



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

COLEGIO DE GEOGRAFÍA

GEOMORFOLOGÍA DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN GEOGRAFÍA
P R E S E N T A :
OSVALDO FRANCO RAMOS



DIRECTOR DE TESIS: DR. JOSÉ JUAN ZAMORANO OROZCO

CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO D.F.

2005



FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFIA

m. 349084



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

La presente investigación está dedicada a mis padres:

Alejandro J. Luis Franco Galicia

Y

María Ángela Ramos Molotla

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Oswaldo Franco Ramos

FECHA: 06/10/05

FIRMA: [Firma]

A mis hermanos:

Alejandro y Ricardo

Con mucho cariño para mis sobrinos:

Manuel A. (Chelito); L. Javier; Nayely y Richard Jr.

A mi familia y amigos.....

Gracias por estar conmigo en todo momento.

Agradecimientos:

Al Dr. José Juan Zamorano Orozco, director de esta tesis, por haberme permitido formar parte de su equipo de trabajo y encaminarme hacia el mundo de la geomorfología; además por su valiosa amistad y respaldo durante mi estancia en el Instituto de Geografía.

Al Dr. José Lugo Hubp por aceptar ser parte de los revisores del trabajo, así como sus excelentes comentarios y críticas para el perfeccionamiento de la tesis.

Al Dr. Lorenzo Vázquez Selem examinar detenidamente esta investigación y por sus acertados comentarios en la parte de geomorfología y cartografía.

Al Dr. José Ramón Hernández Santana y al Dr. Mario Arturo Ortiz quienes fueron parte de los revisores cuyas observaciones permitieron mejorar el trabajo.

A la Dra. Lucía Capra Pedol por su ayuda en aclaraciones y críticas en temas relacionados con vulcanología y enseñanzas en campo.

Al Dr. David Palacios Estremera por su apoyo y respaldo en el desarrollo de la tesis sobre todo durante sus visitas de trabajo en México, y aceptar formar parte de sus proyectos de investigación. Además de su invaluable amistad y confianza brindadas.

Esta investigación fue financiada por el Ministro de Educación y Cultura de España, en el marco de los proyectos: "Los lahares del Popocatepetl" y "Sistema integral para la prevención de riesgos hidrovulcánicos". Universidad Complutense de Madrid.

A los investigadores españoles Dr. Julio Muñoz y Dr. Manuel Molla por sus comentarios sobre el trabajo y su amistad.

A las autoridades del Instituto de Geografía de la UNAM por permitirme hacer uso de sus instalaciones e infraestructura, sin su apoyo la finalización de este trabajo se hubiese dificultado.

A todos los profesores del Colegio de Geografía quienes mal o bien contribuyeron en mi formación académica y personal.

A Celia de Sistemas de Información Geográfica por ayudarme con la impresión de los mapas geomorfológicos.

A una niña muy especial, Gabriela Aguirre, por permanecer siempre a mi lado, sobre todo en los momentos más difíciles; tus consejos, apoyo y comprensión no los olvidaré.... gracias! Gab.

También quiero agradecer infinitamente a mis compañeros, que con el tiempo se convirtieron en grandes amigos: Raúl Alvarado (niño) por sus enseñanzas y ayuda en trabajo de campo, fotointerpretación y cartografía. A Miguel Santos (Migue) por compartir experiencias y discusiones dentro y fuera del ámbito académico. Eliseo Cerecedo (Loki) por estar conmigo en las buenas y malas, así como el apoyo brindado dentro y fuera de la escuela. A Sergio Salinas (oshito) por el apoyo, críticas y sugerencias principalmente en la parte de geomorfología volcánica y SIGS, así como su amistad. Alejandro Pérez (socio), por la gran amistad que tuvimos dentro y fuera del

Instituto, y por compartir no sólo aspectos académicos. Raúl Gutiérrez (chino!) por introducirme a los SIGS y respaldo en trabajo de campo y gabinete. A Miguel Castillo y Esperanza Muñoz, que a pesar de las circunstancias me brindaron su apoyo y comprensión.

Además agradezco a los compañeros que en algún momento colaboraron en la realización de esta tesis; Mtro. Alberto Pérez Rojas, Ana Rosales, Nayelli Zaragoza, Ana Isabel, José Antonio, Yolotzin, Lorenzo, Jacobo, Cristian, Omar y Carlo.

A mis compañeros del Instituto de Geografía, Alberto López, Liz Huitzil, Cristina Colin, Rafael Aragón, Pablo Flores y Mario.

Cuando crezcas, descubrirás que ya defendiste mentiras, te engañaste a ti mismo o sufriste por tonterías. Si eres un buen guerrero, no te culparás por ello, pero tampoco dejarás que tus errores se repitan.....

Paulo Coelho

ÍNDICE

Introducción	2
---------------------------	---

Capítulo I. Actividad volcánica en el Popocatépetl de 1345 a 1938

1.1 Época Prehispánica	4
1.2 La Conquista (1519-1521)	8
1.3 La Colonia (1521-1810).....	11
1.4 La Independencia (1810-1821) y el S. XIX	15
1.5 Actividad durante el siglo XX	17
Consideraciones finales	29

Capítulo II. Diciembre de 1994-2003: un nuevo periodo eruptivo en el Popocatépetl

2.1 Actividad volcánica anterior a diciembre de 1994 (de 1992 a noviembre de 1994)	45
2.2 La crisis eruptiva de 1994	47
2.3 1995	49
2.4 1996	51
2.5 1997	54
2.6 1998.....	59
2.7 1999	63
2.8 2000	65
2.9 2001	69
2.10 2002	76
2.11 2003	79
Consideraciones finales	83

Capítulo III. Geología

3.1 Marco geológico regional	86
3.2 Origen y evolución del Popocatépetl	89
3.3 Geología y estratigrafía.....	94
Consideraciones finales	105

Capítulo IV. Geomorfología

I. Relieve endógeno	107
II. Relieve endógeno modelado	123
III. Relieve exógeno	127
Consideraciones finales	140
Conclusiones	141
Bibliografía	144

Introducción

El Popocatépetl es el volcán más activo y peligroso del sector centro-oriente del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM). Se localiza en los 19°03' N y 98°35' W, su altitud alcanza los 5452 msnm (Pico de Anáhuac). El objetivo primordial de la presente investigación es conocer las características del relieve, en función de la génesis, morfología, estructura, edad y dinámica; así como el comportamiento eruptivo histórico y reciente del Popocatépetl, el cual ha transformado la morfología de su territorio. La zona de estudio cubre un área total de 450 km² y se encuentra entre los 18°54' - 19°06' N y los 98°34' - 98°46' W (Fig. 1).

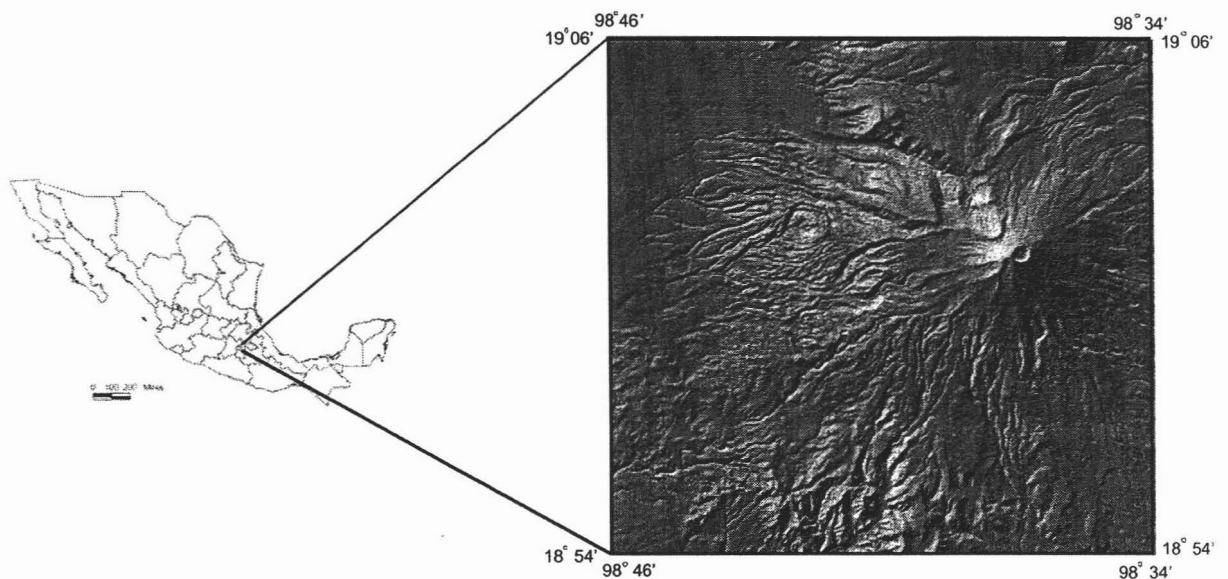


Figura 1. Mapa y modelo sombreado del terreno, donde se localiza el área de estudio de la presente investigación

El origen y evolución del Popocatépetl se caracteriza por una dinámica constructiva (acumulación de productos volcánicos) y por una destructiva (eventos explosivos). Estos dos aspectos han determinado formas de relieve muy diversas, que junto con los procesos modeladores (exógenos) hacen de este territorio una superficie compleja, desde el punto de vista geomorfológico, geológico, estructural y volcánico.

Hay que mencionar que la actividad reciente del Popocatepetl representa un peligro latente para los poblados localizados en las laderas y faldas. Esta zona se considera como de máximo riesgo, en ella residen aproximadamente 300,000 personas. No obstante, el área de afectación, de ocurrir un evento catastrófico no se reduce a los territorios adyacentes al volcán, se extiende hasta las ciudades de México y Puebla; localizadas a 60 km en línea recta del volcán. En este sentido, la configuración del relieve (mapa geomorfológico), constituye un factor determinante en la prevención y mitigación de fenómenos volcánicos que representan una amenaza para la población.

Esta investigación se divide en cuatro capítulos: el primero consiste en el análisis histórico de la actividad volcánica, de 1345 a 1938. El segundo trata del comportamiento e intensidad eruptiva desde 1994 a 2003. El tercero corresponde al análisis geológico-estratigráfico de la zona de estudio. En el cuarto y último se relacionan los procesos endógenos y exógenos que han originado el relieve, mismos que se representan en una cartografía geomorfológica.

Capítulo I. Actividad volcánica en el Popocatepetl de 1345 a 1938.

A lo largo de la evolución geológica del volcán Popocatepetl, se han presentado una variedad de estilos eruptivos que van de los más explosivos y paroxímales, hasta los de una intensidad baja, que en ocasiones dificultan distinguir los efectos que ellos tienen en el relieve; estos caracteres son típicos de los volcanes poligenéticos.

El Popocatepetl de alguna manera ha dejado evidencia de su actividad pasada; estos eventos se conocen a través de los depósitos asociados (flujos lávicos, flujos piroclásticos, *surges*, avalanchas de escombros, flujos de escombros, de caída, etc.). Otra posibilidad son las crónicas realizadas en distintos tiempos y por observadores diferentes. En este sentido, los reportes de mayor antigüedad no son del todo exactos y minuciosos, ya que las descripciones de los cronistas están en función de su experiencia y percepción.

En este capítulo se realiza una reseña sobre la actividad volcánica del Popocatepetl, la cual abarca desde época Prehispánica y hasta 1938. Esta información permite realizar un análisis comparativo entre los fenómenos más antiguos y las manifestaciones volcánicas actuales (diciembre de 1994 a 2003).

La actividad del Popocatepetl se enmarca en los siguientes períodos históricos: Prehispánico, Conquista, Colonia, S. XIX y S. XX (hasta 1938).

1.1 Época Prehispánica

El reporte más antiguo del que se tiene conocimiento, se le atribuye al indígena Domingo de San Antón Chimalpain en 1345, quien reporta actividad explosiva y lluvia de cenizas (Villa, 1997). Esta información es limitada y no deja ser una

descripción cualitativa. No obstante, y debido a los dos elementos que se mencionan, pudiera haber existido actividad fumarólica, expulsión de balísticos y de material juvenil (pómez). Todo parece indicar que el Popocatepetl continuó su actividad hacia 1346, pero de una manera menos violenta. Al respecto los Tlacochalcas-chalcas comentan que del cráter sólo *...vieron salir humo...* (Villa, *op.cit*).

En 1354 se sabe que el volcán tuvo una erupción importante, no se conocen más detalles y el reporte es de Villa (*op. cit*) *El Popocatepetl ha tenido varios nombres: Xalliquéhuac (Arenales que se Levantan) antes de su erupción de 1354, Año 9 Caña; Durán lo llama Popocatzin; también se le conoció como Atepetolonhetl (Cerro Viejo donde Brota Agua).*

Sin embargo, es muy probable que la actividad se haya prolongado hasta 1356, al respecto se comenta lo siguiente: *...a los treinta y un años de la fundación de la ciudad de México, comenzó a salir fuego del volcán...* (Orozco y Berra en Cruz-Reyna, 1995); si se considera que en 1325 fue fundada Tenochtitlán (León-Portilla, 1983).

Después de siete años, en 1363 otra evidencia, nuevamente atribuida al poeta indígena Domingo de San Antón Chimalpain *Entonces (1363) los mexicanos vieron humear por primera vez el Popocatepetl* (Villa, *op.cit*). Este hecho tuvo que haber sido un evento importante ya que no paso desapercibido para el cronista Fernando Alvarado Tezozomoc: *...Año I-caña, 1363 años cuando ya humeaba, cuando en el murió Tenochtzin...* (Villa, *op.cit*). Las dos fuentes hacen referencia a una actividad fumarólica importante. Hay que mencionar que de 1345 a 1363, representa el reporte de actividad volcánica más antiguo del Popocatepetl, con un total de 18 años (Fig.2).

Época	Año	Comportamiento eruptivo
Siglo XX	1919 a 1938	Actividad volcánica
	1901-1918	Bajos niveles de actividad
Independencia (1810-1821) y S. XIX	1894-1900	
	1885-1893	Sin información ?
	1884	"Ruidos volcánicos"
	1822 a 1883	Sin actividad
	1810-1821	Sin información ?
	Colonía (1521-1810)	1804
1774-1803		Sin información ?
1773		Actividad volcánica
1666 a 1772		Sin información ?
1663 a 1665		Actividad volcánica
1540 a 1662		Sin información ?
1539		Actividad volcánica
1529 a 1538		Sin información ?
1528		Actividad volcánica
Conquista de México (1519-1521)	1519 a 1520	
	Prehispánica (1345-1519)	1512
1509		
1471-1508		Sin información ?
1470		Sin actividad
1363		Actividad volcánica
1356		
1354		
1346		
1345		

Figura 2. Secuencia de actividad volcánica del Popocatepetl de 1345 a 1938.

Después de este período no existe dato alguno que haga referencia al volcán, la falta de información se continúa por 107 años (1364 – 1469). Es hasta 1470 cuando se hace referencia a un período de calma *pero todas las cosas han desaparecido como el humo terrible que sale de la garganta del Popocatépetl...* este dato se le atribuye a Nezahualcóyotl (Villa, *op.cit*). Hay que mencionar que de 1471 a 1508 no se tiene información, este período comprende 37 años, y no se puede afirmar que el volcán continuó con las mismas características eruptivas que reportó Nezahualcóyotl, o bien interrumpió su calma eruptiva.

Al final del período prehispánico existen reportes de actividad volcánica, al respecto Orozco y Berra, M. Hace el siguiente comentario: *Año de 4 casas y de 1509, vieron una claridad de noche que duró más de 40 días, dicen los que la vieron que fue en toda la Nueva España, que era muy grande y muy resplandeciente y que estaba en la parte oriente, y que salía de la Tierra y llegaba al cielo* (en Cruz-Reyna, 1995). Esta información hace pensar en la existencia de una gran columna piroclástica, indicativa posiblemente de una actividad muy explosiva. El carácter extraordinario de este evento, no pasó desapercibido y queda registrado con un glifo en el códice Telleriano Remense (Fig.3), a partir de este documento se deduce que dicho fenómeno ocurrió hace 1,000 o 1,100 años.



Figura 3. Volcán Popocatépetl representado en el códice Telleriano Remense, en el cual existen evidencias de actividad explosiva (Villa, 1997).

En 1512, antes de la conquista, existe otro reporte en donde se deduce que el Popocatépetl se encuentra en una etapa de aparente quietud, siendo la actividad fumarólica el evento más sobresaliente: ... *les parecía que humeaban las piedras tanto que llegaba el humo al cielo...* (Cruz-Reyna, *op.cit.*).

1.2 La Conquista (1519-1521)

La conquista de México-Tenochtitlán a manos del ejército español, ocurre entre 1519 y 1521 (Gibson, 1984). Para este período las noticias sobre la actividad del Popocatépetl son realizadas por los altos mandos del contingente y algunos soldados. En ellas se denota asombro, admiración y hasta temor a los fenómenos volcánicos que observan (Fig. 4). Lo anterior no es de extrañarse, si se toma en cuenta que en el territorio español del siglo XVI, no existían volcanes activos.



Figura 4. En el códice Florentino se muestra la marcha de Cortés hacia Tenochtitlán, donde el Popocatépetl se encontraba en plena actividad explosiva (Villa (1997).

La novedad de estos eventos, se refleja en los numerosos reportes que existen; si bien algunos de ellos se repiten, cada variante contribuye con nuevos datos, de esta manera es posible tener una idea más completa de lo ocurrido. Como ejemplo de lo

anterior se tiene un seguimiento de nueve años que comienza con la llegada del contingente español *...en el año de que tratamos (1519), los españoles le vieron arrojar humo, cenizas y piedras incandescentes, durando en este estado hasta 1528* (Orozco y Berra, en Cruz-Reyna, *op. cit*).

Durante este período existen testimonios que permiten conocer algunos hechos relacionados con la actividad del Popocatepetl, en particular con el deseo de subir a la cima y mirar que ocurría; los dos primeros intentos están documentados y se sabe que el primero no tuvo éxito; ocurrió en 1519 y quedó registrado el 30 de octubre de 1520 por Hernán Cortés¹ en su segunda carta de relación: *...están dos Sierras muy altas y muy maravillosas, porque en fin de agosto tienen tanta nieve que otra cosa de lo alto de ellas sino la nieve, se parece. Y de la una, que es la mas alta, sale muchas veces, así de día como de noche, tan grande bulto de humo como de una gran casa; y sube encima de la sierra hasta las nubes, tan derecho como una vira, que, según parece, es tanta la fuerza con que sale que aunque arriba en la sierra andaba siempre muy recio viento, no lo puede torcer. Y porque yo he deseado de todas las cosas de esta tierra poder hacer a vuestra alteza muy particular relación, quise de ésta, que me pareció algo maravillosa, saber el secreto, y envié a diez de mis compañeros, tales cuales para semejante negocio eran necesarios, y con algunos naturales de la tierra que los guiasen, y les encomendé mucho procurasen de subir la dicha sierra y saber el secreto de aquel humo, de donde y cómo salía. Los cuales fueron y trabajaron lo que fue posible para la subir, y jamás subieron, a causa de la mucha nieve que en la sierra hay y de muchos torbellinos que de la ceniza que de allí sale andan por la sierra, y también porque no pudieron sufrir la gran frialdad que arriba hacía, pero llegaron muy cerca delo alto, tanto que estando arriba comenzó a salir aquel humo, y dicen que salía con tanto ímpetu y ruido, que parecía que toda la sierra se caía abajo,....* . Los acontecimientos que se narran, guardan parecido con eventos ocurridos en tiempos modernos, donde la presencia de fumarolas, emanaciones de ceniza y vapor de agua han sido los fenómenos más frecuentes, como ejemplo los ocurridos el mes de octubre de 1997 y que se continuaron hasta abril de 1998.

¹ Cortés Hernán. Cartas de Relación. Editorial Porrúa, S.A. Colección "Sepan Cuantos". México, D.F. 1983. pag.47.

El segundo intento para llegar a la cima del volcán fue exitoso, al respecto Bernal Díaz del Castillo² comenta: ...*“estábamos en Tlaxcala mucho fuego, más que otras veces solía echar, de lo de cual nuestro capitán Cortés y todos nosotros, como no habíamos visto tal nos admiramos de ello; y un capitán de los nuestros que se decía Diego de Ordaz ... demandó licencia a nuestro general para subir a él ... con dos de nuestros soldados y ciertos indios ... llegar arriba, y los indios que iban en su compañía se le quedaron en lo bajo, que no se atrevieron a subir, y parece ser, según dijo después Ordaz y los dos soldados, que al subir que comenzó el volcán a echar grandes llamaradas de fuego y piedras medio quemadas y livianas, y mucha ceniza, y que temblaba toda aquella sierra y montaña a donde está el volcán, y que estuvieron quedos sin dar un paso adelante hasta de ahí a una hora que sintieron que había pasado aquella llamarada y no echaba tanta ceniza y humo, y que subieron hasta la boca que era muy redonda y ancha, y que había en el anchor un cuarto de legua ...* Los detalles de la narración manifiestan una explosión (*llamarada*) de corta duración y expulsión de pómez incandescentes (*piedras medio quemadas y livianas*), este tipo de fenómenos guarda similitudes con la actividad actual, en particular con la ocurrida el 19 de diciembre de 2001, donde se presentó una exhalación de carácter explosivo que lanzó fragmentos incandescentes por la ladera E y que alcanzaron los 2 km de distancia. La columna de ceniza no pudo ser observada por los nublados, la duración del evento fue de tres minutos, con una fase más intensa de dos minutos; al término, el volcán recuperó sus niveles de estabilidad (CENAPRED, 2001). Al parecer, y aventurándonos un poco, cuando el cronista menciona *que estuvieron quedos sin dar un paso adelante*, hace pensar que estaba transcurriendo el momento más violento. La evidencia que indica que fue de corta duración y que posteriormente entró en calma fue la decisión de Ordóñez de continuar caminando hacia el cráter. Un comportamiento similar al del 19 de diciembre de 2001.

Las referencias que cubren el período histórico conocido como la Conquista, son escasas, pero suficientes para demostrar que el volcán estaba activo; con la siguiente

² Díaz del Castillo, Bernal. Historia de la Conquista de Nueva España Editorial Porrúa, S. A. Colección “Sepan Cuantos”. México D. F. 1983. pag. 136.

referencia de Prescott³ se puede dar por terminado este inciso: *...en la época de la conquista estaba frecuentemente en actividad: bramaba con una fuerza no común, cuando los españoles se hallaban en Tlaxcala, lo que calificaron de mal agüero los nativos de Anáhuac.*

1.3 La Colonia (1521-1810)

Este período inicia con la caída de Tenochtitlan en el año de 1521 y termina en 1821, año en que se declaró la independencia de México (Moreno-Toscana, A., 1981).

La actividad del Popocatepetl en este período, fue registrada en jeroglíficos, pinturas, esculturas, crónicas e incluso leyendas. Hay que mencionar que la información tiene un sesgo subjetivo; sin embargo, es más amplia y detallada, si se compara con los períodos anteriores. No obstante, ha sido posible comparar y descartar aquellos datos que no eran compatibles cronológicamente con acontecimientos históricos.

La actividad del Popocatepetl fue la continuación de la que ya había sido reportada en 1519 por los españoles en su camino a la capital Azteca, el fin de este período eruptivo se continuó hasta 1528.

El volcán tuvo un gran interés para los españoles, ya que el cráter era la única fuente abastecedora de azufre, elemento indispensable en la preparación de la pólvora. Este hecho quedó registrado por Cervantes Salazar (en Cruz-Reyna, 1995) *... una vez ganada la ciudad ... y no teniendo pólvora para conquistar las demás provincias, llamó a Montañó y Mesa, el artillero, para formar la expedición que iría al cráter del Popocatepetl a recoger el azufre necesario para fabricar la pólvora ...tomaron treinta y seis brazas de guindalesa en dos pedazos que pesaban dos*

³ Prescott, William. Historia de la Conquista de México. Editorial Porrúa, S. A. Colección "Sepan Cuantos". México, D.F. 1976. pag. 243.

arrobas y un balso de cáñamo para entrar al volcán y cuatro costales de añejo, aferrados en cuero de venado curtido en que trajese el azufre. Tocó a Montañó entrar siete veces en el cráter del cual extrajo cerca de ocho arrobas y media de azufre. En seguida entraron los otros compañeros hasta llenar los sacos y decidieron no entrar más ... era cosa espantosa volver los ojos hacia abaxo, porque allende de la gran profundidad que desvanecía la cabeza, espantaba el fuego y la humareda que con piedras encendidas de rato en rato, aquel fuego infernal despedía...

Está claro que las personas comisionadas para obtener el azufre, entraron al cráter aprovechando un corto lapso de calma aparente. Las condiciones volcánicas que prevalecían en ese momento se pueden relacionar con las que ocurren en tiempos modernos y que tienen relación con el crecimiento de domos en el interior del cráter. Este proceso se desarrolla a partir de la inyección de magma, de manera lenta, continúa y acompañada por breves expulsiones de piroclastos; estas últimas rompen la superficie del domo y como consecuencia aparecen grietas, por donde es posible observar el magma incandescente ... *espantaba el fuego y la humareda que con piedras encendidas de rato en rato...* Estas condiciones y tomando en cuenta la crónica de Montañó, bien pudieron ser las que prevalecían en el momento que era extraído el azufre.

La necesidad de azufre y el riesgo que representaba extraerlo del cráter de un volcán activo, fue una preocupación de Cortés; quedando escrita el 15 de octubre de 1524, en su Cuarta Carta de Relación (*op. cit.:* pag.198) : *.... y para el azufre, ya a vuestra majestad he hecho mención de una Sierra que esta en esta provincia, que sale mucho humo; y de allí, entrando un español setenta o ochenta brazas, atado a la boca abajo, se ha sacado con que hasta ahora nos habemos sostenido. Ya de aquí adelante no habrá necesidad de ponernos en este trabajo, porque es peligroso; y yo escribo siempre que nos provean de España....*

En 1528 concluyó la actividad volcánica, que los españoles presenciaron desde su llegada a territorio mexicano. En este análisis corresponde a un segundo período eruptivo (Fig.2), documentado de manera sistemática a partir de crónicas realizadas por los nativos y documentos escritos por españoles. En 1539, once años después del último reporte de actividad, se tiene la crónica de Bernal Díaz del Castillo (*op. cit.:* pag.136): *Después de aca desde que estamos en la tierra no le habemos visto echar tanto fuego ni con tanto ruido como al principio, y aun estuvo ciertos años que no echaba fuego asta el año de mil quinientos treinta y nueve, que echo muy grandes llamas y piedra y ceniza.* Posiblemente se refiera a lo que hoy conocemos como luminiscencias, expulsión de balísticos y caída de ceniza.

De 1540 a 1662 no existen reportes, por lo cual es difícil reconocer algún comportamiento, de calma o actividad.

El tercer período de actividad (Fig. 2) inicia en 1663 y se continúa hasta 1665, se sabe que en 1664 hubo una fuerte explosión, que generó una columna eruptiva de varios kilómetros de altura, suspendiendo grandes volúmenes de material piroclástico (ceniza) que impidió el paso de la luz solar, al respecto existe el siguiente cometario *la cual ocasionó que la Ciudad de Puebla se oscureciera por cuatro días* (Martin-Del Pozzo, et al., 1995). Si bien no se precisa el año, existen las referencias del párroco Betancourt (en Murillo, 1939), que destaca la presencia de fumarolas y exhalaciones *Llámenle los naturales Popocatépetl, que quiere decir Cerro que humea. Tiene una gran boca en la cima y echa por ella un penacho de humo tan grueso y tan espeso que se ve de muchas leguas subir por la región del aire. A veces arroja ceniza y se esparce a los comarcanos pueblos, y llega hasta Puebla, Tlaxcala y hasta Chalco, ocho leguas de distancia. ...Hiciéronse rogativas y procesiones de sangre, pidiendo a Dios misericordia, porque la ceniza era en cantidad y con ella piedras que se hallaban menudas y livianas como la piedra pómez.....* A partir de la información anterior se puede deducir la ocurrencia de explosiones y columnas eruptivas posiblemente de tipo pliniano. Los materiales asociados fueron dispersados por los vientos predominantes hacia el este; noreste y noroeste. Estas direcciones corresponden a los poblados que son mencionados en la crónica y que padecieron horas de sufrimiento y peligro. Hay que mencionar que las comunidades a

las que se hace referencia, se encuentran a una distancia en línea recta de 40 a 70 km. Estos acontecimientos guardan similitud con el ocurrido el 30 de junio de 1997 (CENAPRED, 1997).

De 1666 a 1772 no se cuenta con alguna referencia directa que demuestre que el Popocatepetl estuvo activo, no obstante, no descartamos que en 112 años que dura este período sin información, haya ocurrido algún tipo de manifestación. A partir de una representación pictórica realizada para la región de Chalco-Amecameca en el siglo XVIII (Fig.5), se sabe que el Popocatepetl estaba en calma (no es posible precisar el año), debido a que en este documento es representado sin ningún rasgo que demuestre lo contrario, al mismo tiempo y de manera detallada, fue dibujada una potente capa de nieve que cubre sus laderas en el sector altitudinal más bajo.



Figura 5. El mapa de Chalco-Amecameca del S. XVIII que muestra una aparente calma del Popocatepetl, quizá correspondiente al segundo período de inactividad de 1700-1803 (Villa,1997).

De manera indirecta, en 1773, se sabe por Joaquín Velásquez de León que el Popocatepetl presentaba algún tipo de manifestación volcánica *...aquel famoso volcán de Cholula, la boca de este gran pirofilacio no esta en su mismo vértice sino un poco mas abajo, mirando hacia la parte del sureste, de suerte que desde aquí no se ven sus fuegos y humaredas, pero si muy bien desde Cholula y otros parajes del contorno de la Puebla de los Angeles* (Moreno, 1977).

De 1774 a 1802 no se cuenta con información referente a la actividad del Popocatepetl, tuvieron que transcurrir 28 años, para volver a tener noticias; en 1803 Alejandro de Humboldt llega al puerto de Acapulco, en este año y en el siguiente, 7 de marzo de 1804, hace mención sobre la actividad del Popocatepetl; *Este hermoso cultivo forma contraste con el aspecto silvestre de las montañas peladas que cierran el valle, y entre las cuales se distinguen los famosos volcanes de La Puebla, el Popocatepetl y el Iztaccihuatl. El primero forma un cono enorme cuyo cráter siempre encendido y arrojando humo y cenizas, rompe en medio de las nieves eternas*⁴. Esta crónica sugiere que el volcán, si bien estaba activo, la intensidad de sus manifestaciones no eran de importancia, ya que no se hace mención de potentes fumarolas o expulsión de balísticos, por mencionar algunos fenómenos asociados. En este punto hay que mencionar que Humboldt tiene una visión futurista del peligro que representa la cercanía del volcán Popocatepetl a la ciudad de México, de manera particular con la ocurrencia de los lahares *...pero con todo, es seguro que concurren mucha circunstancias para temer que las avenidas del Sur, sobre las cuales no tiene el desagüe ninguna influencia, puedan ser menos funestas a la capital. Los lagos de Chalco de Xochimilco saldrían de madre, si por un fuerte erupción del volcán Popocatepetl, se descolgasen de repente las nieves que cubren esta montaña colosal. En 1802, estando yo en Guayaquil, en la costa de la provincia de Quito, el cono del Cotopaxi se calentó de tal manera por efecto del fuego volcánico, que casi en una sola noche desapareció el enorme gorro de nieve que lo cubre. En el Nuevo Continente, las erupciones y grandes temblores de tierra son muchas veces precursores de aguaceros que duran meses enteros. ¡Que peligros amenazarían a la capital, si estos fenómenos se repitieran en el Valle de México, bajo una zona donde, en años poco lluviosos, caen hasta 15 decímetros de agua (op.cit; pag: 138).*

1.4 La Independencia (1810-1821) y el S. XIX

La entrada del Ejército Trigarante a la ciudad de México el 27 de septiembre de 1821, liquidó en el aspecto político, tres siglos de dominio colonial (Lemoine – Villicaña, 1978). Esta fecha marca el inicio de un período caótico de inseguridad general y debilidad institucional. En esta atmósfera el interés científico no tuvo un

⁴ Humboldt, A. Ensayo Político sobre el Reino de la Nueva España. Editorial Porrúa, S.A. Colección “Sepan Cuantos”. México, D.F. 1973. pag. 120.

medio idóneo para desarrollarse, debido a que existían otras prioridades. En todo el período de Independencia, no existe referencia a la actividad del Popocatepetl. Es el año de 1823 que marca el inicio de un mayor número de observaciones, cada vez más detalladas y con mayores elementos de análisis, los que de alguna manera reflejan el progreso y conocimiento científico de la época.

En las primeras décadas del siglo XIX, el volcán Popocatepetl presenta bajos niveles de actividad, al respecto el historiador William H. Prescott comenta *En el presente siglo, muy pocas veces ha dado pruebas de su origen volcánico, y la montaña que humea, casi ha perdido el derecho que tenía a este nombre...*⁵. El naturalista William Bullock (1823) confirma el aparente reposo del volcán *...vio limitada su vista por azules montañas, entre las cuales se levantaba el gigantesco Orizaba y el majestuoso Popocatepetl coronado de nieve* (en Iturriaga, 1997). Dos años más tarde, en las descripciones elaboradas por Joel Robert Poinsett (1825) hace evidente la inactividad del volcán: *...al sur se destacaban los volcanes de Puebla, los cuales después de descomponer en hermosos matices los rasgos del sol naciente, conservaban su blancura deslumbrante...* (Iturriaga, *op.cit.*). Este comentario hace referencia a los volcanes que constituyen la Sierra Nevada, uno de ellos es el Popocatepetl, con esta evidencia deja en claro la ausencia de cualquier tipo de actividad.

La quietud del Popocatepetl favoreció, en 1836, la ascensión del Barón Gross, quien tuvo la inquietud de investigar el comportamiento del volcán, llegando hasta el borde del cráter, sin experimentar ninguna manifestación eruptiva. En este mismo año, el geólogo Andrés del Río descendió al fondo del cráter con el fin de documentar y establecer la recurrencia y características de las sulfataras (Murillo, 1939). El período de quietud al cual se hace referencia, se continuó por cuarenta y ocho años más; mismo que se ve interrumpido en 1884 por un fenómeno poco usual y es documentado por Juan Orozco y Berra *...para Ud. que a las 12:20 minutos de hoy se percibió ruido estrepitoso y prolongado rumbo al Popocatepetl, llamando la atención de todo el vecindario. Ignórese la causa...* (Villa, 1997).

⁵ Prescott, William. Historia de la Conquista de México. Editorial Porrúa, S. A. Colección "Sepan Cuantos". México, D.F. 1976. pag. 243.

Con la información anterior resulta difícil hacer una interpretación correcta de lo sucedido, no obstante estos ruidos “volcánicos” pudieran estar relacionados con pequeñas explosiones o con sismos volcánicos, sin embargo, no hay elementos que atestigüen el inicio de un período eruptivo, debido a que se carece de información de 1885 a 1893.

La existencia de bajos niveles de actividad fumarólica, fue la característica que prevaleció en el volcán a partir de 1894, estas condiciones permitieron la ascensión al cráter de Aguilera y Ordóñez, *Existen actualmente en el fondo del cráter del Popocatepetl varios respiraderos que han dado lugar a un lento y escaso deposito de azufre, formado por la condensación de los vapores y por las reacciones químicas verificadas al contacto del aire. Las fumarolas arrojan gran cantidad de vapor de agua, ácido sulfhídrico y muy pequeñas cantidades de ácido sulfuroso a una temperatura que alcanza como máximo 92°. Hemos contado en el cráter siete fumarolas principales....* (Aguilera y Ordóñez, 1896-97). En este marco existe la referencia de Agustín Aragón “...durante las semanas que pasé junto al Popocatepetl, la grandeza y majestuosa soledad de las montañas, admiré los azulados y encantadores cielos de las alturas...”. (Moncada, et al., 1999).

La presencia de pequeñas fumarolas pone de manifiesto una estructura volcánica activa en período de quietud, estas condiciones se continuaron hasta el año de 1900 (Fig. 2).

1.5 Actividad durante el siglo XX

En las dos primeras décadas de este siglo se continuaron las emanaciones de vapor de agua y azufre, la actividad volcánica se mantuvo en los niveles más bajos, estas condiciones permitieron realizar observaciones detalladas. La referencia que se cita, pone de manifiesto las condiciones que prevalecían antes de 1918 *La antigua chimenea estuvo siempre obturada por escorias recubiertas por las rocas de los derrumbes, y solo quedaban algunas pequeñas aberturas por las cuales salían periódicamente lentas columnas de*

vapor, y en muy raras ocasiones, nubes cargadas de ceniza (Murillo, 1939). En 1919, un año después, inicia un proceso eruptivo que curiosamente coincide con una explosión de dinamita realizada para la explotación de azufre en el interior del cráter del Popocatepetl *Alguien aconsejó al capataz que podía aumentarse considerablemente la producción de azufre, dinamitando determinados puntos, siguiendo este consejo, este bárbaro colocó 28 cartuchos de dinamita en diversos lugares, principalmente entorno de la antigua chimenea* (Murillo, *op.cit*). Esta decisión tomó un carácter dramático, cuando varios trabajadores (volcaneros) quedaron heridos de gravedad por efectos de la explosión, su fallecimiento se atribuye a la imposibilidad de rescatarlos debido a presencia de mal tiempo. En este contexto existe la siguiente cita donde se detalla el efecto que tuvo la explosión artificial y el inicio de un período de actividad... *¿Tú pudiste darte cuenta, pregunte a Leonardo. De las condiciones en que estaba el cráter el día 25 de febrero cuando fueron a dar auxilio? – Sí, señor. Se había amontonado mucha nieve en el fondo y el sol la había empezado a derretir y por entre aquel lodazal blanco salían grandes borbotones de aire, y gruesos chorros de vapor. Seguramente la dinamita abrió el volcán y por las hendiduras empezó a salir otra vez fuego de adentro. Poco tiempo después de estos acontecimientos...diversos volcaneros subieron al cráter a fines de marzo y pudieron ver que toda la nieve se había fundido, y sobre la chimenea, que era el lugar donde se habían puesto los cartuchos, había un gran montón de piedras en medio del cual aparecieran rayas de lumbre entre las que salían con mucha violencia chorros de humo. En diciembre de ese mismo año el montón de piedras según gráfica expresión de Leonardo, se había convertido en una casuela volteada hacia abajo. A su alrededor se veía una corona de pequeñas fumarolas... La explosión de dinamita produjo un verdadero sismo en la cima del volcán, haciendo oscilar las paredes del cráter...y produjo a los dos o tres días después, violentas explosiones de vapor que salían por uno de los costados de la antigua chimenea...un mes después (en marzo de 1919) se había empezado a formar un aparato volcánico sobre la antigua chimenea del volcán por el cual se iniciaron violentas manifestaciones fumarólicas.* (Murillo, *op.cit.*). De acuerdo con la información anterior la reactivación del Popocatepetl es consecuencia de una detonación de dinamita ocurrida en el interior del cráter. La presencia de fumarolas y la expulsión de piroclastos, a partir de una pequeña estructura volcánica localizada en la base del cráter, fue la principal característica.

