

# Capítulo 1

## Antecedentes

### 1.1 Marco Teórico

#### 1.1.1 Tipos de Vulcanismo y Erupciones

Un volcán se define como un sitio del cual sale material magmático o sus derivados, formando una acumulación que por lo general toma una forma casi cónica. Los volcanes tienen en su cumbre o en sus costados cavidades de forma aproximadamente circular llamadas cráteres.

Se dice que un volcán es activo, cuando existe magma fundido en su interior, o existe la posibilidad de recibir nuevas aportaciones de magma y por tanto mantiene el potencial de producir erupciones, pero generalmente se dice que un volcán está activo cuando presenta actividad eruptiva reciente.

Los volcanes de acuerdo a su tipo de vulcanismo pueden clasificarse en:

**Monogenéticos:** Es aquel en que la erupción ocurre durante una sola etapa, es decir, nacen, desarrollan una erupción que puede durar varios años, se extinguen y no vuelven a tener actividad.

**Poligenéticos:** Es aquel en el cual se forman edificios volcánicos por la acumulación de materiales emitidos por erupciones anteriores.

Es importante además mencionar que los volcanes dependiendo de a qué tipo pertenezcan nos proporcionan información sobre su actividad pasada. Estos tipos pueden ser:

**Calderas:** Depresiones circular o elíptica de 1 a 1000 km de diámetro, se forma cuando el magma se obtiene de un reservorio somero.

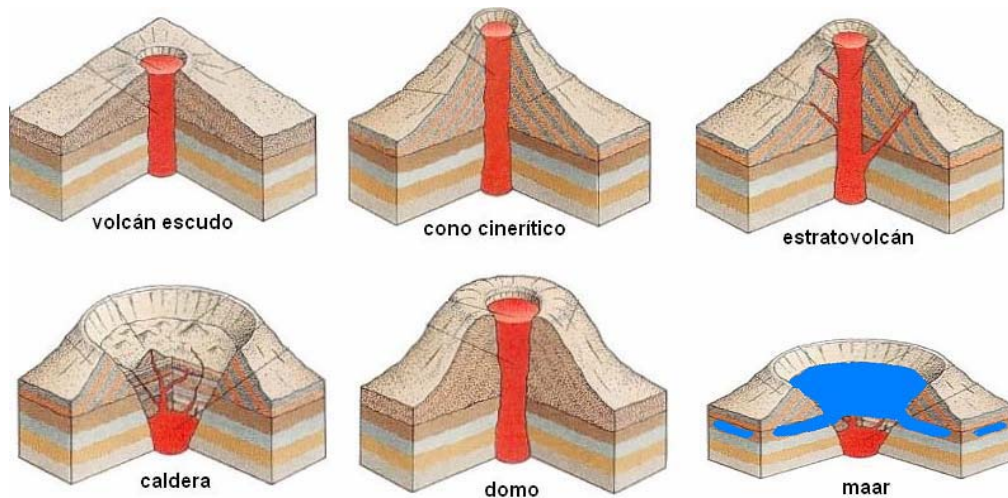
**Cono Cinerítico:** Es una montaña con laderas muy inclinadas y se forma debido a la acumulación de partículas y lava mezclada con gases. Tienen alturas entre 30 y 450m y generalmente son monogenéticos.

**Maar:** Son conos con cráteres muy grandes de bajo relieve que corta el nivel freático por lo que forma un lago en el fondo llamado "mare" y se forma por erupciones explosivas someras.

**Volcán Escudo:** es un volcán amplio con pendientes menores a 10° constituidas por erupciones de lava basáltica fluida.

**Estratovolcán:** Son volcanes con formas cónicas y pendientes pronunciadas, construidas a partir de erupciones de flujos de lava viscosa, flujos piroclásticos y tefra, generalmente estos volcanes tienen erupciones explosivas.

**Domos:** se forman por masas de lava relativamente pequeñas, presentan pendientes fuertes que tienden a derrumbarse y forman flujos de bloques y cenizas. También este tipo de volcán es característico de actividad explosiva y llegan a medir hasta 200m de diámetro y 500m de altura.



