



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**PROCESOS DE FORMACION Y DESTRUCCION DE
DOMOS EN EL VOLCAN POPOCATEPETL. 1996-2009.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

P R E S E N T A :

ANGEL GOMEZ VAZQUEZ

DIRECTOR:

DR. SERVANDO DE LA CRUZ REYNA

Ciudad Universitaria Febrero de 2012



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.

Dedicó esta tesis a mi esposa Gloria por su paciencia y amor.

A nuestro hijo Jorge Angel por su llegada a nuestra vida.

A dios que nos permite seguir juntos y cada día más unidos.

Dedico esta tesis a la memoria de mi padre Jesús, a la de mi madre Glafira y la de mi hermano Francisco.

Dedico esta tesis a toda mi familia por estar conmigo en las buenas y malas épocas de mi vida:

Sr. Fidel, Juana, Sra. Consuelo, Ventura, Irma, Rosalino, Abel, Luz, Araceli, Carmen, Saúl, Claudio, Valeria, Rosalía, Karen, Julio, Brenda, Juan, Katie, Noé, Sharón, Yumi, Viridiana, Julio Cesar, Katherine, Juan Carlos, Ivonne, Fernanda, Jessica, Omar, Jessica, Jesús, Paola, Diego, Karen y Eduardo.

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por la oportunidad de continuar recibiendo las enseñanzas que nos proporciona el volcán Popocatepetl.

Al Posgrado en Ciencias de la Tierra por la oportunidad de ser parte de el.

Al Centro Nacional de Prevención de Desastres por la información para la realización de esta tesis.

Al Dr. Servando de la Cruz por la paciencia para hacer llegar a buen puerto este trabajo.

A la DGAPA por su apoyo para la realización de esta tesis.

INDICE

RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	10
1.-INTRODUCCION.....	13
2.-ANTECEDENTES.....	15
2.1. Historia eruptiva del volcán Popocatépetl.....	17
2.2.- Riesgo asociado al Popocatépetl.....	21
2.3.- Monitoreo del volcán Popocatépetl.....	23
2.3.1. Observaciones directas visuales.....	24
2.3.2 Monitoreo Sísmico.....	26
2.3.2.1 Clasificación de señales sísmicas en el Popocatépetl.....	28
2.3.2.2 Estudios relevantes de la actividad sísmica en el Popocatépetl.....	31
2.3.3 Monitoreo Geoquímico.....	32
2.3.4 Monitoreo por sensores remotos.....	34
2.3.5 Monitoreo geodésico.....	36
2.3.5.1 Medición de redes de deformación con Electronic Distance Meter (EDM).....	37
2.3.5.2 Nivelación geodésica.....	48
2.3.5.3 Inclínometría.....	50
2.3.5.4 GPS (Sistema de Posicionamiento Global)....	53
2.4. Morfología del cráter antes de 1996.....	56
2.5. Procesos de formación de domos en otros volcanes.....	65
2.5.1 Volcán St. Helens (USA).....	66
2.5.2 Santiaguíto.....	67
2.5.3 Montserrat.....	69

2.5.4 Colima.....	70
3.- METODOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN Y CÁLCULO DE VOLÚMENES DE LOS DOMOS EN EL VOLCÁN POPOCATÉPETL.....	74
3.1.Métodos de fotogrametría.....	74
3.2.Fotogrametría digital.....	78
3.3. Fotogrametría aplicada en otros volcanes, ejemplos.....	80
3.4. Fotogrametría en el volcán Popocatépetl y métodos de cálculo de volúmenes.....	81
3.5. Métodos indirectos de identificación de domos emplazados: EDM, tremor volcánico y eventos LP.....	88
3.5.1.EDM.....	88
3.5.2. El tremor volcánico y los eventos de largo período LP como indicadores de emplazamiento de domos.....	92
4. DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD DE EMPLAZAMIENTO Y DESTRUCCIÓN DE DOMOS EN EL VOLCÁN POPOCATÉPETL EN EL PERIODO 1996-2009.....	97
5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	177
5.1. Volúmenes y tasas de emisión.....	177
5.2 Comparación del proceso de crecimiento de los domos del Popocatépetl con otros volcanes	182
5.3 Mecanismos de emplazamiento y destrucción.....	183
5.4 Consecuencias para la estimación del peligro volcánico.....	186
6.- CONCLUSIONES.....	190
REFERENCIAS.....	196
Anexo.....	205

RESUMEN

Esta tesis esta dirigida a describir, cuantificar y evaluar el proceso del crecimiento y destrucción de domos de lava en el cráter del volcán Popocatepetl durante el actual periodo de actividad que inicia en 1994. Hasta mayo de 2009 se han contabilizado 28 episodios de emplazamiento y remoción de domos, cada uno con características específicas que se describen y discuten con detalle en este estudio. En todos los casos, los emplazamientos han terminado en procesos de destrucción parcial o total de domos, vinculados a la interacción de varios mecanismos. Entre 1994 y 2009 la componente visible de esta actividad ha sido la ocurrencia de “exhalaciones” y explosiones de nivel bajo a moderado, asociadas tanto a los procesos de crecimiento como de destrucción de domos y que han lanzado nubes de ceniza a la atmósfera y fragmentos incandescentes sobre el cono volcánico. Entre las más importantes están las ocurridas el 30 de junio de 1997 y el 22 de enero de 2001. En esta tesis se presenta el seguimiento puntual de la actividad, visible e instrumentalmente detectada del volcán Popocatepetl asociada con la emisión y destrucción de estos domos. En particular se muestra la asociación de los procesos de crecimiento y destrucción con episodios de tremor, sismos volcánicos LP y algunas fases de deformación detectadas por otros dispositivos de monitoreo. Por otra parte se describe un modelo recientemente publicado que explica el proceso de crecimiento de los domos, también se presenta una primera clasificación de los domos basada en la geometría de los mismos y teniendo como referencia procesos similares de otros volcanes. Se

describe en otro de los capítulos los cambios en la morfología del interior del cráter, ocurridos en el período de 1996 a 2009. Finalmente se presenta una valoración preliminar cualitativa del peligro que representa el volcán Popocatepetl en términos de la actividad y parámetros descritos en esta tesis.

En los capítulos 1 y 2 se presenta una introducción y antecedentes generales, así como la historia eruptiva del volcán Popocatepetl. En las mismas secciones de este trabajo se indica el monitoreo sistemático que se mantiene sobre este volcán. También se dedica un apartado a la descripción de la morfología del interior del cráter antes de 1996, particularmente con información de principios del siglo XX, algunos otras fotografías e información recopilada de antes de la aparición del primer domo de lava en el actual episodio eruptivo ocurrida en 1996.

En el capítulo 3 se describen las metodologías de observación que permitieron identificar el emplazamiento de domos de lava en el interior del cráter del volcán, así como los procedimientos para la determinación de sus características morfológicas, dimensiones y volúmenes.

En el capítulo 4 se describe con detalle la actividad vinculada a los procesos de formación de los 28 episodios de crecimiento de domos, las cotas máximas y mínimas alcanzadas, y cuando los datos disponibles lo permiten, sus dimensiones geométricas y volúmenes estimados. La base de datos así constituida se considera de especial importancia en cualquier estudio posterior de la actividad del volcán.

En el capítulo 5 se analizan las variaciones de la tasa de producción de magma y de emisión de material al exterior del cráter, presentando un análisis del balance de masa en el cráter a lo largo de todo el periodo de actividad, lo que ha permitido desarrollar un criterio objetivo para evaluar el nivel de actividad del volcán. Asimismo, en este capítulo se discute la aplicabilidad de un modelo que explica el proceso del persistente proceso de emplazamiento de domos acompañado de un grado alto de degasificación pasiva, que es el caso del volcán Popocatepetl. Se analizan asimismo las consecuencias de este proceso en el peligro volcánico. También se discute una comparación del proceso de emplazamiento y destrucción de los domos del Popocatepetl con otros volcanes.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones de esta tesis, seguida de una sección con las referencias bibliográficas del trabajo.

ABSTRACT

This thesis is aimed to describe, quantify and assess the ongoing eruptive activity of Popocatepetl volcano, characterized by a succession of lava domes emplacement and destruction. Between 1994 and 2009, 28 episodes of lava domes formation and removal has been identified, each with specific features that are described and discussed in this study. In all cases, the dome emplacements have ended in partial or total destruction of the domes related to the interaction of various mechanisms. Between 1994 and 2009 the visible component of such activity has been the frequent occurrence of small to moderate “exhalations” and explosions, related to both, dome growth and destruction. Such events have frequently produced significant ash plumes and ejected incandescent debris on the volcano flanks. Some of the largest explosions were recorded on 30 June 1997, and 22 January 2001. A detailed account of the observed activity related to the domes growth and destruction, as well as the internal activity detected by the monitoring devices, particularly seismic tremors and LP events and some deformations, is included in this thesis. Additionally, a recently published model is used to explain the persistent dome emplacement and passive degassing process at Popocatepetl, and a classification of the domes based on similar processes in other volcanoes is presented. The volcanic activity along the last 17 years has produced significant morphological changes of the crater interior, a subject also discussed in other chapter. Finally, the consequences of the results found in this study on the volcanic hazard of Popocatepetl are assessed.

A general introduction to the thesis is given in Chapter 1, and the background and eruptive history of Popocatépetl volcano, as well as a description of the monitoring system and the morphology of the crater prior to the onset of dome emplacement activity in 1996 is presented in Chapter 2.

Chapter 3 is dedicated to the description of the observation methods used to identify the presence of domes at the interior of crater, and the procedures for determining the morphology and calculating the dimensions and volumes of the domes.

Chapter 4 gives a detailed account the activity related to each of the 28 episodes of dome emplacement and destruction, including the heights and, when the available data permitted, the dimensions and volumes of the lava bodies. This data base is particularly valuable for any further study of the Popocatépetl activity.

In chapter 5, the fluctuations of the magma production rate, and the amounts of material ejected outside the crater are analyzed, and a balance of mass is performed on the lava and debris content in the crater along the whole period of activity. This analysis proves helpful as an objective criterion to assess the state of the volcano unrest. In addition, this chapter includes a discussion of the applicability of dome growth models accompanied with large passive degassing, which is the case of Popocatépetl. A discussion on the volcanic hazard consequences is included. We also discuss a comparison of the construction and destruction process of the domes at Popocatepetl with other volcanoes

Chapter 6 presents the conclusions of the thesis. This chapter is followed by a bibliographical reference section.

1.-INTRODUCCION

Nuestro país se encuentra en una región de marcada actividad volcánica, que tan sólo en los últimos 100 años ha presentado fases eruptivas en los volcanes Bárcena, Fuego de Colima, El Chichón, Socorro (Evermann), Popocatépetl, incluyendo el nacimiento de un volcán monogenético, el Parícutín

Esta tesis se concentra en el estudio de la actividad más reciente del volcán Popocatépetl, el cual se ubica en el extremo meridional de la Sierra Nevada en el centro-Este del Eje Volcánico Mexicano, en las coordenadas 19.02 N, 96.82 W. Este estratovolcán andesítico-dacítico es la segunda cumbre más alta del país con una altitud de 5452 msnm. En la cima, se encuentra un glaciar. Tiene un cráter de forma semielíptica de aproximadamente 800 x 600m, con el eje mayor orientado Oeste –Este. La profundidad media del cráter en 1994, antes del inicio del episodio eruptivo actual, era de 150m aproximadamente.

Debido al incremento en su actividad en 1994, se instaló una red de monitoreo para la detección del comportamiento de sus manifestaciones internas y externas. La actividad eruptiva desde esa fecha se ha caracterizado por eventos de carácter efusivo y explosivo, de intensidad moderada. Una de esas manifestaciones externas es la sucesión de episodios predominantemente efusivos, caracterizado por el crecimiento de domos en el interior del cráter y su posterior destrucción por explosiones. En esta tesis se analiza y cuantifica este proceso por medio de métodos directos como son los fotogramétricos convencionales combinados con

métodos geométricos de cálculo. También se utilizan para la identificación de emplazamientos de domos, métodos indirectos como manifestaciones sísmicas como el tremor o LPs, asimismo se utiliza el análisis de datos de deformación con EDM para el mismo propósito. Se describirán con todo detalle las características de la actividad volcánica asociada con el proceso de emplazamiento y destrucción de domos. Se mostraran los volúmenes absolutos y acumulado, así como las tasas de emisión.

