daños adicionales. Desafortunadamente, muchos viejos edificios no han sido construidos para resistir grandes sismos, o la planificación y las normas utilizadas para su construcción no fueron suficientemente buenas. Por lo tanto, aún existen elevadas probabilidades de que ocurran daños y desastres.

Entonces, ¿qué hacer en caso de sismo? En varios lugares, como en edificios públicos por ejemplo, deberían existir espacios de refugio en caso de sismo. Por supuesto, estos espacios deben ser cámaras reforzadas que resistan las sacudidas. Durante un fuerte sismo, es una buena idea buscar refugio en zonas abiertas, estando siempre atentos a los objetos que empiezan a desprenderse y a caer. Como medida preventiva, hemos de intentar localizar caminos alternativos de escape ya que, en Centroamérica, cada ciudadano tiene elevadas probabilidades de experimentar al menos un terremoto en su vida.

1.3 Referencias

- Cas R.A.F. and Wright J.V. (1987). "Volcanic Successions". Unwin Hyman Inc., 528 pp.
- Francis P. (1993). "Volcanoes: A Planetary Perspective". Oxford University Press, 443 pp.
- Rose W. et al. (Eds.) (2006). "Volcanic Hazards in Central America". The Geological Society of America Special Paper 412, 276 pp.
- Sigurdsson H. et al. (Eds) (2000). "Encyclopedia of volcanoes". Academic Press – San Diego, 1417 pp.
- The Smithsonian Institution - Global Volcanism Program Website: www.volcano.si.edu