**Figura 1.1 Tipos de volcanes (Tomado de la Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos, 2005)**

Por otro lado los tipos de erupciones más conocidas son:

**Erupción efusiva o Hawaiana:** Es una erupción dominada por la salida continua de lava de baja viscosidad que puede formar flujos o ríos de lava. El gas se libera fácilmente. La extrusión puede durar minutos o días.

**Erupción Estromboliana:** Las erupciones estrombolianas están caracterizadas por una intermitente explosión o fuente de lava basáltica de viscosidad mayor a la Hawaiana, proviene de un solo cráter o fisura. Cada episodio de ésta obedece a la liberación de gases volcánicos, lo que ocurre, típicamente, cada varios minutos, algunas veces en forma rítmica y otras en forma irregular. Origina columnas eruptivas de hasta 10,000 m de altura.

**Erupción Vulcaniana:** La erupción vulcaniana es un tipo de erupción explosiva que lanza fragmentos de lava nueva que no toman una forma redondeada durante su viaje por el aire. Esto se debe a que la lava es muy viscosa o ya está solidificada. Producen columnas eruptivas de 10 a 20 km de altura, con velocidades iniciales de hasta 200 m/s.

**Erupción Pliniana y Peleana:** Las erupciones plinianas son grandes eventos explosivos que forman enormes columnas de tefra y gas que se elevan hasta la estratosfera (entre 20 y 45 km). Las emisiones son continuas y de magma viscoso.

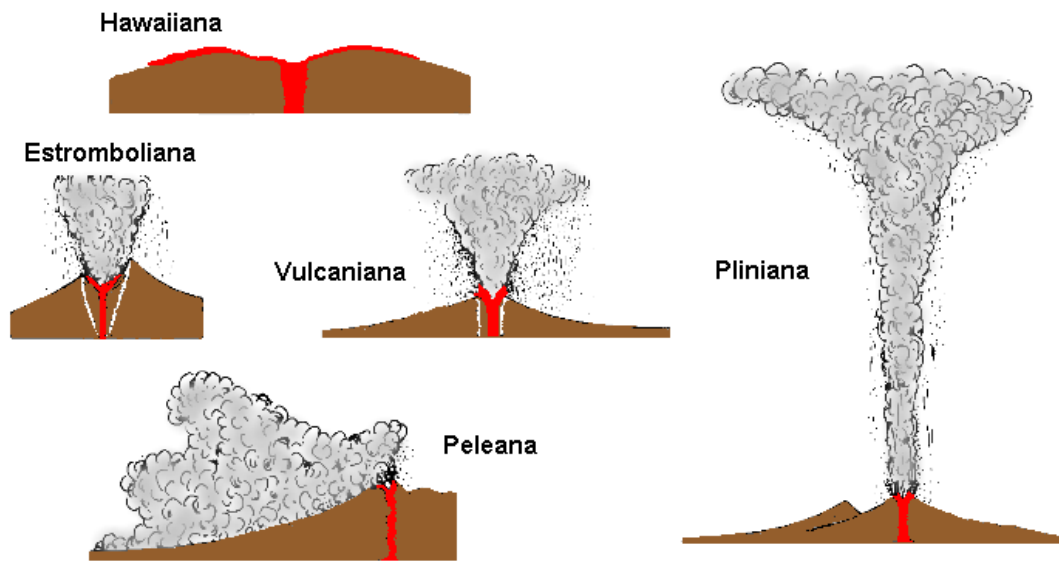


Figura 1.2 Tipos de erupciones

Actualmente, una de las formas más aceptadas de cuantificar las erupciones explosivas (forma que no es válida para las erupciones efusivas) es la escala del Índice de Explosividad Volcánica (VEI, por sus siglas en inglés). Esta escala fue definida por Newhall y Self en 1982, y es una escala compuesta en la que se toman en cuenta diversas características de una erupción.

Tabla 1.1 Índice de Explosividad Volcánica. Esquema de clasificación de Newhall y Self (1982). El catálogo de volcanes activos que se menciona es el de Simkin et al. (1981).