Se hace una comparación del emplazamiento y destrucción de los domos del Popocatépetl contra los ocurridos en otros volcanes.

La información de la actividad del volcán Popocatépetl fue tomada principalmente de la página del CENAPRED www.cenapred.unam.mx

2.-ANTECEDENTES

El vulcanismo tiene un papel importante en el pasado geológico de nuestro planeta, tal como se evidencia en el origen volcánico de gran parte de la corteza terrestre, tanto oceánica como continental. En la escala de tiempo geológico, la actividad volcánica ha beneficiado a todas las especies y a la humanidad, en particular creando terrenos fértiles y de gran belleza escénica, estimulando y proporcionando sustento y permitiendo así el desarrollo de civilizaciones. Sin embargo 56 países concentran el 98 % de los volcanes activos del mundo, entre ellos México. El promedio de erupciones a nivel global se ha estimado para la década de los 90's en 60 por año. Así mismo en los últimos 500 años han ocurrido en el mundo unas 20 erupciones con un VEI (Volcanic Explosive Index) > 5 (De la Cruz-Reyna, 1994; Simkin, 2000) Esta información indica la necesidad de realizar estudios detallados sobre los volcanes activos, para conocer y entender su comportamiento, para evaluar el estado del volcán y poder con esto determinar los efectos potenciales de una erupción mayor sobre la población.

Nuestro país se encuentra en una región con actividad considerable volcánica. La mayor parte del vulcanismo está relacionado con las interacciones entre las placas tectónicas de Rivera, y Cocos, Pacífico y Rivera, Cocos y la Norteamericana. Una de las repercusiones más importantes de esa interacción es la formación de la Faja Volcánica Mexicana, que tiene una orientación preferencial Este-Oeste y se extiende más de 1200 Km. con un ancho variable de 20 a 150 Km. La tasa promedio de erupciones que han ocurrido en el país en los últimos

500 años ha sido de unas 15 erupciones de diversos tamaños por siglo. (De la Cruz Reyna y Tilling, 2008). En la figura 1 se muestran algunos de los volcanes y campos volcánicos que han presentado alguna actividad en tiempos históricos.

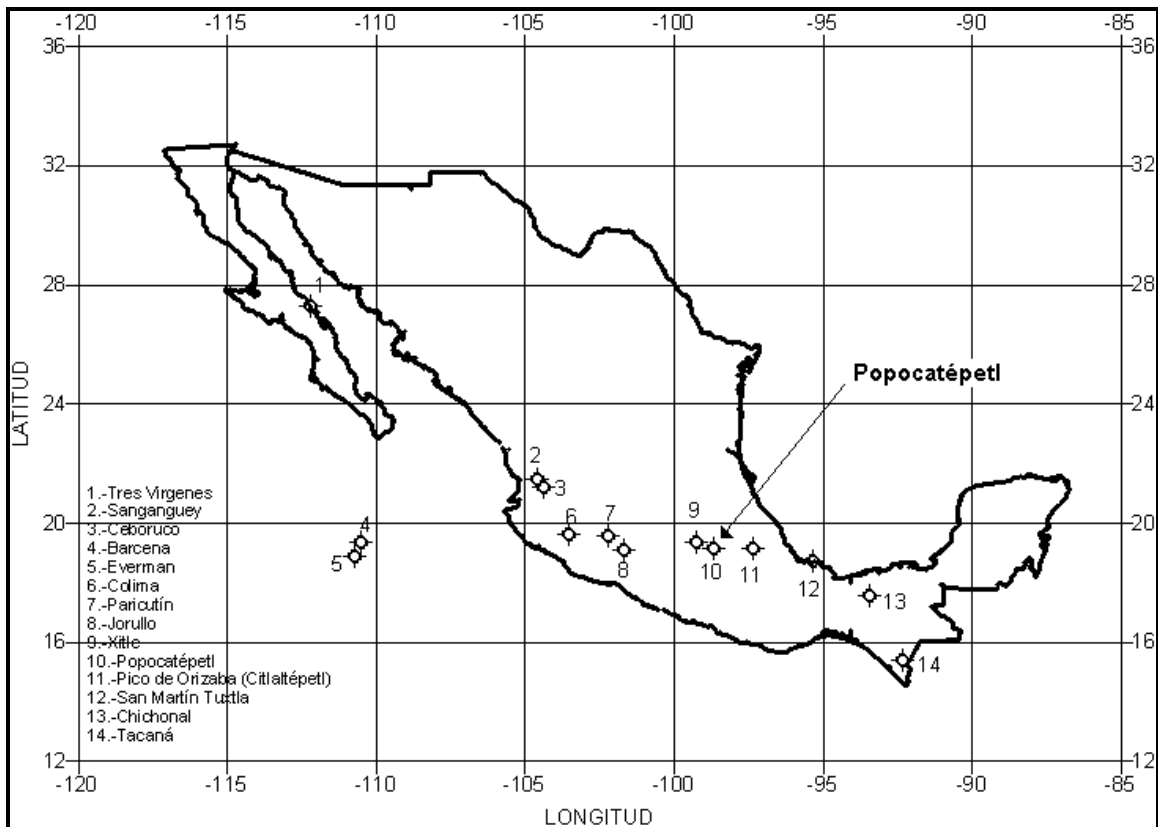


Figura 1 Principales Volcanes activos de México.

De estos volcanes el Popocatépetl y el volcán de Colima presentan a la fecha los mayores niveles de actividad.

2.1. Historia eruptiva del volcán Popocatépetl

El volcán Popocatépetl es un estratovolcán andesítico-dacítico ubicado en la parte central de la Faja Volcánica Mexicana, en el extremo meridional de la Sierra Nevada y cubre un área de 600 km², con una altitud de 5452 msnm. Ha tenido actividad histórica importante, destacando la de 1919-1927, por estar bien documentada (figura. 2) (Dr. ATL, 1939). Después de varias décadas de inactividad, a partir de diciembre de 1994 se inició un nuevo período de actividad eruptiva, la cual se mantiene hasta la fecha.

De acuerdo con Boudal y *Robin* (1989), y Siebe (1995), el Popocatépetl ha presentado erupciones del tipo St. Helens o Bezymiany a lo largo de su historia eruptiva. Algunas se han desarrollado como colapsos sectoriales preferentemente hacia el sector sur del edificio actual. La última erupción de este tipo ocurrió hace 23,000 años, edad que se puede asignar al actual edificio volcánico. De acuerdo con Siebe (1996) menciona que hace 14,000 años ocurrió una erupción freatomagmática proveniente de uno de los flancos, del sector noroeste conocido ahora como barranca Nexpayantla, los depósitos de caída se dirigieron hacia el noroeste, menciona también que detectaron material de caída producto de esta erupción en varias zonas de la cuenca de México, por ejemplo en Nonoalco 5 cm, en Tlahuac 20 cm de espesor y en Xico 30cm. Posteriormente Siebe, (1996), menciona que han ocurrido en el volcán Popocatépetl erupciones Plinianas hace alrededor de 11,000, 9,000 y 7,000 años antes de nuestra era. Particularmente indica que las últimas tres erupciones Plinianas ocurrieron entre los años 3195 y 2830

a.c, 800 y 215 a.c y 695 y 1095 d.c., lo cuál significa que con toda certeza existían asentamientos humanos en la zona central de México en estas últimas tres erupciones. Estas erupciones Siebe (1996), asociándolas con las etapas cultural de Mesoamerica, las renombro “Precerámico” superior, “Cerámico” inferior y “Cerámico” superior (Tabla 1) .

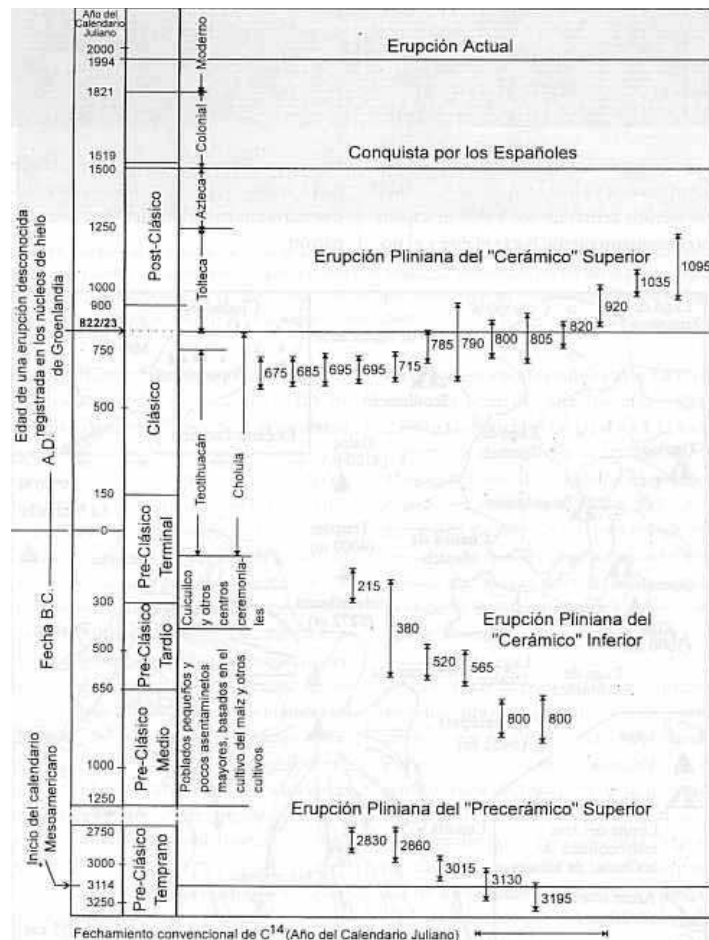


Tabla 1. Cuadro que muestra los fechamientos de las tres últimas erupciones plinianas en el volcán Popocatepetl, vinculadas al aspecto cultural. Tomada de Siebe (1996).

Adicionalmente al registro geológico, los 600 años más recientes de actividad están bien documentado en diversos documentos históricos (códices, reseñas,

artículos periodísticos, libros, etc.). Antes de 1994 la actividad previa ocurrió en 1920, caracterizada por emisión de domo y explosiones de bajo nivel (figura 2).

La tabla 2 resume la actividad eruptiva registrada en el volcán más relevante en tiempos recientes.



Figura 2 Actividad del Popocatépetl en 1920 (Foto Waitz, 1920).

Tabla 2. Actividad histórica en el volcán Popocatépetl. (Tomado de De la Cruz-Reyna, 2008)

Fecha	Descripción de la actividad volcánica
1347	Erupción poco documentada
1354-1363	Episodios de actividad eruptiva moderada
1509-1512	Emisión de fumarolas
1518-1528 y	Episodios de actividad eruptiva moderada, con fumarolas, explosiones y

1530	esporádicas emisiones de rocas incandescentes
1539-1540	Erupciones moderadas similares a las anteriores
1548	Erupción moderada, con algunas explosiones y emisiones de material incandescente
1571-1592	Actividad persistente. Emisiones de gases y cenizas
20/10/1697	Explosión moderada
1720	Actividad moderada
1804	Fumarolas leves
19/02/1919- 1927	Episodio de actividad eruptiva consistente de la emisión y destrucción de domos de lava en el interior del cráter. A lo largo de varios años se manifestaron explosiones, emisiones de ceniza y materiales incandescentes y fumarolas.
21/12/1994-	A la 01:31 del 21/12/94, ocurren cuatro explosiones seguidas por una emisión creciente de gases y ceniza. En esa ocasión, se evacuaron unas 20, 000 personas en poblaciones del Estado de Puebla, las cuales eran las ubicadas más próximas al volcán. Las emisiones de ceniza o exhalaciones continuaron en 1995 y 1996. En marzo de 1996, ocurre otro episodio de emisión intensa de gases y cenizas. A finales de marzo de ese año, se detecta un domo creciente de lava en el interior del cráter. En 1997 se detecta un nuevo domo de lava y a la actividad de explosiones y exhalaciones continua. Una de las explosiones mas importantes ocurrió el 30 de junio de 1997, generó un a columna eruptiva de 8 km sobre la cima y una leve lluvia de ceniza en la Cd.de México. En diciembre de 2000 se registra la erupción más grande del episodio actual, la cual lleva a realizar

	<p>nuevamente evacuaciones preventivas similares a las de 1994. Posteriormente el 22 de enero de 2001 ocurre una explosión que produce flujos piroclásticos hacia el sector norte y noroeste y produce un lahar que llega hasta unos cuantos kilómetros de Santiago Xaltizintla en el estado de Puebla. Hasta mayo de 2009 se han formado 28 domos de lava.</p>
--	---

2.2.- Riesgo asociado al Popocatepetl

El Riesgo volcánico puede definirse, como la probabilidad de que ciertos eventos produzcan un impacto adverso sobre algunos elementos expuestos. (Ortiz, 2000).