El siguiente año, en 1920, continuó el incremento eruptivo y el número de evidencias escritas también, al respecto Friedlander (1921) menciona *...se escribía sobre una erupción del Popocatépetl –a mi esto me parece probable- que se tratase solamente de un aumento de la antigua actividad fumarólica.*

Al parecer los fenómenos volcánicos característicos de 1920 fueron las explosiones *Desde principios de 1920 las explosiones adquirieron una invariable periodicidad, cada 8 días, precisamente los domingos por la mañana entre 6 y 7, y por las tardes inmediatamente después de ponerse el sol, se verifican erupciones que eran invariablemente las mas importantes de toda la semana (Murillo, 1939).*

La reactivación del volcán era tan evidente que no pasó desapercibida *en junio de 1920, los diarios de Méjico anunciaron que el Popocatépetl había entrado en erupción, pero este anuncio se hizo un poco mas de un año después de que la erupción había empezado...* Este hecho se sustenta en la siguiente afirmación *Si el cráter del volcán apareció hasta febrero de 1919 como un horno de ladrillos apagado, desde 1920 semejaba un horno acabado de encender lleno de humo y de cenizas y con un gran brasero en el fondo, cuyo fuego se reavivaba constantemente por violentas corrientes de vapor. Ese nuevo aparato presentaba en su centro dos grietas en las cuales el fuego era constante, muy visible aun a plena luz del día cuando era avivado por las expulsiones. La bóveda tenía un diámetro aproximado de 50 metros por 19 de altura y estaba proyectada con leve inclinación de Oriente Sur al Norte. Una corona de fumarolas muy activas la circundaba (Murillo, op.cit.).*

Los datos anteriores son corroborados por el Dr. Waitz, en su ascenso que realizó el 11 de octubre del mismo año *... en cuyo fondo observó una pequeña cúpula andesítica a la que puso el nombre de tapón...* El Dr. Waitz no ha visto ninguna explosión salir de la cúpula, y observó solamente algunas fumarolas a su alrededor. Las condiciones descritas cambiaron un día después, cuando el científico se encontraba de regreso y en las cercanías de Tlamacas presencié una explosión muy violenta (Friedlander, 1921).

Lo que ocurría en el interior del cráter eran fenómenos que muy pocas personas habían visto, muchos de ellos exagerados o fuera de la realidad. Esta situación motivó

nuevamente al Dr. Atl a realizar una expedición en el mes de noviembre *El 19 de noviembre subí a ver el cráter, y observé que sobre una gran parte de la antigua laguna, y junto a la rampa que desciende de la pared Norte, abajo del malacate, se había levantado una bóveda en cuyo centro había una abertura en cruz que parecía incandescente. ... Era parte de la antigua chimenea y de las escorias de sus bordes que un empuje interior había levantado como una gran ámpula. Medía aproximadamente 40 metros de diámetro y 10 de altura. Aparecía inclinada ligeramente del Sureste al Noreste. ... dos aberturas muy marcadas en forma de cruz,... correspondientes a la dirección de las grietas que generaron el Popocatepetl. (Fig. 6)... Rodeaba esta bóveda de escorias una corona de fumarolas muy activas, y de su centro surgían periódicamente masas de humo espeso y chorros de vapor invisible,... que a su paso volvían incandescentes las piedras de la bóveda.... (Murillo, 1939).*



Figura 6. Estructura volcánica vista el 19 de noviembre de 1920, en la cual se pueden distinguir incipientes grietas en forma de cruz (Murillo, 1939).

Las observaciones del Dr. Atl fueron muy fructíferas y de trascendencia para los científicos de la época, Friedlander (1921) hace el comentario con base en el relato del pintor *...las erupciones salían del centro de la cúpula. ... las grietas de la cúpula eran incandescentes y que las explosiones lanzaban cenizas y piedras hasta el orlo del cráter. Al parecer el domo que aparece en la figura 6 presenta una dinámica volcánica muy activa, como ejemplo de ello Friedlander vuelve a comentar: la noche del 27/11/20 tuvo ocasión de ver una llama gruesa y luciente que salía del centro de la cúpula, de la duración de algunos segundos. Atl con sus propias palabras describe la misma situación, haciendo énfasis en lo que él denomina la cúpula ...primero se oía un rumor interior bajo el piso del cráter, semejante al que produce la trepidación de una locomotora en marcha; inmediatamente*

después aparecían en la abertura central de la cúpula pequeñas y apretadas nubes de humo... (Murillo, op.cit.).

En diciembre se continúan documentando los cambios que ocurrían en el interior del cráter principal *La cúpula aparecía con gran número de hoyos en toda su superficie, y las explosiones se identificaban indistintamente por todas partes. La corona de fumarolas era más activa (Murillo, op.cit.).*

En el mes de marzo de 1921 el periódico Excélsior organiza una expedición al Popocatepetl, en ella participa el Dr. Atl. Este año inició con una actividad volcánica que se iba incrementando de manera significativa, hasta generar explosiones de gran magnitud, como la que ocurrió el día 22 de marzo. Este evento fue tan violento que obligó a interrumpir los preparativos que debían de realizarse para que los participantes bajaran al interior del cráter. Un indígena llamado Ignacio fue uno de los encargados para esta labor previa a la ascensión y reporta lo sucedido de la siguiente manera *a eso de las seis y media de la mañana salió un fumarola grandísima que nos tapo el sol y cuando el viento la hizo a un lado vimos que caían muchos puntitos blancos como palomitas que nos caían encima. Eran piedras que parecían caer del cielo. ... A Anastasio, otro mozo, lo hirieron... a otro le quemaron el pie.... esto no lo habíamos visto nunca. El volcán nunca había echado piedras... vimos elevarse una enorme columna de humo a una altura aproximada de 3000 metros sobre el cráter (Murillo, 1939).* A partir de esta situación se deduce *que las piedras que fueron echadas* podrían corresponder a la estructura volcánica de la figura seis, que presentaba una fase de destrucción parcial o total.

La información de 1921 es más detallada, no obstante requiere de la siguiente aclaración; existe un reporte gráfico del Dr. Atl, en marzo de 1921, del cual se desconoce el día de su elaboración. Este dato resulta importante en un mes donde ocurren cambios significativos en el interior del cráter del Popocatepetl. La importancia de la figura 7 radica en que pone de manifiesto una estructura distinta en cuanto a morfología. Tomando en cuenta esta cronología, existe la posibilidad que los reportes se hayan realizado días anteriores a los que aparecen en el esquema que Atl denomina como *las que existieron a fines de marzo.*

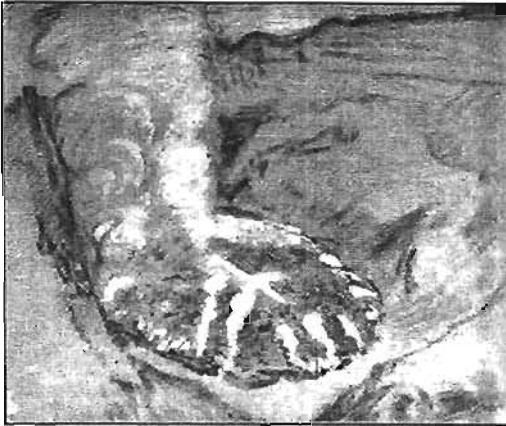


Figura 7. Condiciones que existían en marzo de 1921, no se especifica el día de elaboración de este gráfico, pero es probable que sea anterior a la observación realizada el 25 del mismo mes y año (Murillo, 1939)

Después de todas las dificultades que tuvieron que superar los excursionistas, la expedición llega al labio inferior la mañana del día 25 de marzo a las ocho y media, momento en que ocurre otra explosión (Fig. 8) ... *humo y cenizas, y a nuestro alrededor cayeron unas piedras pequeñas como garbanzos, y otras mas grandes, como el tamaño de un huevo, ... afortunadamente las explosión se produjo en sentido diagonal, hacia el oriente, evitando accidentes ... un mozo que se desvió hacia el Oriente fue herido en la cabeza por un proyectil grande como el puño de una mano ... murió ... todas las piedras que habían caído sobre los declives tenían una alta temperatura, y cualquier objeto que se les acercaba lo quemaba inmediatamente ... después de la explosión hubo una lluvia muy abundante de arenas y cenizas, de las que se recogieron grandes cantidades (Murillo, op.cit.).*



Figura 8. Erupción captada en marzo de 1921 en el borde inferior del cráter, sorprendió a un grupo de exploración(Murillo, 1939).

Una vez que el volcán se estabilizó y las condiciones de seguridad y visibilidad permitieron recorrer la parte cumbral, el Dr. Atl describe las características morfológicas del fondo del cráter de la siguiente manera (Fig. 9): *Su aspecto general había variado notablemente en cuatro meses;* (la comparación la hace con la observación que realizó el 19 de noviembre de 1920; en este relato es importante mencionar que él se refiere a la misma estructura, nuestra opinión es distinta y la discutiremos más adelante).

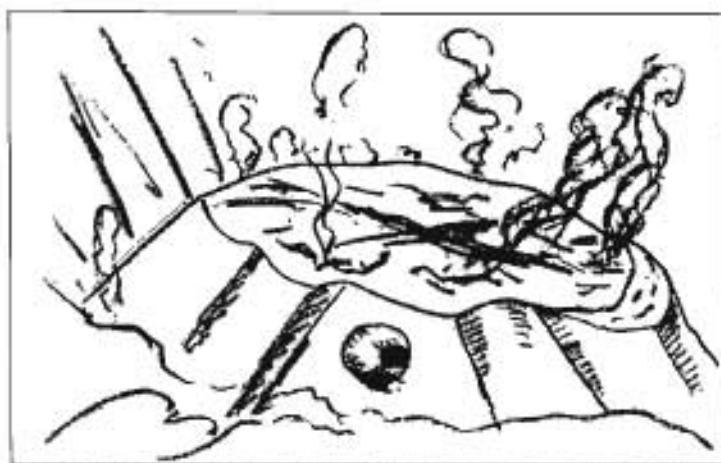


Figura 9. Estructura volcánica observada por el Dr. Atl el 25 de marzo de 1921 (Murillo, 1939).

Los datos referentes a la altura presentan confusión, ya que en otro momento, pero en la misma excursión comenta *La cúpula del fondo parecía continuar lentamente su evolución con el levantamiento de su parte central. ... aumentando hasta cerca de 25 o 26 metros* (Murillo, 1939). Hay que mencionar que existen nueve metros de diferencia entre los dos valores, esta discrepancia se explica en que las mediciones fueron realizadas de manera subjetiva desde alguno de los bordes del cráter principal, pero se trata de la misma *cúpula* (Fig. 9).

La estructura a la que se hace referencia presenta la morfología de un pequeño cono truncado y es considerado el responsable de la expulsión de balísticos y fuertes explosiones, que tuvieron continuidad hasta el 18 de abril, como lo atestigua Gómez de Orozco (en Murillo, *op.cit.*): *... a las 8:25 de la noche, un trueno prolongado y enseguida un rumor característico de grandes derrumbes... se percibieron... por espacio de diez minutos. Al día siguiente, en que llegamos hasta las Cruces encontramos fragmentos lanzados por el*

Volcán, rocas negras, y todavía calientes, de mas de 75 centímetros de diámetro, grandes fragmentos de roca de montaña arrancados por la erupción. La cita anterior nos permite imaginar la magnitud de las explosiones que ocurrieron en este período; si se toma en cuenta que bloques de 75 cm de eje mayor, llegaron a Las Cruces, sitio localizado a una distancia de 1.5 km desde el centro del cráter.

De mayo a noviembre de 1921, el Popocatepetl presentó bajos niveles de actividad explosiva, como lo atestigua Frienlander (1921) en el reporte que realiza desde el borde del cráter el día 15 de noviembre *El fondo ... en vez de estar parcialmente cubierto de una laguna ... hoy lo encontré casi completamente cubierto por una cúpula baja y ancha de roca. En torno de esta cúpula hay un foso circular del cual salían fumarolas violentas, silbantes y estridentes como rumor de calderas sobrecargadas ... La superficie de la cúpula lávica era de colores más bien claros amarillentos, rojizos y grises, semejantes a las estratificaciones y diques de lava andesítica de las paredes del cráter. Estaba atravesada por múltiples agujeros y grietas irregulares de las cuales sin embargo no salían sino pocas y débiles fumarolas... Al SE y al NW, al pie de la cúpula tenía un color y una superficie diversa era negra o casi negra y tenía todo el carácter de una lava en bloques. Esta lava había salido evidentemente de la cúpula hacia poco tiempo; la superficie tenía un aspecto escoriáceo y mostraba manchas de sublimación blanquizcas y amarillentas.* Esta descripción tan detallada fue favorecida por las condiciones de calma aparente que prevalecieron hasta el 10 de diciembre *... de una muy violenta y fuertemente cargada de cenizas, que se elevó a una altura aproximada de 6600 metros sobre el borde del cráter del volcán, y duró en la atmósfera más de 4 horas* (Murillo, 1939). Sin duda este evento es uno de los más intensos en el siglo XIX; como complemento de la información escrita existe una representación gráfica en la que se parecía el carácter extraordinario de la explosión (Fig. 10).

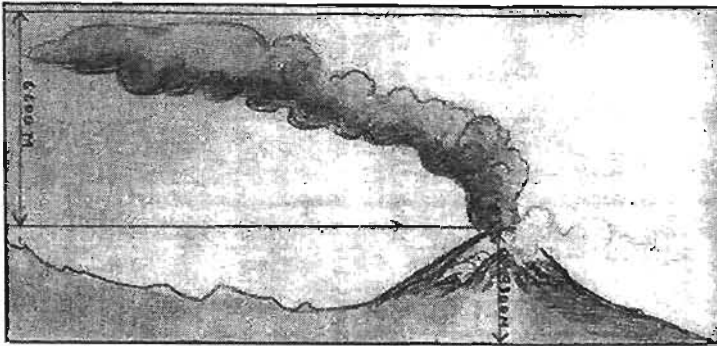


Figura 10. Explosión del Popocatepetl que originó una columna de 6.6 km de altura sobre la cima (Murillo, 1939).

El interés por observar el interior del cráter y relacionar las condiciones volcánicas con otros fenómenos naturales (sismos), fue una de las líneas de investigación de los científicos de la época; en el mes de enero de 1922, se realiza una expedición a la cumbre del volcán; llega a la cima el día cuatro y no se hace referencia de la existencia de ninguna estructura volcánica en el interior del cráter, al respecto Camacho (1922) menciona *La existencia del volcancillo que nos ocupa es muy corta. El Señor ingeniero de Gortari, no hace mención de él...* La primera parte de la cita pone de manifiesto, por primera vez, el carácter efímero de las estructuras que se desarrollan en la base del cráter principal y hace pensar que no se trata de una sola, sino de varias. Este aspecto es el punto de partida para plantear una nueva hipótesis acerca de la actividad ocurrida de 1919 a 1938.

El día en que descendían los excursionistas y a la altura de Tlamacas, reportan: *El 5 de enero, a las 17 horas y minutos fue notable para todos los habitantes de Amecameca y Ozumba, la erupción del volcán.* En este marco hay que mencionar, que la asociación entre construcción-destrucción de *volcancillos* y explosiones, por primera vez la hace Camacho (*op.cit.*). Al respecto menciona que la aparición de una nueva estructura fue consecuencia del evento ocurrido el cinco de enero *¿Fue entonces cuando nació el volcán central de la caldera del Popocatepetl?. Probablemente sí.* El evento anterior marca el comienzo de bajos niveles de actividad, estas condiciones permitieron la llegada a la cumbre de otro grupo de científicos, encabezada por Heriberto Camacho el día 9 de marzo *...hoy es notable la calma reiterante en la actividad fumarólica y solfatárica. Solamente en el borde de la gran caldera puede estimarse el trabajo de sus órganos.... La formación nueva es un volcán por su morfología completa y por su génesis... de composición ácida. ...el*

proceso evolutivo ha terminado, las manifestaciones dinámicas y las emanaciones gaseosas han decrecido y solo queda la actividad solfatárica el SE en la parte baja de las paredes de la caldera... Las manifestaciones volcánicas pueden continuar en la misma forma, es decir, sin encerrar ningún peligro ni amenaza para los habitantes de las faldas de esta gran montaña... los efectos de las erupciones no son desastrosas (Camacho, op.cit.). Estas condiciones, así como las afirmaciones realizadas por Camacho, se interrumpen en el mes de diciembre de 1922 con una explosión que tiene las siguientes características (Fig. 11) En una sola ocasión, durante todas mis largas observaciones, pude ver un verdadero pino formado por una erupción a chorro continuo que empezó justamente al salir el sol y perduró en la atmósfera cerca de tres horas (Murillo, 1939).



Figura 11. Explosión del Popocatépetl en forma de pino, ocurrida en diciembre de 1922 (Murillo, 1939).

El Dr. Atl es la fuente principal de lo ocurrido en el año de 1923, para esta fecha y de manera indirecta, se deduce una etapa de aparente quietud en el Popocatépetl *...sigue desarrollando su actividad constantemente, pero con lentitud.* El aspecto más relevante de este año es sin duda el que se refiere a la pequeña estructura volcánica que localizada en el interior del cráter *“... el año de 23 el aparato terminó su formación convirtiéndose en un cráter perfecto (Murillo, op.cit.).* Las características morfológicas denominadas por Atl como *cráter perfecto* aparecen en la figura 12.



Figura 12. Estructura volcánica en la base del cráter en las últimas etapas de construcción, vista por el Dr. Atl en 1923 (Murillo, 1939).

El volcán mantiene niveles bajos de actividad hasta el primer semestre de 1925, en este periodo prácticamente no hay manifestaciones, este aspecto lo podemos sustentar a partir de una entrevista que le hace el periódico Excélsior al Dr. Atl, el mes de abril de 1925, en donde afirma ... *noticias alarmantes publicadas por la prensa sobre una eminente catástrofe producida por el Popocatepetl ... fantasía de los excursionistas que, no pudiendo ascender al volcán lo calumnien ... Esta actividad tiene gran importancia desde un punto de vista científico* . El 23 de junio de 1925 las condiciones volcánicas cambian ... *presencia desde las faldas del Iztaccihuatl, a una altura de 4000 metros, tres explosiones muy violentas, que se produjeron en el espacio de 4 minutos. Fueron tres densas nubes de color negruzco que dejaron sobre las faldas de la parte sur del volcán una gruesa capa de ceniza* (Murillo, *op.cit.*). Dichas condiciones quedan plasmadas en un dibujo (Fig. 13) que nos da idea de la situación que prevalecía en ese momento.



Figura 13. Eventos explosivos originados el 23 de junio de 1925, cuyas columnas eruptivas se desplazaron hacia el sur del volcán (Murillo, 1939).

En 1927 el nuevo cono había terminado su evolución y apareció revestido de una capa de escorias fundidas con una pequeña chimenea en el centro (Fig. 14).



Figura 14. Aspecto del nuevo cono volcánico en 1927, corresponde a las últimas etapas de evolución (Murillo, 1939).

1928-1929.- en estos años el nuevo cráter se deterioró rápidamente y su pared norte fue destruida por una fuerte explosión lateral... (Fig. 15).



Figura 15. Morfología del nuevo cono durante 1928-1929, donde se reconoce su abertura en el flanco noreste ocasionada por una explosión lateral (Murillo, 1939).

La (Fig. 16) muestra el nuevo cono en su estado actual, 1938. ... aparato volcánico ya muy destruido. En 1938 las explosiones cesaron. Del cono en ruinas surge raramente alguna columna de vapor que asciende lentamente en la atmósfera. Terminaron completamente los ruidos subterráneos, los temblores producidos por las explosiones y las lluvias de ceniza. ... al finalizar este año de 38, recorriendo los labios superiores del gran cráter, observé dos gruesas nubes que salían del fondo. ... Su volumen era enorme, pero no provenían del propio cono, sino de una abertura entre éste y el fondo del viejo cráter, la que estaba en comunicación con la antigua chimenea. Es muy posible que todas las erupciones del periodo histórico se hayan producido por esa grieta que estuvo siempre abierta (Murillo, 1939).



Figura 16. Aparato volcánico observado en 1938 que presenta una apertura en su ladera norte. Dicha estructura es parcialmente rellena por material lávico a partir de 1994 (Murillo, 1939).

Consideraciones finales

Para el período anterior al siglo XIX, se cuenta con información subjetiva, indirecta, insuficiente y algunas veces con dificultad para ser verificada en otras fuentes. No obstante, se pudo elaborar una secuencia del comportamiento eruptivo del Popocatepetl (Fig.2). Con la información obtenida no es posible establecer un patrón en el comportamiento eruptivo del volcán, pero esta recopilación pone en evidencia un proceso continuo, donde se han sucedido distintas fases de actividad volcánica. En este marco, intuimos que el comportamiento eruptivo presenta un ritmo o recurrencia que incluso involucra los

tiempos actuales, pero no es posible establecerlo con la información disponible, quedará para un futuro próximo el enriquecimiento de esta cronología.

Un aspecto que se considera valioso fue la diferenciación de los períodos donde el volcán no tuvo actividad, y los que por alguna causa desconocida no existen reportes. Este aspecto es importante retomarlo, ya que en la búsqueda de la información existen fuentes que consideran la falta de registros como sinónimo de calma volcánica. Este error altera la secuencia en el establecimiento, a futuro, de las distintas etapas eruptivas que ha presentado el volcán a lo largo de su historia.

La información del siglo XX, en particular de 1901 a 1938, está de acuerdo con el desarrollo científico de la época, hay una mayor preocupación por explicar la génesis de los fenómenos volcánicos y su dinámica. De esta manera se desarrollan teorías que tratan de relacionar los sismos, el volcanismo y las condiciones atmosféricas. Por otro lado, de manera gráfica, son representadas las explosiones más violentas y los cambios que ocurren en el fondo del cráter principal.

A Gerardo Murillo se le atribuye el mayor número de registros que se tienen para este período. Hay que destacar que las observaciones de este personaje fueron realizadas en el lugar de los hechos, fue testigo de lo que ocurría en el interior del cráter y en las laderas del edificio volcánico, de ahí el valor científico y artístico de sus observaciones y dibujos.




Hay que mencionar que 20 años de observaciones del Dr. Atl, dejaron claro que la pequeña estructura volcánica que se desarrolló en el interior del cráter y que reportó, por primera vez, el 19 de febrero de 1919, la consideró como una sola a lo largo de todo el período de observación, pero en constante evolución. Esto se puede observar en la serie de dibujos que realizó al respecto. Esta idea tuvo una amplia distribución entre los científicos de la época, así lo demuestran los escritos de Friedlander (1921), Camacho (1922) y Waitz (en Friedlander, *op.cit.*). Sin embargo, nuestra opinión es distinta y está basada en la actividad reciente del



volcán, que se caracteriza por la alternancia de procesos efusivos y explosivos. Esta dinámica es la causante de la creación y destrucción de los domos que se desarrollan en el interior del cráter, de 1996 a 2003 se han creado y destruido alrededor de 25 de ellos (Macias y Siebe, 2005).




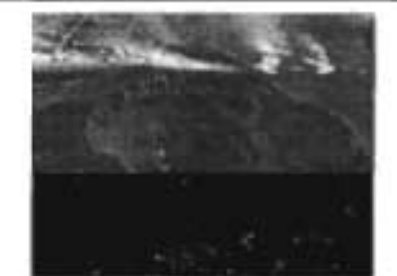
Tomando en cuenta lo anterior, se interpretó la información elaborada por Gerardo Murillo con un enfoque geomorfológico; es decir, tomando en cuenta la expresión del relieve, la ocurrencia e intensidad de las explosiones. De esta manera se determinó la existencia de por lo menos 11 domos en el interior del cráter en un período de 19 años, su análisis y comparación con estructuras dómicas asociadas a la actividad de 1994 – 2003, se presenta en la figura 17.



Hay que mencionar que el dato anterior es cuestionable si se toma en cuenta que en la actualidad han existido 25 domos en un lapso de 7 años. Este hecho nos hace suponer que para 1919 – 1938 el número de domos fue mayor; en este sentido cabe resaltar que en esa época, la única manera de darse cuenta de la existencia de *volcancillos* en el interior del cráter, fueron las excursiones. De tal manera que cada una de las estructuras reportadas, son el resultado de cada uno de los ascensos a la cima.



Figura 17. Evidencias geomorfológicas sobre la existencia de una dinámica de creación y destrucción de domos en el Popocatepetl de 1919 a 1938.

Fecha	Referencias: *Murillo, 1939; **Friedländer, 1921 y *** Camacho, 1922.	Evidencia o Interpretación morfológica	No. de estructura	Comparación morfológica con el periodo eruptivo: 1994 - 2003
1918	<p><i>... yo bajé muchas ocasiones al fondo de este gran pozo y pude explorarlo punto a punto sin encontrar nunca el más leve rastro de un aparato volcánico moderno. La antigua chimenea estuvo siempre obturada por escorias recubiertas por las rocas de los derrumbes, y solo quedaban algunas pequeñas aberturas por las cuales salían periódicamente lentas columnas de vapor, y en muy raras ocasiones, nubes cargadas de ceniza.*</i></p>			
1919 Febrero, marzo y abril	<p><i>Diversas volcaneras que subieron al cráter observaron un montón de piedras que parecían 'una cazuela volteada boca abajo, toda resquebrajada', por entre cuyas aberturas salían vapor y humo... un montón de escorias que poco a poco fue tomando el aspecto de una bóveda agrietada, y en esas grietas se percibía fuego que se avivaba cuando el aire soplabo... había un gran montón de piedras en medio del cual aparecieron rayas de luz entre las que salían con mucha violencia chorros de humo.*</i></p>		1	


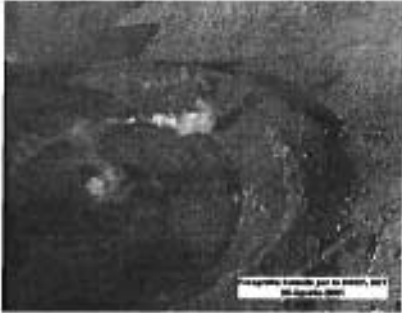
1919	<p>En junio de 1920 El Universal anuncio que el Popocatepetl estaba en erupción... los volcaneros la confirmaron, agregando que esa erupción ya tenia más de un año [sugiere una actividad continua durante 1919] de estarse verificando.</p> <p>...atribuyen el origen de esta erupción de 1919 a los temblores de 1920, no están en lo justo porque cuando estos se verificaron el aparato volcánico del Popocatepetl ya se había formado, y por él se verificaban constantemente un año antes [se refieren de mayo a noviembre de 1919], explosiones de vapor cargado de ceniza. *</p> <p>A partir de esta información se deduce que una vez iniciada la actividad volcánica en 1919, continúa el resto del año. Las explosiones-expulsión de piroclastos son la causa de la destrucción de la estructura 1 y el emplazamiento de la 2, este fenómeno de creación y destrucción de domos ha sido característica de la actividad actual del Popocatepetl.</p>		
Diciembre	<p>... el montón de piedras según gráfica expresión de Leonardo, se había convertido en una casuela volteada hacia abajo. A su alrededor se veía una corona de pequeñas fumarolas.... *</p>		<p>2</p> 
1920	<p>... las explosiones adquirieron una invariable periodicidad, cada 8 días, precisamente los domingos por la mañana entre 6 y 7, y por las tardes inmediatamente después de ponerse el sol, se verificaban erupciones que eran invariablemente las más importantes de toda la semana. *</p> <p>El incremento de la explosiones y expulsión de piroclastos, a principios de este año, pudieron corresponder a la destrucción del domo 2 y el emplazamiento del 3.</p>		



<p>1920 s / fecha</p>	<p>... horno de ladrillos... semejaba un horno acabado de encender lleno de humo y de cenizas y con un gran brasero en el fondo, cuyo fuego se reavivaba constantemente por violentas corrientes de vapor.*</p>		<p>3</p>	
<p>Antes del mes de octubre, parece que nadie exploró o investigó lo sucedido en el cráter. La única información que se tiene y que puede atestiguar la presencia de las explosiones responsables del domo 3 es la siguiente: <i>En 1920 y 21 se producían violentas emisiones de vapor por la abertura central de la cúpula en 'formación', algunas de ellas acompañadas de humo espeso y cenizas.*</i></p> <p>La característica de mayor peso para considerar al domo como una estructura distinta, y no una variación del <i>horno de ladrillos</i>, es la morfología y composición (<i>cúpula andesítica</i>).</p>				
<p>11 de octubre</p>	<p>... en cuyo fondo observó una pequeña cúpula andesítica a la que puso el nombre de tapón... **</p>		<p>4</p>	


<p>1920 12 de octubre</p>	<p><i>Una explosión más violenta se verificó en la mañana del 12/10 cuando el Dr. Waitz se encontraba de regreso en Tlamacas** Este evento es el responsable de la destrucción del domo 4 y la creación del 5.</i></p>		
<p>19 de noviembre</p>	<p><i>... se había levantado una bóveda en cuyo centro había una abertura en cruz que parecía incandescente... como una gran ampulita... ,medía 40 metros de diámetro y 10 de altura. *</i></p>	 <p>Tumaco de Marilla (op.cit)</p>	<p>5</p>  <p>44817 Papacotepal Formación de un nuevo cuerpo de lava. Foto: R. Quares (1979) 11 pp</p>
<p>Diciembre S / fecha</p>	<p><i>... aparecía con un gran numero de hoyos en toda su superficie [cráteres de impacto] y las explosiones se verificaban indistintas por todas partes. La corona de fumarolas era más activa. *</i></p>		



<p>1921 22 de marzo</p>	<p>...a eso de las seis y media de la mañana salió una fumarola grandísima que nos tapo el sol y cuando el viento la hizo a un lado vimos que caían muchos puntitos blancos como palomitas que nos caían encima. Eran piedras que parecían caer del cielo.... En efecto, el día anterior [se refiere al día 22] vimos elevarse una enorme columna de humo a una altura aproximada de 3000 metros sobre el cráter. * La explosión a la que se hace referencia, todo parece indicarlo, fue la responsable de la destrucción de la estructura anterior piedras que parecían caer del cielo y el surgimiento del domo 6.</p>			
<p>23 -24 de marzo</p>	<p>"El levantamiento de la bóveda había aumentado hasta cerca de 25 o 26 metros". *</p>	 <p>Tocado de Parícutin (a. r. v.)</p>	<p>6</p>	 <p>Volcán Parícutin, 10.00. Vista del labio superior sobre (foto: A. Quares) 01210673.jpg</p>
<p>25 de marzo 08:30 hrs.</p>	<p>... la caravana llegó al labio inferior... a las ocho y media de la mañana del 25, y en ese preciso momento se verificó una formidable erupción de humo y de cenizas (Fig. 8), y a nuestro alrededor cayeron algunas piedras pequeñas como garbanzos, y otra mas grandes, del tamaño de un huevo, todas fragmentos de antiguas escorias. [Posibles fragmentos del domo] ...un mozo...fue herido en la cabeza por un proyectil grande como el tamaño de una mano...murió. *</p>			

<p>25 de marzo</p>	<p><i>...pude darme cuenta de las modificaciones que había sufrido el levantamiento del fondo. Su aspecto general había variado notablemente en cuatro meses (se debe al domo observado el 19 de noviembre de 1920 (fig 6); en esta cita es evidente que se refiere a la misma estructura) ... su elevación aumentaba por lo menos el doble, es decir, a 35 metros sobre el suelo y la capa superior estaba completamente resquebrajada y cubierta de agujeros por los cuales se verificaban las erupciones ... en la parte norte de la cúpula se había formado un pequeño embudo diagonal de cerca de tres metros de diámetro del cual salían constantemente chorros de vapor. *</i></p>		<p>7</p>	 <p><small>Cráter Popocatepetl. Anaranjado, interior del cráter (foto B. Quaresima 1974) [2]</small></p>
<p>18 de abril 20:25 hrs</p>	<p><i>... un trueno prolongado y enseguida el rumor característico de grandes derrumbes. ... El día siguiente [19 de abril], en que llegamos hasta las Cruces encontramos fragmentos lanzados por el Volcán, rocas negras, y todavía calientes, de más de 75 centímetros de diámetro, y grandes fragmentos de roca de montaña arrancados por la erupción. *</i></p> <p>No se puede afirmar, pero existe la posibilidad de que este evento fuera el responsable de la destrucción del domo 7. Después de esta fecha, no se cuenta con información detallada de los seis meses siguientes, pero es un hecho que la actividad volcánica continúa durante todo el año de 1921 las emisiones de vapor de agua y de cenizas fueron muy considerables y se verificaron cotidianamente, y en algunos días hubo diez, quince, veinte y hasta cincuenta, algunas de ellas muy potentes. La cúpula del fondo parecía continuar su evolución, con el levantamiento de su parte central. *</p> <p>En este período no se puede saber si la actividad volcánica presente en los siguientes seis meses sin información, pudo haber sido la responsable de la existencia de uno o varios domos, anteriores al que se reporta en el mes de noviembre. Hay que mencionar que en todo este tiempo, el Popocatepetl presentó manifestaciones volcánicas violentas, una de las últimas es la que ocurre el 14 de noviembre de 1921 <i>Al subir observamos diversas explosiones con la característica nube en forma de coliflor, ... el tiempo nos obligo a volver antes de llegar al cráter. **</i></p>			


<p>1921 15 de noviembre</p>	<p><i>... hoy lo encontré casi completamente cubierto por una cúpula baja y ancha de roca. En torno a esta cúpula hay un foso circular... al SE y al NW, al pie de la cúpula tenía un color y una superficie diversa era negra o casi negra y tenía todo el carácter de una lava en bloques. Esta lava había salido evidentemente de la cúpula hacia poco tiempo.... **</i></p>		<p>8</p>	
<p>10 de diciembre</p>	<p><i>... una erupción muy violenta, fuertemente cargada de cenizas, que se elevó a una altura aproximada de 6600 metros sobre el borde del cráter... duró en la atmósfera más de 4 horas. *</i></p> <p>Es muy probable que la destrucción del domo 8 haya generado la columna eruptiva de la cual se hace mención (Fig. 10), y al mismo tiempo formar una nueva, aunque no podemos estar seguros. Si se toman en cuenta las observaciones que realiza el 4 de enero el Ingeniero Gortari, no existe evidencia de ninguna estructura volcánica menor emplazada en el cráter principal (en Camacho, 1922). De ser ciertas estas condiciones, el domo 9 sería resultado de una explosión ocurrida el 5 de enero.</p>			

<p>1922 05 de enero</p>	<p>... a las 17 horas y minutos, fue notable para todos los habitantes de Amecameca y Ozumba, la erupción del volcán. *** Este fenómeno marca la probable aparición del domo 9, incluso el autor de la cita anterior pone en evidencia la creación de esta estructura ¿Fue entonces cuando nació el volcán central de la caldera del Popocatepetl? ... Probablemente sí. ***</p>			
<p>1922 9 de marzo</p>	<p>La formación nueva es un volcán por su morfología completa y por su génesis.... ***</p>		<p>9</p>	
<p>Diciembre</p>	<p>... pude ver un verdadero pino formado por una erupción a chorro continuo que empezó justamente antes de salir el sol y perduró en la atmósfera cerca de tres horas. * Con este evento se destruye la estructura observada el 9 de marzo para crearse una nueva, la número diez.</p>			

<p>1923</p>	<p><i>...el año de 23 el aparato terminó su formación convirtiéndose en un cráter perfecto. *</i></p>	 <p>Tomado de Murillo (1923)</p>	<p>10</p>	
<p>El reporte anterior es la única información que se tiene para un período de dos años seis meses. La falta de información hace suponer, pero no con seguridad, que el volcán presentaba una etapa de relativa calma y por consiguiente la permanencia de la estructura número diez.</p>				
<p>1925 23 de junio</p>	<p><i>...presencia desde las faldas del Iztaccihuatl, a una altura de 4000 metros, tres explosiones muy violentas, que se produjeron en el espacio de 4 minutos. Fueron tres densas nubes de color negrusco que dejaron sobre las faldas de la parte sur del volcán una gruesa capa de ceniza. * (Fig. 13).</i></p> <p>Estos eventos pudieron causar la destrucción de la estructura anterior y la creación de la once. A partir de esta fecha ya no existe información sobre explosiones, ni tampoco hay excursiones hacia el cráter, es probable que en esto tenga que ver un período de relativa calma que se va a continuar a lo largo de 1926 y 1927.</p>			

1927	<p><i>...el nuevo cono había terminado su evolución y apareció revestido de una capa de escorias fundidas con una pequeña chimenea en su centro. *</i></p>		11	
<p>Todo parece indicar que hubo un evento aislado que interrumpe dos años seis meses de calma, y que modifica la morfología de la estructura número once. No se conoce la fecha exacta de la ocurrencia de este evento, pero es un hecho que no fue de gran magnitud.</p>				
1928-1929	<p><i>... en estos años el nuevo cráter se deterioró rápidamente y su pared norte fue destruida por una fuerte explosión lateral... *</i></p>		11	

Tuvieron que transcurrir nueve años, para volver a tener noticias de lo que ocurría en el interior del cráter, al parecer en este lapso no hubo ningún tipo de manifestación volcánica que modificara la estructura once. No obstante, la última fotografía que se muestra en esta secuencia, presenta un volcán en buenas condiciones morfológicas; se pueden reconocer rasgos primarios muy puntuales, como el labio del cráter, un atrio que limita un fondo ocupado por un cuerpo de agua. Estas condiciones son contrarias a las que describe el Dr. Atl y para la misma fotografía, donde se refiere a la estructura en cuestión como *aparato volcánico ya muy destruido*. Si se comparan las fotografías de 1928-29 y 1938 se verá que la primera presenta una morfología con un mayor modelado que la segunda. Este aspecto hace pensar que probablemente se trate de dos volcanes distintos, pero la falta de una actividad violenta que siempre ha acompañado la construcción y destrucción de domos no apoya esta hipótesis.