VEI	Descrip. Erupción	Vol. Pirocl.	h col. (km)	Clasificación					Duración (hr. expl. cont.)				Iny. Tropa.	Iny. Estra.
				Estro.	Plin.	Haw.	Vulc.	Ultra-Plin	<1	>12	1-6	6-12		
0	no explosiva	$<10^4$	$<0,1$			*			*				despreciable	no
1	pequeña	$10^4-10^6$	0,1-1	*		*			*				menor	no
2	moderada	$10^6-10^7$	1-5	*			*		*	*			moderada	no
3	moderada-grande	$10^7-10^8$	3-15		*		*		*	*	*		substantial	posible
4	grande	$10^8-10^9$	10-25		*		*		*	*	*		----	definitiva
5	muy grande	$10^9-10^{10}$	$>25$		*			*	*	*	*		----	significativa
6	-----	$10^{10}-10^{11}$	----		*			*	*	*	*		----	----
7	-----	$10^{11}-10^{12}$	----		*			*	*	*	*		----	----
8	-----	$>10^{12}$	----		*			*	*	*	*		----	----

## 1.1.2 Peligros Volcánicos

Los principales peligros volcánicos asociados a los volcanes pueden ser agrupados en las siguientes categorías (Macías, 1995):

### 1. *Peligros por eventos que involucran el flujo de materiales volcánicos.*

#### **Lavas**

Son flujos de material fundido e incandescente que siguen la morfología del terreno, avanzan a velocidades bajas y rara vez representan un peligro para la vida humana como son:

- a) Derrames de lavas
- b) Domos de lava

#### **Flujos piroclásticos de densidad**

Se refiere a flujos de materiales volcánicos generados por erupciones de tipo explosivo los cuales están compuestos por gases tóxicos y fragmentos de roca. Estos flujos viajan a grandes velocidades (200-300 km/hr) y por sus altas temperaturas destruyen y queman todo a su paso, su alcance está en función de la pendiente del volcán y generalmente es menor a 10-15 km. Se definen como:

- a) Flujos piroclásticos
- b) Oleadas piroclásticas “surges”
- c) Explosiones dirigidas “blast”

#### **Flujos de lodo y sus transformaciones (lahares)**

Un lahar es una mezcla de agua y una alta concentración de partículas que produce un flujo capaz de acarrear materiales de gran tamaño por grandes distancias, por ejemplo el Nevado del Ruiz, Colombia en 1985, el cual alcanzó 60 km.

#### **Derrumbes gigantes (avalanchas de escombros)**

Es el derrumbe de una parte del edificio volcánico debido a la intrusión de magma debajo del aparato volcánico o a la actividad sísmica intensa.

### 2. *Peligros por eventos de caída libre.*

#### **Caída de Material Piroclástico y proyectiles balísticos**

Son los materiales de caída libre, compuestos por fragmentos de lava vesicular, cristales y roca preexistente, son emitidos del cráter por erupciones de tipo explosivo ya sea de manera balística o verticalmente en la atmósfera para formar columnas de material volcánico que puede alcanzar varios kilómetros de altura.

## 1.2 Trabajos Anteriores

### 1.2.1 Volcán Popocatepetl

El volcán Popocatepetl es uno de los volcanes que ha registrado mayor actividad en los últimos años. A partir de 1993 las fumarolas que emitía fueron más sobresalientes que en años anteriores por los que varios científicos de la Universidad Nacional Autónoma de México crearon un Comité Científico Técnico para coordinar y dirigir las acciones de monitoreo y de instrumentación científica en el volcán. Dentro de este comité se reunieron especialistas en vulcanología y sismología los cuales para la crisis del 21 de diciembre de 1994 pudieron tener información más detallada del fenómeno eruptivo.

Uno de los trabajos más completos que se han llevado a cabo en cuanto a la actividad del volcán Popocatepetl y del periodo más activo, es: "Volcán Popocatepetl: estudios realizados durante la crisis de 1994-1995" realizado en conjunto por el Instituto de Geofísica y el CENAPRED. En este informe se tiene una recopilación de los antecedentes históricos, una descripción de la instrumentación empleada para el monitoreo y su ubicación, la zonificación de peligros volcánicos del Popocatepetl, aspectos geológicos, geofísicos, geoquímicos y de impacto atmosférico y aspectos de comunicación entre el grupo científico, las autoridades de protección civil y la población

#### Geología del Volcán Popocatepetl

El cono del Popocatepetl ha sido construido durante los últimos 23 000 años, tiene una elevación sobre el nivel del mar de 5472, una elevación con respecto a la topografía de la región de aproximadamente 3000 m.