El establecimiento de un marco para el estudio de los riesgos asociados a los desastres requiere la introducción de una serie de conceptos y una actualización de la definición básica de riesgo (De la Cruz-Reyna y Tilling, 2008), la cuál puede definirse como:

RIESGO= Peligro*(Vulnerabilidad-Preparación)

En donde:

PELIGRO es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno volcánico en un período de tiempo determinado.

VULNERABILIDAD es la expectativa de daño infringida a un elemento expuesto por acción del evento volcánico.

PREPARACIÓN. Se refiere a la serie de medidas preventivas implementadas para la reducción de la vulnerabilidad.

y el operador “*” representa el producto de cada una de las combinaciones de las probabilidades anteriores.

El peligro y la vulnerabilidad pueden evaluarse siguiendo dos metodologías distintas: con base en el estudio de la historia eruptiva y de los efectos de erupciones pasadas (métodos observacionales) o partiendo de modelos teóricos de los fenómenos y sus efectos (métodos predictivos) Ortiz,(2000). En el estado actual del conocimiento ambos métodos se combinan y el resultado puede representarse por medio de un SIG donde se muestren las dimensiones y los alcances más probables de las diferentes manifestaciones volcánicas. El mapa de peligros del Popocatepetl es un ejemplo de la confección de mapas donde se muestra las áreas susceptibles de ser afectadas por productos volcánicos (figura 3). También debe construirse una base de de datos donde se indique la cronología de las erupciones pasadas. De ésta se construye la distribución estadística de las erupciones (es decir de las tasas de ocurrencia de los distintos tipos de erupción o VEI) y por tanto de sus probabilidades de ocurrencia, de tal suerte que por medio de este análisis es posible llegar a estimar el peligro volcánica de forma mas formal (Mendoza-Rosas, et al 2008).

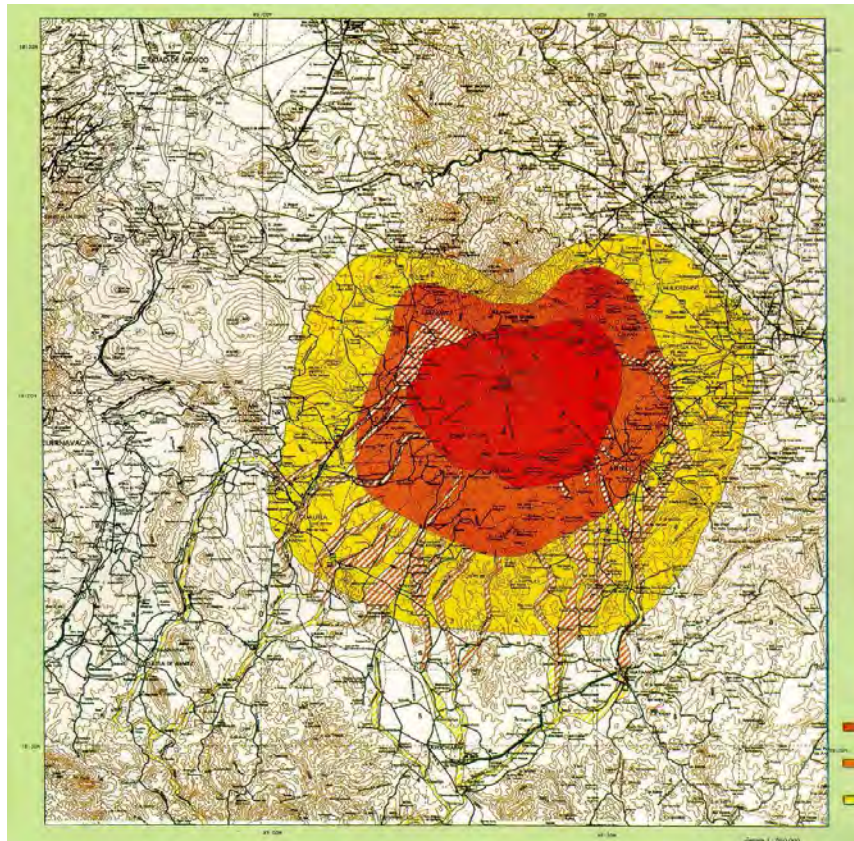


Figura 3. Mapa de Peligros del volcán Popocatépetl (Macias, et al 1995).

2.3.- Monitoreo del volcán Popocatépetl.

Como parte de la reducción del riesgo volcánico, es fundamental el monitoreo o vigilancia de un volcán, el cuál consiste en la operación continua y permanente de instrumentación especializada. Esto con la finalidad de registrar y reconocer oportunamente, alguna variación importante de los niveles de referencia de actividad interna, que se consideran como “normales” e interpretarla como posibles precursores de erupciones.

La Asociación Internacional de Vulcanología y Química del Interior de la Tierra, (IAVCEI) ha marcado algunos parámetros recomendados como fundamentales para mantener un nivel básico de monitoreo y vigilancia de un volcán

- 1.- Observaciones directas visuales.
- 2.- Monitoreo Sísmico.
- 3.- Monitoreo de deformación del edificio volcánico.
- 4.- Monitoreo Geoquímico.
- 5.- Monitoreo por sensores remotos (imágenes térmicas y de satélite)

En el caso del volcán Popocatepetl, se cuenta con esta vigilancia. A continuación se describe brevemente.

2.3.1. Observaciones directas visuales.

Es la observación directa de los cambios físicos que presenta un volcán, como cambios en los niveles de emisión de ceniza, derrumbes y deslaves en sus flancos, flujos piroclásticos, flujos de lodo, etc. Estas manifestaciones se pueden detectar a simple vista, por video, y por fotografías terrestres, aéreas y satelitales (Figura 4). En el Popocatepetl se han instalado cámaras de video en el sector norte a 11 Km en el paraje conocido como Altzomoni (Figura 5), en el lado sureste en el poblado de San Juan Tianguismanalco, a 16 km y otra cámara en el cerro de

Tlamacas que permite observar el sector norte con más detalle. Cabe mencionar que todas imágenes se reciben en tiempo real en el CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres).



Figura 4. Imagen aérea del cráter del volcán Popocatépetl, tomada por SCT. Muestra en la parte superior la pared más alta del cráter. A la izquierda la formación conocida como el “Chimuelo”.



Figura 5 Enlace de la cámara de video montada en el cerro de Altzomoni, que sirve para observar de manera permanente el sector norte del volcán Popocatépetl (tomada de www.cenapred.unam.mx).

2.3.2 Monitoreo Sísmico.

Se basa en una red de estaciones sismológicas dedicadas a captar la actividad sísmica del volcán. La geometría de una red esta diseñada para localizar hipocentros de la actividad volcnotéctonica, y de alguna manera inferir la estructura interna del volcán. Es fundamental que estas redes mantengan un registro continuo y alta ganancia para detectar señales de cualquier nivel. Las estaciones permanentes utilizan diversas técnicas de telemetría vía radio, analógicas y digitales, para registrar y monitorear la actividad en forma remota y segura, desde un centro de observación y procesamiento. En el Popocatepetl existen 7 estaciones permanentes con sismómetros de periodo corto y 3 de banda ancha (Guevara et al 2003), distribuidas alrededor del volcán (Figura 6). En general la distribución de las estaciones es cercana y alrededor del cráter, la más próxima a la cima es la estación Canario, situada a menos de 2km (Figura 7). Las señales de todos estos dispositivos se transmiten en tiempo real al CENAPRED, donde se procesan e interpretan (Figura 8).

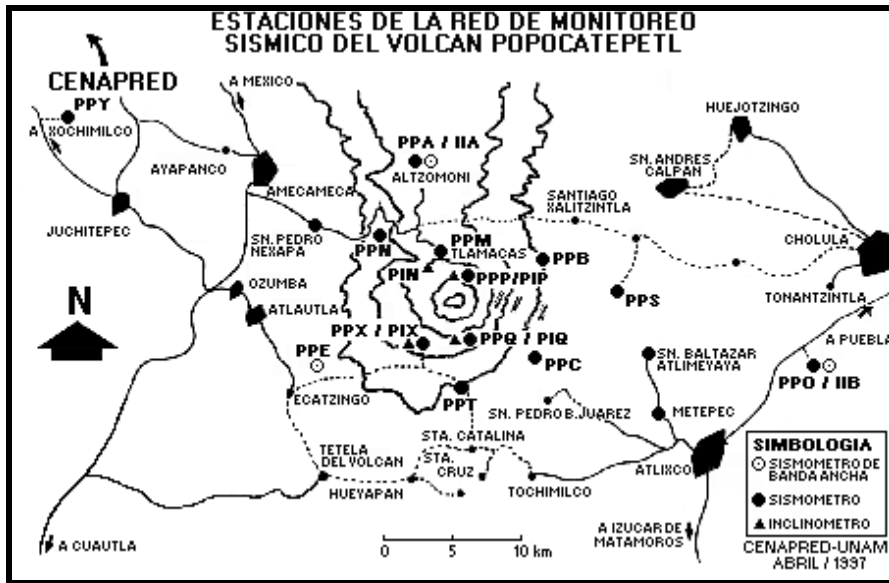


Figura 6 Distribución de la red de estaciones sísmicas en el volcán Popocatépetl (Tomado de Guevara et al 2003). PPP, PPX y PPC cuentan también con estaciones de banda ancha



Figura 7. Estación sismológica Canario en el flanco norte del volcán Popocatépetl (tomada de www.cenapred.unam.mx)



Figura 8. Centro de recepción en el CENAPRED.

El monitoreo sísmico proporciona información de los eventos sísmicos que ocurren en el volcán y su entorno.

2.3.2.1 Clasificación de señales sísmicas en el Popocatepetl

Las señales características que pueden presentarse en un volcán y que son más comúnmente utilizadas para interpretar su actividad interna se describen a continuación:

Eventos volcanotectónicos (VT): Se caracterizan por ser una señal muy similar a la de los sismos tectónicos, de duración variable, desde los pocos segundos para los eventos pequeños, y raramente hasta algunos pocos minutos para los más grandes. Su principal característica es la clara diferenciación del primer arribo de la señal (llegada de la onda P) seguido de la onda S, el contenido espectral es amplio, pero dominado por frecuencias que oscilan entre 5 a 10hz (McNutt et al

2000) (Figura 9). La profundidad en el caso del volcán Popocatépetl se ha localizado entre 2 y 10km (Martínez 2003). Estos eventos son el resultado de la formación o propagación de fracturas o fallas en las rocas que constituyen el volcán. El fracturamiento de las rocas produce una liberación de energía, la cual se transforma en calor y en ondas elásticas (Ibáñez, 2000).