<p>1938</p>	<p><i>... el aspecto actual del aparato volcánico ya muy destruido. En 1938 las explosiones cesaron. Del cono en ruinas surge raramente alguna columna de vapor que asciende lentamente en la atmósfera. Terminaron completamente los ruidos subterráneos, los temblores producidos por las explosiones y las lluvias de ceniza. *</i></p>		<p>11 ?</p>	
-------------	--	--	-----------------	--

Capítulo II. Diciembre de 1994 – 2003: un nuevo período eruptivo en el Popocatepetl

En el presente apartado se analiza el comportamiento eruptivo del Popocatepetl, a partir del 21 de diciembre de 1994, fecha en que comienza una nueva fase de actividad y que se continúa hasta la actualidad. Cabe mencionar que para la segunda mitad del 2003 los niveles de actividad tendieron a disminuir, esta tendencia podría marcar el posible inicio de un período de calma volcánica. Hay que mencionar que la erupción de diciembre de 1994, fue anunciada por variados síntomas que se asocian a una reactivación volcánica. Desde finales de 1992 comienza una actividad sísmica y fumarólica que con el tiempo se incrementa, tanto en frecuencia como en intensidad.

Los registros del monitoreo volcánico del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), son la fuente de información principal de este escrito (www.cenapred.unam.mx). Los datos que proporciona esta institución, son diarios y supervisados por un grupo de especialistas, certificados a nivel internacional. De tal forma, se cuenta con registros detallados sobre sismicidad, tipo de actividad volcánica y materiales asociados. De manera complementaria se consultó la base de datos del *Global Volcanism Program* (<http://www.volcano.si.edu>) y por último, aunque sólo para eventos volcánicos de gran magnitud, con información hemerográfica.

Las explosiones tienen gran significado geomorfológico, a partir de este fenómeno se caracteriza el tipo de actividad volcánica y materiales expulsados. En este marco se reconocen rellenos de detritos volcánicos que llegan a formar pequeñas represas a lo largo de los barrancos, del mismo modo es evidente la existencia de un potente manto piroclástico que se deposita en las laderas altas del volcán, zona donde se encuentran las cuencas de captación de todos los escurrimientos que drenan las laderas del Popocatepetl. Estas condiciones llegan a catalizar o magnificar la dinámica fluvial y gravitacional, convirtiendo a estos procesos, tanto en agentes de transformación importante del relieve, como en un peligro para las poblaciones aledañas. Lo anterior es la justificación, por la que se toma a las explosiones como el principal elemento de análisis en este apartado.

Con base en el índice de explosividad volcánica, IEV (Fig. 18) propuesto por Newhall y Self (1982), las columnas eruptivas del Popocatépetl son clasificadas en función de su altura. Esta variable, esta íntimamente asociada a la ablación del glaciar o a procesos volcánicos tan específicos, como creación y destrucción de domos, expulsión de balísticos, generación de *lahares*, caída de cenizas, luminiscencias, etc. De esta manera se caracteriza la actividad más reciente del Popocatépetl.

ÍNDICE DE EXPLOSIVIDAD VOLCÁNICA (IEV)

IEV	ALTURA DE LA COLUMNA (Km)	VOLUMEN DE EYECCIÓN (m ³)	CRITERIO CUALITATIVO	ESTILO ERUPTIVO	EJEMPLOS
0	< 0.1km	< 10 ⁴	Suave	Hawaiano	Kilauea
1	0.1 - 1km	10 ⁴ - 10 ⁵	Efusivo	Hawaiano/Estromboliano	Stromboli
2	1-5 km	10 ⁵ - 10 ⁷	Poco explosivo	Estromboliano/Vulcaniano	Galeras (1992)
3	3-15 km	10 ⁷ - 10 ⁸	Explosivo	Vulcaniano	Ruiz (1985)
4	10-25 km	10 ⁸ - 10 ⁹	Severo	Vulcaniano/Pliniano	Galunggung (1982)
5	>25 km	10 ⁹ - 10 ¹⁰	Cataclismo	Pliniano	St. Helens (1980)
6	>25 km	10 ¹⁰ - 10 ¹¹	Paroxismo	Pliniano/Ultra-Pliniano	Krakatau (1883)
7	>25 km	10 ¹¹ - 10 ¹²	Colosal	Ultra-Pliniano	Tambora (1815)
8	>25 km	> 10 ¹²	Colosal	Ultra-Pliniano	Toba (74 000 años a C)

Figura 18. Índice de Explosividad Volcánica (IEV); la columna sombreada representa el único rango utilizado en la clasificación de las columnas eruptivas del Popocatépetl (Newhall y Self, 1982).

Con respecto al IEV de 0 al 2, la altura de la columna es a partir del cráter. Del nivel 3 en adelante, el valor es sobre el nivel del mar.

Otro aspecto a considerar es el cambio de rubro entre el nivel 2 y 3, en este caso se utiliza el siguiente criterio (cuarta columna, Fig. 18). En una explosión que genere una columna eruptiva de 3 km, estaría dentro del nivel 2 (1 a 5 km). Esta misma columna podría ser clasificada como nivel 3 (3 a 15 km) si en el momento de su emanación hay expulsión de balísticos. La presencia de estos productos implica un grado de explosividad mayor, aunque no necesariamente este fenómeno se refleje en la altura que alcanzan los piroclastos.

Con el fin de facilitar la caracterización de la actividad del Popocatépetl, se elaboró una gráfica para cada año de actividad, a partir de 1993 y hasta el 2003 (un total

de 11), en ellas se hace evidente la frecuencia, intensidad (IEV) y distribución que tuvieron a lo largo de un año.

2.1 Actividad volcánica anterior a diciembre de 1994 (de 1992 a noviembre de 1994).

El último evento eruptivo del Popocatepetl fue en 1938, a partir de esta fecha tuvieron que pasar 54 años para que volviera a mostrar indicios de actividad. Es así que a finales de 1992 se presenta un incremento en la actividad sísmica y en la fumarólica.

En 1993 las explosiones fueron intensas y frecuentes, en este año se presentan dos eventos importantes (Fig. 19). El primero se registró el 25 de febrero y generó una columna eruptiva de 4.5 km de altura (IEV:2), el contenido de azufre y piroclastos fue considerable, incluso la superficie del glaciar quedó parcialmente cubierta por ceniza. La explosión de noviembre fue más violenta, los materiales arrojados alcanzaron los 6 km de altura. Para este caso no es posible dar un valor de IEV a esta explosión, debido a que se desconoce si la medición se realizó a partir del cráter o sobre el nivel del mar.

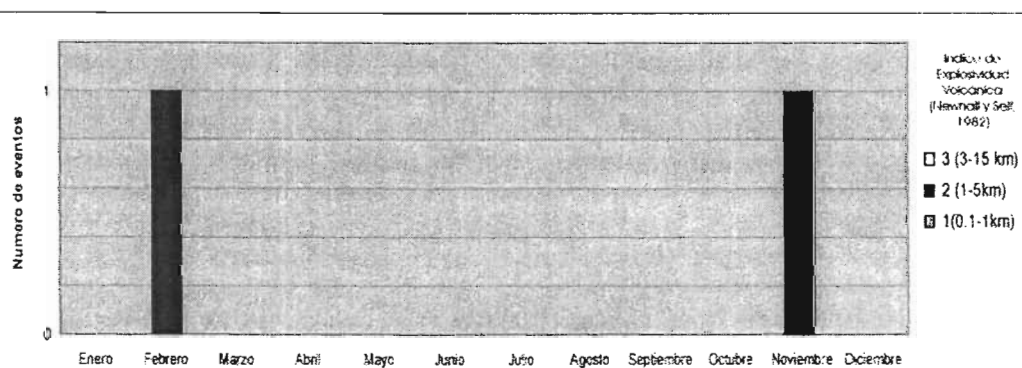


Figura 19. Gráfica que muestra la frecuencia, intensidad y distribución de las explosiones ocurridas en el año de 1993.

No obstante, hay que mencionar que no son los únicos eventos, en el mes de junio se registran explosiones con una intensidad y magnitud muy bajas, estos fenómenos reciben el nombre de exhalaciones, cada uno es acompañado por

emisión de ceniza. En octubre también se presentan eventos explosivos (13, 14 y 21), de los cuales no hay más datos, sino la sola mención.

De enero a noviembre de 1994.

En este período la característica principal fue la ocurrencia de eventos volcano-sísmicos⁶, que no tuvieron una manifestación en superficie, a través de explosiones o columnas eruptivas, sin embargo, este fenómeno pone de manifiesto que la actividad interna continuaba. En enero ocurrieron 86 sismos en total, de los cuales 62 tuvieron un hipocentro a una profundidad menor a 1 km, por debajo del cráter; estos eventos se conocen como de tipo B. Sismos cuyo foco se localizó hasta una profundidad de 10 km sólo fueron 12, este tipo de manifestaciones se conocen como de tipo A. En ambos casos (tipo A y B) su ocurrencia pone de manifiesto el fracturamiento de rocas, lo que hace pensar que la inyección de magma hacia superficie, fue la génesis de estos fenómenos. Los sismos tipo AB se consideran de transición; tuvieron lugar a una profundidad intermedia con respecto a los anteriores, entre 5 y 7 km por debajo del cráter, de éstos se registraron 12. Cabe mencionar que estas manifestaciones volcano-sísmicas estuvieron acompañadas por exhalaciones de vapor y gas, con un contenido de azufre de 400 a 1200 ton/día (Global Volcanism Program, 1994).

En el mes de marzo se instalan estaciones de monitoreo sísmico en puntos cercanos al volcán Popocatepetl. De esta manera comienzan a transmitirse señales de manera continua todos los días. Con esta información da inicio la caracterización del comportamiento volcano-sísmico y su relación con las erupciones.

⁶ Los eventos volcano-sísmicos se clasifican de acuerdo a sus características rúbricas y se relacionan con el comportamiento eruptivo: Los de **tipo A** ocurren a profundidades de 1 – 10 km y son de alta frecuencia con longitudes de onda P y S bien definidas. Se originan por el fracturamiento de la roca como resultado de la intrusión o migración de magma y/o a la dispersión de fluidos de alta presión. Los **tipo B** se presentan a profundidades menores a 1 km, en los cuales es difícil distinguir las ondas P y S, también son formados por el fracturamiento de la roca. Los de **tipo AB** presentan componentes de alta y baja frecuencia, las primeras con impulsos de onda P y S con duración de 5.5 seg; en cambio los de baja frecuencia son de 0.8 – 1.1 seg. La duración total del evento es de 150 seg. Es muy probable que el origen de estos eventos sea una mezcla de los tipo A y B (Banks et al, 1993).

En este marco, los datos recibidos ponen en evidencia una actividad sísmica muy dinámica. Para el mes de marzo se contabilizaban por día 99 sismos y en abril 164, todos ellos de tipo B. Los 8 meses restantes, la sismicidad no fue significativa, en promedio ocurrieron 6 sismos por día (Fig. 20.)

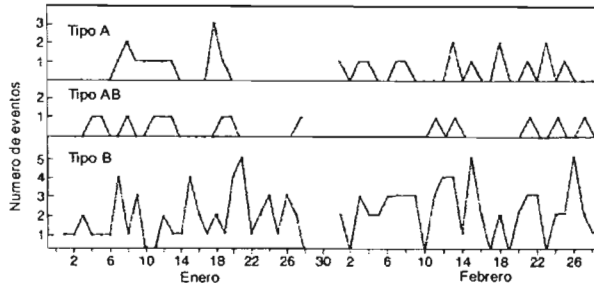


Figura 20. Actividad sísmica ocurrida los primeros meses de 1994, con un incremento en la frecuencia comparado con el año anterior (Global Volcanism Program, 1994).

2.2 La crisis eruptiva de 1994

El comienzo de una nueva etapa eruptiva en el Popocatepetl lo determina una explosión ocurrida en la madrugada del 21 de diciembre de 1994 (01:54hrs), evento que generó una columna eruptiva de 13.4 km de altura, snm; 74 km de ancho y 250 km de largo (IEV: 3). Los materiales piroclásticos tuvieron una dirección preferencial NE-E, ocasionando caída de ceniza en Puebla, Tampico y Tamaulipas (Fig. 21). También fueron expulsados fragmentos incandescentes (balísticos) que cayeron sobre las laderas del volcán, explosiones menores se continuaron al amanecer y el resto del día (Fig. 22).



Figura 21. Imagen de satélite que muestra la columna eruptiva, originada en la explosión del 27 de diciembre de 1994, cuya dirección preferencial fue hacia el NE (Vidal, 1996).



Figura 22. Eventos explosivos que ocurrieron a lo largo del día 21 de diciembre de 1994, representan la actividad volcánica iniciada la madrugada de ese mismo día (CENAPRED, 1995).

La actividad volcánica continuó y los eventos más notorios fueron los días 26, 27 y 28; en promedio la altura que alcanzaron los piroclastos expulsados fue entre 11 y 12.5 km, snm (IEV: 3) (Fig. 23).

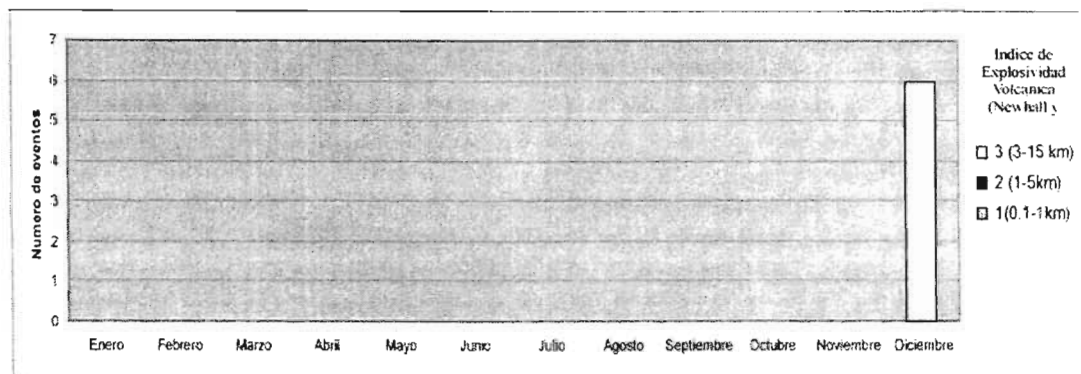


Figura 23. Gráfica que muestra la magnitud de la actividad del día 21 de diciembre de 1994.

Los piroclastos que cayeron dentro del cráter, durante este período eruptivo sepultaron parcialmente la pequeña estructura volcánica originada en los años treinta, al mismo tiempo que desaparecía el pequeño lago que existía en su interior (Fig. 24).



Figura 24. Interior del cráter del Popocatepetl después de diciembre de 1994, se distingue la estructura originada en 1938 y es notable la ausencia del lago que existía en su interior (CENAPRED, 1996).

Cabe resaltar, que a partir del 21 de diciembre de 1994, el volcán recobra el interés por parte de los especialistas y de todos los sectores de la población, ya que su reactivación representaba pérdidas humanas, económicas, así como un impacto ambiental negativo en toda la región, en caso de presentarse una erupción mayor. En este sentido, el monitoreo volcánico se hace más estricto con el fin de informar y prevenir los peligros que se asocian a la actividad eruptiva.

2.3. 1995

Las explosiones más representativas, se concentran en la primera mitad del año (Fig. 25), todo parece indicar que se trata de la continuación, pero con una intensidad menor, de la actividad iniciada en diciembre de 1994. Los eventos del 10 de enero (Fig. 26), 13 y 21 de febrero fueron los más sobresalientes, debido a que sus columnas alcanzaron entre 2.5 y 3 km sobre el cráter.

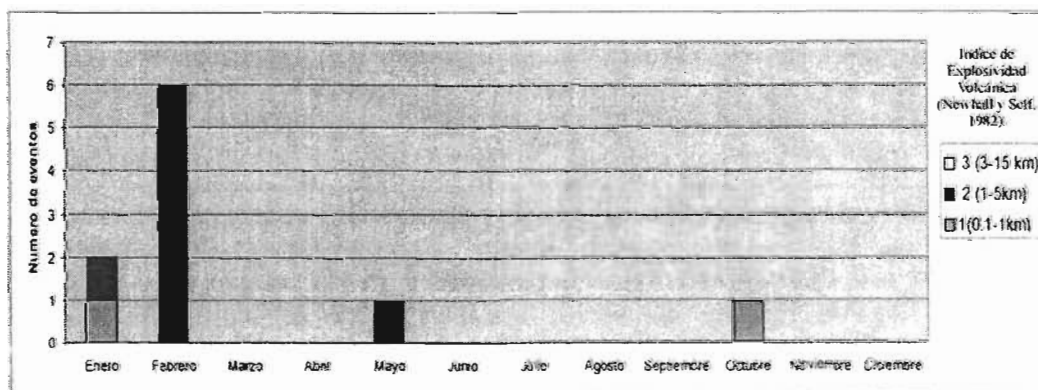


Figura 25. Gráfica que muestra la distribución de los principales eventos explosivos durante 1995.



Figura 26. Explosión ocurrida el 10 de enero; la columna eruptiva alcanzó los 2 km sobre el cráter (CENAPRED, 1995).

En la gráfica de la figura 25, marzo y abril no presentan registros de actividad, esto no quiere decir que el volcán se mantuviera tranquilo, por el contrario, se presentaron continuas y numerosas exhalaciones, forman nubes muy densas de piroclastos que no tienen desarrollo vertical. Como resultado de este estilo eruptivo, el glaciar quedó cubierto en un 50 % de su superficie por ceniza, lo que favoreció la fusión del hielo y dio origen al primer lahar en el mes de abril. Este flujo de lodo recorrió 3 km a partir de la base del glaciar, siguiendo el curso de la barranca Huiloac (Palacios *et al.*, 2001). Cabe mencionar, que este tipo de eventos también se observaron después de la explosión del 26 de mayo.

En lo que respecta a la actividad sísmica, fue predominante de junio a diciembre, no obstante, este hecho se ve interrumpido por una exhalación el 23 de octubre, que tuvo una altura de aproximadamente un kilómetro sobre el cráter.

Las modificaciones más notorias se observaron en el sector SSE de las paredes inferiores del cráter, ahí aparecieron tres bocas de morfología irregular. En estas aberturas eran expulsados, de manera intermitente, pequeños volúmenes de material piroclástico.

2.4. 1996

En la figura 27 se reconocen tres eventos de actividad explosiva, el primero de ellos se presentó en marzo, donde numerosas exhalaciones arrojaron grandes volúmenes de gas, vapor y ceniza, a partir de tres aberturas volcánicas (bocas), localizadas al pie de la ladera interior del cráter en el sector SSE. Se estiman 5 mil toneladas de material expulsado, esparcido en un radio de 50 km (Escobar, 1996).

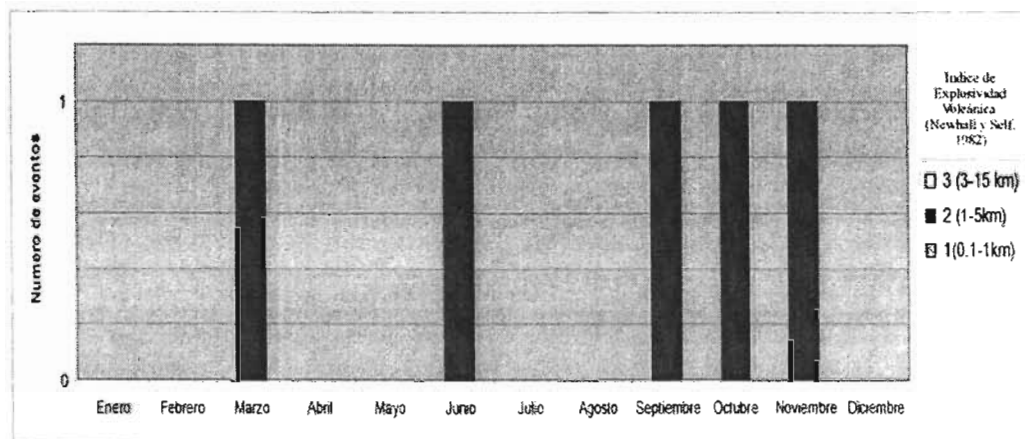


Figura 27. Actividad en el año de 1996.

A mediados de marzo se observa el crecimiento de un primer domo (Fig. 28), su desarrollo se acompaña de explosiones de baja intensidad y expulsión de piroclastos, estas características se mantienen constantes hasta abril. El último día de este mes, se presentó una explosión, de la cual se desconoce la altura de la columna, pero fue tan violenta que no pasó desapercibida por los medios de comunicación *...rocas que, arrojadas a alta temperatura, rodaron y pudieron haber golpeado y causado la muerte de cinco alpinistas...Los monitoreos científicos demuestran que la sismicidad del Popocatepetl ha aumentado recientemente al tiempo que el cráter está prácticamente lleno de lava (La Jornada, 19 de mayo de 1996).*

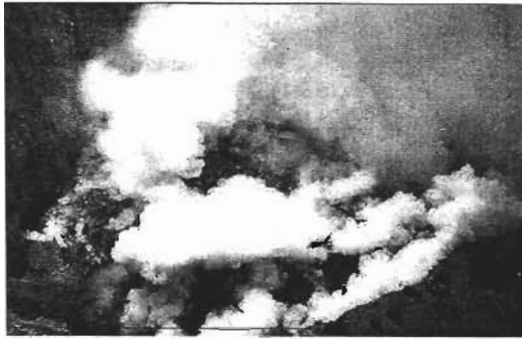


Figura 28. Aspecto del primer domo de lava sobre la base del cráter; el 11 de abril presentaba un mayor volumen (CENAPRED, 1996).

La expulsión de balísticos tiene relación con la destrucción del domo 1, una vez que desaparece, la inyección de magma continúa, este hecho lo confirma un promedio de 100 sismos tipo B por día (Fig. 29), lo que da como resultado la creación del domo 2. El primer reporte visual de esta estructura fue el 17 de mayo (Fig. 30).

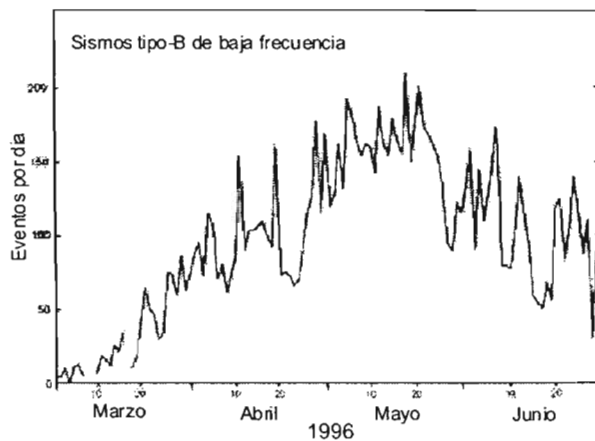


Figura 29. Los sismos volcano -tectónicos tipo -B tienden a incrementarse durante el mes de mayo (Global Volcanism Program, 1996).



Figura 30. Formación del domo 2, vista tomada el 17 de mayo de 1996 (CENAPRED, 1996).

Junio es el segundo evento explosivo (Fig. 27), la explosión más sobresaliente sucedió el día 14, genera una columna piroclástica de 3 km de altura (IEV:2). La explosión representa las primeras fases de destrucción del domo 2 (Fig. 31).



Figura 31. Columna eruptiva ocurrida el 14 de junio de 1996 (CENAPRED, 1996)

Julio y agosto representa una fase de construcción y destrucción del domo 2, estos procesos son de baja magnitud y se caracterizan por presentar expulsión de piroclastos en forma no violenta.

El tercer período de actividad se presenta de septiembre a diciembre, con una intensidad y magnitud que no es igual en los cuatro meses. En los dos primeros, ocurren explosiones frecuentes y violentas, siendo la más importante de septiembre, la del día 18 (Fig. 27).

La primera mitad del mes de octubre el volcán se mantuvo estable, con exhalaciones moderadas de ceniza y vapor, el día 18 se tiene conocimiento de la existencia de una depresión a manera de cráter que se localizaba en la porción cumbre del domo 2. La contracción de la cima, pudo haber sido un indicador de un decremento en el suministro de lava que interrumpió su crecimiento. Estas condiciones de aparente estabilidad se interrumpen el día 28, donde ocurre una explosión que generó una columna eruptiva de 4 km sobre el cráter (IEV:2), y

produjo una lluvia de ceniza que llegó hasta la ciudad de México. Este evento convirtió la depresión anterior en un cráter de explosión.

En noviembre y diciembre la actividad explosiva disminuyó, aunque existe mención de por lo menos una explosión, para cada mes, documentarlas es difícil, ya que la información que existe al respecto es muy subjetiva.

2.5. 1997

La actividad explosiva de este año fue intensa y de gran magnitud, este hecho no se refleja en la gráfica correspondiente (Fig. 32), debido a que en la mayoría de los eventos no se conoce la altura de la columna, dato indispensable para su representación y clasificación.

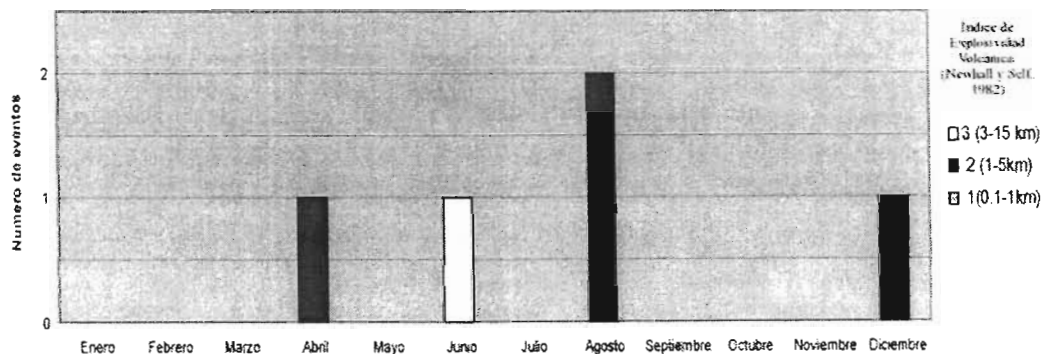


Fig. 32. Actividad explosiva durante 1997.

En enero comenzó a formarse el domo 3 (Fig. 33), que tuvo desarrollo hasta la primera mitad del mes de abril, su crecimiento fue acompañado de explosiones que lanzaron piroclastos y balísticos (Fig. 34).

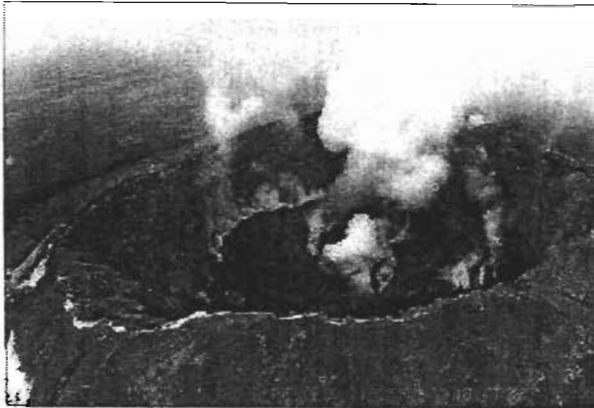


Figura 33. Formación del domo 3 en la base del cráter durante los primeros días de enero de 1997, con pequeñas exhalaciones de vapor de agua en su superficie debido al enfriamiento gradual del mismo (CENAPRED, 1997).



Figura 34. Aspecto del domo 3 el 18 de abril de 1997. Su evolución estuvo acompañada por expulsión de balísticos que originaron cráteres de impacto en los bodes del mismo domo, este aspecto se observa a la derecha de la fotografía (CENAPRED, 1997).

El 24 de abril es la fecha en que aumenta la explosividad en el Popocatépetl, este día ocurren tres explosiones, una de ellas presentó una columna eruptiva de 4 km de altura sobre el cráter (IEV:2), provocando una densa lluvia de ceniza en poblados localizados en las laderas del volcán y en la ciudad de Puebla. De esta manera es reportado este evento por los medios de comunicación ... *en altura y volumen, el estallido mas fuerte que ha registrado el Popocatépetl desde 1994... la fumarola alcanzó aproximadamente los 4 kilómetros de altura... la ceniza tardó en llegar una hora 30 minutos desde el cráter del volcán... hasta el centro de esta capital* (Reforma, 25 de abril de 1997). La explosión anterior generó una depresión semicircular en la cima del domo 3, y sobre su superficie numerosos cráteres de impacto.

La segunda explosión importante de abril ocurre el día 29, al no conocerse la altura de su columna no fue posible considerarla en la figura 32. No obstante, es importante mencionar que fueron expulsados balísticos, que alcanzaron una distancia aproximada de 2 km de distancia respecto al cráter. Este evento mereció la siguiente nota periodística *La madrugada de ayer el volcán Popocatepetl arrojó una lluvia de cenizas y expulsó rocas incandescentes que provocaron incendios forestales... cuatro episodios de actividad, el más importante a las 1:11 y otros tres de menor intensidad, a las 1:22, 1:59 y 4:07...* (La Jornada, 30 de abril de 1997). Los balísticos arrojados con seguridad fueron parte del domo 3, sin embargo, no quedó destruido, solamente sufrió cambios en su morfología. Estas transformaciones continuaron, en mayo y hasta el 10 de junio. Paralelo a su desarrollo, continuó la expulsión de balísticos y piroclásticos, al respecto existen las siguientes notas periodísticas:

A las 20:45 horas de ayer, en el Popocatepetl se produjeron explosiones de gran magnitud, las mayores registradas desde marzo de 1996, generando caída de ceniza y gravilla en Santiago Xalitzintla y en la capital del estado de Puebla, a más de 50 kilómetros del cráter. Por otra parte, en San Pedro de Benito Juárez, los pobladores manifestaron caída de rocas incandescentes y temblores prolongados por casi una hora (La Jornada, 12 de mayo de 1997).

El domingo a las 20:30 horas, el Popocatepetl tuvo una exhalación acompañado por una emisión importante de ceniza transportada por los vientos dominantes hacia el este y noreste. Este fenómeno se relaciona con la apertura parcial de los conductos de desfogue del volcán, rellenos ocasionalmente por lava (Diario de Morelos, 13 de mayo de 1997).

El 11 de junio ocurre la explosión más conocida del Popocatepetl, por desgracia los datos de altura de la columna no se conocen, motivo por el cual no está considerada en la gráfica, pero puede verse en la figura 35. A este evento se asocian fenómenos como: la destrucción del domo 3, un decremento en el volumen y área del glaciar, debido a la caída de piroclastos incandescentes sobre su superficie. La ablación de la masa de hielo, producto de la actividad volcánica generó lahares, como el ocurrido el 13 y 14 de junio. El del día 14, tuvo un recorrido máximo de 13 km, encausando sus detritos por un afluente de la barranca Huiloac, sus escombros no llegaron al poblado de Santiago Xalitzintla.

Este proceso de deshielo fue el principal aporte de agua para remover los escombros dispuestos en las cabeceras de los barrancos (Palacios *et al.*, 2001).



Figura 35. Explosión ocurrida el 11 de junio de 1997 (CENAPRED, 1997).

El 30 de junio se presentó una explosión (IEV:3) que generó una columna eruptiva de 8 km de altura sobre el cráter (13.4 km snm), con expulsión de balísticos (Valdés *et al.*, 2001). Los fragmentos incandescentes a los cuales se hace referencia, seguramente corresponden a los relictos del domo 3.

Por otro lado, también fueron arrojadas pómez (de 10 cm de diámetro) que tuvieron una distribución desde Paso de Cortés hasta la carretera de Amecameca-Ozumba. Los piroclastos más finos fueron esparcidos en los estados de México, Puebla, Morelos y en la Ciudad de México, ocasionó el cierre del aeropuerto por 12 horas (Valdés *et al.*, 2001; Sheridan *et al.*, 2001).

Como consecuencia del evento del 30 de junio, parte del glaciar se derritió y liberó un volumen de agua de $1 \times 10^7 \text{ m}^3$, y removió detritos volcánicos sobre la barranca Huiloac, el 1 y 2 de julio. Estos depósitos llegaron al Poblado de Santiago Xalitzintla (Fig. 36), localizado a 15 km de distancia del cráter del volcán (Capra *et al.*, 2004).

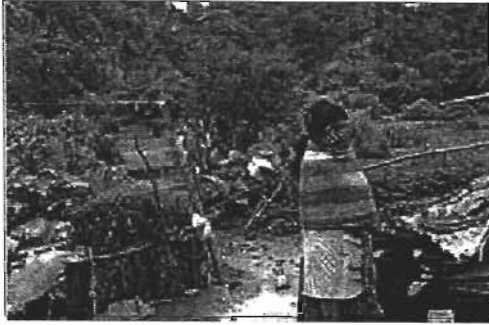


Figura 36. El pueblo de Santiago Xalitzintla localizado a ~15 km al noreste de Popocatepetl, es afectado severamente por flujos de lodo y detritos generados por la fusión parcial del glaciar e intensas precipitaciones pluviales durante la erupción del 30 de junio de 1997 (La Jornada, 02 julio de 1997).

La Secretaria de Comunicaciones y Transportes confirma la existencia del domo cuatro, el día 3 de julio (Fig. 37).

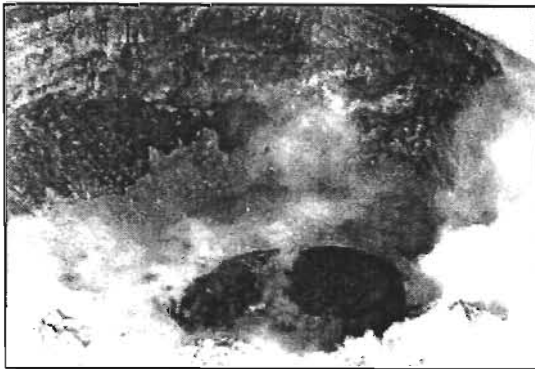


Figura 37. Aspecto del domo cuatro el día de su observación el 3 de julio de 1997 (CENAPRED, 1997).

Esta nueva estructura crece de julio hasta el 12 de agosto, fecha en que ocurren varias explosiones, la más importante de ellas expulsa piroclastos a 2 km de altura sobre el cráter (IEV:2), como consecuencia destruye el domo 4 y se inicia el emplazamiento del domo 5, que presenta una morfología incipiente en forma de elipse con crestas de compresión bien marcadas y distribuidas en todos sus bordes, mismas que definen un pequeño cráter. Esta estructura desaparece en el mes de noviembre, hay que mencionar que la actividad fumarólica y el mal tiempo no permitió la observación completa de su emplazamiento y de su destrucción.

En los primeros días de diciembre comenzó la extrusión del domo 6, acompañada de numerosos sismos tectónico-volcánicos y prolongados episodios de temblor (manifestaciones del movimiento del magma hacia la superficie). La morfología de

esta nueva estructura adoptó la forma de disco (Fig.38), el diámetro fue de 400 metros y cubría casi toda la superficie del fondo del cráter principal.



Figura 38. Vista del domo 6 el día 10 de diciembre de 1997 (CENAPRED, 1997).

El día 24 de diciembre ocurrió una explosión importante que duró ~30 min y originó un intenso resplandor en el cráter, se observó en San Nicolás de los Ranchos y Amecameca. Este evento explosivo arrojó nubes densas de piroclastos y balísticos, estos últimos causaron incendios forestales en las laderas del volcán. Con estas condiciones se inicia un período de destrucción y construcción que se refleja en numerosos cambios en la morfología del domo 6.

2.6. 1998

Se caracteriza por importantes eventos de explosividad. El primero de ellos comprende de marzo a junio, el segundo, un poco más intenso, de agosto a octubre, y el máximo en noviembre y diciembre (Fig. 39).

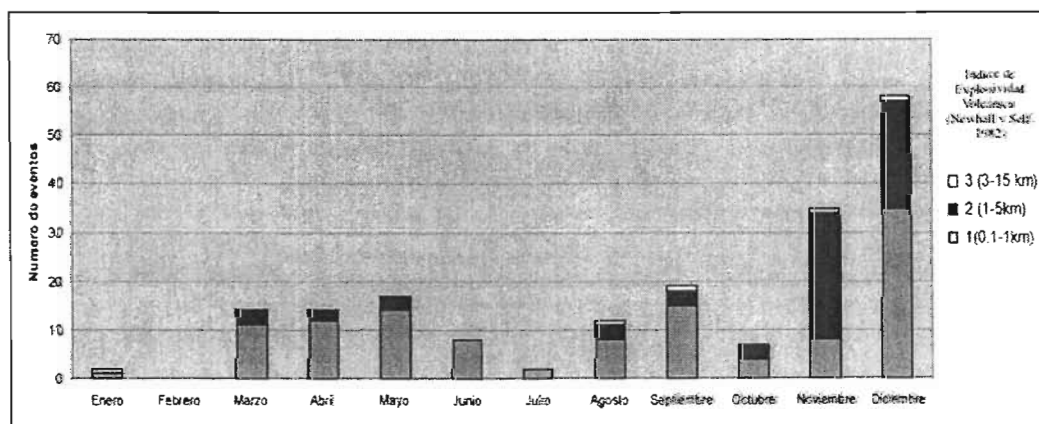


Figura 39. Actividad explosiva durante 1998.

Enero y febrero se caracterizan por presentar los niveles más bajos de explosividad, si se comparan con el resto del año. Hay que mencionar que la mayoría fueron exhalaciones, con expulsión de piroclastos de manera no violenta; de las explosiones que existieron no se cuenta con datos, pero sí con evidencias (notas periodísticas). La explosión más importante de este bimestre fue la del primero de enero; generó una columna eruptiva de 5 km sobre el cráter (IEV:3), acompañada de fragmentos incandescentes que cayeron en su mayoría sobre la ladera noroeste, provocando incendios forestales en la barranca Nexpayantla, lluvia de ceniza en San Baltasar Atlimeyaya, Metepec y Atlixco (Fig. 40). A este evento también se le atribuyen daños a viviendas en el sector sureste del volcán, al respecto se cuenta con la siguiente evidencia *La explosión que registró el volcán Popocatepetl el jueves provocó cuarteadoras en algunas paredes de las casas de San Pedro Benito Juárez y alarma entre la población por falta de comunicación, ya que la telefonía rural con la que cuentan se encuentra bloqueada* (Reforma, 3 de enero de 1998).