Durante los últimos 20 000 años, la actividad explosiva del Popocatepetl ha sido caracterizada por cuatro eventos mayores, con producción de pómez de caída y flujos de ceniza (hace 14 000, 5000, 2150 y 1 100 años) y cuatro menos expuestos, ocurridos hace 11 000, 9 000, 7 000 y 1 800 años (Siebe et al., 1997; Siebe y Macías, 2004).

Los primeros estudiosos que reportan depósitos de avalancha en el Popocatepetl son Robin (1984) y Boudal (1987). Estos dos artículos se refieren casi en su totalidad a la última erupción del tipo Santa Elena en el Popocatepetl y mencionan la existencia de un último depósito que cubre amplias partes de la ladera sur del volcán. Estos autores no lograron obtener material orgánico que les permitiese fechar el depósito sin embargo lo estimaron entre 30 000 y 50 000 años atrás. Este depósito se calculó que tiene 300 km<sup>2</sup> y un volumen de 27.7 km<sup>3</sup>. El alcance máximo horizontal del depósito es de L=30 km. Estimaban una altura del volcán sobre el terreno de H=3,500m en un momento previo al derrumbe lo que da un coeficiente de fricción de H/L= 0.116 llegando a la conclusión de que este depósito debería ser catalogado como "gigante".

Estudios que se hicieron a partir de 1993 revelan que los resultados obtenidos por estos dos autores tienen que ser revaluados, puesto que algunos investigadores estiman que la distancia horizontal que alcanzó el depósito llega a L=75 km hacia el sur, y además de que no se trata de un solo depósito si no de al menos 4 depósitos de avalancha. Uno de ellos se encuentra en la ladera Este y cubre un área de aproximadamente 50 km<sup>2</sup> y alcanza espesores de más de 25 m en varios lugares. Desafortunadamente no hay muchos afloramientos de este depósito ya que la mayor parte

del mismo se encuentra cubierto por depósitos piroclásticos jóvenes provenientes del Popocatepetl.

Los mejores afloramientos que pueden verse están en los cortes de las carreteras federales que comunican Atlixco-Cholula y Atlixco-San Juan Tianguistengo. Este depósito tiene una edad de varios miles de años y probablemente se originó en el Iztaccihuatl. Ahí se puede observar un gran cráter en forma de herradura que forma las llamadas "Rodillas", un accidente topográfico en la parte sur del volcán. Este cráter tiene un diámetro de aproximadamente 1400 m y está abierto hacia el sureste, dirección hacia donde se encuentra el depósito de avalancha. Se piensa que el primer depósito pudo deberse a este cráter.

Los otros tres depósitos de avalancha relacionados son depósitos que se traslapan y cubren una superficie de al menos 600 km<sup>2</sup> y se encuentran en la vertiente sur del Popocatepetl. Muchos de los afloramientos están visibles en las barrancas que drenan el flanco sur y muestran dos o tres diferentes depósitos superpuestos, pero todos muy similares en su litología y estructura interna por lo cual son difíciles de distinguir. Estos depósitos alcanzaron un desplazamiento horizontal de más de L=70 km hacia el sur del volcán. Los científicos asumen que si la altura del cono es similar a la actual H=4 500 m se obtiene un coeficiente de fricción de H/L=0.0643, el cual es mucho menos que el valor promedio para este tipo de depósitos e implica que hubo una gran movilidad del material. De estos tres depósitos no es posible aun identificar los cráteres que los originaron pues han sido cubiertos por derrames gigantes de anteriores volcanes.

La estructura interna y textura de los depósitos por lo general son masivos con contactos inferiores bien definidos. Consisten de fragmentos de roca del antiguo edificio volcánico, incluyendo bloques de lava dacítica y andesítica, porciones de depósitos piroclásticos, y áreas alteradas hidrotermalmente. Los bloques que componen el depósito son más grandes en las porciones del depósito próximas al volcán, mientras que en las porciones distales son más pequeños. Los grandes bloques en las partes proximales muestran una típica estructura de "rompecabezas". (C. Siebe, M. Abrams y J. L. Macías, 1995)

El último derrumbe del Popocatepetl estuvo asociado a la erupción más violenta que se ha podido identificar en la historia del volcán. El derrumbe se llevo a cabo en el flanco sur, el cual generó un flujo turbulento o "blast" que produjo un depósito de varios metros de espesor a más de 10 km de distancia del cráter. El depósito cuenta con una alternancia de capas de gravas, arena y bloques de color rojizo a gris. Los fragmentos son angulares y las capas se caracterizan por tener estratificación cruzada y otras estructuras que indican emplazamiento por un flujo horizontal, turbulento y de poca densidad.