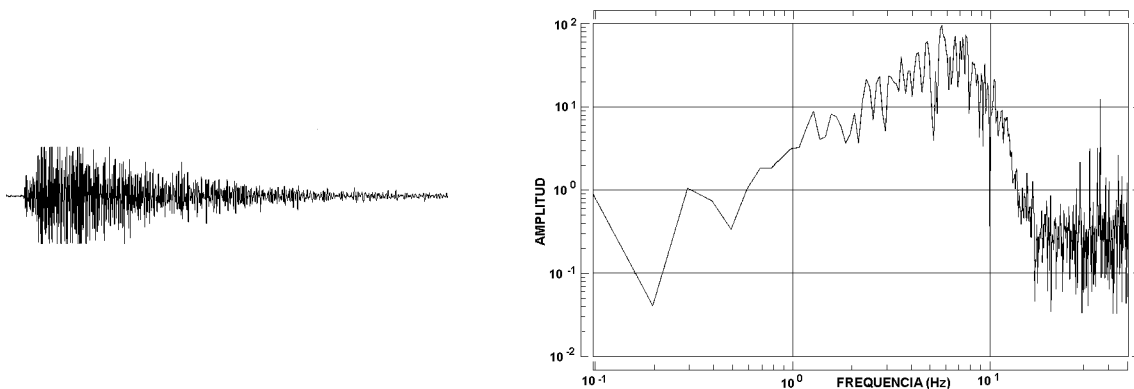


Figura 9. Evento volcanotectónico característico su pico mayor se encuentra en 6 Hz. (Tomado de Martínez Bringas, 2003).

Sismos de período largo, también llamados LPs, en el caso del Popocatépetl son conocidos también como exhalaciones (Martínez 2003), Su forma es parecida a los volcanotectónicos pero presentan una pequeña prefase de duración variable en su inicio seguida por una señal de baja frecuencia(figura 10). Estos eventos son conocidos también como eventos de baja frecuencia, se caracterizan por una duración que va de los pocos segundos hasta algunos minutos. El contenido espectral es dominado por las bajas frecuencias y comúnmente en el rango de 0.5 a 5 Hz (McNutt 2000), aunque varía de volcán a volcán (Ibáñez, 2000). El rango más común se ubica entre 2 y 3 Hz (McNutt 2000) y (Martínez 2003) (Figura 10)

Este tipo de actividad sísmica se atribuye, entre otras causas, a la vibración de grietas o fracturas llenas de fluidos magmáticos (gases o magma) dentro del volcán. Estos eventos pueden ser originados por la resonancia iniciada por la presión en un conducto o una fractura rellena con fluido. Producen pequeñas columnas de vapor y solo en ocasiones cantidades pequeñas de ceniza (Martínez 2003).

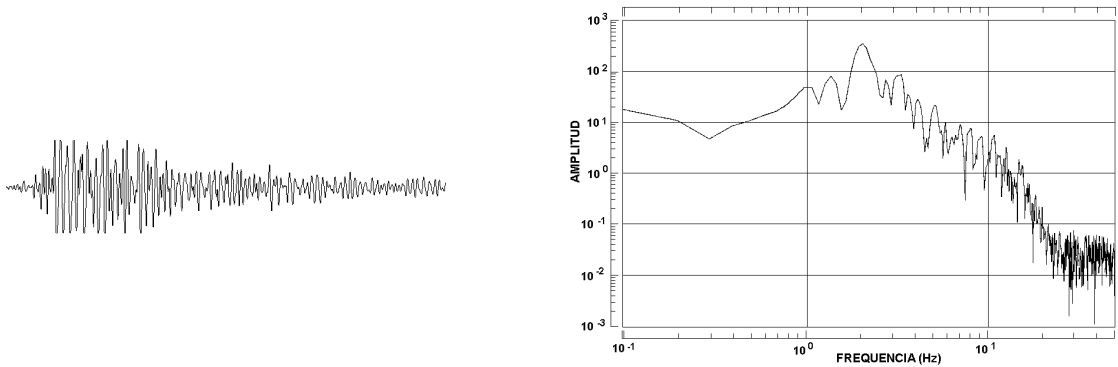


Figura 10. Evento LP característico (Tomado de Martínez 2003)

El tremor volcánico, es una señal sísmica continua caracterizada por mantener una amplitud variable durante minutos, días, horas o días. Las frecuencias dominantes se encuentran entre 1 a 5 Hz, siendo las más comunes de 2 a 3 Hz (McNutt 2000). El contenido espectral suele tener algunos picos dominantes (Ibáñez, 2000). Dos tipos de señal de tremor son reconocidas, el tremor armónico y el tremor espasmódico o de alta frecuencia, el primero es una señal de baja frecuencia suavizada, el segundo es pulsante e irregular (McNutt, 2000). En el Popocatepetl el armónico presenta frecuencias de 0.1 a 3 Hz, generalmente en múltiplos de 0.5 y 1 Hz (Martínez, 2003) (Figura 11) y el de alta frecuencia que

refleja una vibración continua del volcán con una frecuencia dominante de entre 2 y 3 Hz (Martínez, 2003). El tremor armónico ha sido observado en muchos otros volcanes, asociado con el emplazamiento de domos, como por ejemplo en el volcán Galeras, (Gil Cruz, et al 1997).

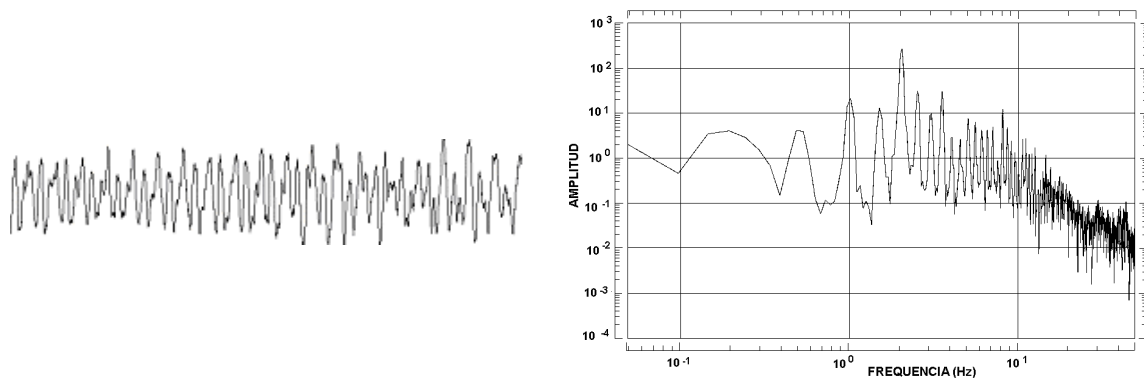


Figura 11. Tremor armónico en el volcán Popocatépetl, a la izquierda el registro y la derecha el espectro, los picos se ubican entre 1 3 Hz (Tomada de Martínez, 2003).

2.3.2.2 Estudios relevantes de la actividad sísmica en el Popocatépetl

En el aspecto sísmico se han realizado varios estudios de este volcán, particularmente son relevantes los realizados por (Cruz et al 2001)., en el realiza un análisis de la señal producida por diversas explosiones ocurridas en el Popocatépetl de 1996 a enero del 2000. Mediante un modelo de fuente explosiva obtiene los parámetros de profundidad, duración, magnitud y dirección de la fuerza puntual F , aplicada al terreno durante las explosiones. Aplica las funciones

de Green y encuentra una zona de baja velocidad a 8km bajo la superficie del cráter relacionada posiblemente con la cámara magmática del volcán.

Arciniega et al 2000, hace una caracterización de eventos sísmicos ocurridos en el volcán del 21 de diciembre de 1994 al 30 de marzo de 1995. En ella distingue eventos volcanotectónicos VTs, de largo período LPs y tremor. De octubre a diciembre de 1994 identifica 49 LPs por día, antes de la erupción del 21 de diciembre de 1994 observa 10h de tremor y en febrero de 1995 algunos otros episodios intermitentes de la misma señal, distingue que los LPs se ubican con picos principales de frecuencia alrededor de 1-4 Hz. La localización de los VTs los ubico en un rango de 2.5 a 10km bajo el cráter y el tremor a 2.5 Km. bajo el mismo.

2.3.3 Monitoreo Geoquímico.

Todos los magmas contienen gases disueltos que se liberan y modifican su composición en las fases eruptivas y pre-eruptivas. Al separarse del magma, los gases se transportan rápidamente a través de fracturas, grietas y poros por la corteza terrestre hasta su salida a la superficie (Armienta, et al 1993). Por ello la determinación y análisis de los gases volcánicos en distintos sitios aporta información acerca de cambios en la actividad volcánica. Una gran proporción de esos gases se disuelven en el agua de acuíferos cercanos o asociados al volcán. El monitoreo hidrogeoquímico de esas aguas permite dar seguimiento a esa actividad. Algunos de los principales parámetros que son determinados por medio de análisis químico de aguas de manantiales, ubicados en los alrededores del

Popocatépetl (Figura 12) son: SO_4^{2-} , Cl^- , B , F^- , SiO_2 , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , además de que se mide in situ pH, conductividad y temperatura. En varias oportunidades el CO_2 , también ha sido determinado. Adicionalmente por medio de espectrómetros de correlación (COSPEC o Minidoas se miden los niveles de SO_2 y otros gases en el aire (Figura 13). Los detalles referentes al monitoreo geoquímico no son motivo de este estudio, por lo cuál no se considera necesario profundizar en el tema.



Figura 12. Muestreo de manantiales en el sector sureste del volcán Popocatépetl.



Figura 13. Espectrómetro de correlación para medición de SO_2 en el volcán Popocatépetl (tomada de www.cenapred.unam.mx)

2.3.4 Monitoreo por sensores remotos

El empleo de imágenes de satélite para la vigilancia volcánica, en específico en situaciones de crisis, es muy útil. Existen disponibles en Internet páginas dedicadas a la observación de áreas volcánicas activas (<http://goes.higp.hawaii.edu/>), que permiten observar al volcán en tiempo casi real y en caso de ocurrir algún evento volcánico relevante (explosiones con emisión de gases o cenizas) detectar la dirección que llevan los productos emitidos desde el cráter y tomar alguna decisión o recomendar al momento a alguna autoridad responsable. Adicionalmente, ya sea gratuitamente o con un costo, se encuentran disponibles (además de la imágenes GOES (Figura 14)) otras como, MODIS, ASTER, etc. que proveen información útil para fines de investigación asociada a actividad volcánica.

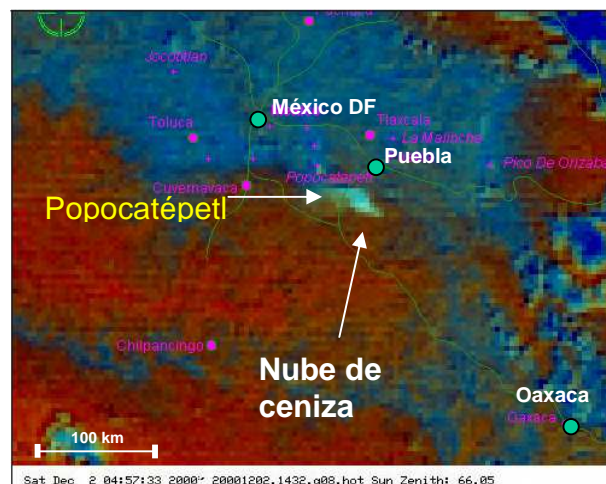


Figura 14. Imágenes GOES del volcán Popocatépetl (Tomada de <http://goes.higp.hawaii.edu/>)

Varios estudios con esta técnica de monitoreo del Popocatépetl se han realizado, destaca el realizado por Wright y colaboradores en el 2002, en el analizaron los datos de radianza infrarroja obtenidos de las imágenes del satélite meteorológico GOES. En este trabajo no lograron distinguir las exhalaciones debido a que el tamaño mínimo de un píxel de este tipo de imágenes (4km x píxel) no logro discriminarlas debido a su baja temperatura (9 -15° C). En el período de su estudio lograron identificar uno de los domos de finales de 1998, pero el de enero-febrero de 2000 no, y concluyeron que probablemente hubo un cambio en el estilo de emplazamiento de cada domo.