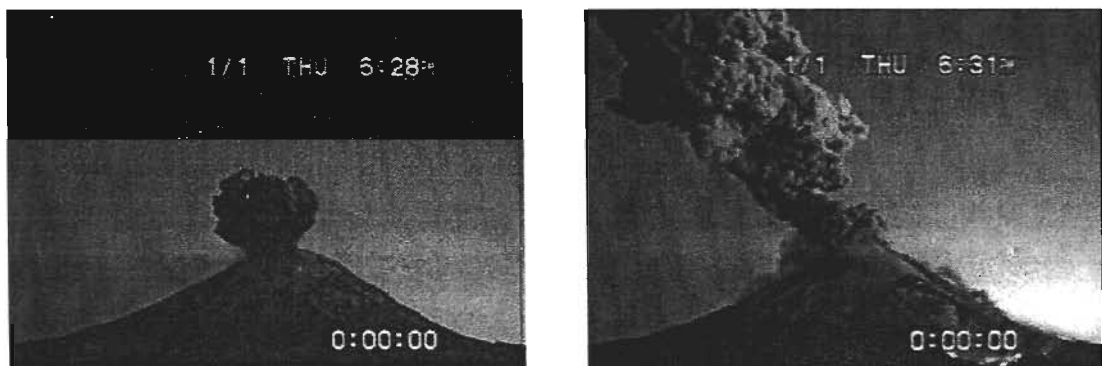


Figura 40. Dos tomas que muestran el desarrollo de la columna eruptiva provocada por la explosión del 1 de enero de 1998 (CENAPRED, 1998).

Con respecto al domo 6, su evolución continúa, se tiene evidencia de su crecimiento el 16 de enero, al respecto existe un anota periodística avalada por CENAPRED *Al detectar el aumento de lava en el cráter del volcán Popocatepetl, autoridades del Centro Nacional para la Prevención de Desastres en México advirtieron que aumentó el riesgo de una erupción... La cantidad de magma en el cráter ha aumentado y cuando eso ocurre, se bloquean los canales a través de los que escapa el gas...* (Reforma, 16 de enero de 1998).

Al parecer, las condiciones que favorecen el desarrollo y evolución del domo 6, se continúan, de manera constante, hasta el día 20 de marzo. Para el día 21 las características eruptivas dieron un giro notable, ocurrieron fuertes explosiones; la primera a las 5:11 hrs, tuvo una duración de 5 minutos y expulsó pequeñas cantidades de ceniza. La segunda (15:59 hrs) fue de mayor intensidad y generó una columna eruptiva de 2 km de altura sobre el cráter (IEV:2), que fue acompañada de la expulsión de fragmentos incandescentes, los cuales cayeron en las laderas noreste y noroeste (CENAPRED, 1998). Estos violentos acontecimientos se explican por el continuo aporte de magma que existe dentro del cráter, proceso que favorece el crecimiento y evolución morfológica del domo 6 (CUPRADER, en *La Jornada*, 22 de marzo de 1998).

Del 22 de marzo al 20 de abril, la actividad del Popocatepetl, presentó bajos niveles de actividad, en general. Las exhalaciones de gas, vapor de agua y cenizas, fueron de manera no violenta, condiciones que fueron interrumpidas el día 21 con dos explosiones (11:07 y 14:53 hrs), que presentaron condiciones similares en cuanto a la altura que alcanzó la columna piroclástica (4 km) y al IEV (2). Estas condiciones se repiten para el día 27 (Fig. 41). Para esta fecha el domo 6 todavía existía, presentaba un ligero borde en forma de media luna de fronteras sinuosas, en cuyo centro se formó una depresión escalonada y profunda, esta información es el último reporte referente al domo 6.



Figura 41. Explosión ocurrida el 27 de abril, la columna alcanzó los 4 km de altura sobre el cráter y un IEV de 2 (CENAPRED, 1998).

El segundo período explosivo de este año comprende de agosto a octubre, la mayoría de las columnas piroclásticas fueron muy efímeras y no alcanzaron el

kilómetro de altura. La presencia de exhalaciones y expulsión de piroclastos, de forma no violenta. Fue el fenómeno de más constancia. Al mismo tiempo, en el fondo del cráter ocurrían pequeñas emanaciones de magma, parte de este material quedaba en la base y otra porción era incorporada a los piroclastos, que expulsaban estas explosiones de bajo nivel. Este proceso representa la etapa más temprana del emplazamiento del domo 7.

Las explosiones de noviembre comenzaron el día 21 y se continuaron hasta el 22 de diciembre, (un total de 16 eventos) en todos los casos se generaron columnas piroclásticas que alcanzaron entre 3 y 7 km de altura sobre el nivel del cráter. La presencia de balísticos en algunas de las explosiones determinó que el IEV fuera de 3, no obstante que en la mayoría de los casos era de 2 (Fig. 39).

Los eventos explosivos que tienen relación con el emplazamiento definitivo del domo 7, son los que ocurrieron del 22 al 24 de noviembre. Se puede afirmar lo anterior en la ocurrencia de numerosos sismos, de los denominados Tipo A, que aparecen como respuesta de la migración del magma a superficie. En relación con el fenómeno anterior, también fue posible observar incandescencias, resultado de la presencia de magma fresco en el interior del cráter.

La etapa de destrucción-construcción del domo 7 comienza a partir del 25 de noviembre (Fig. 42), este hecho se constató a partir de un incremento en la frecuencia e intensidad de la actividad explosiva. Hay que hacer notar que en cada uno de los eventos ocurridos, una constante fue la expulsión de fragmentos incandescentes (balísticos), su presencia sugiere cambios sustanciales en la morfología el domo 7. Estas condiciones eruptivas se continuaron hasta el 17 de diciembre, fecha de su destrucción (Fig. 43).



Figura 42. Explosión del 25 de noviembre de 1998, la columna eruptiva alcanzó los 2 km de altura sobre el cráter (IEV: 2) (CENAPRED, 1998).

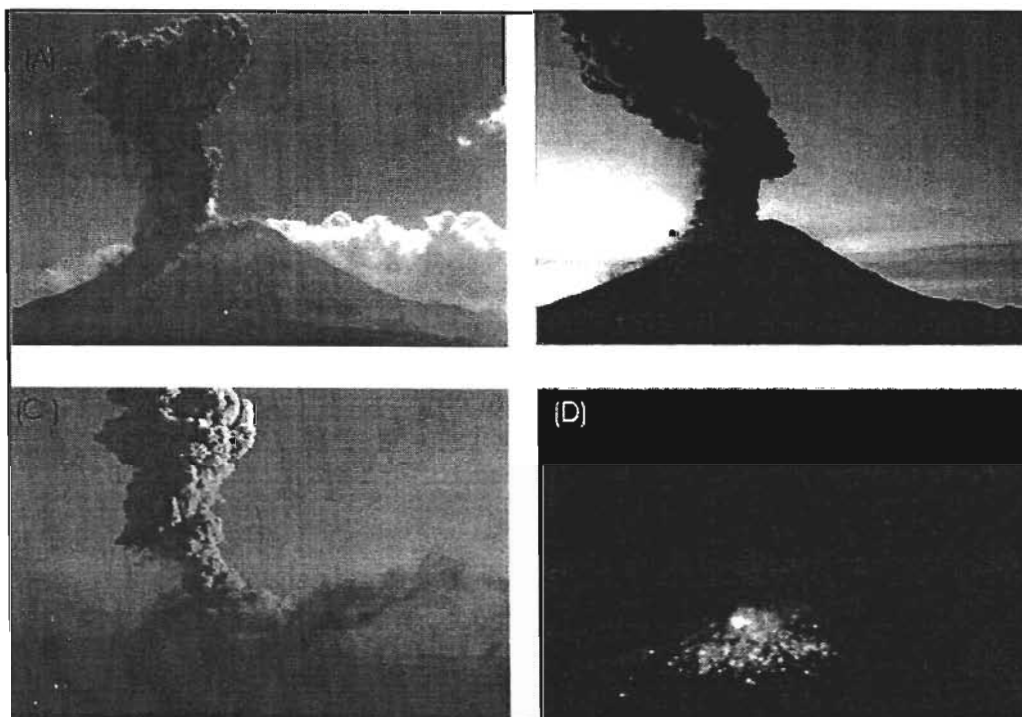


Figura 43. Explosiones ocurridas los días: A) 4, B) 5, C) 15 y D) 17 de diciembre; este periodo de violenta actividad fue la causante de la destrucción del domo 7 (CENAPRED, 1998).

Los eventos de diciembre arrojaron bloques incandescentes y piroclastos sobre, gran parte de la superficie del glaciar. Las huellas de los balísticos fueron visibles incluso a mediados del mes marzo de 1999, de la misma forma que pequeños flujos de agua, remanentes de un importante deshielo ocurrido en este mes y del cual no se conocen más detalles.

2.7. 1999

En este año se reconocen dos principales períodos de actividad explosiva, el primero y más intenso comprende de marzo a mayo, con un total de 43 eventos, de los cuales predominan los de IEV:2 (25 eventos); el segundo de menor explosividad, se observa de julio a diciembre. Los meses de febrero y junio fueron caracterizados por incipientes exhalaciones de vapor, gas y ceniza, sin embargo, la falta de datos de altura de las columnas piroclásticas, no favoreció su caracterización de acuerdo con el IEV (Fig. 44).

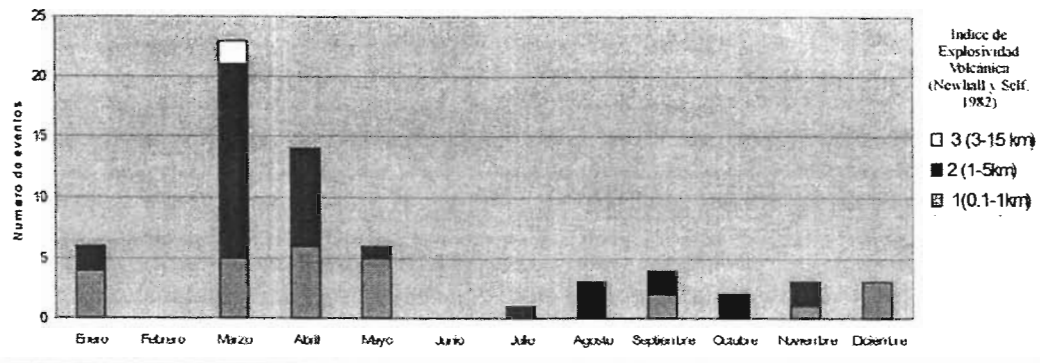


Figura 44. Actividad explosiva durante 1999.

Durante enero y febrero de este año, la actividad volcánica del Popocatepetl se mantuvo en niveles bajos, los fenómenos más recurrentes fueron los tremores armónicos, eventos volcano-sísmicos tipo "A" y exhalaciones de vapor de agua, gas y ceniza; es decir, expulsión de piroclastos de manera no violenta. Estas condiciones se relacionan con el ascenso de magma a la superficie.

A partir del 1 de marzo la actividad interna se incrementó con tremores armónicos, exhalaciones de baja intensidad y expulsión de balísticos que no rebasan el cráter. Del 2 al 10 del mismo mes se observan condiciones similares en el comportamiento del volcán, que se relacionan con el emplazamiento y evolución del domo 8. De esta fecha hasta el final de mes, los niveles de explosividad tendieron a incrementarse de manera significativa, registrando explosiones con IEV entre 2 y 3, que se acompañaron de balísticos incandescentes. Seguramente estos fragmentos eran parte del domo 8, el día 30 desapareció esta estructura.

Una de las explosiones más representativas de este período ocurrió el 19 de marzo y no pasó desapercibida por los medios informativos ...*la primera explosión se suscito a las 05:31 horas, lanzando el volcán fragmentos incandescentes sobre sus flancos en un radio de tres kilómetros... la segunda ocurrida a las 18:39 horas provocó alarma entre los habitantes de las comunidades cercanas por el ruido que provocó y que arrojó material incandescente hacia los flancos del coloso...* (La Jornada, 20 de marzo de 1999). Estos fenómenos pueden corresponder a la continua destrucción del domo 8, experimentando cambios sustanciales en su morfología.

En abril continuó la actividad explosiva y expulsión de balísticos, a diferencia del mes anterior estas presentaron incandescencia. Debido a esta característica, es probable que en esta fecha diera comienzo la formación de una nueva estructura en el interior del cráter. Esta idea se fundamenta en que los resplandores se asocian con la salida de nuevo magma.

Los piroclastos incandescentes emitidos por las explosiones anteriores, cubrieron parte del glaciar, acelerando la fusión del hielo que se reflejaba por pequeños flujos de agua que escurrían sobre la ladera norte el volcán, este fenómeno fue confirmado por el CENAPRED (1999) los días 16 y 17 de mayo. Procesos similares se registraron el 7 de julio, donde los flujos de agua recorrieron los barrancos localizados en el mismo sector. Dichos eventos pueden corresponder a la formación de pequeños *lahares*, que rellenaron parcialmente el fondo de los barrancos.

En el segundo período de explosividad (julio a diciembre), la actividad tiende a disminuir, con un predominio de exhalaciones de vapor de agua, gas y ceniza, tremores armónicos y sismos volcano-tectónicos. Los valores de IEV más representativos en este período fueron de 1 y 2 (Fig. 44).

2.8. 2000

En este año la actividad explosiva se puede dividir en tres períodos que presentan, en forma gradual, un incremento en la actividad eruptiva. El primero de enero a abril, es el de menor intensidad. El segundo de mayo a agosto, de transición hacia

el incremento y por último, de septiembre a diciembre, el más intenso de todos (Fig. 45).

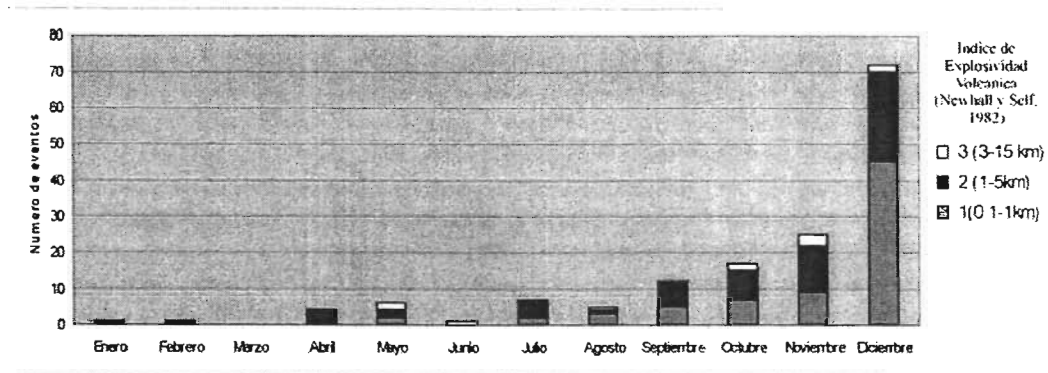


Figura 45. Actividad explosiva durante el 2000.

A partir del 12 de febrero, fueron notorios los eventos volcano-tectónicos (sismicidad y tremores armónicos). Lo anterior tuvo relación con las primeras etapas de extrusión de lava, el día 25 del mismo mes en un vuelo realizado por la SCT se confirmó la existencia del domo 9. Para esta fecha el diámetro era de 50 m y el espesor de 11 m. En este período evolutivo los fenómenos recurrentes fueron los tremores armónicos, sismos tipo A (se relacionan con el emplazamiento de magma) y pequeñas exhalaciones de vapor de agua, gas y ceniza (Fig. 46).



Figura 46. Explosión ocurrida el 17 de abril, asociada al crecimiento-destrucción del domo 9 (CENAPRED, 2000).

En el segundo período de explosividad (mayo - agosto), la mayoría de los eventos presentaron incipientes columnas piroclásticas que no rebasaron el kilómetro de altura. Sin embargo, una de las explosiones mas importantes de este cuatrimestre se suscitó el 23 de mayo, lanzando material piroclástico a 5 km de altura sobre la

cima (IEV:3). Estos materiales se desplazaron hacia el noroeste y suroeste del volcán, se reportó caída de ceniza en Ozumba, Tepetlixpa y San Pedro Nexapa. Es probable que este hecho se relacione con la evolución (creación-destrucción) del domo 9.

La acumulación de piroclastos incandescentes en la superficie del glaciar, asociados a las explosiones anteriores, generaron procesos de ablación, y como resultado de ello, *lahares*; mismos que fueron confirmados por el CENAPRED (2000), el 24 de mayo. Este *lahar* removió escombros en la barranca Huiloac, con un tirante de 70 cm por 4 metros de ancho, a una velocidad de 25 km/h. Otras explosiones similares a las anteriores, fueron las que ocurrieron el 6 de junio y el 4 de agosto que generaron columnas eruptivas mayores a 5 km de altura sobre la cumbre, con IEV de 3. Hay que mencionar que el domo 9 se destruye entre mayo y agosto, no se tiene una fecha precisa, pero el análisis de la información con la que se cuenta eso sugiere.

El tercer período comprende de septiembre a diciembre, es el más intenso y el de mayor frecuencia en explosiones, un total de 126 eventos que tienen las siguientes características: 66 con IEV:1; 53 con IEV:2 y 7 con IEV:3 (Fig. 45).

A principios de septiembre los niveles de sismicidad tendieron a incrementarse en número y duración de tremores armónicos, expulsión de piroclastos y balísticos (IEV:2), exhalaciones de gas y vapor de agua de baja intensidad, así incandescencias en el interior del cráter (inyección de magma). Condiciones que tuvieron relación con la emanación de magma a superficie, que originó el comienzo del domo 10, su existencia fue confirmada el 6 de octubre por la SCT (Fig. 47). Su evolución a partir de construcción-destrucción del mismo, terminó el 11 de diciembre.

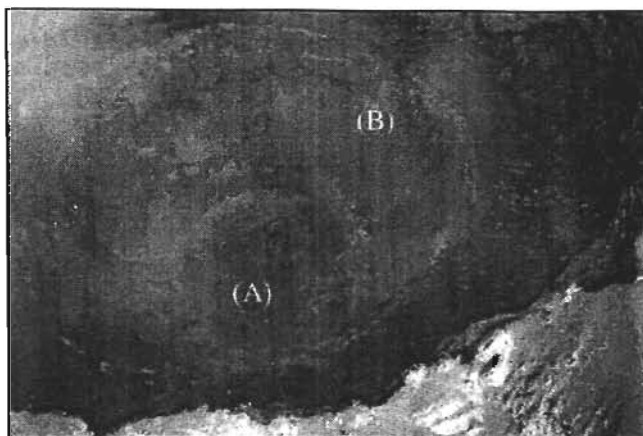


Figura 47. Vista del interior del cráter el 6 de octubre de 2000: A) domo 10; B) remanentes del domo 9 (CENAPRED, 2000).

La evolución del domo 10, fue interpretada por medios de comunicación de la siguiente manera *Hemos detectado un domo en el volcán, es decir, una costra que tapa la liberación de energía y sismos de baja intensidad; los expertos suponen que, por los síntomas, hay actividad que no ha podido liberar (el Popocatepetl) y es probable que tengamos una exhalación importante en los próximos días (Reforma, 4 de noviembre de 2000).*

Del 12 al 15 de diciembre, los niveles de explosividad aumentaron a 200 explosiones por día (Fig. 48), presentaron columnas piroclásticas que rebasaron los 5 km de altura sobre la cumbre del volcán (IEV:2 y 3). Estos eventos fueron acompañados por la expulsión de fragmentos incandescentes, que cayeron en los sectores próximos del cráter, con un radio menor a un kilómetro del foco emisor. Lo anterior sugiere la destrucción del domo 10.

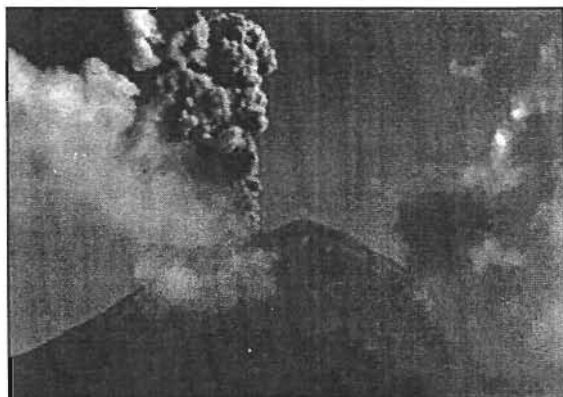


Figura 48. Columna piroclástica generada por la explosión del 12 de diciembre de 2000. Este evento marca el inicio de la destrucción del domo 10 (CENAPRED, 2000).

El día 16 de diciembre se confirmó la existencia del domo 11, su crecimiento fue calculado entre 180 a 200 m³/s. Con este ritmo llegó a tener un volumen entre 15 y 19 millones de metros cúbicos para el día 18. Esta cantidad de material estuvo cerca de desbordar por el labio inferior del volcán (Valdés et al., 2001).

La existencia del domo 11 se da a conocer de la siguiente manera por los medios de comunicación *El Cenapred informó que si bien el volcán ha reportado estabilidad en días recientes, mientras continúe el domo de lava sobre el cráter, se mantendrá el riesgo de expulsión de material ígneo (Reforma, 23 de diciembre del 2000).*

Existen noticias sobre la presencia y crecimiento del domo 11 para el 23 de diciembre (Fig. 49) *Si bien el Popo ha registrado una calma relativa, con pocas exhalaciones, menores niveles de actividad sísmica, deformación de las laderas y emisión de bióxido de azufre, el domo sigue ahí y continua la acumulación de energía... (Reforma, 24 de diciembre de 2000).*



Figura 49. Vista del domo 11 el día 23 de diciembre de 2000. Esta toma fue realizada días antes de su destrucción (CENAPRED, 2000).

El día 24 de diciembre se presenta una explosión importante (IEV:3), lanzó balísticos incandescentes a una distancia de 3.5 km; este evento marca el inicio de un incremento significativo en la explosividad del volcán, condiciones que sin duda tienen relación con la dinámica evolutiva del domo 11.

2.9. 2001

En este año se distinguen tres períodos de actividad explosiva: de enero a marzo con 109 explosiones (IEV:1); un segundo, de transición a una disminución, de abril

a agosto y el último caracterizado por bajos niveles de explosividad, de septiembre a diciembre (Fig. 50).

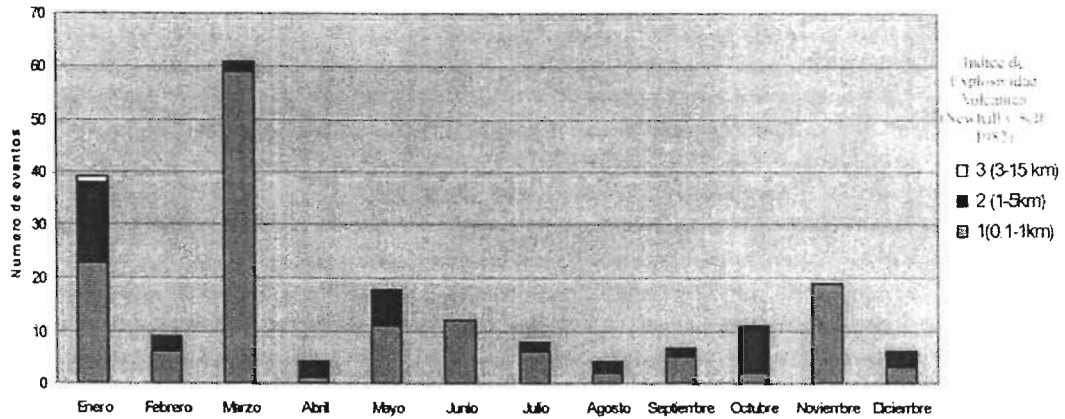


Figura 50. Actividad explosiva durante el 2001.

Las dos primeras semanas de enero el Popocatepetl aumentó su actividad interna, numerosos sismos fueron los responsables de expulsar fragmentos incandescentes que no rebasaron los 1000 m sobre la cima. Estas condiciones de explosividad se acompañaron de incandescencias que pusieron de manifiesto la salida de nuevo material magmático hacia la superficie. Si bien CENAPRED y la SCT no confirman la existencia de un nuevo domo, la información mencionada hace pensar en el emplazamiento, crecimiento y evolución del domo 12 y que se mantuvo hasta el día 22 de enero.

A las 16:23 hrs del 22 de enero ocurre una explosión de gran magnitud que genera una columna eruptiva de 8 km de altura sobre el cráter (IEV:3). En un instante, parte de ella se colapsa, generando flujos piroclásticos que descendieron sobre el flanco NNW alcanzaron distancias entre 4 y 6 km desde su origen. A partir de las 18:00 hrs, los episodios de tremor armónico se intercalaron con explosiones y expulsión de piroclastos (Fig. 51). Estos fenómenos pueden relacionarse con la destrucción del domo 12 y el nacimiento de uno nuevo.

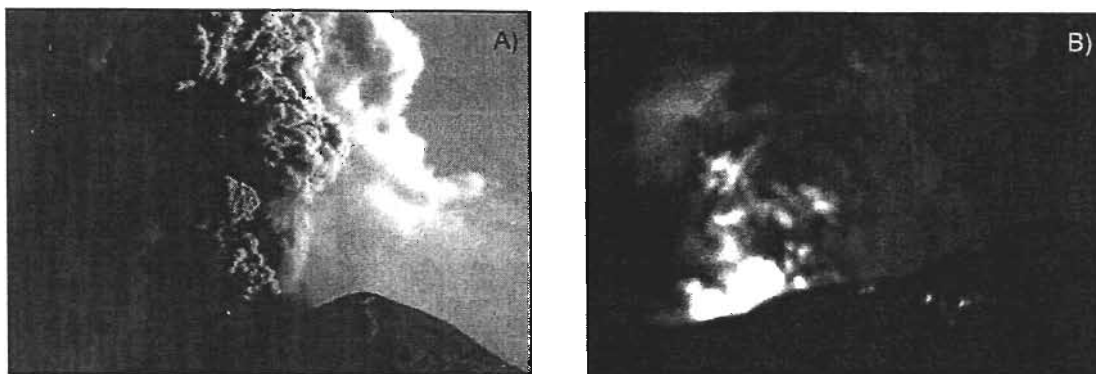


Figura 51. Actividad explosiva ocurrida el 22 de enero de 2001: A) evento generado a las 18:17 h, columna eruptiva de 5 km; B) explosión y expulsión de fragmentos incandescentes registrados a las 19:10 h. Ambos eventos se relacionan con la destrucción del domo 12 (CENA PRED, 2001).

Los flujos piroclásticos generados por dicha explosión, rellenaron parcialmente la cuenca alta de tres de los barrancos que drenan la ladera noreste del Popocatepetl: Tenenepanco, Espinera y Tepeteloncocone (Fig. 52). Hay que mencionar que el área del glaciar, localizado en este mismo sector, fue cubierta en su totalidad por piroclastos incandescentes.

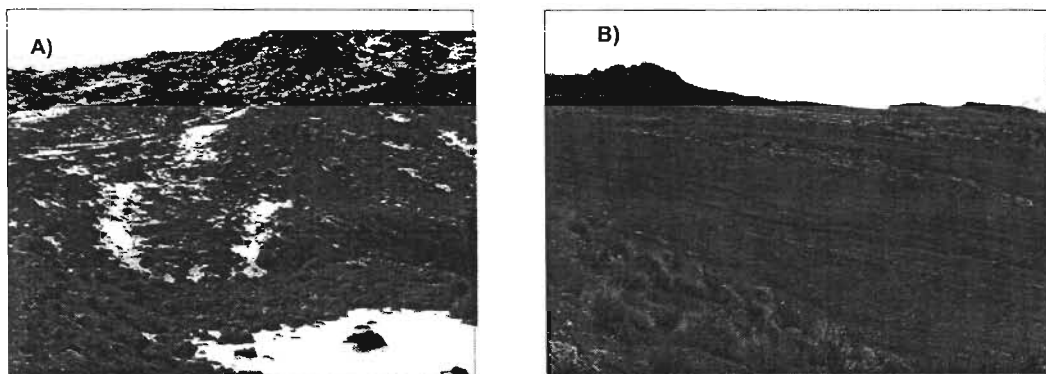


Figura 52. Depósitos de flujo piroclástico con alto contenido de pómez, originado el 22 de enero del 2001, que tuvieron una dirección preferencial en la ladera noreste del Popocatepetl: A) cuenca alta de la barranca Tenenepanco y B) curso medio de la barranca Tepeteloncocone.

Cuatro horas después de haberse depositado los flujos piroclásticos, se dieron las condiciones necesarias para que se desarrollaran *lahares*, movilizándose estos por las barrancas ya mencionadas. El *lahar* más importante, por longitud y depósitos acumulados, se desarrolló sobre la barranca Huiloac. Sus detritos son ricos en pómez, su espesor varió entre 70 y 150 cm y su volumen fue calculado entre $\sim 2.3 \times 10^5 \text{ m}^3$ (Capra *et al.*, 2004), sobreyace a los depósitos de 1997 (Fig. 53).

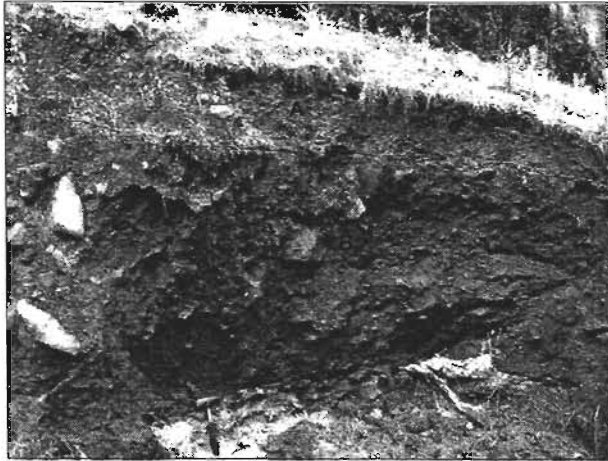


Figura 53. Depósitos de flujos de escombros en la barranca Huiloac: A) desarrollado a partir de la actividad volcánica ocurrida el 22 de enero del 2001 y B) emplazado en 1997.

Desde la explosión del 22 de enero, la actividad del volcán se mantuvo en niveles relativamente bajos, se presentó expulsión de balísticos, exhalaciones de piroclastos de manera no violenta. La actividad interna tuvo un incremento que fue manifiesta en la sismicidad (tremores armónicos), este fenómeno tiene relación con la salida de magma a la superficie y seguramente evidencia el emplazamiento de una nueva estructura en el interior del cráter, estas condiciones se mantuvieron hasta la primera mitad del mes de marzo.

La observación del domo trece se hace el día 13 de marzo (Fig. 54), para esta fecha sus medidas se calcularon entre 100 y 150 metros de diámetro, se observó que su crecimiento era muy rápido, para el día 14 había aumentado entre 50 y 100 metros más, es decir 200 m de diámetro y 40 m de altura.

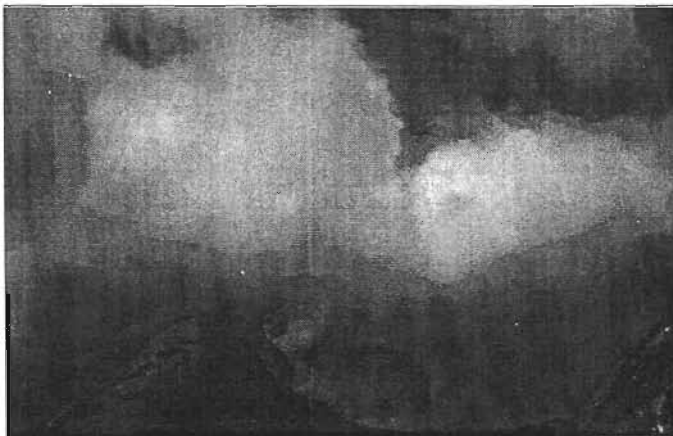


Figura 54. El día trece de marzo, en un vuelo realizado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), se observa el domo 13 (CENAPRED, 2001).

La evolución de este domo se confirma en la siguiente nota periodística *El tamaño del domo de lava del volcán se incrementó 40 %, por lo que se espera en los próximos días una etapa explosiva del coloso* (La Jornada, 17 de marzo de 2001). El resto del mes de marzo y la primera quincena de abril, la actividad del volcán fue caracterizada por tremores armónicos, sismos y exhalaciones de vapor de agua, gas y ceniza. Estas condiciones volcánicas sugieren el crecimiento paulatino del domo 13.

Uno de los eventos más significativos del segundo período de explosividad, se observa el 16 de abril (19:48 hrs), con una fuerte explosión que duró cerca de 40 segundos, la cual lanzó piroclastos a una altura de 4 km sobre la cima (IEV:2) y fragmentos incandescentes (balísticos) arrojados en un radio de 2 km desde el cráter. Las laderas con mayores impactos fueron la noreste y noroeste, área donde se localiza el glaciar (Fig.55). Estos eventos se relacionan con la evolución del domo 13, para este período presenta un proceso de destrucción-creación muy dinámico.

El 13 de mayo a las 23:01 se presenta una explosión importante, expulsó fragmentos incandescentes a una distancia de hasta 0.5 km del cráter. Asociados a la explosión se registró un sismo de 2.0 de magnitud y episodios de tremor armónico con un total de 5 horas. Lo anterior pone de manifiesto la destrucción del domo 13 y el emplazamiento del 14, la presencia de este domo la confirma CENAPRED el día 18 de mayo.

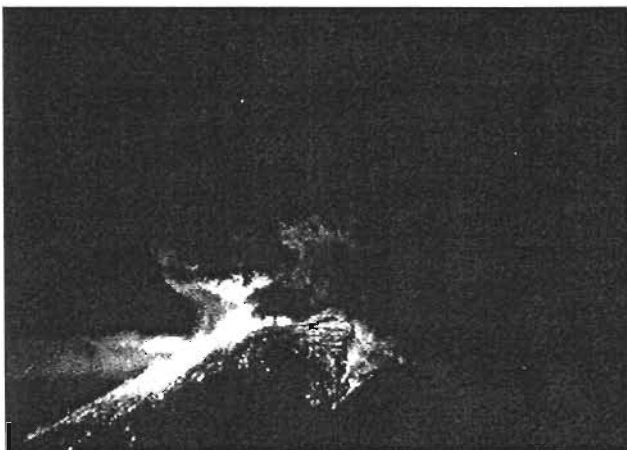


Figura 55. Explosión piroclástica y balísticos registrada el 16 de abril del 2001, relacionada con la destrucción del domo 13 (CENAPRED, 2001).

El 31 de mayo (21:36 h) se presentó una violenta explosión que duró cerca de un minuto, acompañada de expulsión de fragmentos incandescentes arrojados sobre las laderas norte y noreste, alcanzaron hasta los 3 km de distancia. Un evento similar al anterior, ocurrió el 1° de junio aunque de menor magnitud explosiva (IEV:2). Es muy probable que estos eventos se relacionen con la destrucción del domo 14.

Durante junio y julio el volcán mostró bajos niveles de actividad, sin embargo en este período y en los primeros días de agosto, tuvieron lugar las fases constructivas del domo 15. En este sentido, en un vuelo que realizó la SCT, el 13 de agosto, se confirma la presencia de esta estructura, que para esta fecha presentaba 190 metros de diámetro y 30 de altura (Fig. 56). La evolución de este domo continuó hasta la primera mitad del mes de octubre con fases de destrucción-construcción, caracterizados por episodios de tremor armónico, sismos, expulsión de balísticos e incandescencia en el interior del cráter (realimentación de lava).



Figura 56. Vista del domo 15 en el segundo vuelo realizado por la SCT, el día 20 de agosto del 2001: A) la nueva estructura (domo 15) y B) probables relictos del domo 14 (CENAPRED, 2001).

Del 16 de agosto y hasta el 24 de octubre la actividad del Popocatepetl se caracterizó por una actividad interna muy dinámica que tuvo reflejo en superficie a partir de expulsión de fragmentos incandescentes e incandescencias; fenómenos en estrecha relación con la dinámica de destrucción parcial del domo 15. En octubre el domo presentó una subsidencia, su cima se hundió y adoptó una geometría cóncava, donde comenzó a emplazarse el domo 16, observado el 25 de octubre en un vuelo de reconocimiento de la SCT, para esta fecha el mismo alcanzaba los 50 m de diámetro. Su crecimiento continuó y para el 21 de noviembre había alcanzado 130 m de diámetro.

Se vuelven a tener noticias del domo 16 a partir del vuelo realizado por la SCT, el día 11 diciembre, se confirma el aumento de su volumen; 190 m de diámetro (Fig. 57). Al igual que en los caos anteriores, su evolución se caracterizó por la presencia de tremores armónicos, expulsión de fragmentos incandescentes, e incipientes exhalaciones de vapor de agua, gas y ceniza. Este proceso evolutivo se interrumpe el día 16 de diciembre.



Figura 57. Vista del interior del cráter el 11 de diciembre de 2001; A) domo 16 y B) relictos del domo 15 (CENAPRED, 2001).

La actividad explosiva ocurrida del 17 al 22 de diciembre, sugiere la destrucción del domo 16, lo anterior se sustenta por la presencia de columnas piroclásticas de gran tamaño (IEV:2), todas ellas acompañadas con expulsión de fragmentos incandescentes (balísticos) provenientes de la fragmentación del domo (Fig. 58).

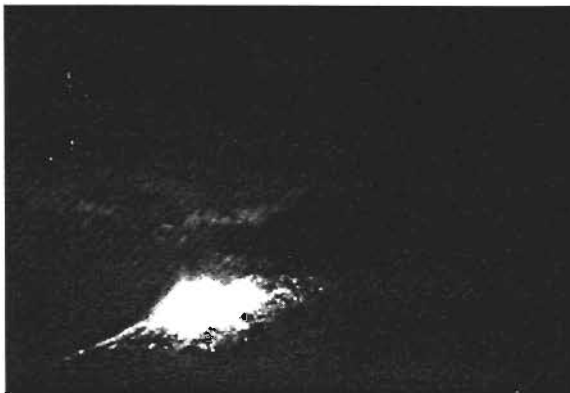


Figura 58. Explosión ocurrida el 19 de diciembre de 2001, los balísticos incandescentes provienen de la fragmentación del domo 16 (CENAPRED, 2001).

En los días restantes del mes de diciembre la actividad explosiva tendió a disminuir; no obstante, la actividad interna se mantuvo muy dinámica, el tremor armónico fue uno de los fenómenos más persistentes, hubo exhalaciones

incipientes de vapor, gas y ceniza. La intensa actividad sismo-volcánica sugiere las primeras etapas de formación de un nuevo domo.

2.10. 2002

En este año, las explosiones se presentan en tres periodos; el primero fue de enero a marzo, un total de 21 eventos, de los cuales 19 tuvieron un IEV de 1. El segundo comprende de abril a agosto, con 19 explosiones con IEV de 1 y 2, y el último de noviembre a diciembre, fue de los más explosivos y violentos, se reconocen eventos que alcanzaron el nivel 3 de IEV (Fig. 59).