El 'blast' fue seguido por el emplazamiento de un depósito de pómez de caída el cual consta de fragmentos angulares de una pómez con fenocristales de biotita y alcanza espesores de varios metros. Por su distribución y dimensiones es el producto de la caída de fragmentos de una columna de tipo Pliniana. La erupción terminó con el emplazamiento de flujos de ceniza que se produjeron cuando la columna se colapsó y alcanzaron distancias de más de 30 km del volcán.

### **Geofísica del Volcán Popocatepetl**

La cuantificación de los diferentes eventos sismo-volcánicos y sus cambios temporales tanto en número como en energía liberada se han utilizado para predecir erupciones volcánicas. A partir de la crisis que se generó debido a la reactivación del volcán Popocatepetl, durante el periodo del 21 de diciembre de 1994 al 30 de marzo de 1995, se clasificaron y cuantificaron los eventos sísmicos asociados, con el fin de determinar las diferentes variaciones de la actividad sísmica del volcán y para tratar de entender cuál fue el proceso que generó esta crisis y sus implicaciones al futuro (Valdés, 1995).

Con la instalación de 4 estaciones telemétricas PPC (Colibrí, Pue.), PPB (Bonzai, Pue.), LMVM (Loma del muerto, Méx) y SNPP (San Nicolás de los Ranchos, Pue.) y con la integración de las

estaciones PPM (Tlamacas, Méx.), PPA (Alzomoni, Méx.) y PPX (Chipiquixtle, Méx), se conformó La Red Sísmica del Volcán Popocatepetl, para monitorear de manera continua la actividad sísmica asociada al volcán. Con el análisis de los registros se logró clasificar los siguientes 4 tipos de eventos:

- **Tipo “A”:** Estos eventos son similares a los tectónicos con frecuencias típicas de 5 Hz y las fases de las ondas P y S son definidas con tiempos de fase S-P de 1.5 a 3 seg.; la duración de coda es menor a los 40 seg.

Estos eventos representan fallamientos y fracturamientos de corte, similares a los que se producen en los eventos tectónicos.

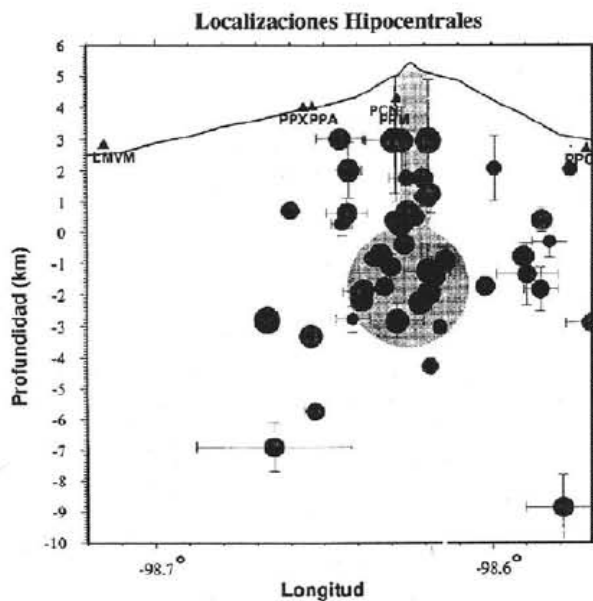
- **Tipo “B”:** Los periodos característicos de estos eventos se encuentran en el rango de 0.8 a 1.6 seg. La fase de la onda P es emergente y no es posible identificar la fase de onda S; la duración de la coda es menor a los 125 seg.
- **Tipo “AB”:** Estos eventos se caracterizan por tener componentes de altas y bajas frecuencias. Las altas frecuencias incluyen fases impulsivas de ondas P y S, con un tiempo S-P de 1.5 a 2 seg.; la duración de esta componente es de 5.5 seg. aproximadamente y las amplitudes de las ondas P y S son más pequeñas que la de los eventos Tipo “A”. Los periodos característicos de la componente de baja frecuencia son de 0.8 a 1.1 seg. y la duración de la coda de todo evento es menor a los 150 seg.
- **Tremor:** Este tipo de señal sísmica se debe a la oscilación o vibración continua de elementos del aparato volcánico. El tremor es comúnmente asociado a los eventos del periodo largo o Tipo “B” ya que los espectros de ambas señales son consistentes.