En las medidas terrestres, una modalidad del monitoreo visual en otra banda del espectro electromagnético es el monitoreo térmico. En el volcán Popocatépetl, se realiza con una cámara térmica colocada a 10 Km. del cráter que transmite en tiempo real hacia el CENAPRED. Este dispositivo permite entre otras cosas, detectar la temperatura aparente de productos arrojados por el volcán (fragmentos incandescentes y emisiones de ceniza) (Figura 15).

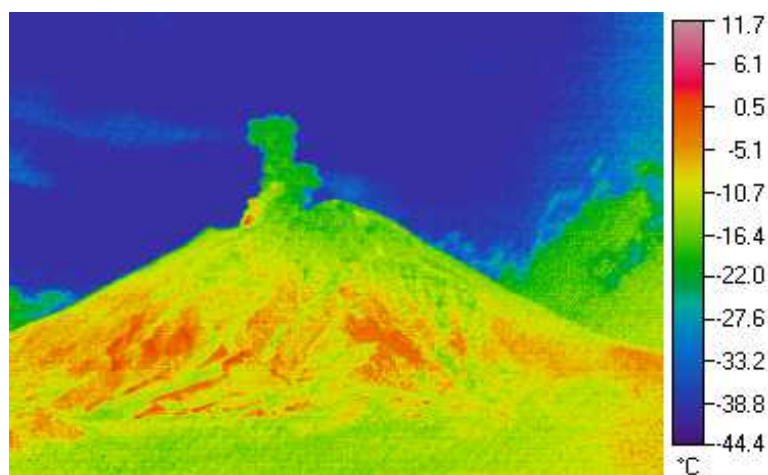


Figura 15. Imagen térmica del volcán Popocatépetl.

2.3.5 Monitoreo geodésico

Este aspecto de monitoreo se describirá de manera más amplia debido a que en un capítulo posterior se hace referencia al mismo y es necesario dejar clarificado la mayoría de los aspectos vinculados a esta técnica de monitoreo.

El monitoreo geodésico consiste en la medición de desplazamientos o deformaciones de la superficie de los volcanes, producto de la actividad interna. Este monitoreo basa su aplicabilidad y efectividad en la hipótesis de que una erupción será precedida por deformaciones significativas del edificio volcánico, generadas por la presión de intrusiones magmáticas o de sus volátiles asociados. Las deformaciones del terreno relacionadas con la actividad volcánica pueden ser provocadas por diferentes causas, entre otras cabe mencionar: la intrusión magmática, la deflación o inflación de este debido a fenómenos de calentamiento, degasificación o enfriamiento, y la expansión, contracción o redistribución de cuerpos de agua o de productos geotermales. Estos movimientos pueden ser evaluados como cambios en las coordenadas verticales y horizontales de los puntos que forman el edificio volcánico y se traducen como levantamiento o inflación del terreno o bien como hundimiento o deflación del cuerpo del volcán. En algunos casos también pueden ocurrir ligeras inclinaciones del edificio volcánico, esto es cambios en la verticalidad de su eje de simetría. El tamaño de estos cambios depende de la localización de la fuente de presión con respecto a los sitios donde se toman las medidas, así como el tamaño y la orientación de

estas y del grado de fracturamiento y la distribución de las fallas bajo y en el entorno cercano del volcán.

2.3.5.1 Medición de redes de deformación con Electronic Distance Meter (EDM)

El EDM básicamente consiste de un medidor preciso de distancias en el rango de kilómetros, por medios ópticos y electrónicos. El funcionamiento de este instrumento consiste en el envío y recepción de un pulso electromagnético, normalmente un haz láser de corta duración que es reflejado por un prisma ubicado en la superficie del volcán. En función de la distancia entre el EDM y el reflector, la longitud de onda de la señal de retorno estará fuera de fase con la señal transmitida. El instrumento mide el tiempo de viaje del pulso y compara la fase de la señal de las señales transmitida y reflejada, lo cual se traduce en la distancia. Hay una amplia gama de capacidades de EDM en alcance y precisión, pero para propósitos de monitoreo volcánico, basta con un alcance de menos de 10 Km. Este tipo de distanciometros funcionan con láseres cerca de la parte infrarroja visible del espectro electromagnético que permite medir las distancias con una precisión de unos 5 mm. Recientemente los distanciometros como unidades separadas e independientes han sido descontinuados por la mayoría de fabricantes, incorporándose ahora a un ensamble modular que cuenta con medición de distancia y ángulos en el mismo dispositivo, y que se denomina estación total. Estos sistemas a últimas fechas cuentan también con servomecanismos (estaciones robóticas) que permiten realizar mediciones

autónomas y con mayor frecuencia, lo que ha permitido mejorar la calidad y cantidad de datos que se obtienen, permitiendo entre otras cosas ahorrar la cantidad de recursos que se invertirían sobre todo en gastos de campo, sin embargo es importante mencionar que estos equipos son de costo considerablemente mayor que las unidades independientes.

Uno de los resultados que puede obtenerse de la medición de la distancia entre los puntos de referencia cercanos y lejanos al volcán, es la modelación de las fuentes de presión que causan las deformaciones, y sus desplazamientos. Por ejemplo, en la modelación de un proceso de ascenso de magma, se encuentra que no siempre es regular y puede provocar esfuerzos verticales o laterales y ocasionar deformaciones complejas.

Mogi (1958) elaboró un modelo para estimar la deformación provocada en una superficie por una inyección magmática que causa un aumento de presión en una cámara esférica. El modelo de Mogi presenta varias consideraciones teóricas preliminares:

- La corteza terrestre es un cuerpo ideal elástico. Cuando ocurre una primera deformación la corteza se comporta como un cuerpo elástico, pero a medida que la deformación se prolonga la corteza se comporta como un cuerpo elástico-viscoso.
- La deformación de la corteza es causada por un cambio en la presión hidrostática de una fuente de forma esférica situada a cierta profundidad.

El modelo de Mogi considera al material en el interior del cuerpo volcánico, causante de la deformación, como una fuente de forma esférica de radio r localizada a una cierta profundidad f , conformada como cuerpo elástico semi-infinito y de comportamiento homogéneo, que ejerce una presión P sobre las paredes de la esfera que originan un cambio de volumen de dicha esfera (Figura 16).

Del modelo de Mogi se obtienen las siguientes expresiones para los desplazamientos horizontales dh y verticales dv para los puntos localizados a una distancia d del punto A y donde $r/f < 1$. El modelo matemático de Mogi representa el desplazamiento absoluto esperado como función de la distancia radial al epicentro de la fuente de presión y de su profundidad. En general, desconocemos las dimensiones de la fuente esférica y lo que estas han variado. Si conocemos dh y dv en cada punto podremos calcular donde está el centro de la deformación.

$$dh = \frac{3r^3 P}{4\mu} \cdot \frac{d}{(f^2 + d^2)^{3/2}} \qquad dv = \frac{3r^3 P}{4\mu} \cdot \frac{f}{(f^2 + d^2)^{3/2}}$$

En donde:

dh = desplazamientos horizontales

dv = desplazamientos verticales

r = radio de la fuente esférica de presión

P = exceso de presión en la fuente

μ = rigidez de la corteza

f = profundidad donde se localiza la fuente de presión

d = distancia radial horizontal al centro de presión

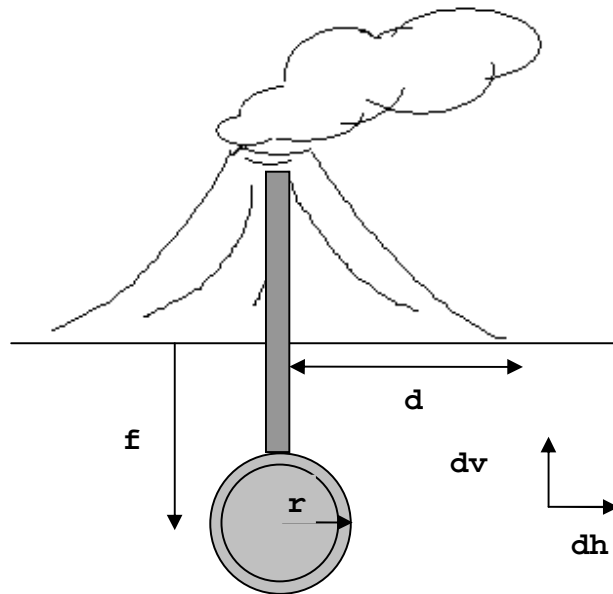


Figura 16. Esquema del modelo de Mogi.

El modelo matemático anterior representa el desplazamiento absoluto esperado, como función de la distancia radial al epicentro de la fuente de presión y de su profundidad, este desplazamiento debiera ser observado desde un marco de referencia que no se deformara con el volcán. El alcance de instrumentos EDM y su precisión no permiten ubicar el marco de referencia en un lugar estable, libre de movimientos asociados al volcán, por otra parte las técnicas de medición topográfica que se aplican nunca se realizan sobre grandes áreas, por lo que sin duda serán afectados por la deformación que pudiera sufrir el volcán. Luego entonces será necesario tomar las diferencias entre los desplazamientos, los puntos de medida y los puntos de referencia, que también pueden localizarse en

regiones que se deformen. Lo anterior se logra tomando las diferencias de las ecuaciones de Mogi, evaluadas en los sitios de medida y en los vértices base o de referencia.

Si denotamos como **a** la distancia entre el epicentro de presión y las estaciones de medida, y **b** la distancia entre el mismo epicentro y las estaciones base o de referencia, los desplazamientos diferenciales entre los puntos a distancias a y b están dados por:

$$ddh = \left(\frac{3r^3 P}{4\mu} \right) \left[\frac{a}{(f^2 + a^2)^{3/2}} - \frac{b}{(f^2 + b^2)^{3/2}} \right] \dots\dots\dots (1)$$

$$ddv = \left(\frac{3r^3 P}{4\mu} \right) \left[\frac{f}{(f^2 + a^2)^{3/2}} - \frac{f}{(f^2 + b^2)^{3/2}} \right] \dots\dots\dots (2)$$

Si en las ecuaciones 1 y 2 sustituimos los siguientes valores:

distancia entre la “fuente de presión “ y los vértices para prisma (estaciones de medida) =1500m, distancia entre la fuente y las estaciones de referencia Tlamacas (4800 msnm) y Paso de Cortes (7350 msnm) (figura 17), obtendremos los valores de los desplazamientos diferenciales horizontales entre estaciones y los vértices para prisma (Figura 18). Cabe aclarar que en este caso se considera que la fuente se localiza por debajo del cráter a una cierta profundidad “f”.

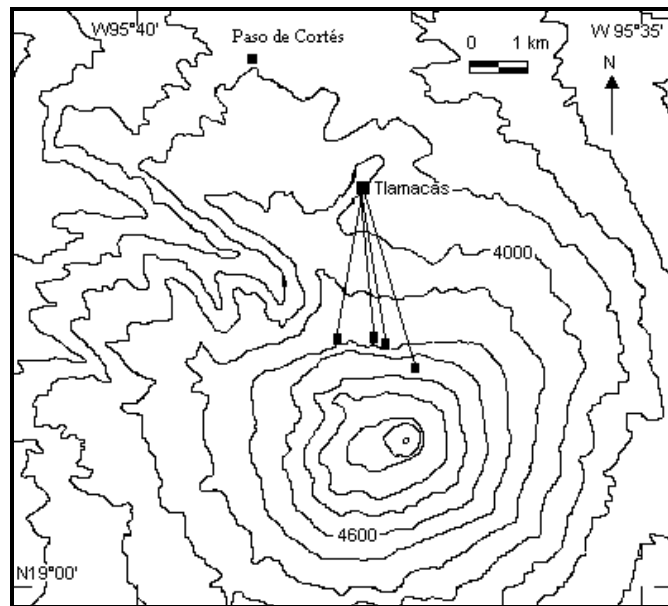


Figura 17. Ubicación de las estaciones de medición, para detectar deformaciones horizontales en el volcán Popocatepetl.