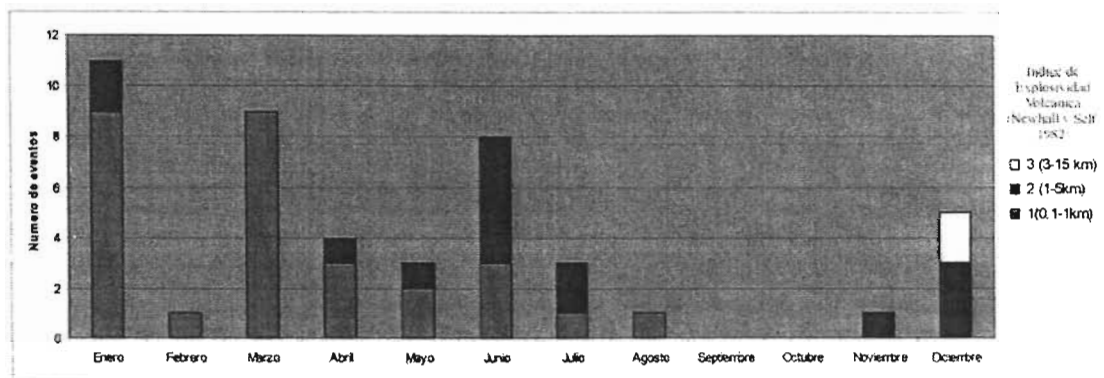


Figura 59. Actividad explosiva durante el 2002.

Las primeras tres semanas de enero el volcán presentó numerosas explosiones con bajos niveles de intensidad, los fenómenos más frecuentes fueron los sismo-tectónicos y exhalaciones de piroclastos de forma no violenta. De manera ocasional hubo expulsión de fragmentos incandescentes, esto no fue característico de este período. Dichas condiciones, sobre todo la presencia de tremores armónicos, sugieren la inyección de magma hacia la superficie y la consecuente formación del domo 17, mismo que fue observado el día 24 a partir del vuelo de reconocimiento realizado por la SCT. Para esta fecha el domo en cuestión presentaba 180 metros de diámetro y 50 de altura (Fig. 60). Su crecimiento continúa hasta el 18 de febrero y a partir de esta fecha aumenta la actividad explosiva.



Figura 60. Aspecto del domo 17 el 24 de enero del 2002: A) la nueva estructura (domo 17); B) vestigios del domo 16 y C) posibles relictos del domo 15 (CENAPRED, 2002).

Del 19 al 23 de febrero ocurre un intenso período explosivo, en éste se reconocen tres eventos importantes, por la cantidad de fragmentos incandescentes que expulsaron y la altura de las columnas piroclásticas que generaron (IEV:2). A estos fenómenos se atribuye la desaparición del domo 17 (Fig. 61).



Figura 61. Actividad explosiva ocurrida el 23 de febrero del 2002, (CENAPRED, 2002).

A partir del 24 de febrero y hasta el 11 de mayo, inició una actividad volcánico-tectónica importante, que generó inyección de magma hacia la superficie. Al no presentarse en este período explosiones violentas, el domo 18 pudo emplazarse y ganar volumen. El 29 de abril la nueva estructura tenía 170 m de diámetro y su aspecto para el día 7 de marzo se puede observar en la figura 62.



Figura 62. Vista del domo 18 el día 7 de marzo del 2002 (CENAPRED, 2002).

Los eventos más representativos del segundo período eruptivo de este año (Fig. 59) fueron los ocurridos el 12 y 17 de mayo; en ambos casos se lanzaron fragmentos incandescentes y se generaron columnas piroclásticas importantes, de ellas se desconoce su altura por haber ocurrido en la noche. La importancia de estos dos eventos se refleja en cambios morfológicos sustanciales ocurridos en la cima del domo 18; en particular el desarrollo de un cráter que fue un rasgo característico que se observó hasta el 17 de septiembre.

De septiembre a noviembre es un período donde la actividad interna predomina, los tremores armónicos es el fenómeno característico y recurrente. Se asocia a una continua inyección de magma hacia la superficie, que se lleva acabo desde el fondo del cráter del domo 18. Este fenómeno continúa con seguridad hasta el 11 de diciembre, y tiene como consecuencia la desaparición del domo 18 y el emplazamiento del 19. Con respecto a su crecimiento se cuenta con los siguientes datos: para el día 2 de diciembre su diámetro era de 90 m y su altura de 40 m (Fig. 63); para el día 11 había alcanzado el doble en su diámetro (180 m) y 46 m de altura.



Figura 63. Fotografía aérea (S/escala) tomada el 2 de diciembre del 2002, en la cual se reconoce el domo 19 (CENAPRED, 2002).

El 18 de diciembre los índices de explosividad se incrementaron considerablemente, las columnas eruptivas que se generaron sobrepasaron los de 6 km de altura sobre la cima (IEV:3), fueron acompañadas de expulsión de

fragmentos incandescentes que llegaron a una distancia de 1.5 km (Fig. 64). La presencia de balísticos y su violenta explosión, ponen de manifiesto la destrucción del domo 19. La segunda mitad de diciembre son tiempos donde la actividad volcano-tectónica (tremor armónico) es la que predomina, al igual que la expulsión de piroclastos de manera no violenta (exhalaciones). Estas condiciones son el marco del crecimiento del domo 20.

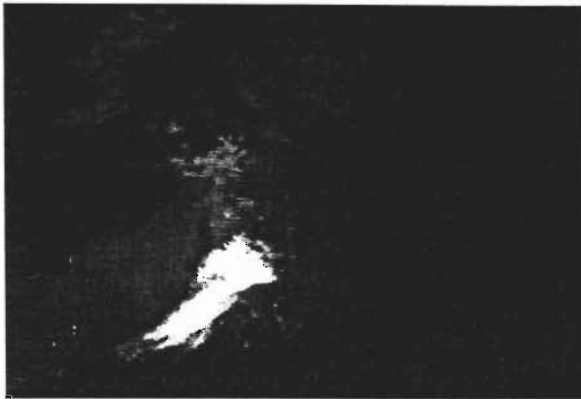


Figura 64. Actividad explosiva ocurrida el 18 de diciembre del 2002 (CENA PRED, 2002).

2.11. 2003

Tres períodos eruptivos se reconocen en este año, el más intenso se presentó de enero a abril, predominando las explosiones con IEV de 2; el segundo, de junio a agosto se caracterizó por la expulsión de piroclastos de manera menos violenta y recurrente que el anterior. El tercero de septiembre a diciembre, presentó los niveles de explosividad más bajos desde su reactivación en 1994 (Fig. 65).

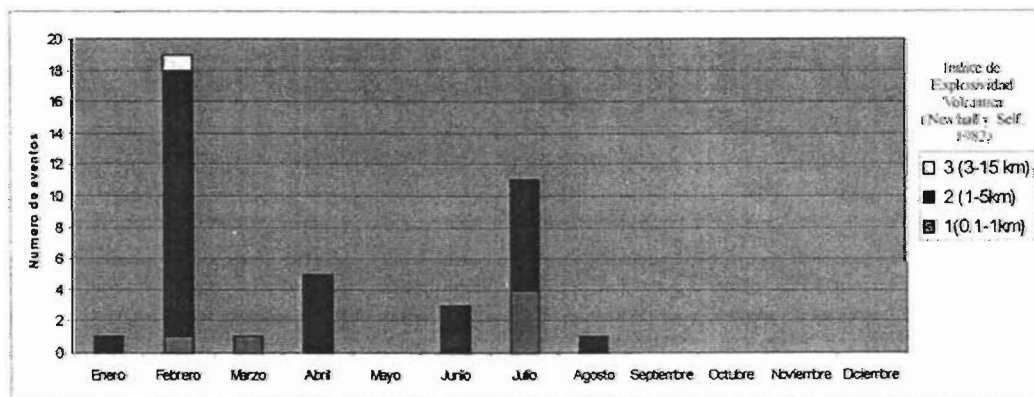


Figura 65. Actividad explosiva durante el año 2003.

Las primeras dos semanas de enero, la actividad del volcán presentó bajos niveles de explosividad, no obstante, su actividad interna fue persistente (sobre todo los tremores armónicos). Estas condiciones tienen relación con la continuación de los procesos efusivos responsables del emplazamiento del domo 20, su observación fue reportada por la SCT el 17 de enero (Fig. 66).



Figura 66. Fotografía aérea (S/escala) realizada el 17 de enero del 2003, en la cual se reconoce el domo 20 y los relictos del 19 (CENAPRED, 2003).

El mes de febrero se caracteriza por la etapa más importante en cuanto actividad explosiva de este año, los eventos generaron columnas piroclásticas entre 2 y 5 km de altura sobre la cima (IEV: 2 y 3). Una constante, en la mayoría de los casos, fue la expulsión violenta fragmentos incandescentes (balísticos), este comportamiento se relaciona con la destrucción del domo 20 (Fig. 67). El mes de marzo es de calma aparente y contrastan con el mes anterior.

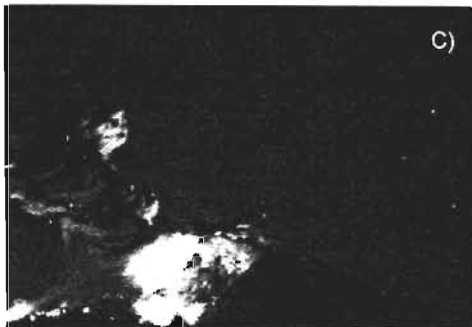
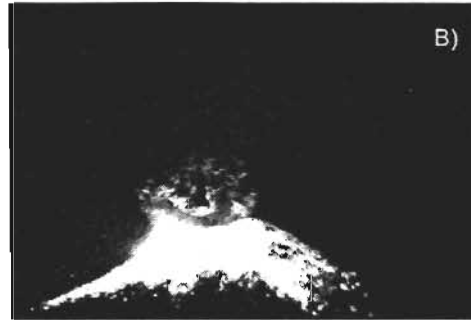


Figura 67. Explosiones ocurridas en el mes de febrero los días: A) 4, B) 14 y C) 22; esta actividad se relaciona con la destrucción del domo 20 (CENAPRED, 2003).

El domo 21 comenzó su formación en las dos primeras semanas de abril, su crecimiento fue acompañado por una intensa actividad interna que estuvo asociada con la emanación de magma en la superficie. El 21 de abril fue posible observar el domo 21, a partir de una fotografía aérea realizada por la SCT (Fig. 68).

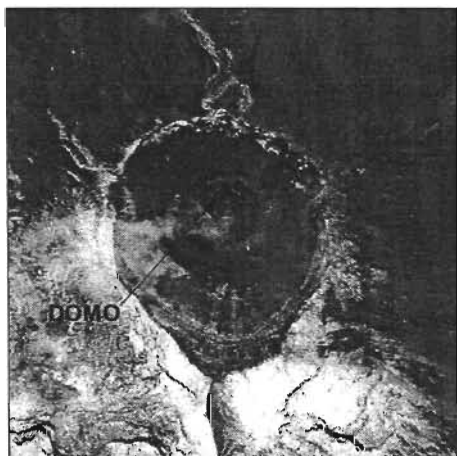


Figura 68. Fotografía aérea (S/escala) tomada el 21 de abril del 2003, en la cual se reconoce el domo 21 (CENAPRED, 2003).

La actividad explosiva inicia en abril con dos eventos importantes, el primero ocurrió el día 24 (Fig. 69) y generó una columna piroclástica de 2.5 km de altura

sobre la cumbre (IEV:2), se acompañó por violentas expulsiones de fragmentos incandescentes que llegaron a distancias de 2 km. Este acontecimiento destruye parcialmente el domo 21.

El segundo evento importante de abril, responsable de la destrucción del domo 21, se presentó el día 28, con características similares a las descritas en el párrafo anterior. El único rasgo distintivo fue la distancia que alcanzaron los fragmentos incandescentes, en este caso de 800 m. Estos impactaron sobre el suelo congelado localizado en la ladera noroeste del volcán, favoreciendo su deshielo.

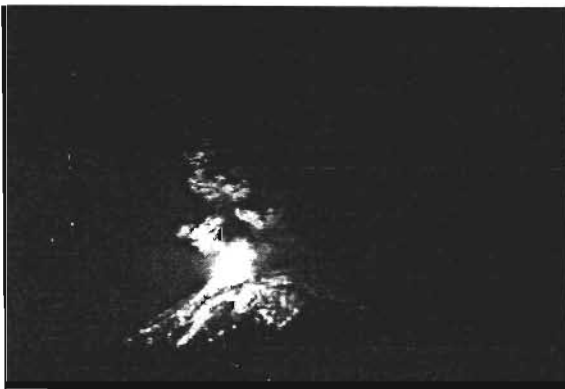


Figura 69. Actividad explosiva ocurrida el 24 de abril del 2003 (CENAPRED, 2003).

De abril a agosto se nota un decremento de la actividad explosiva, si se compara con los primeros cuatro meses del año. Julio representa el mes de mayor actividad del segundo cuatrimestre. En este mes se presentaron fuertes explosiones que generaron columnas piroclásticas de hasta 3 km de altura sobre el cráter (IEV:2). En ocasiones fueron acompañadas por expulsión de fragmentos incandescentes (balísticos). Con respecto a la presencia de domos, no es posible saber si en este lapso se gesta una nueva estructura en el interior del cráter principal. De acuerdo con la información existente, no hay evidencias que demuestren lo contrario. Otro hecho a favor de esta hipótesis, es la existencia de un período de calma aparente que comprende de septiembre a diciembre.

Consideraciones finales

Analizar la intensidad explosiva del volcán y la frecuencia, fue un punto de partida exitoso en la caracterización de la actividad volcánica del Popocatepetl, ocurrida entre 1993 y 2003. Al mismo tiempo fue posible asociar fenómenos tan particulares como: deshielos, *lahares*, flujos piroclásticos, presencia de domos, incandescencias y expulsión de balísticos.

El histograma de frecuencias (Fig. 70) muestra el resumen de 10 años de actividad, en este grafico se reconoce el comportamiento eruptivo a partir de las siguientes fases: reactivación, inicio, máxima y decremento.

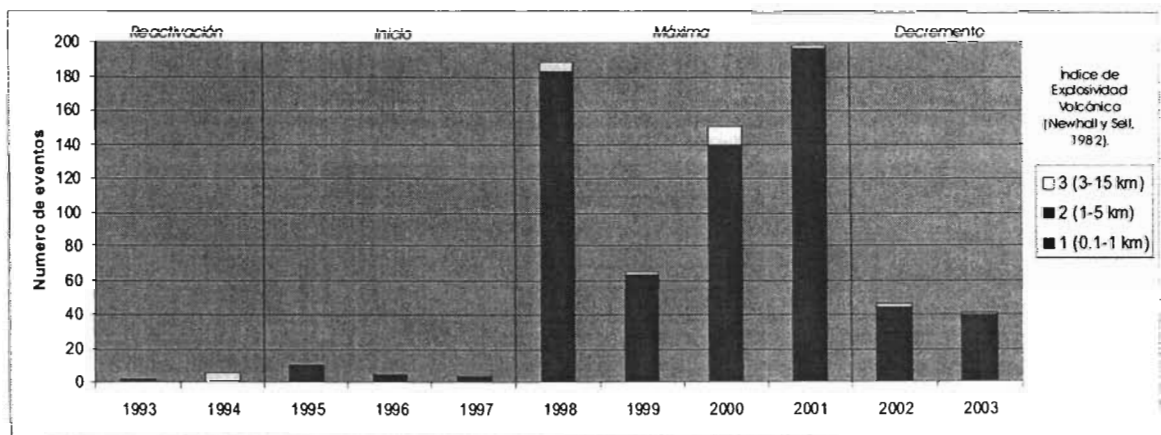


Figura 70. Histograma de frecuencias que representa la actividad explosiva del Popocatepetl de 1993 a 2003, se reconocen las siguientes fases: reactivación, inicio, máximo y decremento.

La fase de *reactivación* comprende de 1993 a 1994, se caracteriza por presentar el menor número de explosiones del período analizado. De un total de 8, seis fueron muy intensas (grandes: IEV:3), incluso los piroclastos llegaron al estado de Tamaulipas. Hay que mencionar que estos eventos marcan el comienzo de la actividad más reciente del Popocatepetl y que continúa hasta nuestros días.

El período denominado *inicio* abarca de 1995 a 1997, los eventos volcánicos se incrementaron en frecuencia e intensidad, como lo demuestran numerosos reportes de prensa, sin embargo, esta situación no se refleja en la figura 69. La

explicación a este hecho obedece a una falta de sistematización en los datos por parte del CENAPRED. En esta época la institución mencionada, hace referencia a las explosiones y columnas piroclásticas sin tomar en cuenta la altura (sobre la cima o snm); la dirección preferencial o bien el número de eventos es confuso: *se presentaron numerosas explosiones de bajas a medias...* Con estos datos, no fue posible clasificarlos de manera adecuada en este período. Los 20 episodios que se consideran en la figura 69, contaban con los datos necesarios para clasificarlos; esto no quiere decir que fueron los únicos que ocurrieron. En este marco, un hecho que hace pensar que el período de inicio fue violento e intenso, es el desarrollo de 6 domos y un lahar (junio de 1997), que se relaciona con eventos volcánicos de gran magnitud responsables de la fusión parcial del glaciar, localizado en la ladera noroeste.

La *máxima* actividad del Popocatépetl, dentro del período que se analiza, se sucede de 1998 a 2001, ocurren un total de 602 explosiones con las siguientes características: 19 de ellas muy violentas (IEV:3); 217 consideradas como moderadas (IEV:2) y 366 pequeñas (IEV:1). Hay que mencionar que entre cada evento explosivo eran frecuentes las exhalaciones de piroclastos, que fueron expulsados de manera no violenta y no formaron columnas. Estos fenómenos no son tomados en cuenta en la figura 70. Es importante mencionarlos, ya que cuando los vientos predominantes los dirigieron hacia la ladera noroeste, cayeron sobre la superficie de hielo, ocasionando una reducción del glaciar en extensión y volumen. Debido a la poca altura que alcanzaron (< 500 m), no tuvieron tiempo para enfriarse, de ahí la potencialidad de fusión que presentaron. En este período estuvieron presentes procesos efusivos, en particular la formación de domos, un total de diez. La dinámica de estas estructuras termina con su fragmentación y desaparición; en este sentido, tiene especial importancia el domo 12, su destrucción (22 de enero de 2001) generó un flujo piroclástico que derritió una porción importante del glaciar, desarrollando *lahares* que ocuparon las barrancas localizadas en la ladera noroeste del Popocatépetl.

Los años del 2002 y 2003 representan el inicio de una relativa estabilidad que ocasionalmente es interrumpida por explosiones moderadas. En estos dos años se reportaron 88 eventos, de los cuales 3 tuvieron una intensidad significativa (IEV:3);

49 fueron consideradas moderadas (IEV:2) y 35 pequeñas (IEV:1). Los domos volcánicos también estuvieron presentes, en esta etapa que es considerada de *decremento* volcánico, un total de cinco estructuras.

Hay que mencionar que los domos desarrollados en el interior del cráter principal, han sido los responsables de cambios en la morfología del relieve. La destrucción de estas estructuras generó abundantes depósitos de caída que mantearon las cuencas de captación fluvial, con detritos que no presentan ninguna resistencia para ser movidos por la acción fluvial. Este hecho conlleva a un aumento en la capacidad erosiva de los escurrimientos. En este sentido, la colmatación parcial o total de algunos sectores de los cauces generaron flujos de lodo, cuyos depósitos ocuparon la porción media de las cuencas, favoreciendo el desarrollo de saltos de cabecera (erosión remontante). Por último, hace falta decir que en el período que se analiza existieron 21 domos, cada uno de ellos contribuyó en la expresión del relieve que es posible observar en la actualidad.

Capítulo III. Geología

La expresión morfológica de cualquier parte de la superficie terrestre, es el reflejo de las condiciones geológicas existentes. Por tanto, la validez del análisis geomorfológico depende del conocimiento que se tenga acerca de la superficie terrestre, es decir, de su génesis (tipos de roca), estructura (pliegues y disyunciones), temporalidad (edad de las formas) y distribución. Estas son las razones por las que se hace necesario un apartado geológico a nivel regional y local en este trabajo.

A partir de información tectónica y geológica regional, se enmarca la actividad del Popocatépetl como un eslabón más, dentro del complejo *engranaje* de la tectónica y vulcanología global. Las particularidades geológicas de la zona de estudio, se realizan bajo los criterios de Robin (1984); Robin y Boudal (1987); Mooser *et al.*, (1996) y Siebe *et al.*, (1995, 1996 y 1997).

3.1 Marco geológico regional

El Popocatépetl es parte del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM), provincia que atraviesa el país desde las costas de Nayarit en el Océano Pacífico, hasta las de Veracruz en el Golfo de México. Se localiza entre los paralelos 19° y 20° de latitud norte, su desarrollo tiene lugar durante el Neógeno-Cuaternario. Su longitud es de 1200 km y su anchura varía entre los 50 y 250 km, aproximadamente (Ego y Ansan, 2002; Demant, A., 1982).

La actividad tectónica y volcánica de esta región ha propiciado la existencia de una gran variedad en cuanto a morfología, dimensiones y composición de edificios volcánicos. Estas estructuras se disponen con un arreglo NNE-SSW y N-S, posición que es determinada por la dirección preferencial de los principales sistemas de fallas.

En el origen y evolución del CVTM, la hipótesis que tiene más aceptación por la comunidad científica, se basa en métodos geofísicos (tomografía sísmica) y

geoquímicos (análisis de isótopos) (Ferrari, 2000; Pardo y Suárez, 1995). Este modelo hace referencia a la subducción de las placas oceánicas Cocos y Rivera, por debajo de la Norteamericana. Dicha dinámica ha sido determinante en la distribución y composición de los reservorios magmáticos, que han dado como resultado el predominio de un volcanismo calcoalcalino. Es importante mencionar que el fenómeno de subducción es irregular a lo largo de todo su trayecto (Trinchera Mesoamericana).

De manera estrecha con la idea anterior, Mooser *et al.* (1996) plantean que la localización de estratovolcanes en el CVTM, está condicionada por la existencia y orientación de diferentes sistemas de fallas que responden a la compleja dinámica de subducción a lo largo de la Trinchera Mesoamericana.

En este sentido, los autores reconocen para la porción central del CVTM, ocho grupos de alineamientos, fracturas y fallas; el más antiguo de ellos tiene desarrollo en el Eoceno temprano. A partir de esta época y hasta el Pleistoceno, fueron apareciendo nuevas asociaciones disyuntivas, cada una con orientaciones diferentes, pero relacionadas entre sí.

Los sistemas de fallamiento que tienen relación con el Popocatepetl son dos, uno de ellos inició su desarrollo en el Plioceno tardío y continúa en el Pleistoceno, se conoce como "Fracturamiento en *zetas* de las Sierras Mayores" por localizarse en la base de las mismas. La dirección preferencial de este grupo es al SSE, sobre todo en su porción central, ya que en sus extremos presenta curvaturas (Fig. 71).

El fracturamiento en *zetas* de las Sierras Mayores se considera como la continuación de otro que se dispone en forma de arco. Tiene origen en la región de Acambay y termina en las cercanías del volcán La Malinche. A este conjunto se le conoce como "Arco Tarasco", su orientación predominante NW-SE y su edad es estimada entre el Plioceno-Pleistoceno. Mooser *et al.* (op.cit.) aseguran que este fracturamiento fue el responsable del vulcanismo ocurrido desde el Plioceno tardío hasta el Cuaternario medio, por consiguiente, tiene relación con el origen y desarrollo de la Sierra Nevada.

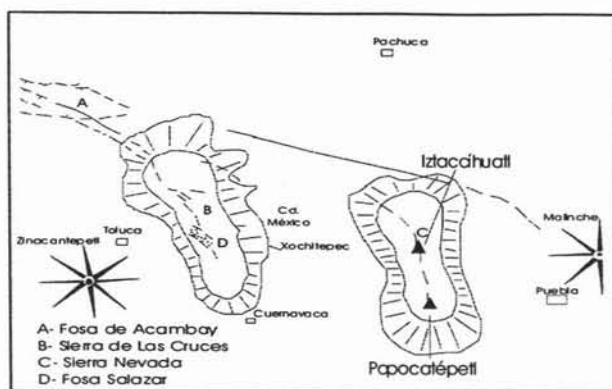


Figura 71. Fracturamientos en "z" que parten desde el Arco Tarasco, dando origen a las Sierras Mayores. En el extremo sur de la Sierra Nevada se localiza el volcán Popocatepetl (Mooser et al., 1996).

El segundo sistema disyuntivo que se vincula al Popocatepetl, ejerce una influencia tectónica muy importante en el volcán Zinacantepetl (Nevado de Toluca), de ahí el nombre de "Fracturamiento Tipo Nevado". Su traza es irregular en cuanto a orientación y longitud, no obstante, se reconoce una dirección preferencial de E-W. Su origen y edad se vinculan a una expansión que presenta el CVTM en el Pleistoceno. Mooser *et al.* (op.cit.) afirman que si las fracturas, fallas y alineamientos que definen este grupo se analizan en conjunto y a nivel regional, puede considerarse una estructura tectónico-volcánica más, que denomina "Arco Chichinautzin" (Fig. 72).

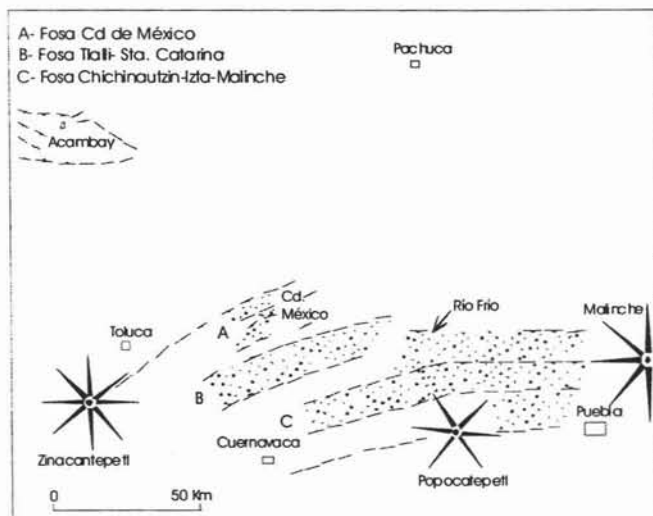


Figura 72. Sistema de fallas y fracturas que constituyen el Arco Chichinautzin, éste comportamiento estructural controla a los grandes estratovolcanes de la zona, uno de ellos es el Popocatepetl (Mooser et al., 1996).

La importancia de este nuevo elemento tectónico a nivel regional, radica en el control estructural que ejerce en los grandes volcanes del centro de México. En especial en las diferentes etapas eruptivas que configuraron la morfología actual del Popocatepetl.

Los modelos anteriores en cuanto al origen de CVTM se refiere, se han mantenido hasta nuestros días (aunque con ligeras modificaciones). No así sus particularidades, que son objeto de discusión e investigación, ejemplo de ellas es la existencia de una gran variedad de morfologías volcánicas, heterogeneidad en composición química de los materiales, presencia de un vulcanismo alcalino de tipo interplaca (asociado a los *Ocean Island Basalt*) asociado con la subducción, existencia de una oblicuidad entre la Trinchera Mesoamericana y el CVTM (sector central y oriental) y la presencia de marcadas variaciones en la anchura del CVTM (Ferrari, 2000). Lo anterior, sin duda, es reflejo de la complejidad de este territorio.

3.2 Origen y evolución del Popocatepetl

El Popocatepetl se localiza en el extremo sur de la Sierra Nevada, cordillera volcánica que se desarrolló durante el Plioceno-cuaternario, de composición andesítica, dacítica y riolítica (Mooser *et al.*, 1996). Este conjunto montañoso tiene una orientación N-S y representa el límite SE de la cuenca endorreica de México.

Son tres los materiales que constituyen el basamento sobre el cual se emplaza el Popocatepetl (Goff *et al.*, 2001). El más antiguo, de edad Paleozoica, está constituido por rocas metamórficas que pertenecen al Complejo Acatlán. Estos materiales no afloran en superficie, se encuentran a una profundidad de ~6000 metros por debajo del cráter principal. Sobreyaciendo al sustrato anterior, existen 3 km, de espesor, de estratos calizos del Cretácico, afloran a 20 km al sur del volcán. Por encima de los depósitos cretácicos se presenta una capa de sedimentos continentales del Terciario, de un kilómetro de espesor. Toda la secuencia mencionada es interrumpida por cuerpos intrusivos del Terciario, que la cortan de manera perpendicular (Fig.73).

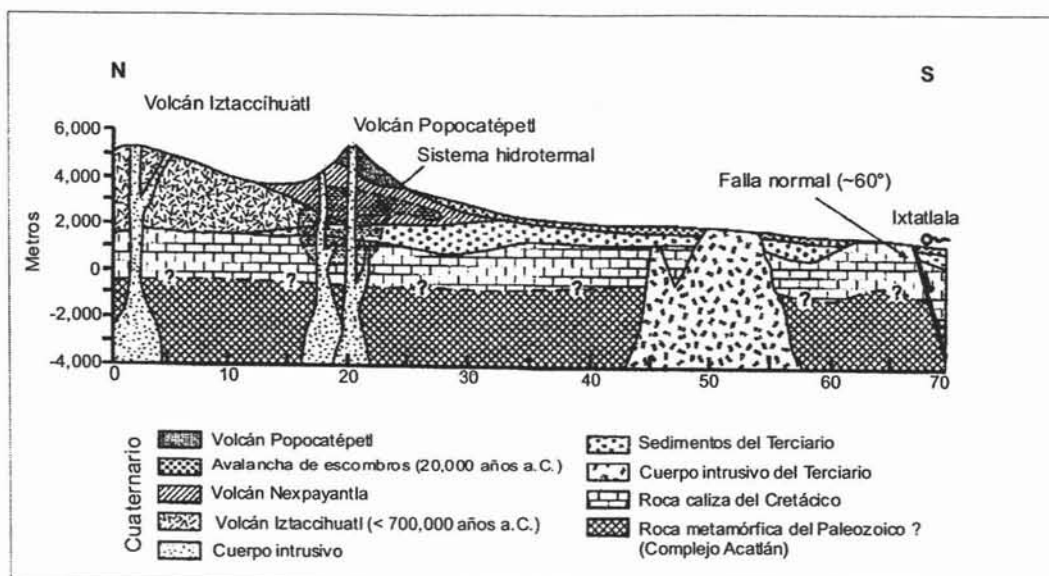


Figura 73. Esquema geológico que muestra los principales componentes litológicos que constituyen el basamento del Popocatépetl, así como las estructuras volcánicas previas a la formación del cono reciente (Goff et al., 2001).

Uno de los primeros modelos que tratan de explicar la evolución del Popocatépetl es atribuido a Robin (1984); Robin y Boudal (1987). En él se plantea la existencia de tres estructuras volcánicas en el área del actual cono.

La primera de ellas corresponde a un edificio de 5000 – 5300 msnm; se conoce como *primitivo*, su edad es coetánea a la formación de la Sierra Nevada, un millón de años aproximados, su actividad fue de tipo efusivo, dando origen a lavas dacíticas que alcanzaron un volumen total de 400 km³.

Hace 50 000 a 30 000 años a.C. el volcán *primitivo*, a partir de un evento tipo Santa Elena se destruyó, de tal manera, que parte de su edificio se transformó en una avalancha de escombros (Fig. 74). Una forma de relieve, que puede relacionarse con la antigua cicatriz dejada por el colapso volcánico, podría ser lo que Mooser *et al.* (1996) denomina “Caldera de Tlamacas”, de edad cuaternaria y que se localiza a ~ 2.5 km al norte del cono actual.

La segunda etapa en la evolución del Popocatépetl queda definida por el nacimiento del volcán El Fraile, dentro de la depresión que originó la explosión del *primitivo*. Las fases que marcan el inicio de actividad del Fraile afloran al SSE del

edificio actual y fueron esencialmente efusivas, ocurrieron entre 10 000 y 15 000 años a.C. a 3 800 años a.C. De esta manera, se fue rellenando la antigua superficie, con morfología de caldera, con depósitos lávicos de hasta 200 m de altura y potentes capas de piroclastos (40 km³ de material emitido), la composición fue andesítica y dacítica (Unidad IIA, Fig.74).

El Fraile no fue constante en su estilo eruptivo, su evolución implicó períodos explosivos y efusivos, como lo demuestra la existencia de potentes depósitos de piroclastos (caída y flujo), que se alternan con numerosas coladas de lava. La sobreposición de estos materiales, construyó un volcán de 5 700 msnm (dato aproximado). Contemporáneo a este edificio, es la existencia de varias bocas eruptivas localizadas en la ladera NE. A través de estos focos de emisión, se expulsaron extensos derrames de lava de composición andesítica (Unidad IIB, Fig. 74).

El Fraile se destruyó a partir de tres eventos explosivos tipo San Vicente⁷, el primero ocurrió hace 10 000 años. Entre los 9 500 y 8 000 años a.C., se presenta el segundo, y último de ellos se sucedió de 5 000 a 3 800 años a.C. Las dos últimas fases de destrucción se caracterizaron por la presencia de flujos de pómez y ceniza que llegaron a distancias de 20 km y alcanzaron espesores entre 10 y 20 m.

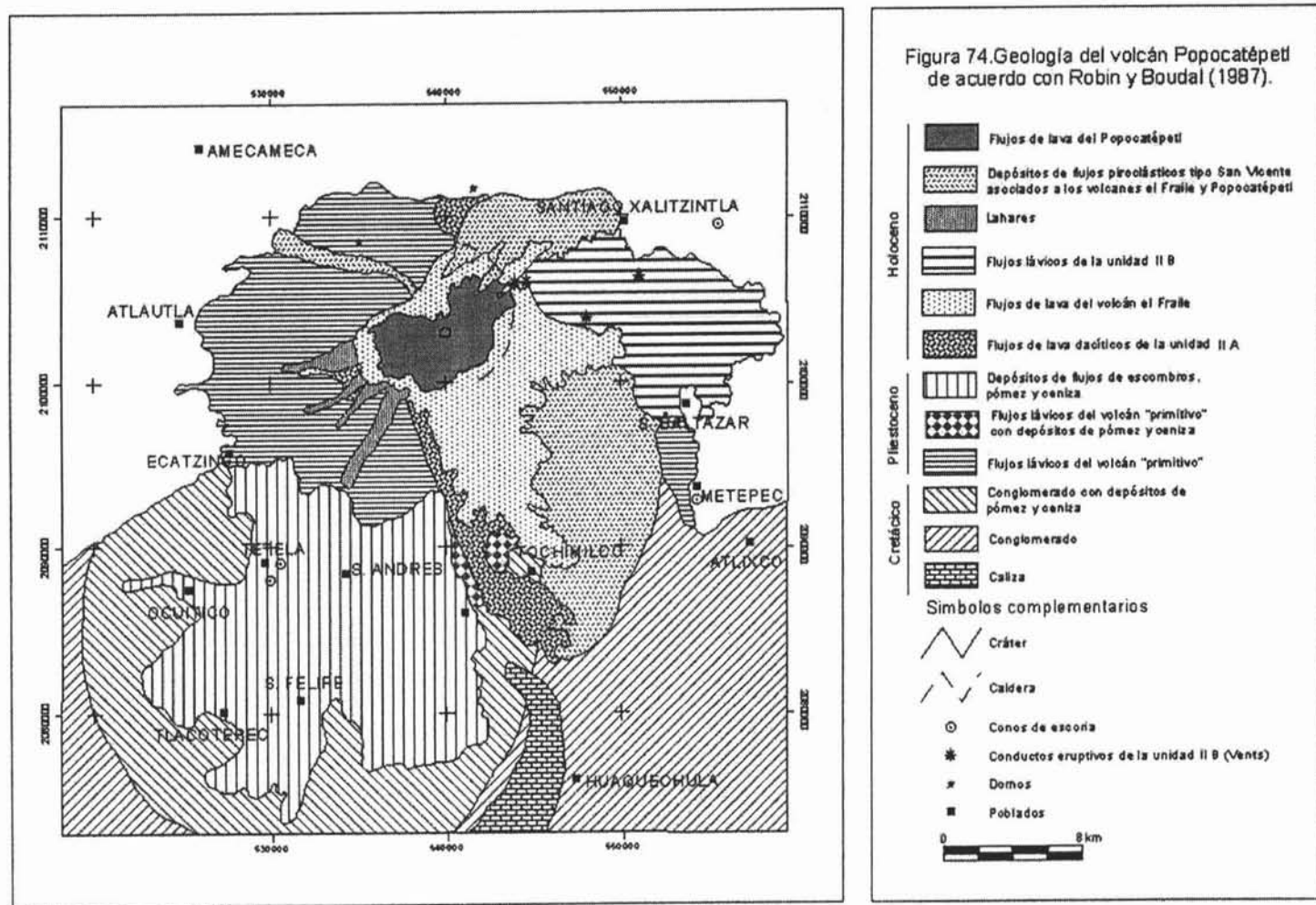
Existen escasas evidencias relacionadas con la existencia de El Fraile, debido a que se han ido perdiendo por explosiones posteriores y por la acción de la dinámica exógena, en especial de la acción glacial de finales del Pleistoceno y del Holoceno. No obstante, en la ladera NW del actual Popocatepetl es posible reconocer dos rasgos morfológicos. El primero se conoce como "El Pico del Fraile" (5000 msnm), el segundo es una prominente pared rocosa que es nombrada "El Abanico".

⁷ La actividad volcánica tipo San Vicente es caracterizada por una violenta apertura del cráter que genera una columna eruptiva de varios metros de altura por encima del volcán, posteriormente colapsa por gravedad en forma de flujos piroclásticos (*nuée ardente*) sobre las laderas (Scarth, 1994).

La tercera y última etapa de evolución está representada por el cono actual del Popocatepetl, su origen se asocia a la alternancia de eventos efusivos y destructivos. Su crecimiento comenzó con la emanación de potentes coladas de lava de composición andesítica y dacítica, entre los 3800 y 1200 a.C.

Para los últimos 1200 años a.C., la actividad eruptiva tendió a ser explosiva, se presentaron eventos tipo San Vicente, lo que generó importantes flujos piroclásticos que mantearon los alrededores del volcán. Como los que se localizan en el actual poblado de Santiago Xalitzintla (1230 ± 90 años a.C.) y en San Pedro Nexapa (1220 ± 60 años a.C.) (Robin y Boudal, 1987) (Fig. 74).