A partir de la crisis de 1994 se inicia la localización de los eventos que contenían primeros arribos claros en al menos tres de las estaciones que se instalaron en el volcán. Un total de 56 sismos fueron localizados usando sismogramas digitales para leer sus fases con una precisión de hasta 0.01 seg., aunque no en todas los eventos los arribos fueron tan claros como para permitir estas precisiones.

La magnitud de los sismos estudiados, fueron calculadas usando la formula  $M_c = -0.09 + 1.85 \log(\tau) + 0.0004 \Delta$  en donde la duración de la señal en segundos y la distancia epicentral en kilómetros. Las magnitudes calculadas se encuentran entre 1.4 y 3.4 grados, con magnitud promedio de 2.36.

Las localizaciones hipocentrales (Figura 1.3) vistas en corte con orientación Oeste-Este muestran que la mayoría de los sismos se encuentran localizados en un volumen de 3.5 km de diámetro con un conducto cilíndrico de 1 km de diámetro y que conecta al volumen con el cráter. Los hipocentros de los eventos que definen este volumen son los que presentan errores menores en su localización, con excepción de los 3 sismos superficiales registrados.

Este volumen sugiere una cámara magmática con un techo a la cota del nivel del mar y un conducto angosto que comunica con el cráter. Proyectando los hipocentros en un corte Norte-Sur se observa que los sismos definen un volumen y un conducto similar al mencionado.



**Figura 1.3** Sección Oeste-Este con las localizaciones hipocentrales (círculos oscuros). Las barras verticales y horizontales corresponden a los errores de localización. Las localizaciones sugieren una cámara magmática de 3 km de diámetro y un conducto de 4 km de largo (Tomada de Valdés, 1995).

En conclusión con los datos que se obtuvieron durante el periodo de estudio de los sismos se pudo establecer que el comportamiento sísmico es importante previo a una fase crítica del volcán Popocatepetl. Destacando la necesidad de mantener un monitoreo continuo de la actividad sísmica del volcán, para entender si su comportamiento es estable o si representa el preámbulo de un comportamiento de tipo eruptivo. Además de que ahora se considera importante el mantener operando continuamente las estaciones sismológicas.

## 1.2.2 Volcán Citlaltépetl

El Citlaltépetl o Pico de Orizaba es un estratovolcán cuenta con una elevación de 5675 metros sobre el nivel del mar.

El Pico de Orizaba es un estratovolcán cuaternario, que ha sido construido sobre rocas calizas y lutitas de edad Cretácica (Yañez-García y García-Duran, 1982). Según algunos autores el edificio volcánico del Pico de Orizaba ha sido construido y destruido en varias ocasiones pues se tienen indicios de la existencia de diversos eventos, los cuales sugieren que el volcán ha sido construido por lo menos en 3 etapas eruptivas diferentes (Carrasco-Núñez, 2000).

De acuerdo a este autor (Carrasco-Núñez, 2000), las etapas de evolución del volcán fueron nombradas de la etapa más antigua a la más reciente como:

- 1) El cono de Torrecillas: Inició su formación hace  $0.65 \pm 0.71$  Ma. con la emisión de lavas andesíticas y dacíticas, formando un gran estratovolcán resultado de una fase predominantemente efusiva.
- 2) El cono Espolón de Oro: Se formó hace 0.21 Ma. con la expulsión de flujos de lava andesítica alta en sílice y dacítica, las cuales formaron la base del cono sobre los restos de Torrecillas, y la parte media y la cima del cono presentaron una alternancia de depósitos de ceniza, brechas y flujos de lava andesítica.