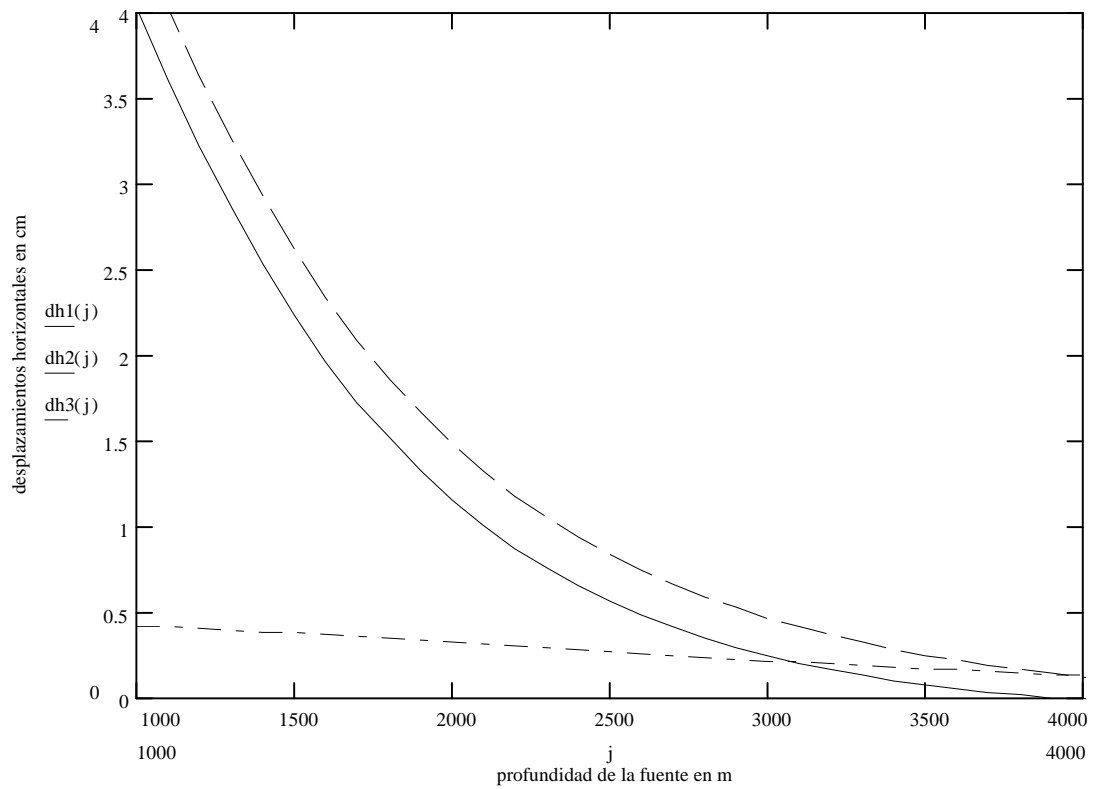


Figura 18. Desplazamientos horizontales (dh) esperados en cm (escala vertical).

En la Figura. 18, dh1, representa el desplazamiento diferencial entre la estación Tlamacas y los vértices para prisma, dh2 representa los desplazamientos diferenciales entre la estación Paso de Cortes y los vértices para prisma y dh3 muestra los desplazamientos diferencial entre la estación Tlamacas y Paso de Cortes.

De manera análoga a los desplazamientos horizontales se muestran en la figura 19 los desplazamientos verticales diferenciales entre estaciones de referencia y vértices de medida.

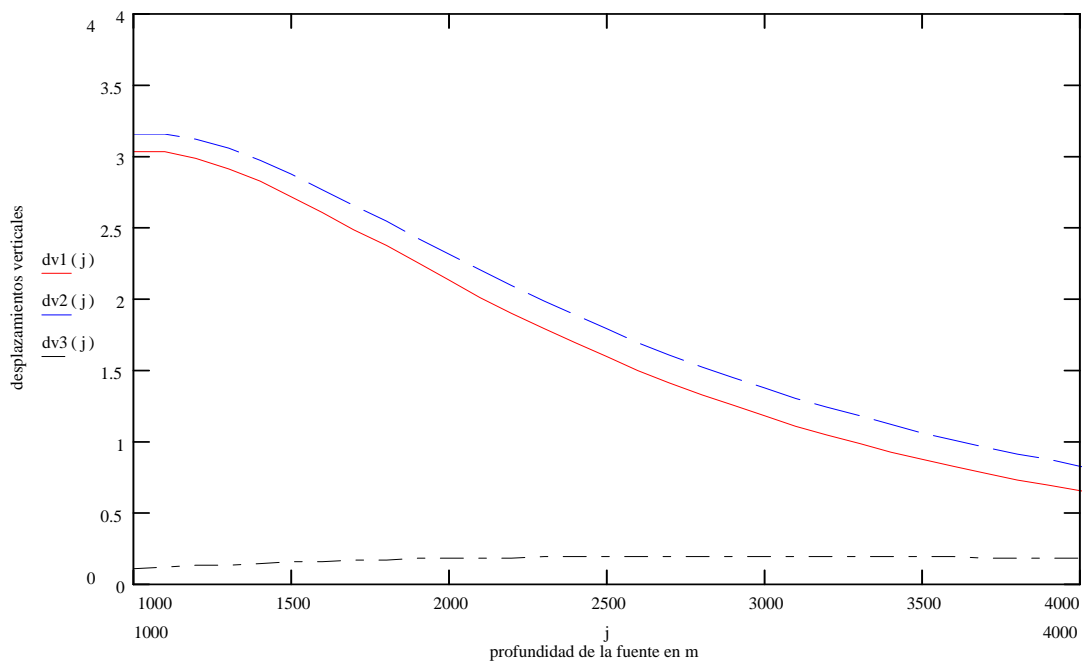


Figura 19. Desplazamientos verticales (dv) en cm esperados (escala vertical) a una profundidad "j"

En el modelo anterior se han utilizado valores de presión, de dimensión de la cámara magmática y de la rigidez del medio, que podrían considerarse más

realistas para el caso del Popocatépetl en base a argumentos sismológicos y geoquímicos (De la Cruz, et al 1995). Los valores mencionados son:

-Radio de la fuente esférica de presión: $r=500\text{m}$, equivalente a un volumen de magma de 0.52 km^3

-Presión en la fuente: $P=100\text{ bar} \sim 10^9\text{ Pa}$

-Rigidez de la roca volcánica: $\mu = 0.5 \times 10^{11}\text{ dinas/cm}^2 \sim 5 \times 10^9\text{ Pa}$

Los valores de presión y volumen de la cámara magmática empleados para este caso corresponden a un escenario que puede involucrar una erupción pliniana con índice de explosividad volcánica alrededor de cuatro, dependiendo de la intensidad con que se desarrollara la actividad. Es evidente que situaciones de mayor riesgo., que involucren volúmenes mas grandes de magma y presiones mas altas, producirían deformaciones mas grandes que las que se ilustran.

Aún considerando que las deformaciones esperadas en un espacio elástico con una fuente de presión esférica localizada a una cierta profundidad. Los criterios de Mogi han demostrado ser una herramienta muy valiosa para el diseño de redes para el monitoreo geodésico de volcanes.

El análisis de las figuras 18 y 19 muestra que los desplazamientos horizontales máximos para los parámetros propuestos de presión, rigidez, etc, ocurren en los 2000 m de rango en forma de distancia radial al centro de la fuente presión y profundidades hasta 3000 m de esta. En el caso de que se encuentre localizada la

fuelle a una profundidad mayor el desplazamiento horizontal varia muy poco con la distancia epicentral. Los desplazamientos verticales serán máximos en el centro de presión y decrecen muy rápidamente con la distancia radial. Para distancias radiales mayores de 3000m los desplazamientos verticales para las distintas profundidades se hacen muy similares y prácticamente indistinguibles

Asimismo se observa que los modelos de deformación de medios continuos, como el de Mogi no siempre es aplicable, ya que con frecuencia se miden desplazamientos diferenciales entre secciones completas del volcán, desplazamientos que parecen estar controlados por sistemas de fallas en la corteza o en el edificio volcánico. El reto en la medición de tales cambios con un medidor de distancia electrónico estriba en colocar los puntos de referencia en los lugares adecuados y hacer mediciones frecuentes entre múltiples pares de puntos de referencia.

Los puntos de referencia desde donde se hacen las mediciones están constituidos por mojoneras, que se construyen ya sea a nivel del suelo o a base de pilares de concreto. Los sitios donde se ubican generalmente son alejados de las zonas que puedan ser afectadas por la deformación que ocurra en el volcán. Para realizar las mediciones es necesario instalar cercana a la fuente de las deformaciones prismas reflectores. Estos son un arreglo de espejos que permiten determinar las distancias entre el emisor (EDM) y los prismas.

En el caso del volcán Popocatepetl se cuenta en el flanco norte de una red que consta de 4 puntos remotos y 7 puntos con arreglos de triple prisma. Las mediciones se realizan con dos modalidades. De manera manual con un EDM Leica DI3000S y desde el vértice Tlamacas con una estación total robótica Leica TCRM 1205 (Figura 20) que miden distancias hacia los mismos 7 puntos de prismas (Figura 21). En el sector sur del volcán se extiende la red EDM hacia 3 vértices para prisma en ese flanco del edificio volcánico (Figura 22). Así mismo se realizan campañas con GPS de doble frecuencia, aproximadamente cada dos meses sobre una red ubicada al sureste del volcán, que se describen más adelante.



Figura 20. Estación robótica para medición de deformaciones en el flanco norte del volcán Popocatepetl.



Figura 21. Red de distribución de prismas en el sector norte para medición de deformaciones en el volcán Popocatépetl



Figura 22. Mediciones EDM en el sector sureste del volcán Popocatépetl

2.3.5.2 Nivelación geodésica:

La nivelación geodésica es una técnica establecida desde hace tiempo para medir las diferencias de elevación entre los puntos de referencia sucesivos y, a través de mediciones repetidas, se determinan los cambios de elevación (desplazamientos verticales) como una función del tiempo. La Nivelación se ha utilizado como un sistema de medición geodésica por más de un siglo, y ha demostrado su utilidad en diversos volcanes activos. Sin embargo, la tecnología reciente e innovaciones en geodesia precisa, eclipsan las ventajas considerables y permanentes de la nivelación como una herramienta de monitoreo del volcán. En ocasiones se pasa por alto que la nivelación en algunas situaciones podría tener una contribución única a la interpretación de la actividad volcánica.

Durante la nivelación geodésica convencional, un nivel de alcohol u otro tipo de instrumento de nivelación (la mayoría de los niveles modernos son electrónicos) y un par de miras invar de nivelación (típicamente de 3 m de largo, graduada cada 0.5 o 1.0 cm en código de barras) se utilizan para medir la diferencia de altura entre los puntos de referencia permanentes, por la acumulación de las diferencias de altura entre una serie de temporales de puntos de inflexión. Típicamente, los puntos de referencia están espaciados 1-3 kilómetros de separación y los puntos de inflexión se 20-100 m de distancia (dependiendo de la pendiente del terreno).

Estudios de nivelación se pueden utilizar para servir dos propósitos diferentes, pero a menudo complementarios. Líneas de unos 10 Km. o más, se utilizan para

medir los desplazamientos verticales absolutos con respecto a un punto o grupo de puntos que se supone que son estables y que se encuentran a una distancia de referencia. Travesías cortas (típicamente de 1 Km. o menos), se utilizan para medir desplazamientos verticales relativos entre un pequeño grupo de puntos de referencia, por lo general con el fin de determinar la inclinación del terreno de manera local.

La nivelación de montaje único es un caso especial en la que los desplazamientos verticales dentro de una pequeña selección de puntos de referencia se miden de una sola puesta de instrumento. Particularmente se utilizan para determinar la inclinación del terreno localmente (muy útil cuando las tasas de deformación son altas o la topografía impide realizar travesías largas o bien no se dispone de tiempo para efectuarlas). Cada uno de estos enfoques tiene ventajas e inconvenientes que determinan cuál es el más apropiado para una aplicación específica. Una estrategia eficaz es medir los segmentos cortos de una larga travesía periódicamente, luego medirla toda cuando se presenten cambios significativos.