Es importante mencionar que El Fraile (Robin, 1984; y Robin y Boudal 1987); es conocido también como volcán Nexpayantla en los modelos propuestos por Carrasco (1985); Mooser *et al.*, (1996); Siebe *et al.*, (1997) y Goff *et al.*, 2001). Por lo tanto estos últimos, identifican solo dos estructuras pre-Popocatepetl; y el promontorio rocoso denominado "El Ventorrillo" es la evidencia morfológica relicto, que se asocia al Nexplayantla.



3.3 Geología y estratigrafía

La información geológica que existe para el Popocatepetl es abundante, no obstante llega a ser poco detallada, indirecta o es integrada a un modelo tectovolcánico regional. Hay que mencionar que uno de los mejores mapas geológicos es de Mooser *et al.* (1996), elaborado para las cuencas de Toluca, México y Puebla.

Este documento relaciona el sustrato geológico, con rasgos morfológicos y estructurales específicos. De esta manera, se hace evidente la génesis, heterogeneidad y distribución espacial de los materiales que existen. La identificación y caracterización de las unidades que componen el "Complejo Popocatepetl", es un aporte importante que será utilizado en el análisis geomorfológico (Fig. 75).

Información específica y detallada en donde se reconocen y analizan (en un marco temporal y espacial) las diferentes secuencias eruptivas, que llegaron a constituir el Popocatepetl, sin duda son los trabajos de Siebe *et al.* (1995). Estos estudios sugieren la existencia de varios edificios volcánicos que han colapsado en distintos tiempos a partir de eventos tipo *Santa Elena*. En la actualidad, resulta difícil reconocer evidencias topográficas que se asocien a los fenómenos mencionados, ya que la actividad volcánica reciente, mantea, disimula o cubre los relieves relictos.

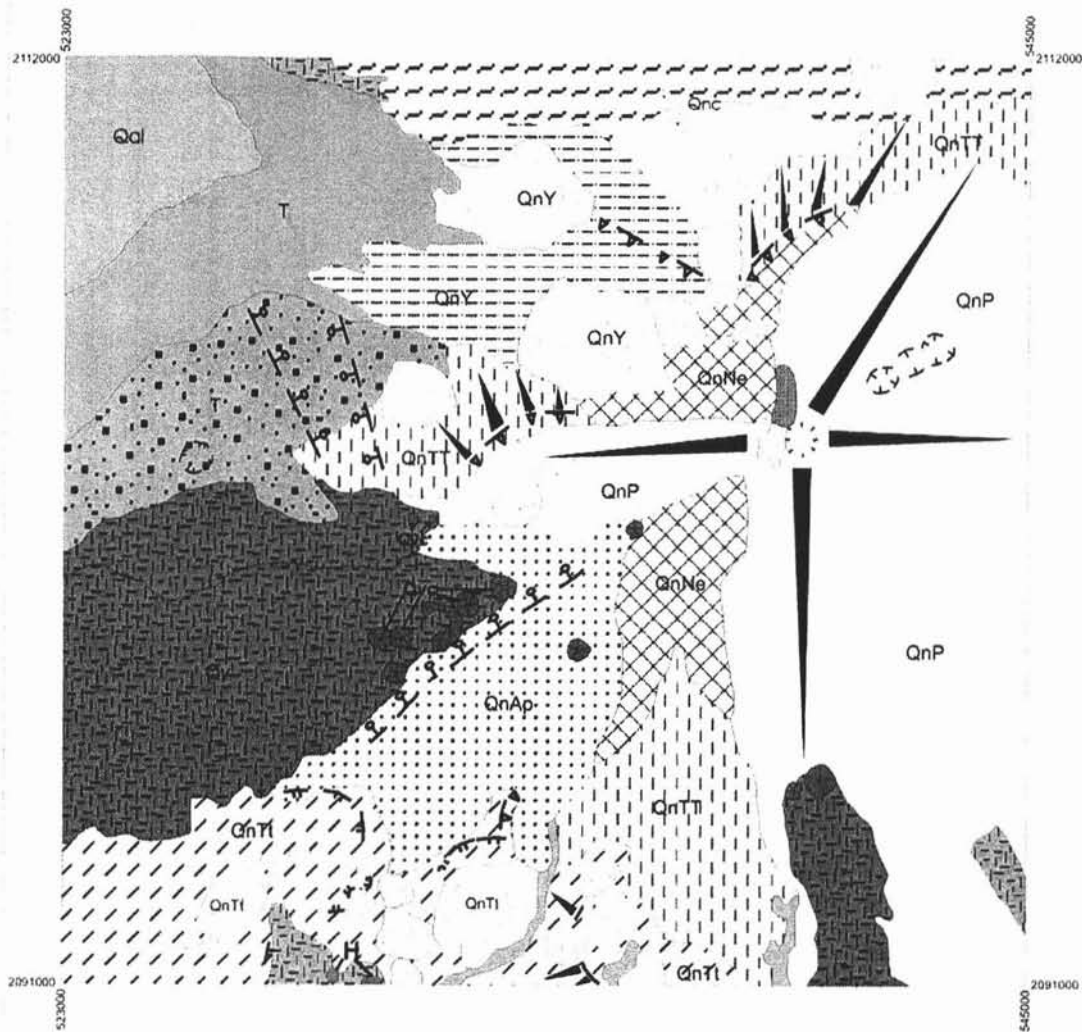
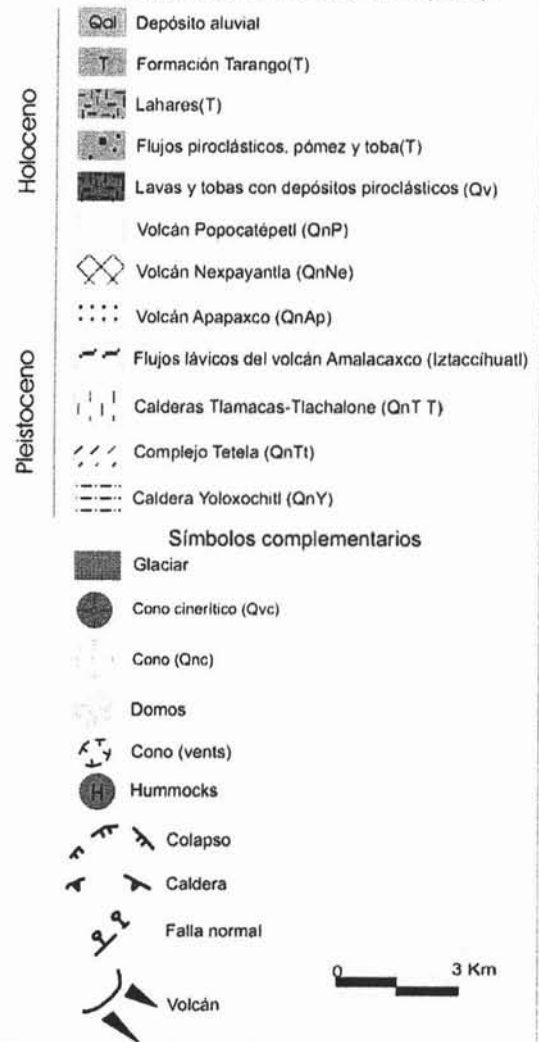


Figura 75. Geología del Popocatepetl de acuerdo con Mooser *et al.* (1996).



Siebe *et al.* (op.cit.) reconocen por lo menos tres depósitos de avalancha de escombros, que de manera conjunta ocupan una superficie de ~ 600 km², llegaron a una distancia máxima de 70 km (desde su fuente) y alcanzaron un volumen de 27 km³. Estos depósitos afloran al sur del volcán, presentan una expresión de montículos irregulares que reciben el nombre de *hummocks* y algunos, desde su base, llegan a los 400 m de altura (Fig. 76).

Los tres depósitos mencionados son similares en cuanto a litología y estructura interna (megabloques fracturados, estructuras tipo rompecabezas, composición andesítico-dacítica, piroclastos alterados por hidrotermalismo y matriz de arena gruesa). Sin embargo son estas características las que dificultan su delimitación (Siebe *et al.*, 1995) (Fig. 77).

Desde el punto de vista geomorfológico tiene especial interés el último colapso volcánico, debido a que este evento es el que condiciona la expresión actual del relieve. Si bien no se conoce con exactitud el área de cobertura y volumen, se sabe que ocurrió entre 22 000 y 23 655 años a.C. También se tiene referencia de que hubo actividad post-colapso, una violenta explosión pliniana generó una columna de alcance estratosférico (Siebe *et al.*, op.cit.).

Los depósitos de este evento extraordinario, se reconocen por la existencia de tres capas, la inferior, de flujo de ceniza se generó por el colapso parcial de la columna eruptiva en su fase inicial; sobreyaciendo a la anterior, se encuentra un depósito de caída de varios metros de espesor, se compone de fragmentos angulares de pómez color beige-blanco. El último de ellos corresponde a un flujo de ceniza, que se asocia con el colapso final de la columna pliniana (Siebe *et al.*, op.cit.).

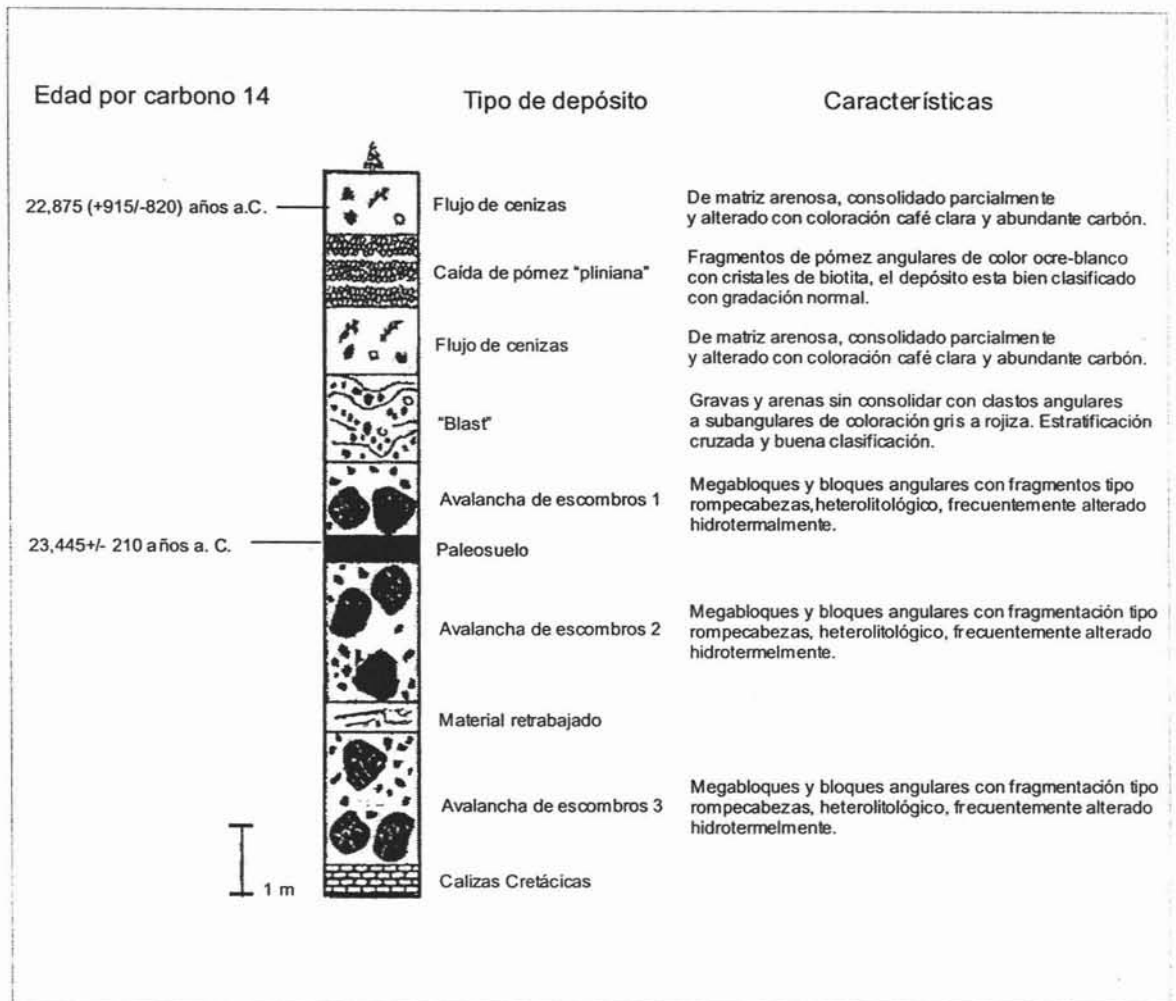


Figura 77. Columna estratigráfica esquematizada que muestra los depósitos de avalancha de escombros, emplazados al sur del Popocatepetl; así como las secuencias piroclásticas relacionadas con los colapsos de edificios tipo Santa Elena. Además se indican los horizontes fechados por radiocarbono 14 (Siebe et al., 1995).

Los materiales sobreyacentes a los productos postcolapso, corresponden a un evento freático-pliniano de gran magnitud, que ocurrió 14 000 años a.C. La columna piroclástica alcanzó los 30 km de altura y se distribuyó hacia el NW, por lo que los materiales pudieron llegar hasta el territorio que ocupa la Ciudad de México y constituir parte de los componentes litoestratigráficos de la cuenca. Los piroclastos resultantes se conocen como depósitos "Tutti-Frutti"; para Mooser corresponde a la "pómez con andesita" (Siebe *et al.*, 1997).

Los "Tutti-Frutti" se constituyen de fragmentos angulosos de pómez dacítica, de coloración naranja, mezclados con líticos de granodiorita de color gris y con fragmentos de areniscas metamorfoseadas de color verde. Estos componentes corresponden a la fragmentación del basamento del Popocatepetl, lo que hace pensar en la magnitud y profundidad de la explosión (Fig. 78). Tomando en cuenta la edad de este evento, es muy probable que tenga relación con la actividad explosiva del Fraile. Sin embargo Siebe *et al.* (1996b) relaciona este evento freático-pliniano con la formación de un cráter en el territorio de la barranca Nexpayantla, localizada a ~ 3km al NW del cono actual.

A los depósitos "Tutti-Frutti" le sucede un flujo piroclástico de entre 11 000 y 6 000 años a.C. Es caracterizado por fragmentos de pómez subredondeados de color ocre, soportados en una matriz de ceniza con textura arenosa y limosa, de color gris oscuro. El origen tiene relación con colapsos de columnas eruptivas de gran altura que se dirigieron hacia el NE, NW y SW, en la actualidad se reconocen en Santiago Xalitzintla, San Nicolás de los Ranchos, Amecameca y Ozumba (Siebe *et al.*, 1997) (Fig. 79).

Por último, los detritos anteriores (de flujo piroclástico), están cubiertos por depósitos de cuatro eventos explosivos de tipo pliniano, ocurridos en el Holoceno Tardío; entre 3195 años a.C. y 1095 d.C. (Siebe *et al.*, 1996a y b) (Fig. 80). De acuerdo con lo anterior y considerando la edad del cono actual del Popocatepetl (~4000 años a.C.) determinada por Robin y Boudal (1987), se puede inferir que los eventos plinianos son parte de la actividad eruptiva asociada a la estructura más reciente.

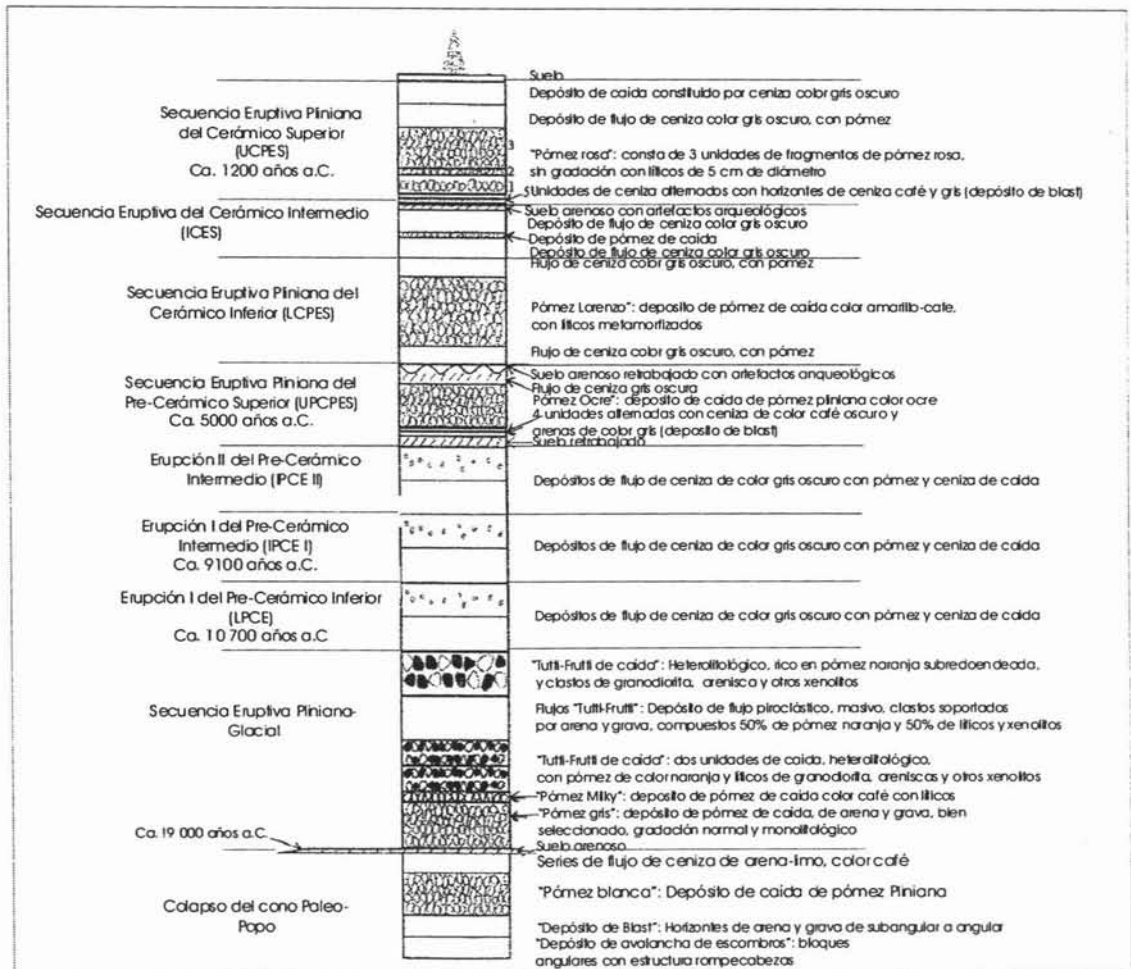


Figura 78. Columna estratigráfica compuesta donde se representan los principales eventos eruptivos de los últimos 24 000 años (Siebe et al., 1997).

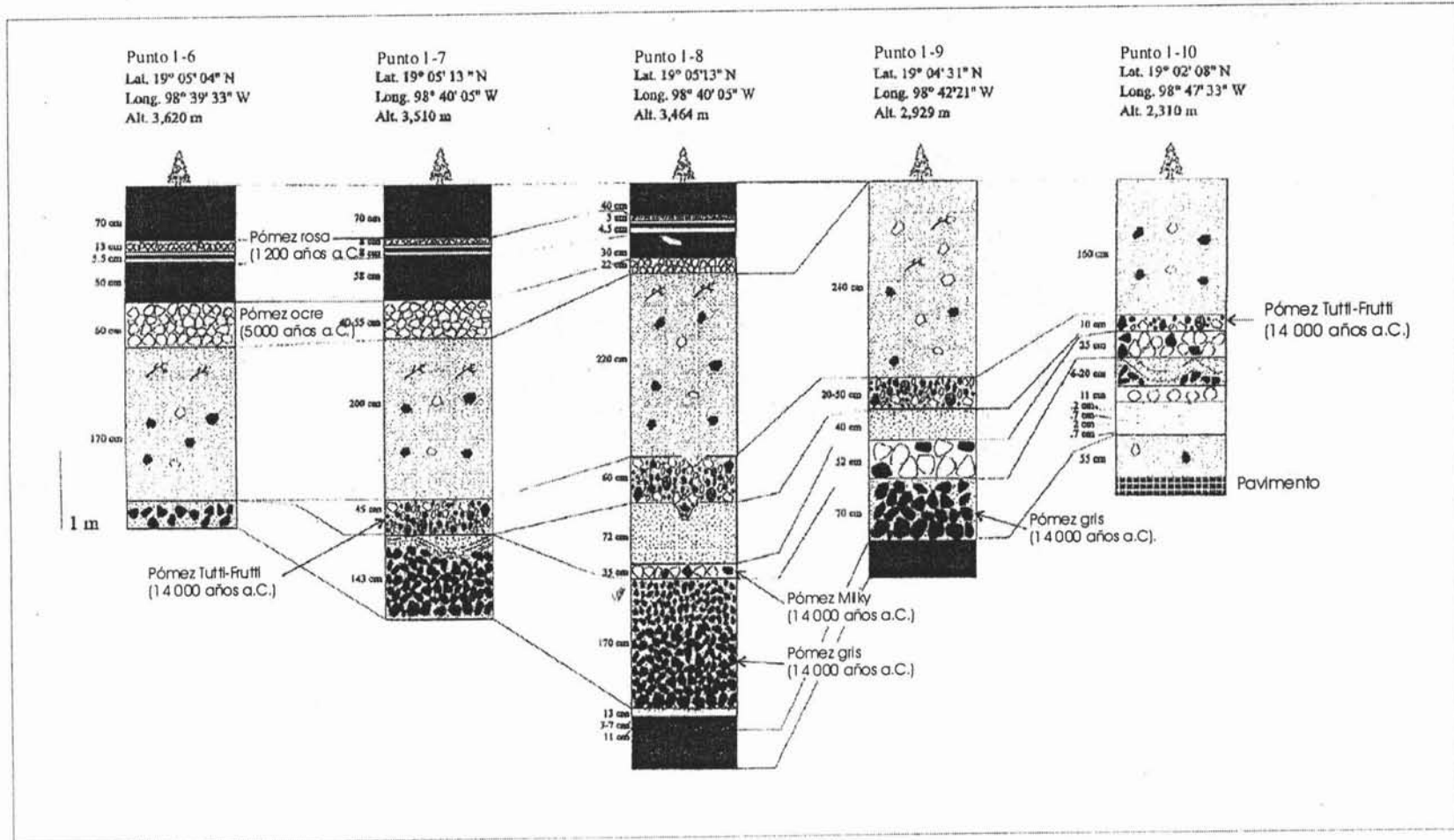


Figura 79. Columnas estratigráficas levantadas en las laderas norte y noroeste del Popocatepetl, en las cuales se reconocen las secuencias eruptivas de los últimos 14 000 años (Siebe *et al.*, 1997).

Las fechas de los eventos plinianos identificados por Siebe *et al.* (1996a), concuerdan con los períodos culturales de Mesoamérica, un total de cuatro; el primero ocurrió en el Preclerámico Superior (de ~ 3195 a 2830 años a.C.), todo parece indicar que la erupción inició con pequeñas expulsiones de ceniza seguidas por actividad hidromagmática de mayor intensidad, que generó una oleada piroclástica, *surge* (con estratificación cruzada, constituidos por gravas, arenas y limos, entre los estratos llegan a existir pequeños trozos de carbón). Cubriendo a los anteriores, pero dentro del mismo período, se depositan materiales de caída, constituidos por clastos angulosos de pómez, de color ocre y composición andesítica, en menor proporción existen litos juveniles y accidentales; los primeros de color gris oscuro, los otros de limonita de coloración verde claro. Este evento culminó con el desarrollo de flujos piroclásticos que tuvieron una distribución radial sobre las laderas del edificio principal.

El segundo de tipo pliniano (de 800 +/- 135 a 215 +/- 65 años a.C.) se asocia con el Cerámico Inferior. Comienza con pequeñas explosiones que generaron incipientes depósitos de caída y flujo, la actividad fue en aumento de manera paulatina hasta generar una columna pliniana, responsable de un sustrato pumítico constituido por fragmentos angulosos de composición dacítica. El espesor promedio alcanzado fue de 1.10 m. Su dispersión fue hacia el ENE con una cobertura elipsoidal, así lo demuestran los afloramientos localizados en los alrededores de San Nicolás de los Ranchos, al noreste del Popocatepetl (Siebe *et al.*, 1996a).

Ocurrido en el Cerámico intermedio (de 125 +/- 175 a 255 +/- 100 años a.C.) el tercer evento también fue de tipo pliniano, a diferencia de los dos casos anteriores, se presentan alternancias efusivas. Los materiales de este período tuvieron una remoción postdeposicional y fueron la fuente de *lahares*, sus depósitos se pueden reconocer sobre la ladera NNE (Siebe *et al.*, op.cit).

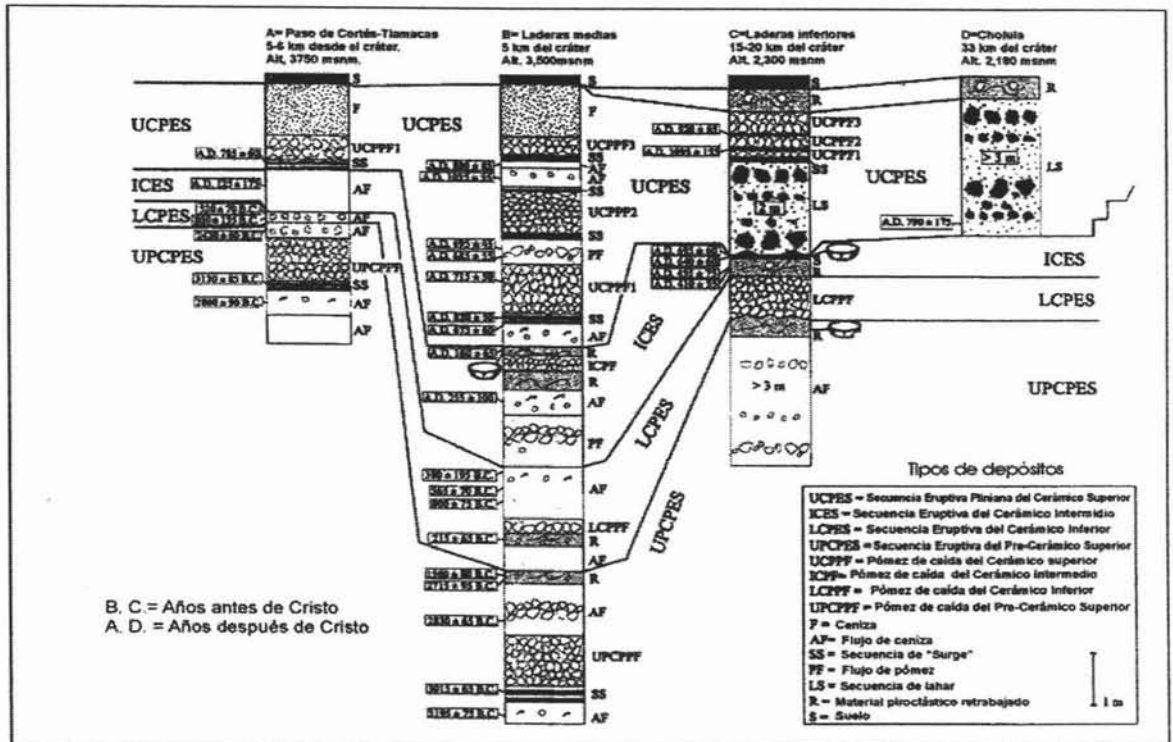


Figura 80. Columnas estratigráficas compuestas, donde se reconocen los últimos cuatro eventos de tipo pliniano, así como las secuencias que fue posible fechar (Siebe et al., 1996a).

El último evento pliniano (entre 675 +/- 60 y 1095 +/- 155 años d.C.) corresponde al Cerámico Superior. La explosión que marcó el inicio de esta actividad, generó numerosos flujos piroclásticos (*surges*) caracterizados por horizontes de ceniza del tamaño de arena y limo, de color gris y ocre. Posterior al emplazamiento de los *surges* inicia la fase de mayor intensidad, la cual generó una columna pliniana estratosférica (> 25 km de altura), desarrollada por tres pulsos eruptivos que expulsaron grandes volúmenes de pómez. El primer pulso lanzó fragmentos hacia el sector NE (UCPPF1, Fig. 81), el segundo tuvo una dirección preferencial hacia el ENE (UCPPF2, Fig. 81). El tercero y último tuvo una dispersión hacia el E (UCPPF3, Fig.81).

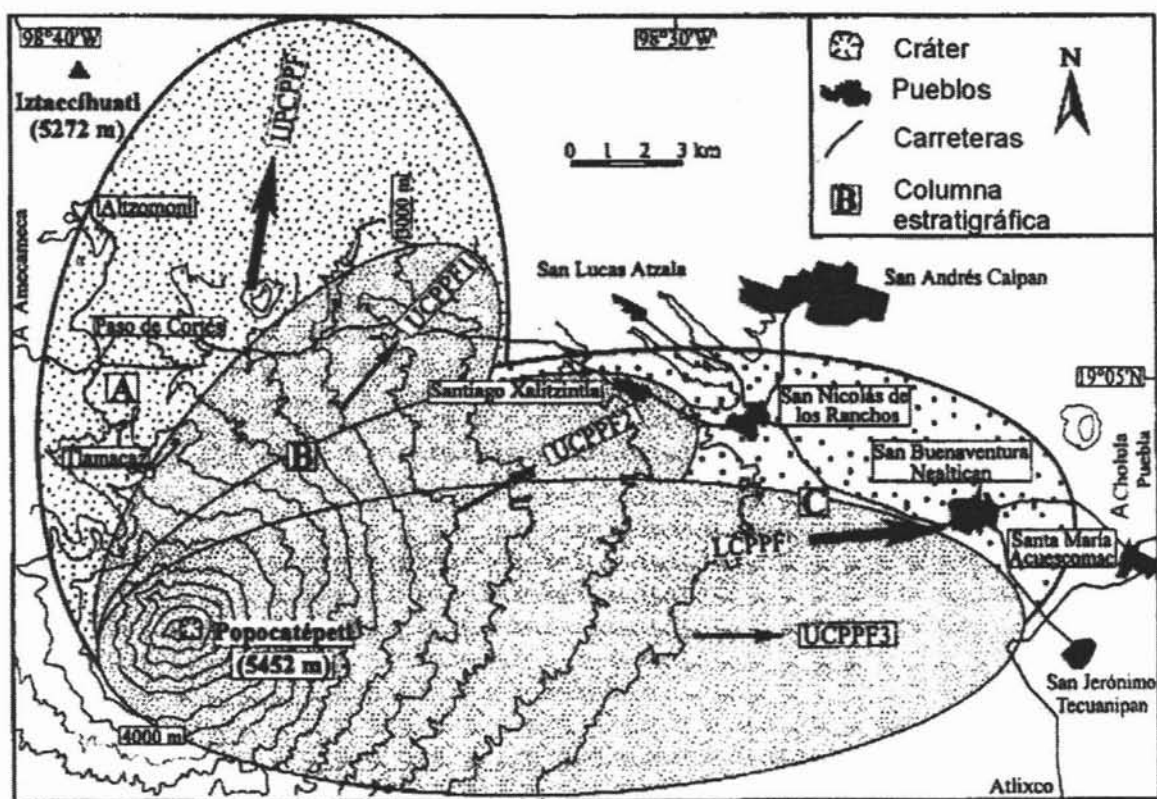


Figura 81. Mapa que indica los principales ejes de dispersión de la pómez emplazada en el Cerámico Superior, este evento se presentó en tres pulsos eruptivos y son representados por las siguientes abreviaturas: UCPPF1, UCPPF2 y UCPPF3. Las letras A, B y C, corresponden a levantamientos estratigráficos que se representan en la figura 80 (Siebe et al., 1996a).

Una vez depositados los materiales correspondientes a los últimos cuatro eventos plinianos, lluvias torrenciales removieron estos detritos y generaron potentes *lahares*. Estos depósitos son característicos de la ladera E, responsables de cubrir prácticamente toda la cuenca de Puebla, los valles de Atlixco y Cuautla (Siebe *et al.*, 1997).

Consideraciones finales

Mediante el análisis geológico-estratigráfico de la zona de estudio, fue posible conocer la distribución, origen, evolución y dinámica de los materiales y relieves asociados. Tal es el caso del volcán Nexpayantla-Fraile, calderas Yoloxochitl, Tlamacas, Tlachalone y el cono actual. Esta información es la base para el análisis geomorfológico.

Capítulo IV. Geomorfología

La geomorfología es la ciencia que estudia las formas de relieve terrestre con base en la génesis, morfología, edad y dinámica. De esta manera los procesos endógenos o formadores y los procesos exógenos o modeladores del relieve, son integrados en un estudio geomorfológico (Lugo, 1991).

En este sentido, el mapa geomorfológico de la zona de estudio es importante para comprender la configuración espacial de las formas de relieve, ya que mediante éste, es posible reconocer relieves con una homogeneidad relativa, en lo que respecta a génesis, morfología, dinámica y evolución.

Los métodos utilizados en la elaboración y representación cartográfica son variados, de acuerdo con cada escuela geomorfológica, que si bien siguen ciertos lineamientos, no siempre es posible el apego a éstos, debido al objetivo de cada trabajo, escala, condiciones del territorio, entre los factores más importantes.

Este trabajo se realizó a partir de la interpretación de fotografías aéreas a distintas escalas (1:80 000; 1:75 000; 1:37 500; 1:19 000 y 1: 5 000), así como recorridos de campo de verificación y reconocimiento de asociaciones o particularidades geomorfológicas.

La clasificación del relieve está basada en los criterios de Simonov (1985): endógeno, endógeno modelado y exógeno. La representación cartográfica se realizó bajo los lineamientos de Bashenina (1977), aunque en algunos casos fue modificada para la mejor representación de las condiciones de nuestro territorio. Resultado del análisis geomorfológico, es el mapa que se anexa al final de la presente investigación y se explica a continuación.

I. RELIEVE ENDÓGENO

Comprende las formas de relieve originadas por la dinámica interna de la Tierra: procesos tectónicos, magmáticos intrusivos y volcánicos. En la zona de estudio predominan los relieves volcánicos, con una gama de morfologías muy amplia.

Volcánico acumulativo

Este apartado hace referencia a la generación, acumulación y emplazamiento de volcanes, domos, bocas eruptivas, diques y coladas de lava, entre otras formas de relieve.

Los volcanes se originan por acumulación de lavas y piroclastos en torno a un conducto central, estas estructuras pueden ser monogenéticas o poligenéticas. Las morfologías resultantes son variadas, dependiendo de la composición química de los materiales, mecanismo eruptivo, volumen emitido y características de relieve preexistente. En este sentido, existen en la zona que se estudia, volcanes simétricos, asimétricos, con cráter cerrado o abierto (en herradura) y con cima convexa, plana o aguda.

En lo que respecta a los domos, se constituyen por la acumulación de lavas viscosas de composición riolítica o dacítica, característica que no permite la fluidez de los materiales; en cambio, se acumulan gradualmente hasta originar un edificio que adopta una morfología convexa (cúpula o domo).

Las bocas eruptivas representan salidas secundarias de magma que generalmente aprovechan zonas de debilidad cortical (fallas y fracturas).

Los diques son cuerpos intrusivos de composición básica o ácida, dispuestos de acuerdo al arreglo que guardan las estructuras disyuntivas existentes en el edificio volcánico.

Las coladas de lava son emplazamientos de magma en la superficie, su longitud, espesor y morfología dependen de la composición química.

1.1 Estructura volcánica principal: Popocatépetl

El Popocatépetl, estratovolcán originado por la acumulación de numerosas coladas de lava y depósitos piroclásticos de composición andesítica-dacítica, ocupan un área de 20 km². Se considera de edad holocénica; entre 3800 y 1200 años a.C. (Robin y Boudal, 1987) (Fig. 82).

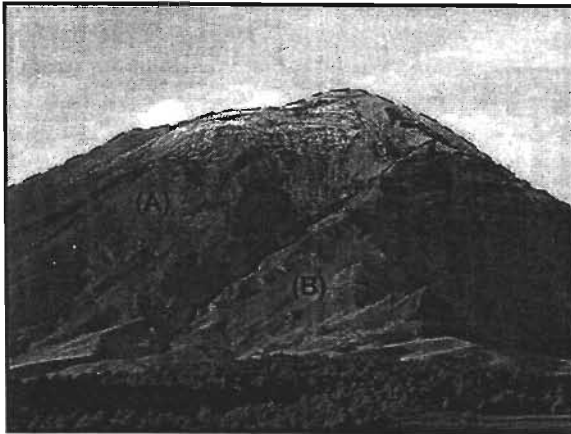


Figura 82. Vista del flanco norte del Popocatépetl: A) cono principal y B) estructura relicto del volcán El Fraile.

La morfología es de un cono truncado irregular; desde su base la altura promedio es de 1750 m y un valor aproximado de 6.75 km de diámetro. Su forma determina un drenaje radial poco desarrollado, en esto tiene que ver la juventud del volcán. Presenta un cráter elíptico y en la porción cumbre NW, el desarrollo de una superficie glacial que fue mayor en épocas pasadas.

El trabajo de campo permitió reconocer formas de relieve y procesos, cuya representación cartográfica es difícil de realizar por las dimensiones que presentan. Entre ellas se tiene a las rampas proglaciares, morrenas y suelos poligonales, la mayor parte de ellas se han desarrollado a lo largo de toda la vertiente norte.

1.2 Volcán con cráter cerrado

Se identificaron cinco estructuras de este tipo, el diámetro promedio de los *anillos* es de 125 m y se localizan al SW y NE de la estructura principal, el Popocatepetl. Este tipo de morfología se relaciona con una dinámica eruptiva constante y poco violenta, que permitió el desarrollo de volcanes cónicos simétricos. Las laderas de estas estructuras presentan inclinaciones entre 30° y 40°; el diámetro promedio es de 0.7 km y la altura relativa de 80 a 100 m. Las estructuras volcánicas que se consideran en este apartado están bien conservadas y presentan un incipiente proceso de modelado fluvial.

1.3 Volcán con cráter abierto

Se identificaron 24 volcanes de este tipo, que están distribuidos de manera heterogénea en la zona de estudio. Esta particular morfología, denota dos dinámicas eruptivas distintas; la primera relacionada con fases explosivas, en donde la ladera más débil se destruye de manera parcial. La segunda se asocia a largos períodos efusivos, donde el aporte de lava es constante y no permiten la existencia de un cráter cerrado. El diámetro de estas estructuras varía de 0.5 a 1.0 km; la altura relativa es de 100 m y la inclinación de las laderas es de 30 grados (valores son promedio).