- 3) Cono Citlaltépetl: Se empezó a formar hace ~16 500 años con episodios efusivos de gran viscosidad, el cono se formó de lavas dacíticas y andesíticas con altas cantidades de sílice construyendo la mayoría del cono actual del Citlaltépetl. Ha tenido episodios efusivos alternados con repetitivas erupciones explosivas, las más importantes de estas explosiones ocurrieron hace 8500-9000 años (Carrasco-Núñez y Rose, 1995) y hace 4100 años (Siebe et al., 1993; Carrasco-Núñez, 1999). Durante los últimos 4000 años el volcán ha expulsado principalmente lavas dacíticas, con eventos explosivos moderados. (Carrasco-Núñez y Rose, 1993).

### 1.2.3 Volcán Colima

El volcán de Colima o Fuego de Colima tiene una elevación sobre el nivel del mar de 3 860 m, por lo que representa la octava cima más alta del país. Los primeros estudios geológicos sobre el volcán de Colima fueron hechos por Waitz (1906, 1915, 1935) quien realizó observaciones generales y describió la formación de flujos piroclásticos durante la erupción de 1913.

Al mismo tiempo que las últimas etapas de actividad del Nevado de Colima se construyó el cono ancestral del volcán de Colima, conocido como Paleofuego (Robin y Boudal, 1987).

Después del último colapso del volcán Paleofuego ocurrido hace aproximadamente 2 500 años, la actividad volcánica migró hacia el sur y se instauró dentro de la caldera del Paleofuego. Esta actividad ha dado origen al actual volcán de Colima. Este estratovolcán está compuesto por una alternancia de derrames andesíticos, depósitos de flujos piroclásticos y de caída. Una de las características del volcán de Colima ha sido la generación de flujos piroclásticos que han alcanzado hasta 15 km del cráter; los más notables son aquellos formados durante la erupción de 1913.

Durante los últimos 400 años, el volcán de Colima ha presentado alrededor de 43 erupciones que lo colocan como el volcán más activo de Norteamérica (De-la Cruz-Reyna, 1993; Saucedo et al., 2004b). Como resultado de su gran actividad, el volcán de Colima cuenta con el registro histórico más completo de los volcanes mexicanos.

La erupción explosiva mejor documentada del volcán de Colima fue la ocurrida en 1913. Antes de la erupción la cima del volcán tenía un cráter cubierto por un domo de lava. La erupción comenzó el 17 de enero de 1913 (Ortiz- Santos, 1944) con una serie de explosiones que generaron densas nubes de vapor y ceniza. El 20 de enero la erupción continuó con la formación de una columna pliniana que alcanzó 21 km de altura (Saucedo-Girón, 1997). El volumen total de la erupción de 1913 fue estimado en  $0.9 \text{ km}^3$  (Saucedo-Girón, 1997). Durante la erupción también se produjeron flujos piroclásticos, los cuales fluyeron 15 km por el flanco sur del volcán, dejando depósitos de ceniza y rocas de 40 m de espesor (Waitz, 1915). Como resultado de esta explosión, la morfología de la cima del volcán cambió drásticamente, el edificio perdió 100 m de altura y se formó un cráter con un diámetro cercano a 400 m y profundidad desconocida (Macías, 2005).

Para 1958, el cráter estaba casi completamente ocupado por un tapón de lava en bloques (Mooser, 1961) que, entre 1961 y 1962, comenzó a derramarse por la ladera norte del volcán de Colima formando una lengua de lava que llegó hasta la base norte del volcán, en el sitio denominado El Playón. En 1975-1976 comenzó la generación de varios flujos de lava acompañados por primera vez de flujos piroclásticos, los cuales fueron documentados por Thorpe et al. (1977). Esta clase de actividad consistió en la intrusión de un cuerpo de magma que empujó el domo o tapón central y eventualmente generó derrames andesíticos como el de 1982 (Luhr y Carmichael, 1990b) y/o flujos piroclásticos producidos por el colapso gravitacional de las partes externas del domo, como el de 1991 (Rodríguez-Elizarrarás et al., 1991), también de la parte frontal de los flujos de lava, como en 1998 (Saucedo et al., 2002), y de manera más violenta, durante los primeros meses del año 2005 (Macías, 2005).