En el volcán Popocatepetl se cuenta con una serie de tres mojoneras en el sector norte que conforman una línea de nivelación radial, a unos 3.5km del cráter y de 150 m de longitud, que se complementan con dos líneas adicionales de nivelación en el sureste del volcán ubicadas de forma radial a 12km y 8km. El equipo para medición consta de un nivel Sokkia SDL30, o un Leica DN03 con miras invar graduadas en código de barras (Figura 23)

Como ya se vio en la sección anterior, las deformaciones verticales de igual manera son susceptibles de estimarse por medio del modelo de Mogi (Figura19).



Figura 23. Nivel Leica DN03 y miras invar en código de barras.

2.3.5.3 Inclínometría

Es una técnica para la diferencia de nivel entre dos puntos fijos que pueden estar separados desde unos pocos centímetros hasta decenas de metros. Esta variación puede ser medida por medios óptico-mecánicos o electrónicos.

Al igual que el nivel de un carpintero, un inclinómetro electrónico utiliza un pequeño recipiente lleno de un fluido conductor y el desplazamiento medido electrónicamente de una burbuja para medir un cambio en la pendiente. Electrodo colocados en el líquido y en la burbuja nos permiten determinar la posición de la burbuja, de tal manera que es posible correlacionar, la tensión de

salida de los cambios de electrodos con la inclinación que provocó el desplazamiento de la burbuja.

Los Inclinómetros electrónicos permiten medir la inclinación en microrradianes, que es el ángulo girado por el desplazamiento de un milímetro en el extremo de una viga de un kilómetro de largo. Originalmente diseñado como parte del sistema de dirección y control de misiles militares, una variedad de inclinómetros electrónicos están ahora disponibles para la vigilancia volcánica, cada uno con diferentes resoluciones y rangos.

De igual manera que para los desplazamiento horizontales y verticales el modelo de Mogi es aplicable para la inclinación. Para obtener la magnitud de la componente radial del vector de inclinación del terreno (ds), de la ecuación 2, de la sección 2.3.5.1 se deriva dv respecto a d , y se obtiene ahora ds .

$$ds = \left(\frac{-9R^3P}{4\mu} \right) \frac{fd}{(f^2 + d^2)^{5/2}} \dots\dots\dots(3)$$

Las inclinaciones que se obtienen por la ecuación 3, tienen valores máximos a una distancia radial de 1500m a 2000m. A distancias radiales mayores de 4500m, las inclinaciones para distintas profundidades de la fuente son muy pequeñas (2 microradianes o menos) y se confunden entre ellas (Figura 24).

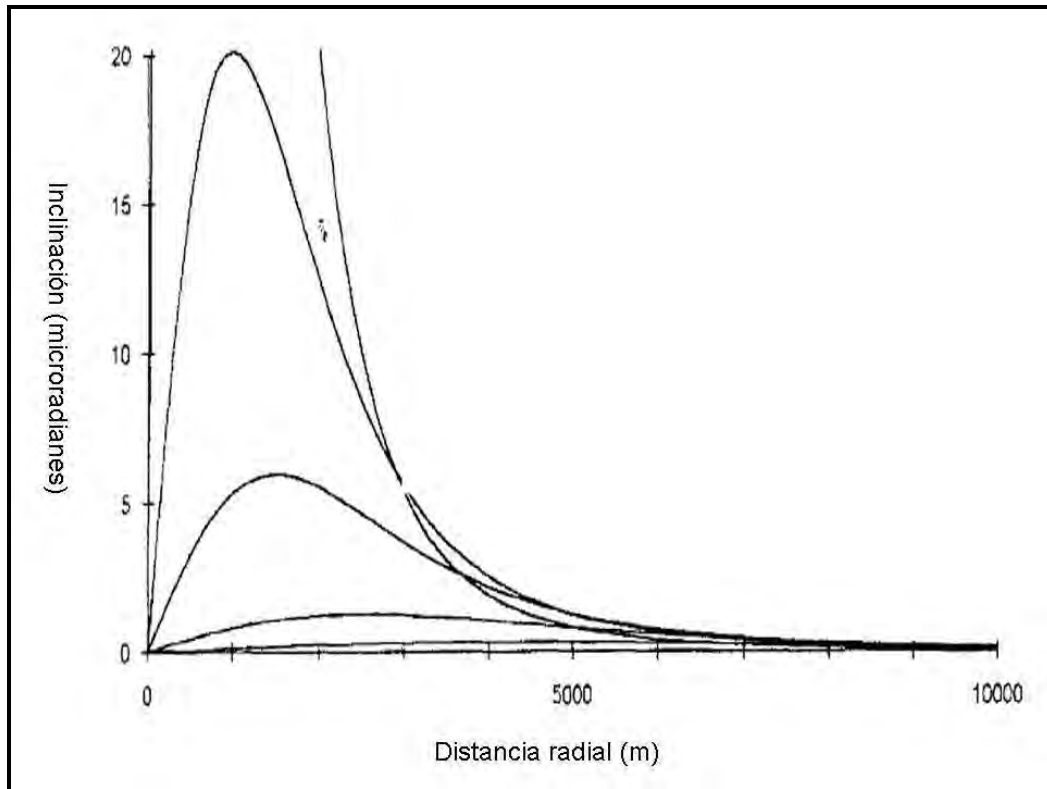


Figura 24. Inclinaciones esperadas en el volcán Popocatépetl, de acuerdo a la ecuación 3.

La interpretación de los datos de inclinación, en ambientes volcánicos activos es de esperarse que se atribuya a movimiento de magma. Cuando el magma ejerce una presión hacia arriba, la pendiente de las zonas adyacentes generalmente indica una inclinación positiva del centro de la elevación. Por el contrario, si el terreno cede, el cambio negativo de inclinación puede interpretarse en términos de reducción de presión. Son comunes los inclinómetros electrónicos de registro continuo, y se han convertido en el instrumento más utilizado para medir la deformación volcánica en tiempo real.

En el caso del volcán Popocatépetl se cuenta con dos inclinómetros instalados en el flanco norte cercano a la estación sismológica Canario y otro al oeste del volcán

en el área de la estación PPX. Los inclinómetros instalados son de la marca Applied Geomechanics (Guevara E. et al 2003) (Figura 25).



Figura 25. Inclinómetro electrónico como el instalado en la estación Canario.

2.3.5.4 GPS (Sistema de Posicionamiento Global)

El sistema de posicionamiento global consiste en una constelación de 24 satélites. Cada satélite orbita la Tierra dos veces al día, a una altitud de unos 20.000 Km sobre la superficie de la tierra. y transmite continuamente información sobre las frecuencias de radio específicas para los receptores en tierra. El GPS fue desarrollado por los EE.UU para el departamento de defensa como un sistema de navegación en todo el mundo y ha sido adoptado por la población civil para muchos otros usos, como la topografía, la cartografía y aplicaciones científicas. Con receptores sofisticados y técnicas de análisis de datos, podemos determinar la posición del receptor con precisiones centimétricas. El funcionamiento del GPS, se basa en la transmisión que realizan los satélites continuamente y una estimación de la posición del mismo, un código digital, y la hora precisa de la señal. Los receptores de GPS miden la distancia utilizando el tiempo de viaje de

las señales de radio. La distancia se calcula multiplicando el tiempo que toma las señales de radio para llegar a los tiempos de receptor de la velocidad a la que viajan las señales. Conocida la posición de los satélites es posible calcular la posición del receptor en tierra o en el aire. Es necesario que los receptores reciban simultáneamente las señales de al menos 4 satélites, en parte porque los relojes de los receptores no son tan exactos como los relojes atómicos de los satélites. La actual constelación de satélites GPS ofrece al usuario de 5 a 8 satélites a la vista desde cualquier punto de la Tierra, si se tiene una vista despejada del cielo en todas direcciones. Con esta mayor cantidad de información, un receptor GPS puede determinar rápidamente la posición con precisión de metros. Sobre los volcanes, sin embargo, una precisión de unos pocos centímetros o menos es muy importante para detectar una deformación. Para obtener esta clase de precisión en las medidas, se deben tomar en cuenta otros factores, incluyendo la variación en la velocidad de la señal transmitida desde el satélite mientras viaja a través de la atmósfera y la incertidumbre en la posición del satélite.

Una manera común de eliminar los errores potenciales es colocar al mismo tiempo varios receptores GPS sobre puntos de referencia en el volcán, de modo que simultáneamente se puede recopilar datos de los mismos satélites. Dado que la mayoría de los errores asociados con el retraso de la señal a través de la atmósfera y la ubicación de los satélites se convierte en el mismo para todos los sitios, se puede determinar su posición respecto a otros con precisiones centimétricas. Sin embargo la precisión depende de que esta observación esté

ligada a un punto de referencia que se considere fijo y que preferentemente deberá ubicarse fuera del área de la deformación esperada en el entorno del volcán. Para la mayor precisión, es necesario realizar sesiones de observación de varias horas y luego calcular la posición en función de la estación de referencia.

En el volcán Popocatepetl en este trabajo se hace referencia a la reocupación de una red de puntos en el sector sureste del volcán, consistente de un polígono de 4 vértices. El equipo que se utiliza son dos receptores GPR3 Topcon de doble frecuencia que se colocan en cada sitio de manera temporal (Figura 26).

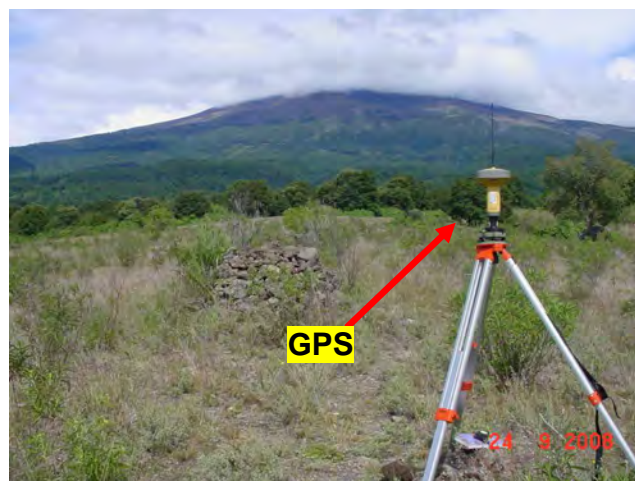


Figura 26. Mediciones con GPS en el sector Sureste del volcán Popocatepetl.

2.4. Morfología del cráter antes de 1996

A principios del siglo XX, y en particular en 1906 el interior del cráter presentaba paredes verticales y en el fondo un pequeño lago (UNAM, 2005) (Figura 27). En 1919 H. Breme observó que las dimensiones del lago se habían reducido notablemente (Figura 28) (UNAM, 2005). En febrero de ese mismo año el volcán incrementó su actividad. Lugareños observaron que en el fondo del cráter se apreciaba un cúmulo de rocas con forma de “cazuela invertida”. El 11 de octubre de 1920 P. Waitz observó un tapón de lava en el fondo del cráter del volcán. Esta estructura sin duda era un domo de lava.



Figura 27. Cráter del Popocatepetl en 1906. Fotografía de Friedlander de 1906, tomada de Mitos de dos volcanes, UNAM, Museo del Palacio de Bellas Artes, 2005.

En este periodo de actividad del volcán, se presentaron explosiones que destruyeron ese domo. Una de estas fue presenciada por el Dr. Atl en marzo de 1920 (Figura 29). En esa visita mediante un dibujo informó que en el fondo permanecía un domo de lava. Reportes de la época indican que la actividad explosiva persistió durante varios años. No existen evidencias escritas de que haya sido un sólo domo. Sin embargo es probable que hayan sido varios emplazamientos, dado que el 15 de noviembre de 1925 I. Friedlander y H. Camacho visitaron el cráter del volcán e informaron que había un domo de lava en el fondo (Figura 30).



Figura 28. Cráter del Popocatepetl en 1919 . Fotografía de H.Bremme de 1919, tomada de Mitos de dos volcanes, UNAM, Museo del Palacio de Bellas Artes, 2005



Figura 29. Explosión en el volcán Popocatepetl ocurrida durante el asenso al cráter por parte del Dr Atl y colaboradores en marzo de 1921. Fotografía, tomada de Mitos de dos volcanes, UNAM, Museo del Palacio de Bellas Artes, 2005. .