Los volcanes que se incluyen en este rubro están bien conservados, se reconocen en ellos todos sus rasgos morfológicos primarios, no obstante están sepultados de manera parcial por coladas lávicas y piroclastos pertenecientes a otros focos secundarios de emisión; detritos piroclásticos provenientes de las recientes explosiones del volcán Popocatepetl y por mantos de origen fluvial.

Por otro lado, los volcanes localizados por arriba de los 3000 msnm presentan un modelado glacial que se reconoce por la presencia de rocas aborregadas y estrías de exaración en las laderas rocosas; estos elementos ponen en evidencia el ambiente gélido ocurrido al inicio del Cuaternario.

1.4 Volcán con cima convexa

La morfología de cono y la ausencia de cráter es la característica principal de estas formas de relieve, tienen una distribución heterogénea y suman un total de trece. La falta de cráter en la cima se ha interpretado como un relleno de lavas y piroclastos provenientes de otras fuentes, esta idea se fundamenta en el incipiente modelado que presentan las laderas. Los valores promedio son los siguientes: diámetro de la base es de 0.7 km; la altura relativa de 100 m y la inclinación de las laderas es de $\sim 30^\circ$.

Un ejemplo de este tipo de estructuras es el *cerro Xaltepec*, que se localiza en el "Paso de Cortes", a ~ 7.5 km al NW del cráter principal. Su base mide 900 m de diámetro y una altura de ~ 200 m. Su morfología es de cono, de cima convexa, en general está bien conservado y presenta un manto de ceniza y pómez procedentes de las explosiones recientes del Popocatépetl. Lo anterior sugiere que su edad se considere como Holoceno (Fig. 83).

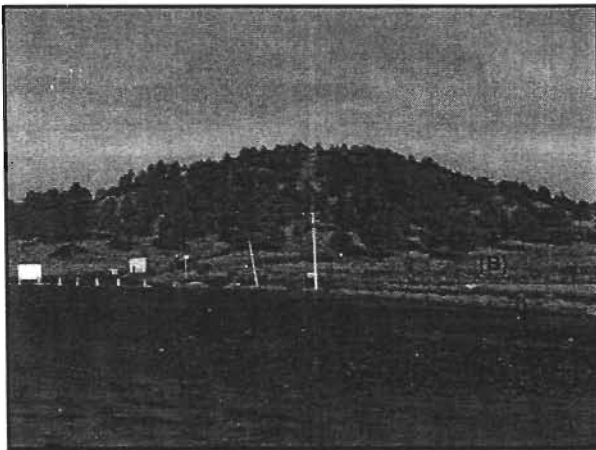


Figura 83. Volcán de cima convexa, cerro Xaltepec (A) y mantos piroclásticos expulsados por el Popocatépetl (B).

1.5 Domos

La morfología se define como convexa-simétrica y suman un total de diez estructuras, la distribución de los domos en los terrenos adyacentes al Popocatépetl en conjunto, no presenta un arreglo aparente. Se constituyen de

lavas riolíticas-dacíticas, se emplazan tanto en los bordes de las laderas exteriores, como en el interior de algunos cráteres de antiguos edificios volcánicos (estratovolcanes o calderas). Debido a la viscosidad e intenso fracturamiento de los domos, son muy inestables y favorecen la caída de materiales en sus laderas. En promedio el diámetro base es de 1.5 km y la altura relativa es de 500 m.

Si bien, la mayor parte de dichas estructuras presenta un modelado fluvial incipiente, también se reconocen los que han sido modelados por procesos glaciares; estos se reconocen por sus morfologías suavizadas, pulidas y parcialmente sepultadas por diferentes tipos de detritos glaciares. Es el caso del cerro Tlamacas (Fig. 84) que se localiza en la porción central de un relicto de caldera que lleva el mismo nombre (a 4.5 km al norte del cráter del Popocatépetl). Su inclinación es de 30° aproximados.

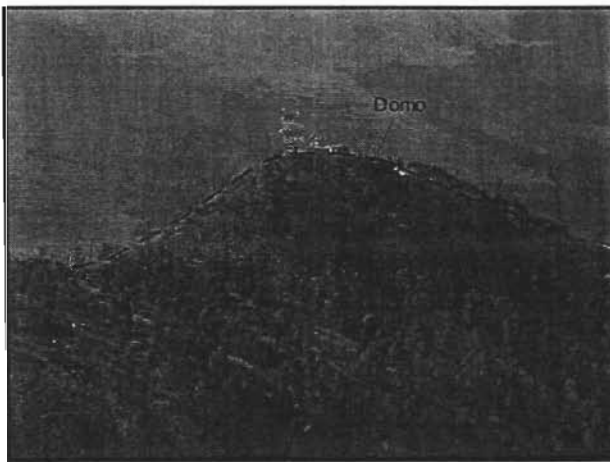


Figura 84. Cerro Tlamacas, domo de lava modelado por la acción glacial (4000 msnm).

El domo Tlamacas presenta un diámetro en su base de 750 m y una altura de 300 m, aproximados. En el flanco SE es posible observar rocas aborregadas y numerosos conjuntos de estrías de exaración, evidencias de la actividad glacial de inicios del Cuaternario.

Otro ejemplo que destaca por sus dimensiones es el cerro Gordo (Fig. 85); se localiza entre los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatépetl (a una distancia de 7.7

km en línea recta hacia el NE, desde el cráter); su diámetro es de ~2.2 km y su altura de 600 m desde su base. Presenta un modelado fluvial evidente, representado por un patrón de drenaje radial centrífugo y en las cabeceras de estos escurrimientos se han desarrollado circos erosivos que en la actualidad no están activos. El cerro Gordo es anterior a las coladas de lava que se asocian al volcán Amalacaxco (perteneciente al complejo Iztaccihuatl), esto se infiere porque sus laderas están cubiertas parcialmente por dichos flujos lávicos.

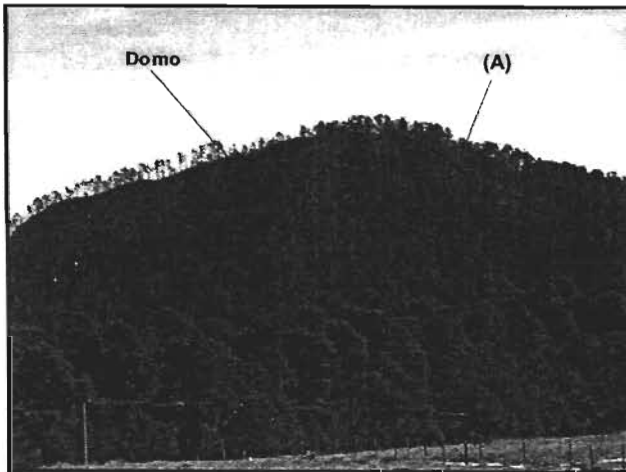


Figura 85. Cerro Gordo; presenta una morfología convexa y en sus laderas se reconocen circos de erosión fluvial inactivos (A). Este rasgo de relieve pone de manifiesto una dinámica que no corresponde con las condiciones climáticas actuales.

1.6 Domos interiores: 1998 y 1999

Con base en la interpretación de fotografías aéreas de 1999, en el interior del cráter principal, se reconocieron dos estructuras dómicas de composición andesítica-dacítica, originadas durante los períodos efusivos del Popocatepetl.

La primera de ellas representa el relicto de un domo que se emplazó a finales de 1998 (Domo 7: Cap. II. Pag. 62), que debido a las explosiones que acompañaron la evolución de dicha estructura, perdió su forma convexa y adoptó una morfología en media luna. Estaba parcialmente sepultado por piroclastos recientes y por detritos que se desprendían de las laderas interiores del cráter (coluviones). Las laderas de dicha estructura tenían una inclinación de ~30° y una altura que alcanzaba los 50 m. Su diámetro fue de 400 m y el área que llegó a ocupar en el interior del cráter fue de 38,521m².

A principios de marzo de 1999 comienza el emplazamiento de la segunda en el interior de la que ya existía (Domo 8: Cap. II. Pag. 64). La nueva forma de relieve tuvo una morfología a manera de “botón simple” (Reffay, A, 1982), sin embargo, fue más pequeña que la anterior, su diámetro era de 200 m, alcanzó una altura de 40 m y cubrió un área de 22,509 m².

1.7 Bocas eruptivas

Se identificaron cuatro, todas ellas se encuentran en la ladera noreste, entre los 3700 y 4120 msnm. Su orientación (NE-SW) sugiere la existencia de una falla que corta al Popocatépetl en esta misma dirección, y que se continúa por el flanco SW. En este sector se observa un claro alineamiento de volcanes con diferentes características morfológicas (incisos: 1.2, 1.3 y 1.4), que ponen en evidencia la continuidad de la estructura disyuntiva.

La longitud total de las cuatro bocas es de 1.6 km, la anchura en promedio es de 0.5 km, la profundidad es homogénea (120 m) y el área que ocupan es de 0.3 km².

De acuerdo con Robin y Boudal (1987) estos conductos adventicios pueden corresponder a la segunda fase efusiva del volcán El Fraile, en la cual se emplazaron flujos de lava de tipo andesítico, que ocuparon el sector oriental hasta llegar a las cercanías del actual poblado de Santiago Xalitzintla.

La actividad reciente del Popocatépetl ha manteado la superficie del cono con una gran variedad de depósitos piroclásticos. No obstante es posible reconocer los rasgos morfológicos primarios de las bocas volcánicas: fondos, atrios y bordes de los cuatro cráteres.

1.8 Diques

La ladera sur de la cañada Nexpayantla es el sector donde se reconocen 8 de estas estructuras; su expresión morfológica es de crestas rocosas laminares, la

mayor de ellas alcanza los 260 m de longitud y una anchura hasta de 50 m (Fig. 86).



Figura 86. Crestas rocosas laminares (diques) sobre la ladera sur de la cañada Nexpayantla. Este sector corresponde al relicto de la caldera Yolochochitl, erosionado casi en su totalidad por la actividad glacial.

Los diques están dispuestos en un arreglo paralelo que se asocia a la existencia de una antigua caldera (Yolochochitl: inciso 2.3), que fue desmantelada por la actividad glacial ocurrida en el Cuaternario, en la actualidad es parte de la ladera sur de la cañada Nexpayantla.

1.9 Coladas de lava asociadas a las etapas tempranas del Popocatépetl

Predominan al noroeste y oeste del Popocatépetl y de acuerdo con Robin y Boudal (1987) corresponden a los primeros flujos de lava emitidos por la estructura que denominan volcán *Primitivo* (Cap. III. Inciso 3.2). El espesor de dichas coladas varía entre 10 y 40 m y la composición es andesítica-dacítica.

La morfología de las lavas tempranas en la actualidad corresponde a superficies ligeramente onduladas, que de manera gradual alcanzan los 30 grados de inclinación. Los desniveles topográficos y las superficies irregulares que son características de estas formas se han perdido por potentes acumulaciones de piroclastos, ocurridos en distintas épocas y que han sido expulsados no sólo por el Popocatépetl, sino también ~59 estructuras volcánicas que se reconocen en el área de estudio.

La actividad fluvial es la responsable de la morfología actual de estas lavas, los cauces definen patrones paralelos y subparalelos, los barrancos más profundos llegan a tener hasta 50 m de profundidad y ponen en evidencia las fronteras entre flujos de lava.

1.10 Coladas de lava asociadas al volcán Iztaccíhuatl

Se ubican en el extremo norte y noreste de la zona de estudio, de acuerdo con Mooser *et al.* (1996) estas coladas tienen una composición andesítica-dacítica y corresponden a las etapas efusivas más recientes del Iztaccíhuatl. De manera particular, se asocian al volcán Amalacaxco de edad holocénica.

La erosión fluvial, también glaciaria (en el Pleistoceno), modela estas formas de relieve a partir del desarrollo de diseños de drenaje dendríticos y subdendríticos, favorecidos por la existencia de una potente capa de detritos de origen volcánico, que son susceptibles al desarrollo de cárcavas y barrancos.

1.11 Coladas de lava asociadas a distintos focos de emisión

Constituyen el piedemonte volcánico del Popocatepetl. Su origen se debe a la acumulación de coladas de lava (114.5 km²) que han llegado a superficie a partir de diferentes focos de emisión, los cuales son heterogéneos en cuanto a su composición, tipo y edad. Estas condiciones tienen reflejo en la compleja morfología presente en las lavas. Esta rampa volcánica rodea por completo el cono principal entre los 3600 y los 2560 msnm.

Se puede observar en el mapa geomorfológico que la longitud de las lavas es heterogénea, este factor es determinado por la tasa de emisión, viscosidad y temperatura de los flujos lávicos, así como por el relieve preexistente, al cual sepultan. De algunas de ellas se puede inferir su edad relativa, de acuerdo a su morfología y posición altitudinal. En este marco se presentan dos ejemplos:

Se trata de un flujo de lava que no pertenece al Popocatepetl, se localiza en el extremo NE y forma parte del área de estudio. Su origen se vincula a una debilidad cortical que fracturó la corteza y favoreció el ascenso de magma poco viscoso a la superficie, estas características no favorecieron el desarrollo de un cono. La fisura tiene una orientación N-S y alcanza los 0.5 km de longitud. La emanación de lava tuvo una dirección preferencial hacia el oriente y bordea todo el flanco sur del Cerro Gordo; su longitud es de 3.7 km, su anchura es de 750 m y presenta una superficie rugosa y ondulada, cubierta por un incipiente manto de detritos piroclásticos, no obstante, la morfología es clara incluso es posible distinguir efímeras estructuras primarias a manera de *levées*. Nixon (1989) la identifica como "dacita Buenavista".

Como segundo ejemplo se tienen las que ocupan el sector SSW de la zona de estudio, que cubren los depósitos de avalancha emplazados hace 23 000 años a.C; como resultado del colapso del edificio del volcán Nexpayantla (Siebe *et al.*, 1995). Las lavas a las que se hace referencia son anteriores al evento mencionado.

En la actualidad el piedemonte volcánico es modelado por la acción fluvial, que se reconoce por el desarrollo de configuraciones de drenaje subparalelas-subdendríticas. Los cauces principales se desarrollan entre las fronteras de las coladas de lava y tienen una acción remontante importante, esto se puede afirmar por la existencia de numerosos saltos de cabecera.

1.12 Coladas de lava recientes asociadas al Popocatepetl

Se distribuyen en todos los flancos del edificio principal, excepto el sector NW. La composición es dacítica-andesítica y desde el punto de vista geomorfológico, constituyen el piedemonte volcánico más reciente de la zona de estudio, su edad está determinada entre los 3800 y 1200 años a.C. (Robin y Boudal, 1987), el área que ocupan es de 47.0 km².

El ángulo de inclinación promedio de los flujos de lava es de 40 grados, esto sugiere que dichas coladas son recientes. Los procesos glaciares y

periglaciares han dejado su huella. Los primeros tienen relación con el último evento frío ocurrido en el Cuaternario, se reconoce por la presencia de morrenas en la superficie de algunas de estas estructuras. Cabe resaltar que esta característica no es constante. En la actualidad los procesos periglaciares son los que predominan y se reconocen por la presencia de mantos de gelifracción, cuñas de hielo y suelos poligonales. Desafortunadamente, la escala de trabajo (1:25 000) no permite la representación de las formas de relieve asociadas a los procesos mencionados, no obstante, es necesario mencionarlas como evidencias que observamos en el trabajo de campo (Fig. 87).

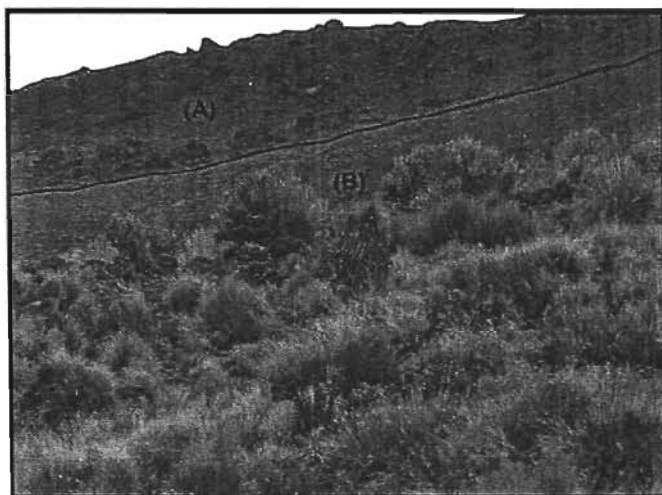


Figura 87. Colada de lava reciente asociada al Popocatépetl, representa la morfología característica de la ladera NE (A); existe una cubierta piroclástica, producto de la actividad reciente del volcán, más evidente en sus flancos (B).

El modelado que predomina en las coladas de lava del Popocatépetl, es periglaciario y fluvial. Del primero en el párrafo anterior se mencionaron las formas asociadas; el segundo, se reconoce por la existencia de un drenaje radial que se desarrolla entre las fronteras de los flujos de lava. Si bien en algunos casos llegan a existir configuraciones subdendríticas, se debe a la presencia de una potente cobertura piroclástica relacionada con la actividad actual y que mantiene las formas en cuestión.

Depósitos de avalanchas de escombros y relieves asociados:

Las avalanchas de escombros se originan por el colapso de un sector del edificio volcánico, en el que intervienen distintos mecanismos, los más importantes son los magmáticos y tectónicos.

El origen de los depósitos de avalancha de escombros, reconocidos en la zona de estudio, corresponden a por lo menos tres colapsos de edificios volcánicos pre-Popocatépetl, al parecer de tipo Santa Elena. Dichos eventos se emplazaron hacia el sur, con un alcance máximo de 75 km, una cobertura de 600 km² y un volumen total de 27 km³. El último de los depósitos registra una edad de 23,445 ± 210 años a.C. (Siebe *et al.*, 1995).

Estos eventos originaron un relieve irregular, a manera de lomas (*hummocks*), algunos de ellos son de grandes dimensiones como los tipo torevá (Mapa anexo: inciso 1.13). De acuerdo con Wyk *et al.*, (2001), se trata de estructuras que pueden alcanzar hasta 500 m de altura relativa y presentar escarpes de 30 a 40 grados de inclinación.

Se localizan en el extremo S-SW de la zona de estudio, el área que cubren es de 30 km², su expresión es de bloques alargados y cónicos. En el primer caso, alcanzan los 250 m de altura, una longitud de 3.7 km y los limitan escarpes de 40 grados de inclinación. La dirección general de la avalancha (N-S), concuerda con la orientación del eje mayor o longitud máxima de estos relieves.

Las geometrías cónicas desarrollan un patrón de drenaje radial centrífugo y en algunos casos desarrollan numerosos circos erosivos, estos procesos son los responsables del modelado actual. El diámetro promedio de la base de estas estructuras es de 1.6 km y alcanzan los 500 m de altura medidos desde su base. La figura 88 muestra un ejemplo de este tipo de morfología que forman parte de la barranca Hueyetlaquixtle.

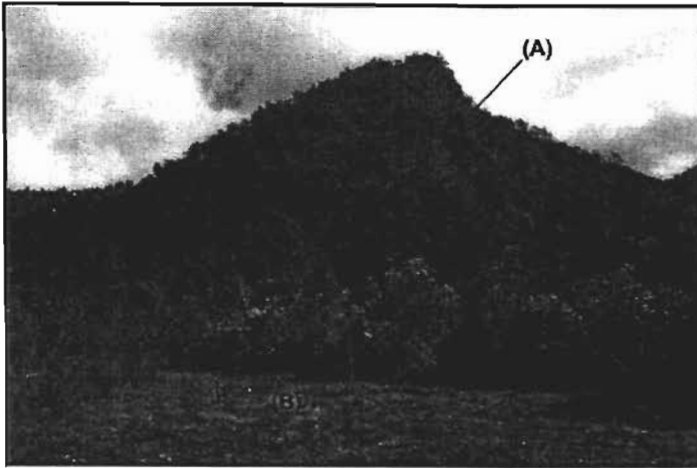


Figura 88. Estructura tipo toreva con morfología cónica (A), forman parte del relieve que define la cuenca de la barranca Hueyetlaquixtle. Se observa en primer plano un llano intermonticula (B), estas superficies son frecuentes entre dichos depósitos.

Los procesos gravitacionales (deslizamientos de tierras) son frecuentes en estos relieves; su ocurrencia puede estar relacionada con una heterogénea consolidación de los detritos volcánicos, que aunado a la presencia de pendientes abruptas y una humedad favorable, favorecen el colapso. Hay que mencionar que en conjunto, los procesos de remoción en masa se alinean siguiendo una dirección SW-NE (ver mapa anexo), esto hace pensar que en su génesis las estructuras disyuntivas juegan un papel determinante.

Existen dos formas asociadas a los bloques toreva: laderas y rampas que forman parte de avalancha de escombros (Mapa anexo: incisos 1.14 y 1.15 respectivamente). Estos relieves son considerados como de transición y corresponden a los depósitos que no llegaron a constituir una forma definida. Cabe mencionar que ambas poseen una génesis acumulativa-volcánica, es decir, no tienen que ver con procesos deposicionales de tipo fluvial-gravitacional.

Los procesos de modelado son los mismos que en el rubro anterior, las condiciones de ocurrencia son similares en lo que se refiere a los procesos de ladera. La diferencia que existe es en cuanto al diseño fluvial, que en las laderas y rampas adopta configuraciones subdendríticas.

Formas asociadas al relieve volcánico

1.16 Cráter principal: superior e inferior

Se localiza en la porción cumbre del actual Popocatepetl, presenta una forma elíptica, orientada NE-SW. El eje máximo mide 840 m y el mínimo 660 m aproximadamente. Su profundidad varía dependiendo del punto donde se realice la medición y del año. En 1994 era de 460 m, desde el Pico Mayor, y desde el labio inferior era de 230 m.

La morfología del cráter es compleja, se reconocen dos sectores que se denominan superior e inferior (Fig. 89). El primero tiene una forma de media luna, sus paredes rocosas se inclinan 60° en promedio y sobre ellas se suceden continuos procesos de ladera (desprendimientos y colapsos), que han dejado cicatrices de desprendimiento a manera de escalones o gradas.



Figura 89. Vista del sector NE del cráter del Popocatepetl; A) Sector Superior y B) Sector Inferior. (CENAPRED, 2002).

Las laderas que componen el sector inferior del cráter son rectas y presentan una forma de embudo cerrado. Al igual que el sector anterior, es una zona de desprendimientos y caídas.

1.17 Labio de cráter

Se trata de una superficie de recta a ligeramente convexa que se localiza entre las laderas interiores de cráter y las que constituyen el edificio volcánico. Su existencia denota una edad relativa reciente de las estructuras en las cuales se

reconoce; de la misma forma, puede ser asociada a una dinámica eruptiva poco violenta cuando tiene continuidad. Este rasgo distintivo se reconoce en los volcanes Tepeitle, Hualciutepalt, Tlalpizatepetl y uno sin nombre localizado al NW del cráter principal (Fig. 90).

1.18 Levées de flujo de lava

Son crestas rocosas de longitud y anchura variable, su origen se asocia al colapso de túneles de lava o a la diferencia en la velocidad-viscosidad del flujo en sus bordes, son paralelos a la dirección del flujo y pueden llegar a ser continuos. Son característicos de las lavas más recientes, en los flujos asociados al Popocatépetl alcanzan 1.5 km.

1.19 Atrio de cráter (laderas interiores)

Corresponde a la depresión que define propiamente al cráter, puede ser cerrado o abierto, esta característica depende de la dinámica eruptiva.

1.20 Escarpes

En la zona de estudio se presentan como laderas a desplome, de altura variable, su génesis no se asocia a la erosión. En el piedemonte volcánico (Mapa anexo, inciso 1.11 y pag. 114), constituyen la porción terminal o los límites laterales de los flujos de lava (frentes de lava). La altura promedio de estos desniveles es de 35 m.

Los escarpes presentes en los depósitos de avalanchas de escombros (Mapa anexo, incisos 1.13 y 1.14 y pags. 117-118), representan los límites de grandes bloques, que llegan a alcanzar 250 m de altura.

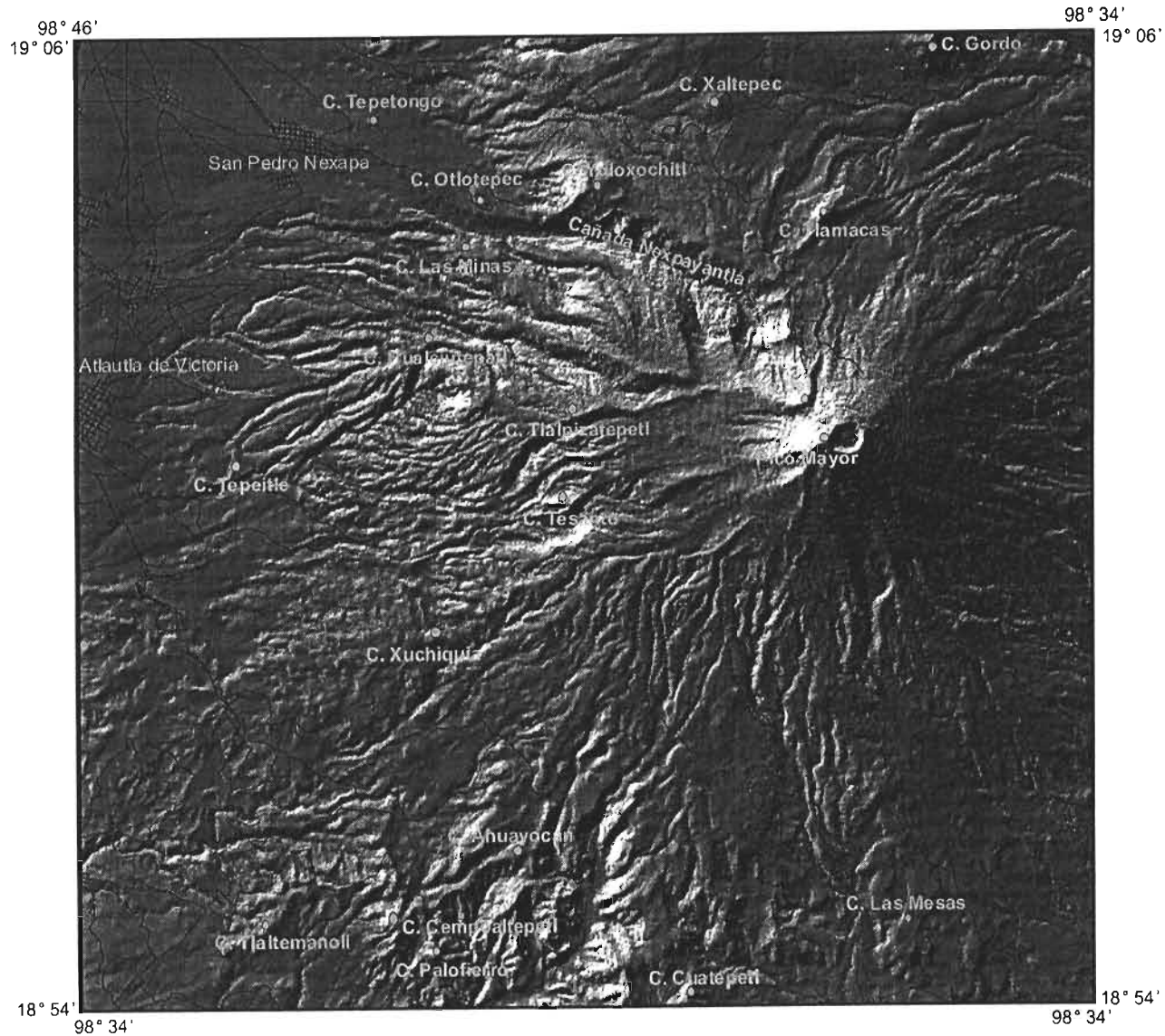


Figura 90. Localización de los rasgos topográficos mencionados a lo largo del presente capítulo.

1.21 Fondo de cráter

Superficies planas ligeramente onduladas que se ubican en el fondo del atrio volcánico, pueden estar rodeadas por completo o bien abiertas en algún sector, su tamaño está en función de la estructura volcánica a la cual se asocia.

1.22 Llanos volcánicos

Depresiones que se forman entre flujos de lava o volcanes, que se rellenan por material piroclástico proveniente de conos adyacentes, son planos, ligeramente inclinados u ondulados. En algunos casos presentan mantos de detritos en su periferia, producto de acarreos fluviales o gravitacionales.

II. RELIEVE ENDÓGENO MODELADO

En esta categoría son incluidos relieves de origen endógeno, que no conservan su morfología original como consecuencia de la acción de los procesos exógenos.

2.1 Relicto del volcán El Fraile

Se localiza al NW del cráter principal, son los relictos de un estratovolcán conocido como El Fraile, destruido por explosiones ocurridas entre los 5000-3500 años a.C; (Robin y Boudal, 1987). El área que ocupa es de 3.8 km², su altitud es de 5000 msnm y presenta una morfología abrupta (pared escalonada), que se conoce como El Abanico (Fig. 91).

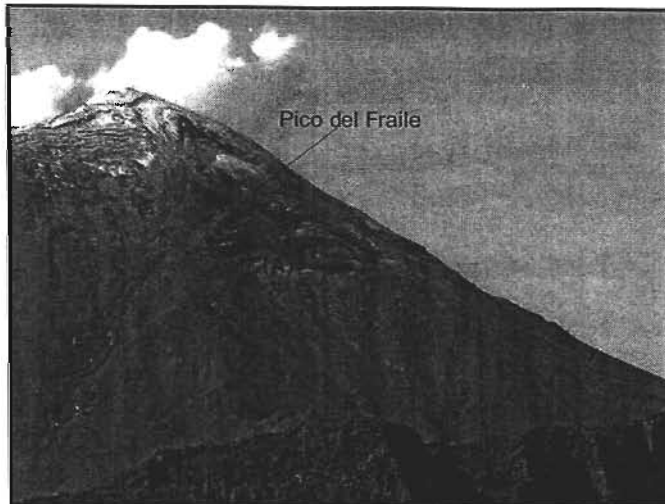


Figura 91. Volcán El Fraile (relicto volcánico). A) Pared rocosa escalonada conocida como El Abanico; su origen corresponde a explosiones volcánicas y su morfología actual es resultado de la acción glaciár ocurrida durante el Cuaternario.

Tanto la actividad volcánica explosiva, como la erosiva glaciár fueron las responsables de modelar un gran anfiteatro, de paredes rocosas abruptas y muy susceptibles a presentar procesos de ladera (desprendimientos), favorecidos por la gelifracción. El Abanico representa la cabecera de la cañada Nexpayantla.

2.2 Volcán erosionado o parcialmente sepultado

Los edificios volcánicos que se incluyen en este apartado suman un total de 27 y la mayoría forma parte del piedemonte volcánico. Esta unidad geomorfológica, ocupa un rango altitudinal que va entre los 2560 y 3600 msnm; es una banda continua que se interrumpe en la ladera NE del Popocatépetl. La pérdida de la morfología original se debe a la acción glaciár y fluvio-glaciár que actuó a lo largo del Cuaternario. Como ejemplo de lo anterior, se tiene al cerro Yoloxochitl (3140 msnm), que se localiza al NW del cráter del Popocatépetl (Fig.92).

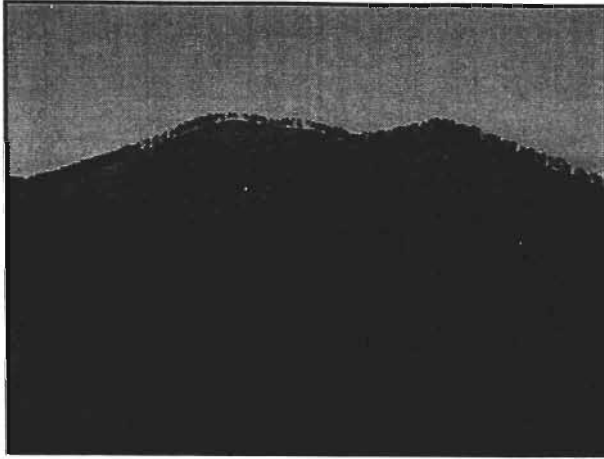


Figura 92. Cerro Yoloxochitl; la morfología volcánica característica se ha suavizado por la acción glacial del Cuaternario.

Los volcanes parcialmente sepultados no forman parte del piedemonte volcánico. Al encontrarse en una posición altitudinal más baja, la acción fluvial y la acumulación de coladas de lava y piroclastos, provenientes de edificios aledaños, han contribuido al enmascaramiento de la morfología original.

2.3 Caldera

Las calderas presentes en la zona de estudio son tres, la más antigua se conoce con el nombre de Yoloxochitl, se localiza al NW del cráter del Popocatepetl (Fig. 90). Corresponde a una estructura alargada y convexa, en ella no es posible reconocer ningún rasgo morfológico que permita asociarla a la forma de una caldera *clásica*. Si bien se clasificó como tal, fue con base en los estudios de Mooser *et al.* (1997) quienes le atribuyen una edad Plioceno-Cuaternario.

La caldera Tlamacas de edad cuaternaria (Mooser *et al.*, op.cit.) se localiza al norte del cráter del Popocatepetl, si bien es un relicto pequeño de forma semicircular, la inclinación, orientación y longitud de sus laderas permite imaginarse su verdadera dimensión. La caldera, en planta, es alargada y presenta un arco muy ligero (eje máximo) que se extiende por 2.5 km de longitud y se orienta hacia el NE-SW. La porción más angosta o anchura (eje mínimo: 750 m) presenta dos geometrías distintas; las laderas exteriores que constituyen propiamente el edificio, son ligeramente convexas y se inclinan

entre 30 y 40 grados, tienen una longitud de 500 m, van ganando altura de manera gradual hasta alcanzar 120 m; medidos desde su base.

Las vertientes interiores, corresponden al cráter de la caldera (Mapa anexo: inciso 2.4); son rectas y definen una pared rocosa de 150 m de altura. En esta superficie fue posible observar diversas nanoformas de origen glaciario, como pulimentos, grupos de estrías, acanaladuras, fracturas de empuje, huellas de arranque y choque. La continuidad del atrio de la caldera se ve interrumpida, en la porción media, por el emplazamiento de un domo de lava (Fig. 93), las características de esta estructura han sido explicadas en el inciso 1.5.

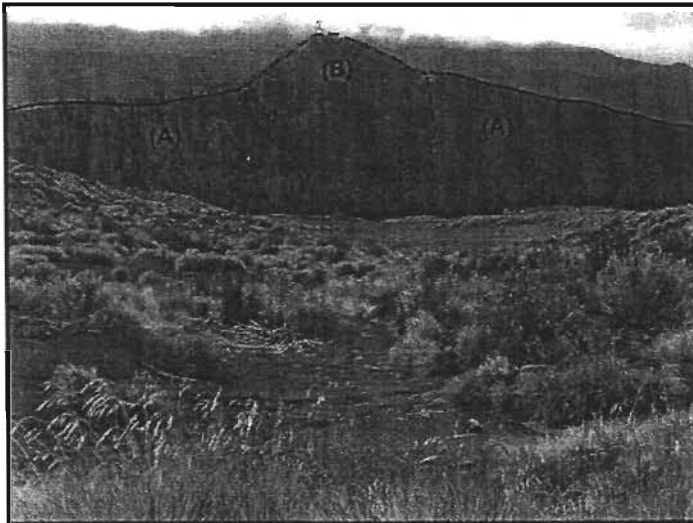


Figura 93. A) Pared rocosa que constituye un relicto del cráter de la caldera Tlamacas; B) Domo de lava con morfología de cúpula.

La caldera Tlachalona de edad cuaternaria (Mooser, *et al.*, op.cit.), se localiza a 5 km al poniente del cráter del Popocatepetl (Fig. 90). Su morfología es similar al ejemplo anterior, las diferencias que existen es en cuanto a las dimensiones. En este caso, el eje máximo es más corto (2.3 km) y tiene una orientación E-W. La anchura de la estructura o eje mínimo es de 1.2 km, más ancho que la de Tlamacas; las laderas exteriores tienen 720 m de anchura. Sus laderas interiores alcanzan los 200 m de altura, representan el atrio de cráter (Mapa anexo: inciso 2.4).

La expresión actual de las tres calderas, es respuesta a una actividad glaciario que fue intensa en tiempos pasados. El apilamiento de lavas y detritos

volcánicos en los flancos de éstas, las han sepultado. Este proceso ha sido continuo, debido a una persistente actividad volcánica ocurrida en distintos tiempos, que incluso ha llegado hasta nuestros días.

Al comparar todas las características morfométricas de las tres calderas, se infiere que la Tlachalone es la estructura más completa, por tanto ha sido la menos desmantelada por la actividad glaciaria. En este marco se interpreta que su ocurrencia pudo haber sido contemporánea con el último evento frío ocurrido a principios del Cuaternario. El fundamento de esta hipótesis es la existencia de una superficie ligeramente convexa en la porción cumbre de la caldera, que se conoce como labio de cráter y que se asocia a estructuras volcánicas recientes.

III. RELIEVE EXÓGENO

En este apartado se agrupan y analizan formas erosivas y acumulativas que son resultado de la acción de los procesos exógenos; el inicio de esta dinámica se conoce como intemperismo o meteorización.

El modelado exógeno en terrenos volcánicos es controlado por la litología, estructura, pendiente y condiciones climáticas locales. En este sentido, los materiales más susceptibles a la erosión son los depósitos piroclásticos poco cementados. Caso contrario sucede con los flujos de lava, en donde la meteorización se desarrolla en las diaclasas de enfriamiento, a partir de la concentración de humedad e infiltración de agua de lluvia.

A. Erosivo fluvial

Las corrientes de agua al fluir sobre la superficie terrestre presentan dinámicas distintas, dependiendo de su ocurrencia estacional o extraordinaria. Las morfologías asociadas, tanto acumulativas como erosivas, son resultado de la dinámica mencionada y se explican a continuación.

3.1 Barrancos

Conjunto de corrientes estacionales o permanentes que deben su presencia a los flujos de agua encausados. Estas formas de relieve se consideran como negativas, debido a que son producto de la destrucción de las rocas que componen la corteza terrestre. Si bien están presentes en toda el área de estudio, su diseño en planta, anchura y profundidad, es distinto. Dichas diferencias dependen de la geometría del relieve, tipo de roca y su competencia para ser erosionada, arreglo de los materiales, existencia de estructuras disyuntivas y edad del relieve. Tomando como punto de partida estos aspectos, fue posible la delimitación de todas las formas de relieve que aparecen en el mapa geomorfológico anexo.

El diseño fluvial en la zona de estudio, se puede generalizar como radial centrífugo, de esta característica es responsable la estructura geológica. Es decir, la disposición y acomodo de los piroclastos, así como la distribución de las numerosas coladas de lava que bordean el cono del Popocatépetl.

Existen otros patrones de drenaje que no tiene un carácter regional como el anterior, su desarrollo depende de formas de relieve específicas y de menores dimensiones. En este marco se identifican las siguientes asociaciones:

- Dicotómico - Abanicos Aluviales. Se observa en el extremo NW de la zona de estudio. Es una variante del tipo radial (semi-radial), en donde el desarrollo de los escurrimientos es a partir de un ápice (Mapa anexo: símbolos complementarios), desde el cual los ríos tributarios se bifurcan en dos y su escurrimiento se va perdiendo en el relleno aluvial (Guerra-Peña, 1980).
- Paralelo y Subparalelo – Lavas Antiguas. Se reconocen al NW y W, su desarrollo se vincula con la existencia de un relieve homogéneo, en el caso que nos ocupa, dicha simplicidad es el resultado de una cubierta potente de detritos de origen volcánico y de acarreos fluviales, que sobreyecen a lavas asociadas a las etapas tempranas del Popocatépetl.

Dichas superficies presentan las mejores condiciones para el desarrollo del diseño paralelo: son largas (hasta de 10 km de longitud) y se inclinan de manera gradual hasta alcanzar los 30°. Las inflexiones que se observan en el diseño general, ponen de manifiesto frentes de lava, que no obstante estar sepultados, controlan la dirección de los escurrimientos río abajo.

El subparalelo es una variante de la anterior y se presenta cuando se pierde la regularidad del relieve (edificios volcánicos y lavas recientes que sobreyacen a las ya mencionadas).

- Dendrítico y Subdendrítico – Depósitos de avalancha de escombros. Ocupa el sector S-SW del área de estudio. Los depósitos de colapso definen un relieve irregular donde se reconocen morfologías de trapecios alargados y semibloques de gran tamaño, que se basculan en distintas direcciones. Estas estructuras se componen de detritos volcánicos heterolitológicos y heterométricos. El depósito es caótico, mal clasificado o poco clasificado. En general, estas condiciones favorecen la erosión fluvial, en particular diseños dendríticos, que aseguran una rápida erosión y una transformación continúa de la morfología del relieve. El drenaje subdendrítico se presenta cuando la morfología de grandes estructuras pierde continuidad, por la alternancia de rampas o la existencia de un ligero control estructural.
- Subparalelo y Subdendrítico - Piedemonte volcánico y lavas recientes. Se trata de depósitos volcánicos distribuidos en todos los flancos del cono del Popocatepetl. Este relieve es heterogéneo, en cuanto a tipos y dimensiones de volcanes y domos, así como a una compleja sobreposición de flujos de lava, que son distintos en morfología, edad y espesores de piroclastos que los cubren. Estas son las condiciones que favorecen la existencia de un drenaje con configuración subparalela. Los subdendríticos no presentan una continuidad, debido a que su desarrollo es controlado por potentes capas de piroclastos y cambios en el gradiente de inclinación del terreno, en distancias cortas.

- Radial Centrífugo – Cono del Popocatépetl. Representa uno de los ejemplos más claros de asociación entre forma y drenaje. El cono truncado del volcán controla los escurrimientos por las laderas, dispersándolos a partir de un punto central elevado desde el cráter. Los cauces involucrados en este diseño son profundos y no desarrollan afluentes, en esto tiene que ver la inclinación de las laderas (40°-45°) y la competencia del material a la erosión, piroclastos poco consolidados.

El análisis del diseño fluvial fue necesario para el reconocimiento y caracterización del relieve que se estudia, a partir de grandes conjuntos. A mayor detalle, observamos que los escurrimientos fungían como fronteras entre formas de relieve (Fig. 94), como los que se denominan de contacto geomorfológico (Mapa anexo, inciso 3.2).

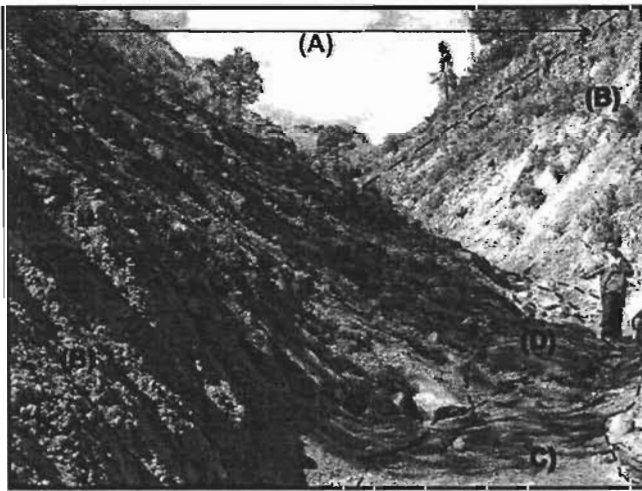


Figura 94. La barranca Huiloac se desarrolla entre dos coladas de lava emplazadas en distintos tiempos. Es un claro ejemplo de lo que se denomina valle de contacto geomorfológico; los elementos que lo componen son: A) morfología en "V", B) Laderas. C) cauce y D) terraza baja.

3.4 Circo de erosión activo

Superficies cóncavas a manera de anfiteatro, generalmente se desarrollan en la cabecera de los escurrimientos y funcionan como una zona de captura de aguas pluviales. Su desarrollo depende del tipo de roca, inclinación, altitud y orientación (retención de humedad-insolación) del relieve que los soporta. Las estructuras disyuntivas y la existencia de una cubierta vegetal también influyen

en su ocurrencia. Tomando en cuenta este último aspecto, ha sido posible diferenciar entre activos e inactivos (Mapa anexo, incisos 3.4 y 3.5 respectivamente).

En el primer caso, el proceso fluvial llega a ser tan intenso que hay una remoción continua de materiales, a partir de numerosos saltos de cabecera que integran continuamente áreas nuevas. Esta dinámica no permite el desarrollo de vegetación, que de alguna manera haga menos susceptibles a estos territorios. Esta situación, aunada a las fuertes pendientes, llega a favorecer los procesos gravitacionales.

Los circos de erosión inactivos indican una estabilidad entre la inclinación del terreno y los materiales, al disminuir el primer factor la erosión potencial de los escurrimientos fluviales se atenúa, a tal grado que favorece el crecimiento de una carpeta vegetal que cada vez va suavizando la actividad fluvial e incluso gravitacional.

B. Acumulativo fluvial

Formas de relieve creadas por la deposición de sedimentos, como respuesta a la pérdida de la capacidad de sustentación.

3.6 Abanicos aluviales

Son formas de transición entre el relieve de montaña y las planicies. En el NW de la zona de estudio corresponde al fin del piedemonte volcánico (asociado al Popocatepetl), y al inicio de las superficies lacustres que constituyen la porción más deprimida de la Cuenca de México. El origen de los abanicos aluviales es complejo, se vincula con fases de acumulación-erosión (volcánico explosivo; glaciar; fluvial-glaciar y fluvial), que rebasan la época actual.

La etapa más temprana en la formación de los abanicos, se liga con una actividad volcánica explosiva que ocurre en el antiguo volcán el Fraile. Este

evento genera una depresión (cabecera de la barranca Nexpayantla), que fue transformada por la acumulación glaciaria, en una cuenca de neviza. La acción glaciaria y volcánica explosiva, aportaron los primeros detritos, que en la actualidad corresponden a las deposiciones más antiguas de los abanicos aluviales.

En el transcurso de los períodos fríos, que duraron hasta el inicio del Holoceno, la barranca Nexpayantla fue excavada por la acción glaciaria (glaciares de valle). Esta dinámica generó grandes volúmenes de detritos, que quedaron depositados en el fondo de la cañada.

La acción fluvio-glaciaria y fluvial, se fueron haciendo presentes conforme el clima fue cambiando a condiciones más cálidas. A partir de estos dos agentes, los depósitos glaciares fueron acarreados hasta la actual posición que tienen los abanicos. Hay que mencionar que estas estructuras son el resultado de los eventos mencionados, lo que ha dado como resultado diferentes generaciones y al mismo tiempo una yuxtaposición de conos aluviales.

Los abanicos aluviales presentan una geometría convexa muy efímera, que en campo puede llegarse a confundir con planicies, en las cercanías del poblado de Amecameca. También adoptan una forma de rampa ondulada y ligeramente inclinada (8° - 10°) en las inmediaciones del pueblo de San Pedro Nexapa. La estructura completa y la morfología característica, sólo es posible distinguirla en fotografías aéreas. La distancia que existe entre el ápice y el extremo NW del mapa geomorfológico, es de 5.7 km. Hay que mencionar que el dato no corresponde a la porción distal del abanico; éste se localiza fuera del área de estudio.

3.7 Lecho de fondo plano

En la zona se reconocen dos relieves de este tipo, el primero se localiza al NW del Popocatepetl y corresponde a la porción más deprimida de la cañada Nexpayantla. Su morfología es de plana a ligeramente inclinada (6°), el lecho

está constituido por acarreos fluviales y por acumulación de mantos piroclásticos recientes.

El tipo de depósito y la morfología es similar en el valle Hueyetlaquixtle, que desmembra la continuidad de los depósitos de avalancha que se localizan en el extremo sur de la zona de estudio.

3.8 Terraza

Las terrazas se localizan entre las laderas fluviales y los lechos (de fondo plano), exclusivos de las cañadas Nexpayantla y Alseseca. Las terrazas representan antiguos lechos fluviales que han sido abandonados en una posición altitudinal superior al nivel actual del río.

Las terrazas no se pueden explicar por condiciones climáticas actuales. Se sugieren las siguientes posibilidades:

- un cambio de nivel de base, ocurrido por la obstrucción de valles a partir del emplazamiento de coladas de lava. Estos eventos se relacionan con el origen de la cuenca de México.
- fluctuaciones muy marcadas del nivel lacustre: migración en la vertical del nivel de base local.
- aumento del volumen de agua de escurrimiento, resultado de un cambio climático y el consecuente deshielo de la masa glaciaria; o liberación extraordinaria de agua de deshielo como resultado de la caída de piroclastos incandescentes sobre la superficie glaciaria.

Alguna de estas hipótesis puede ser válida para la explicación de las terrazas fluviales, pero no podemos determinar cuál es la correcta. Hay que mencionar que las de mayor dimensión se ubican en la cañada Nexpayantla, tienen una longitud de 2.2 km y una anchura de 250 m.

C. Erosivo gravitacional

Se entiende como un desplazamiento de rocas y detritos que se produce sobre una ladera. El material involucrado pasa de una posición altitudinal alta a una baja, este movimiento se presenta con o sin superficie de deslizamiento.

Los desprendimientos y los deslizamientos de tierras son los procesos gravitacionales característicos. El primero está presente en todas las laderas rocosas que se localizan al W, entre los 4600 y 5300 msnm del edificio principal. Los deslizamientos de tierras se desarrollan en los relieves asociados a las avalanchas de escombros (extremo sur de la zona) y en la cabecera de la cañada Nexpayantla (NW del Popocatépetl). En ambos casos están representadas las coronas de desprendimiento y de deslizamiento.

3.9 Coronas de desprendimiento

Representan el escarpe principal, donde el material se ha desprendido por caída libre, su morfología varía de herradura a formas en arco muy amplias. Las dimensiones son heterogéneas, la corona más amplia tiene 500 m de longitud, medidos desde los extremos de la curvatura, y la menor de ellas es de 100 m; en este rango se encuentran las restantes (Fig. 95).



Figura 95. Coronas de desprendimiento. A partir de estos puntos se favorece la caída libre de material rocoso. A) Porción del cono que se conoce como *La Herradura*, localizada en el flanco NW.

El intemperismo juega un papel determinante en el mecanismo de ocurrencia de esta forma de relieve. La gelifracción es el agente que prepara el sustrato; la actividad volcánica, a partir de vibraciones asociadas al mecanismo eruptivo, es un catalizador en el desprendimiento de las rocas (caída libre). La ausencia de depósito asociado fundamenta esta hipótesis. Si las caídas suceden al mismo tiempo que la expulsión de piroclastos, los primeros quedan sepultados.

3.10 Coronas de deslizamiento

Sus dimensiones y morfología son variadas, ya que dependen del volumen desprendido y la dirección del flujo. Su origen se debe al desprendimiento de roca y suelo poco consolidado, que por gravedad caen ladera abajo. En planta son semicirculares y su anchura (de extremo a extremo) varía entre 250 m a 1km, las más desarrolladas se localizan en los depósitos de las avalanchas volcánicas y se disponen con una orientación SW-NE y N-S; este lineamiento sugiere una relación con las principales estructuras disyuntivas presentes en la zona de estudio. Hay que mencionar que este comportamiento se repite en las coronas localizadas en la cañada Nexpayantla, en este caso la orientación es SE-NW.

3.11 Plano de deslizamiento

Representa la superficie de contacto visible entre el material desplazado (depósito) y el escarpe que constituye la corona. Su morfología es cóncava a manera de *cuchara*, resultado del movimiento, ladera abajo, de bloques y detritos; la inclinación de esta superficie varía entre 30° y 40°. Esta forma de relieve está ligada al inciso 3.10.

D. Acumulativo gravitacional

Es el material desplazado que descansa sobre la superficie, en la zona de estudio se reconocieron dos tipos de acumulaciones. La primera, de morfología convexa, se asocia a los incisos 3.10 y 3.11; la segunda, se dispone a manera

de una rampa continua que descansa en las laderas interiores del cráter del Popocatépetl.

3.12 Depósito de deslizamiento

La morfología tiende a ser lobular en todos los casos, se componen de bloques y detritos mal clasificados, heterométricos, con una madurez textural que varía de angular a sub-angular. La longitud de los lóbulos oscila de 250 m a 850 m, en algunos casos no han tenido gran extensión por la presencia de un obstáculo (cercanía de la ladera opuesta al deslizamiento); en otros, al localizarse cerca de los cauces, su volumen ha sido mermado por el acarreo fluvial.

3.13 Rampa coluvial (interior del cráter del Popocatépetl)

Su origen se asocia al desprendimiento de rocas provenientes de las paredes interiores del cráter. El proceso que favoreció su desarrollo, en un inicio fue la gelifracción. Con la reactivación de la actividad volcánica en diciembre de 1994, las explosiones han tenido mayor importancia en los aportes y desarrollo del depósito coluvial (debilitamiento de las laderas). Hay que mencionar que la representación que aparece en el mapa correspondiente es de 1999 y que de ese año a la fecha han ocurrido cambios sustanciales (Fig. 96).

No hay que olvidar que la actividad contemporánea del Popocatépetl, se ha caracterizado por una dinámica de construcción y destrucción de domos, en el interior del cráter. Este proceso ha sepultado de manera paulatina esta forma de relieve, en la actualidad prácticamente ha desaparecido, ya que se integra de forma gradual al fondo cambiante del cráter.

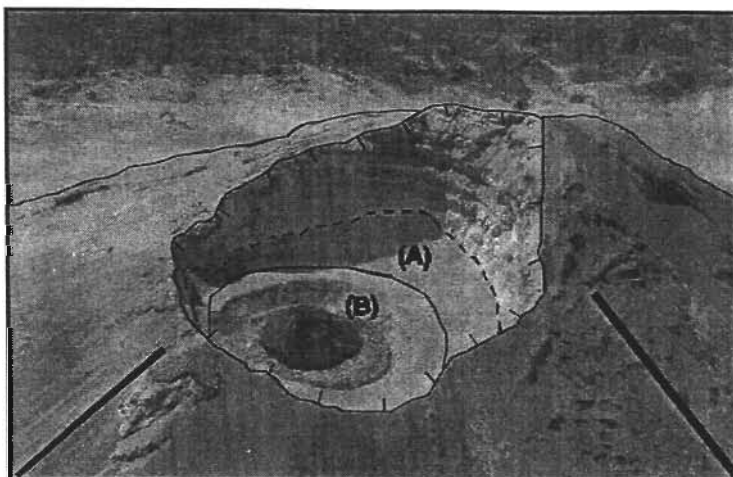


Figura 96. Aspecto del cráter del Popocatepetl en 2001. A) Rampa coluvial, presenta un mayor desarrollo al pie del Pico Mayor, conforme va bordeando las laderas interiores del cráter pierde altura. B) Relicto del 15 y emplazamiento del domo 16 (Cap.2: inciso 2.9) (CENAPRED, 2001).

E. Erosivo glacial

Está representado por la destrucción de rocas debido a la acción glacial. En este sentido sólo se hace referencia a los receptáculos del hielo que estuvieron ocupados hasta el Cuaternario.

3.14 Circos glaciares

La cañada de Nexpayantla es un claro ejemplo de este inciso, en ella se observa un gran anfiteatro (circo glacial) que tiene continuidad hacia una altitud menor a los 3000 msnm, lo que en un pasado era un valle glacial.

Cabe mencionar que existen otras formas asociadas a la dinámica erosiva glacial, se trata de laderas que muestran procesos de exaración ocasionados por el paso de masas de hielo, definen crestas rocosas donde es posible reconocer arranques, pulidos, estriás y acanaladuras. A partir de estos relieves no es posible definir receptáculos glaciares debido a que se presentan discontinuas por estar cubiertas por lavas y piroclastos o por haber sido desmanteladas por la acción fluvial.

Formas asociadas al relieve glaciar

3.15 Superficie glaciar (1999)

Dentro de los procesos modeladores del relieve, los más agresivos son los glaciares; se deben al hielo que se acumula por varios períodos largos. Este proceso ocurre en regiones tropicales de gran altitud y donde la temperatura es baja, como ocurre en la ladera noreste del Popocatepetl.

La representación cartográfica obedece a los límites del glaciar que existía al iniciar 1999 (0.4 km²); en marzo de ese mismo año, se incrementó la intensidad y frecuencia de las explosiones, lo que afectó la superficie glaciar. Este hecho generó pequeños *lahares* a finales de mayo. Para esta fecha la longitud de las lenguas disminuyó en 34 m la del Ventorrillo; en 22 m la Herradura y en 11 m la de Tezcalco (Tanarro *et al.*, 2004). Antes de 1999, la superficie del glaciar no había experimentado cambios tan contrastantes como los fue experimentando, mismos que en la actualidad lo han llevado casi a su destrucción (Fig. 97).

La actividad volcánica iniciada en 1994, sin duda ha sido la responsable de la disminución de la superficie de hielo localizada en la ladera NE. La emisión y exhalación de cenizas, fragmentos incandescentes y flujos piroclásticos que cayeron sobre el glaciar, ocasionaron varias veces la fusión repentina de su superficie y la consecuente formación de *lahares*.



Figura 97. Morfología en gradería de la superficie glaciaria a principios de marzo de 2004.

Símbolos complementarios

Contacto diferido. Representa el límite o frontera aproximada entre unidades geomorfológicas que no son claramente definidas.

Contactos reales. Corresponden a los límites bien definidos entre formas de relieve.

Ápice de abanico aluvial. Punto de fuga donde inicia la bifurcación de una red de drenaje dicotómica característica de los abanicos aluviales.

Nivel altitudinal relativo entre lavas. Indica la posición altitudinal relativa entre coladas de lava. De esta manera, se puede llegar a inferir la edad relativa de las estructuras, así como secuencias eruptivas asociadas a distintos focos de emisión.

Consideraciones finales

El análisis geomorfológico de la zona de estudio sugiere un relieve variado y complejo, como parte de los procesos endógenos que han ocurrido en las distintas etapas eruptivas del Popocatepetl, que junto con la influencia de los procesos modeladores (exógenos) hacen de este territorio una extensa gama de formas de relieve que fueron clasificados y representados con un criterio morfogenético.

El mapa geomorfológico y su explicación fueron el objetivo de este capítulo. La cartografía no solamente es un inventario de los relieves que existen en los terrenos adyacentes al Popocatepetl. Además, representa la distribución espacial de los mismos, por consiguiente la arquitectura del relieve. El conocimiento de los aspectos, tiene utilidad en la actualización de los criterios usados para la prevención y mitigación de los peligros volcánicos.

Conclusiones

La revisión histórica (1345 - 1938), no permitió establecer la totalidad de los períodos eruptivos del Popocatepetl a lo largo de este tiempo. Si bien se trabajó de manera exhaustiva no fue posible contar con suficientes datos para establecer ciclos en la actividad del volcán. Entre las causas que no permitieron contar con registros fueron, sin duda, los conflictos bélicos, enfermedades masivas asociadas a desastres naturales. En los tiempos en los que se sucedieron los eventos mencionados, las personas o grupo de personas que podrían relatar o hacer una crónica referente a la actividad volcánica, tenían su atención en otras necesidades. No obstante, se logra una visión general que sirve de complemento en el entendimiento de la dinámica actual del volcán.

Un aporte de este análisis fue el poder establecer una dinámica eruptiva (construcción y destrucción de domos) muy parecida a la actual, pero que ocurrió entre 1919 y 1938. En este período se determinaron 11 estructuras, seguramente el número fue mayor, si comparamos que entre 1996 y 2003 existieron un total aproximado de 25. De esta manera la existencia de un solo domo y su evolución, continúa durante 19 años, documentada por Gerardo Murillo *Dr. Atl*, no es posible.

El estudio de la actividad y la consecuente generación de columnas eruptivas, realizado por un período de diez años (1993 - 2003), permitió establecer cuatro fases en la actividad del Popocatepetl y son las siguientes:

- Reactivación (1993-1994), caracterizada por un menor número de explosiones, pero de una intensidad considerable. Las columnas eruptivas lograron una altura superior a los 3 km sobre el cráter. Una de ellas llegó a superar los 8 km.
- Inicio (1995-1997), de manera paulatina se incrementó la frecuencia e intensidad en las explosiones y columnas piroclásticas (hasta de 5 km, sobre el cráter). Tuvieron desarrollo 6 domos como respuesta a la dinámica

violenta de construcción y destrucción, que se llevó a cabo en el interior del cráter. Este fenómeno generó expulsión de volúmenes importantes de piroclastos incandescentes, que cayeron sobre la superficie del glaciar, modificaron su área y generaron el primer *lahar*.

- Máxima actividad (1998-2001), se registraron 602 eventos explosivos, la mayoría de ellos generaron columnas por arriba de los 2 km de altura. El emplazamiento de domos continuó acompañado por explosiones que los destruían, un total de diez. En este período se presentan las modificaciones más severas en la superficie del glaciar, que lo llevan a un decremento de su volumen, debido a la caída de piroclastos incandescentes y al emplazamiento de flujos piroclásticos que lo funden y generan *lahares* que llegaron hasta el poblado de Santiago Xalitzintla.
- Decremento (2002-2003), las explosiones disminuyen en frecuencia e intensidad; si bien hay un registro de 88, no son comparables en magnitud con las ocurridas anteriormente, la mayoría de ellas no generaron columnas eruptivas; esta dinámica acompañó al emplazamiento de un total de cinco domos. De acuerdo con nuestras observaciones, estos fenómenos tuvieron una afectación severa en la superficie del glaciar. Los piroclastos no tuvieron tiempo para perder temperatura, directamente cayeron sobre la superficie helada, ocasionando la fusión de importantes masas de hielo, lo que generó un gran número de *lahares* de corta duración y poco alcance.

En el análisis morfogenético se integra la información geológica y tectónica. El arreglo de las formas de relieve se expresa en el mapa geomorfológico del volcán Popocatepetl y zonas adyacentes. Su representación coherente, estructurada y la existencia de límites precisos, favorecen el entendimiento de las condiciones volcánicas de la región. Dicho documento y su explicación, es el principal aporte de esta investigación.

La clasificación del relieve utilizada, permitió identificar, explicar y representar la alternancia entre relieves volcánicos antiguos y recientes; no obstante la heterogeneidad de los materiales. También fue posible reconocer estilos

efusivos y explosivos, a partir de rasgos morfológicos. La tipología que se propone es resultado de la homologación de criterios antecedentes publicados en revistas y textos especializados, así como del análisis interpretativo del relieve en función de la génesis, morfología, edad relativa y dinámica (procesos). Lo anterior representa otro aporte de este estudio.

Bibliografía

- Aguilera, J. G. y Ordóñez, E. (1896-97). *Las fumarolas del Popocatepetl*. Memorias de la Sociedad Científica, Antonio Alzate. Tomo X-24, pp.185-188.
- Araña, V. y López, J. (1974). *Volcanismo. Dinámica y petrología de sus productos*. Ediciones Istmo. Colegio Universitario, Madrid. 481p.
- Armienta, M.A; Martin Del Pozzo, A.L; Espinasa, R; Cruz, O; Ceniceros, N; Aguayo, A. y Butrino, M.A. (1998). Geochemistry of ash leachates during the 1994-1996 activity of Popocatepetl volcano. *Applied Geochemistry*, vol. 13, no.7;p. 841-850.
- Armienta, M.A; De la Cruz-Reyna, S. y Macías, J.L. (2000). Chemical characteristics of the crater lakes of Popocatepetl, El Chichón y Nevado de Toluca volcanoes, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 97: 105-125.
- Banks, N; Tilling, R; Harlow, D y Ewert, J. (1993). Vigilancia volcánica y pronóstico a corto plazo; en: Los peligros volcánicos. Co-organizadores Tilling, R. y Punongbayan, R. Publicado por la Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos. pp. 51-82.
- Bashenina, B. (1977). *Cartografía Geomorfológica*, Ed. Educación Superior, Moscú, URSS. 375 p (en ruso).
- Bloom, A. (1978). *Geomorphology. A Systematic of Late Cenozoic Landforms*. Editorial Prentice-Hall. 510 p.
- Bocco, G. (1980). Algunos comentarios sobre geomorfología volcánica y procesos de erosión antrópica. *Geografía y desarrollo*, Vol. III. p. 15-43.
- Boudal, C. y Robin, C. (1989). *Volcan Popocatepetl: Recent eruptive history and potencial hazards and risks in future eruptions*. IAVCEI, Berlin. p. 110-128.
- Camacho, H. (1922). *Resultados de la visita al cráter del Popocatepetl el 9 de marzo de 1922*. Anales del Instituto Geológico de México. Tomo II, No. 1,2 y 3. p. 64-67.

- Cantagrel, J.M; Gourgaud, A. y Robin, C. (1984). Repetitive Mixing Events and Holocene Pyroclastic Activity at Pico de Orizaba and Popocatepetl (Mexico). *Bulletin Volcanologique*, Vol. 47, N.4 (1); p 735-748.
- Capra, L; Macías, J.L; Scott, K.M; Abrams, M; Garduño, V.H. (2002). Debris avalanches and debris flows transformed from collapses in the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico-behavior, and implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2362: 1-30.
- Capra, L; Poblete, M.A. y Alvarado, R. (2004). The 1997 and 2001 lahars of Popocatepetl volcano (Central Mexico): textural and sedimentological constraints on their origin and hazards. *Journal of volcanology and geothermal research*. 131: 351-369.
- Carrasco, G. (1985). Estudio geológico del volcán Popocatepetl. Tesis profesional, Facultad de Ingeniería. UNAM. 138 p.
- CEANPRED (1995-2003). "Monitoreo volcánico"; <http://www.cenapred.unam.mx>.
- Coque, R. (1984). Geomorfología. Editorial Alianza; Madrid, España. Pp. 477.
- Cruz-Reyna, S; Quezada, J. L; Peña, C; Zepeda, O. y Sánchez, T. (1995). *Historia de la actividad reciente del Popocatepetl (1354-1995)*, en Volcán Popocatepetl. Estudios realizados durante la crisis de 1994-1995. CENAPRED/UNAM; México, 1996. p. 3-22.
- Delgado, H. (1996). Los glaciares del Popocatepetl: ¿Huéspedes efímeros de la montaña? *Ciencias*, no. 41, p. 24-32.
- Demant, A. (1982). Interpretación geodinámica del volcanismo del Eje Neovolcánico Transmexicano. *Revista del Instituto de Geología*, vol. 5, núm. 2; p. 217-222.
- Ego, y Ansan, V. (2002). Why is the Central Trans-Mexican Volcanic Belt (102°-99°W) in transtensive deformation?. *Tectonophysics*. 359:189-208.
- Escobar, R. (1996). "Incrementa la actividad volcánica el Popo; las cenizas llegaron a Puebla". En: *La Jornada*. México, D.F; 14 de marzo de 1996, 16 p.
- Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Vol. LIII, p. 84-92.

- Friedlander, I. (1921). La erupción del Popocatépetl. Societe Scientifique "Antonio Alzate".- Memoires, T. 40. p. 219-228.
- García, A. y Esteller, M. (1998). Modelación de lahares por erupción del Popocatépetl. *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. XIII, num. 2, p 57-65.
- Gibson, C. (1984). Los Aztecas bajo el dominio español 1519-1810. Editorial Siglo Veintiuno. 531 p.
- Global Volcanism Program (1986-2003); <http://www.volcano.si.edu>.
- Goff, F; Janik, C; Delgado, H; Werner, C; Counce, D; Stimac, J; Siebe, C; Love, S.P; Williams, S; Fischer, T y Johnson, L. (1998). Geochemical surveillance of magmatic volatiles at Popocatepetl volcano, Mexico. *GSA Bulletin*, vol. 110, no.6, p. 695-710.
- Goff, F; Love, S; Warren, R. G; Counce, D; Obenholzner, J; Siebe C. y Schmidt, S. (2001). Passive Infrared remote sensing evidence for large, intermittent CO₂ emissions at Popocatepetl volcano, Mexico. *Chemical Geology*. 177: 133-156.
- Gómez Arizmendi A. (1998). Análisis geomorfológico del volcán Popocatépetl escala 1:20 000. Tesis de licenciatura en geografía. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. 171 p.
- Guerra Peña, F. (1980). Fotogeología. Facultad de Ingenieria, UNAM. 337 p.
- Gutiérrez de MacGregor, M. T; González Sánchez, J. y Zamorano Orozco, J. J. (2005). La cuenca de México y sus cambios demográfico-espaciales. Temas selectos de geografía de México. Instituto de geografía, UNAM. 155 p.
- Gutiérrez-Elorza, M. (2001). Geomorfología Climática. Ediciones Omega. Barcelona; 642 p.
- Iturriaga, J. N. (1997). El Popocatépetl. Ayer y hoy. "Don Gregorio" en las crónicas de extranjeros desde el siglo XVI hasta la actualidad. Editorial Diana. México. 337 p.
- Julio-Miranda, P. y Delgado, H. (2003). Fast hazard evaluation employing digital photogrammetry: Popocatépetl glaciers, Mexico. *Geofísica Internacional*, vol. 42, num. 2, pp.275-283.
- Lemoine-Villicaña, E. (1978). El desagüe del Valle de México durante la época independiente. UNAM. 126 p.

- León- Portilla, M. (1983). Los antiguos mexicanos. A través de sus crónicas y cantares. Fondo de Cultura Económica. 202 p.
- Lugo-Hubp, J. (1991). Algunos conceptos sobre la geomorfología volcánica. Instituto de geografía, UNAM. p. 32-43.
- Macías, J.L. y Siebe, C. (2005). Popocatepetl's crater filled to the brim: significance for hazard evaluation. Short communication. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 141: 327-330.
- Martin Del Pozzo; Espinaza, M; Armienta, Reyes, M; Sánchez, G; Cruz, O. y Ceniceros, N. (1995). Recent eruptions at Popocatepetl and their effect on the newly populated areas nearby. *Pedidico Di Mineralogia*, Vol. LXIV-1995.
- Martin Del Pozzo, A.L; Cordoba, C. y López, J. (1997). Volcanic impact on the southern basin of Mexico during the Holocene. *Quaternary International*, vol. 43/44, p. 181-190.
- Martin Del Pozzo, A.L; Cifuentes, E; Cabral-Cano, E; Bonifaz, R; Correa, F. y Mendiola, I.F. (2003). Timing magma ascent at Popocatepetl volcano, Mexico, 2000-2001. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 125: 107-120.
- Moncada, J. O; Escamilla, I; Cisneros, G. y Meza, M. (1999). *Bibliografía geográfica mexicana. La obra de los ingenieros geógrafos*. Instituto de Geografía, UNAM. Serie Libros, Num.1, p. 99-107.
- Mooser, F; Montiel, A y Zuñiga, A. (1996). Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla. Estratigrafía, tectónica y aspectos geotérmicos. Comisión Federal de Electricidad, México.
- Moreno, R. (1977). Joaquín Velázquez de León y sus trabajos científicos sobre el valle de México, 1773-1775. Instituto de investigaciones históricas, UNAM. p.p. 407.
- Moreno-Toscano, A. (1981). *El siglo de la Conquista*. Historia general de México. Tomo 1. El colegio de México. p. 289-370.
- Murillo, G. (*Doctor Atl*) (1939). *Volcanes de México*. Volumen 1. La actividad del Popocatepetl. Editorial Polis. p. 72.

- Newhall, C. y Self, S. (1982). The Volcanic Explosivity Index (VEI): An estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 87, No. c2; p. 1231-1238.
- Nixon, G.T. (1989). The geology of Iztaccíhuatl volcano and adjacent areas of the Sierra Nevada and Valley of Mexico. *The Geological Society of America, Special Paper*, 219, 58pp.
- Ollier, C. (1972). *Volcanoes*. Editorial The mit press. Australia; 179 p.
- Palacios, D. (1996). Recent geomorphologic evolution of a glaciovolcanic active stratovolcano: Popocatepetl (Mexico). *Geomorphology*. 16: 319-335.
- Palacios, D; Zamorano, J.J. y Parrilla, G. (1998). Proglacial debris flows in Popocatepetl north face and their relation to 1995 eruption. *Z. Geomorph. N.F. Berlin*. 42: 273-295.
- Palacios, D; Zamorano, J.J. y Gómez, A. (2001). The impact of present lahars on the geomorphologic evolution of proglacial gorges: Popocatepetl, Mexico. *Geomorphology*: 37: 15-42.
- Panfil, M; Gardner, T. y Hirth, K. (1999). Late Holocene stratigraphy of the Tetimpa archaeological sites, northeast flank of Popocatepetl volcano, central Mexico. *GSA Bulletin*, vol. 111, no.2, p. 204-218.
- Pardo, M. y Suárez, G. (1995). Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: seismic and tectonic implications. *Journal of geophysical research*. vol. 100, no. B7, p. 12'357-12'373.
- Pedraza, J. (1996). *Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones*. Editorial Rueda. Madrid; 414 p.
- Peña-Monne, J.L. (1997). *Cartografía geomorfológica básica y aplicada*. Geoforma Ediciones, Zaragoza. 227 p.
- Poblete, M.A. (1995). *El relieve volcánico del campo de calatrava (Ciudad Real)*. Editorial Castilla-La Mancha. Universidad de Oviedo, España. 467 p.
- Reffay, A. (1982). Les domes volcaniques complex. *Norios*, No. 114. Poitiers, pp. 229-237.
- Robin, C. (1984). Le Volcan Popocatepetl (Mexique): structure, evolution pétrologique et risques. *Bull. Volcanol*; vol. 47-1. p. 1-23.

- Robin, C. y Boudal, C. (1987). A gigantic bezymianny-type event at the beginning of modern volcan Popocatepetl. *Journal of volcanology and geothermal research*. 31: 115-130.
- Scarth, A. (1994). *Volcanoes*. First U. S. edition Texas A&M University press. 273p.
- Schlaepfer, J. (1968). Resumen de la geología de la hoja de México, Distrito federal y Estados de México y Morelos. Hoja México 14 q-h (5), escala 1:10,000. Instituto de Geología, UNAM; México.
- Sheridan, M. F; Hubbard, B; Bursik, M; Abrams, M; Siebe, C. y Macias, J. L. (2001). Gavaing short-term volcanic hazards at Popocatepetl. *EOS Transactions of the American Geophysical Union*, 82 (16).; p. 187-188.
- Siebe, C; Abrams, M. y Macías, J. L. (1995). Derrumbes gigantes, depósitos de avalancha de escombros y edad del actual cono del volcán Popocatépetl. En *Volcán Popocatépetl. Estudios realizados durante la crisis de 1994-1995*. CENAPRED/UNAM; México, 1996. p. 195-220.
- Siebe, C; Abrams, M; Macías, J. L. y Obenholzner, J. (1996a). Repeated volcanic disasters in Prehispanic time at Popocatepetl, central Mexico: past key to the future?. *Geology*; vol. 24, no. 5, p. 399-402.
- Siebe, C; Macías, J. L; Abrams, M. Y Obenholzner, J. (1996b). La destrucción de Cacaxtla y Cholula: un suceso en la historia eruptiva del Popocatépetl. *Ciencias*; 41: 36-45.
- Siebe, C; Macías, J. L; Abrams, M; Rodríguez, S. y Castro, R. (1997). Catastrophic Prehistoric eruptions at Popocatepetl and Quaternary explosive volcanism in the Serdan-Oriental Basin, East-Central Mexico. *Fieltrip Guidebook*. IAVCEI General Assembly. Puerto Vallarta, México; January, p. 19-24.
- Simonov, Y. (1985). *Análisis morfométrico*. Editorial. Universidad Estatal de Moscú, Lomonosov. Moscú, URSS. 30 p (en ruso).
- Tanarro, L.M; Zamorano, J.J. y Palacios D. (2004). Control de la deglaciación del volcán Popocatépetl (México) por fotogrametría como aplicación de la prevención de lahares. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (Sec.Geol.)*, 99 (1-4); p. 105-117.

- Valdés, C; De la Cruz-Reyna, S; Martínez, A; Quaas, R. y Guevara, E. (2001). Resumen de la actividad del volcán Popocatepetl de diciembre 1994 a mayo 2001, en: Las cenizas volcánicas del Popocatepetl y sus efectos para la aeronavegación e infraestructura aeroportuaria. CENAPRED e Instituto de Geofísica, UNAM. p. 21-41.
- Vázquez Selem, L. y Heine, K. (2004). Late Quaternary glaciation of Mexico. *Quaternary Glaciations-Extent and Chronology, Part III*. p. 233-242.
- Varley, N. R. y Armienta, M.A. (2001). The absence of diffuse degassing at Popocatepetl volcano, Mexico. *Chemical Geology*. 177: 157-173.
- Vidal, R., Ortiz, I., Alvarez, R., Gómez, G., (1996). Erupción de 1994 del volcán Popocatepetl: estimación del riesgo. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*. No.16, Madrid; p. 185-199.
- Villa-Roiz, C. (1997). Popocatepetl. Mitos, ciencia y cultura (Un cráter en el tiempo). Editorial Plaza y Valdés. 367 p.
- White, S. (2002). Glaciers of North America-Glaciers of Mexico. *U.S. Geological Survey Professional Paper 1386-j-3*. p 384-405.
- Wyk, B; Self, S; Francis, P.W. y Keszthelyi, L. (2001). A gravitational spreading origin for the Socompa debris avalanche. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 105: 225-247.