La actividad se extendió entre 1919 a 1927, y fue similar a la actual caracterizada por formación de domos de lava y explosiones y exhalaciones. Resultado de esta fase fue que el fondo del cráter principal fue rellenado por unos 90m de escombros de los domos, y la formación de un cráter interior en el remanente del último de los domos (Figura 31). Reportes de 1947 (De la Cruz-Reyna, 1995) indican que se observaron fumarolas. Posterior a ese año no existe información adicional. Durante las siguientes seis décadas el volcán no mostró actividad evidente.



Figura 30. Domo en el interior del cráter del Popocatépetl en 1925. Fotografía de I. Friedlander y H. Camacho de 1925, tomada de Mitos de dos volcanes, UNAM, Museo del Palacio de Bellas Artes, 2005.

En 1986, miembros del Grupo de escaladores de montaña de la UNAM, descendieron al cráter, observaron que la parte inferior del borde del cráter principal tenía una cota de 5.250 m sobre el nivel del mar y el cráter de unos 250 m de profundidad, así como un pequeño cráter circular de unos 200 m de diámetro y 50 m de profundidad con un pequeño lago, aproximadamente circular de unos 40 m de diámetro y 10 m de profundidad. El agua estaba tibia (29 °C), traducida en un tono verdoso. Apreciaron en la parte inferior de los dos principales cráteres interiores, abundantes fumarolas pequeñas con depósitos de azufre a su alrededor. Las temperaturas de las tres muestras de las fumarolas en el fondo del cráter interior se encontraban en el rango de 97 a 99 °C. También detectaron que durante la noche había un resplandor rojizo, lo que sugiere temperaturas mucho más altas. Este tipo de brillo no se había reportado en el interior del cráter desde 1938 (GVN 11, 01, 1986).

Durante 1987, el pH del lago fue 2-2.7 y la temperatura era de 30 °C. La continua actividad fumarólica continua comenzó en agosto de 1988. Una visita a la cumbre de marzo de 1989 por Alejandro Rivera Domínguez reveló grandes depósitos de azufre en los cráteres principal y del interior. Nuevas fumarolas (no observadas en 1987-88) en la pared del cráter principal emitían gases de alta presión y vapor sulfuroso a 300 m. (GVN, 14, 04,1989)

Visitas a la Cumbre en marzo y abril de 1989 revelaron grandes depósitos de azufre en los cráteres principal y el interior, y más de 20 fumarolas hacia el Sur que no habían estado presentes 2 años antes. El 15 de noviembre de 1989, la primera estación de vigilancia sísmica en el volcán Popocatepetl comenzó a funcionar cerca de Tlamacas, en el flanco NW a 3980 m sobre el nivel del mar. La estación consta de transmisión continua de señales analógicas al Instituto de Geofísica de la UNAM. También se instalaron 6 bases para una red de deformación, sobre el flanco NW entre 3.980 y 4.525 m de altitud. Hasta ese momento, tras los primeros 9 meses de registro sísmico indicaron que la sismicidad de fondo estaba dominada por pequeños sismos regionales que ocurren dentro de un radio de 40 Km., sobre todo al W y SW del volcán. Sin embargo, un número pequeño de eventos tipo B, han ocurrido persistentemente (GVN, 15,08, 1990)



Figura 31. Vista del interior del cráter del Popocatepetl de 1927. Fotografía tomada de Mitos de dos volcanes, UNAM, Museo del Palacio de Bellas Artes, 2005

A partir de enero de 1993 aumentaron los informes de los residentes de Puebla, que indicaban que era evidente que durante las tardes se apreciaran fumarolas, de gas y vapor. El lago en el interior del cráter aumentó la temperatura de 29 °C en 1986 a 51 °C en marzo de 1993. Las principales fuentes de actividad intensa de vapor se encontraron en los fondos de ambos los cráteres principal e interior. Manchas y depósitos de azufre se observaron alrededor de los cráteres. Al menos 30 nuevas fumarolas en el suelo del cráter fueron detectadas. (GVN, 18, 05, 1993).

Durante una visita al cráter el 19 de febrero de 1994 hecha por Hugo Delgado, el pequeño lago presentaba un tono verde lechoso con una temperatura de 65 °C y un pH de 1,5. La descripción de este lago del cráter contrasta con las observaciones de 1986, en color (muy clara con un tono verdoso), temperatura

(29 °C) y pH (6,5). Las temperaturas en los respiraderos de fumarolas, medida mediante un termopar, oscilaban entre 250 y 380 °C (GVN, 19, 04, 1994)

En marzo de 1994 la sismicidad comenzó a aumentar presentando 99 eventos de tipo B, en comparación con diciembre 1993-febrero 1994, cuando eran 62. Este aumento persistió en abril y mayo, con 164 y 295 eventos de tipo B, respectivamente (GVN, 19, 06, 1994).

Un nuevo episodio de la actividad explosiva en el volcán Popocatepetl comenzó el 21 de diciembre de 1994. Esta erupción fue precedida por incrementos en la sismicidad, flujo de SO₂, y la actividad fumarólica vista durante los últimos 13 meses. Aunque en la sismicidad del año pasado se levantó y se cayó varias veces, durante fines de octubre hubo un repentino aumento (aproximadamente de 1,6 a 10 veces) de los microsismos diarios en comparación con meses anteriores. Se tomaron algunas mediciones de flujo de SO₂ total en el aire que tuvieron un promedio de más de 1.000 toneladas / día. Durante octubre y noviembre de 1993 un grupo de fumarolas en el cráter de la cumbre produjo nubes que llegaron a 6.000 m de altitud extendiéndose a veces hasta por 50 Km. (GVN, 19:11, 1994).

En la mañana del 21 de febrero de 1995, por primera vez desde que las erupciones comenzaron el 21 de diciembre de 1994, Claus Siebe, observó en el fondo del cráter principal, otro de menor tamaño rodeado por una roca volcánica compuesta de ceniza de baja densidad de arena limosa de color café a gris, que ocupaba el lugar del antiguo lago (figura 32) (GVN,20:02, 1995) .



Figura 32. Fotografía de C.Siebe de 1995, tomada de Mitos de dos volcanes, UNAM, Museo del Palacio de Bellas Artes, 2005. Muestra al cráter del volcán en su vista del sureste con paredes verticales y el fondo del mismo azolvado con material suelto y con menor profundidad que en 1927.

Una fotografía de enero de 1996 tomada por H. Delgado muestra que la reciente actividad no provenía del cráter interior central formado en 1927 si no por tres bocas cercanas a las paredes del cráter principal (Figura 33). Una fotografía de S. de la Cruz, de marzo de 1996 muestra salida de gases y cenizas por una de esas bocas (Figura 34). A partir de marzo de 1996 se presenta la formación de nuevos episodios de creación de domos en el volcán. Con la información disponible y si la actividad de 1920 fue similar a la actual, en la que se habrían producido formaciones de domos en ese periodo de actividad, entonces transcurrieron 76 años sin la formación de domos en el interior del cráter del volcán Popocatepetl.



Figura 33. Cráter del volcán en su vista del sureste con paredes verticales y con las bocas por donde se produjeron las emisiones de gases y cenizas de 1994 a 1996. Fotografía de H. Delgado., tomada de Mitos de dos volcanes, UNAM, Museo del Palacio de Bellas Artes, 2005.



Figura 34. Cráter del volcán y la emisión de gases y cenizas por una de las bocas que se produjeron en el período de 1994 a 1996. También se aprecia actividad fumarólica incipiente en el fondo del cráter interior. Fotografía de S. De la Cruz., tomada de Mitos de dos volcanes, UNAM, Museo del Palacio de Bellas Artes, 2005.

2.5. Procesos de formación de domos en otros volcanes

La formación de domos, es un fenómeno recurrente en volcanes del mundo. Aunque es más común en las fases post-eruptivas, también existen casos de emplazamiento de domos tras largos períodos de reposo. En algunos de los volcanes se han presentado procesos de emplazamiento de domos con un comportamiento cíclico. Por ejemplo en el volcán Lascar, donde estos ciclos, se caracterizado primeramente por extrusión de un domo en un cráter activo, acompañados por intensa degasificación y actividad fumarólica alrededor del domo. Posteriormente el domo presenta una subsidencia y el ciclo culmina con actividad explosiva (Matthews et al 1997). En otros casos como el del domo Santiaguito del volcán Santa María se produce el emplazamiento de los domos y dado que no hay un cráter que los contenga se presentan flujos de lava o flujos de bloques (Harris et al 2003). Esta comportamiento es periódico y se caracteriza por se un ciclo en el cual se produce emisión de lava con picos altos de tasas de emisión que pueden permanecer por tiempos prolongados (años) y posteriormente una disminución en esa tasa de emisión que también puede permanecer por tiempos grandes (3 a 11 años), sin embargo en el 2000, la diferencia de tasas entra cada uno de esos ciclos ha estado disminuyendo entre ciclos (Harris et al 2003).

A continuación se describen brevemente algunos casos recientes de procesos de emplazamiento y destrucción de domos:

2.5.1 Volcán St. Helens (USA)

Este volcán está situado en la región de la cordillera Cascades al oeste de los Estados Unidos. Es un estratovolcán andesítico –dacítico, con una elevación de 2549msnm. La actividad precursora inició el 16 de marzo de 1980 con una serie de sismos volcanotectónicos de baja magnitud. Asimismo, se observó una fractura de 4.900 m de largo que cruzaba toda la cima de la montaña de este a oeste. Se midieron deformaciones de 1.5 a 1.8 m por día. El 8 de abril se determinó en la cara norte una deformación que llegó a ser de 150m. Esta deformación se asoció con la presencia de un criptodomo que generaba un aumento de volumen interno de $125 \times 10^6 \text{ m}^3$. Toda esta actividad culminó con una erupción explosiva con VEI 5. En el cráter remanente de esa erupción creció un domo en diferentes episodios de emisión entre finales de 1980 y 1986 (figura 35). Ese domo alcanzó un volumen de $\sim 75 \times 10^6 \text{ m}^3$. Posteriormente, ese domo fue destruido parcialmente. En octubre de 2004 se produjeron explosiones y el emplazamiento de un nuevo domo en el lugar que ocupaba su predecesor (figura 36) con una tasa de emisión de $\sim 2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, y un volumen para febrero de 2005 de $\sim 44 \times 10^6 \text{ m}^3$ (<http://vulcan.wr.usgs.gov/>).



Figura 35. Imagen del domo en el St. Helens de 1983. Fuente Bob Symonds, 1983 (U.S. Geological Survey). /

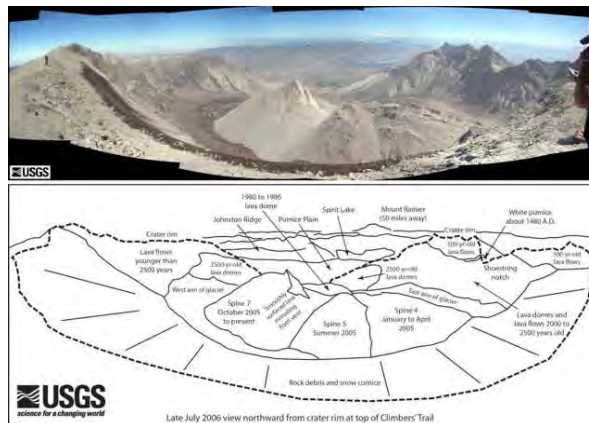


Figura 36. Foto del flanco norte del volcán St Helens el 27 de julio de 2006. Tomada de <http://www.volcano.si.edu/world/volcano.cfm>

2.5.2 Santiaguito

El volcán Santa María es un estratovolcan con una elevación de 3567 msnm, que se localiza cerca de la ciudad de Quetzaltenango Guatemala (figura 37). Este volcán registró una erupción violenta en 1902, con un VEI 6, expulsando cerca de 8 km^3 de roca densa equivalente y perdiendo una parte de la cima en el sector suroeste. Posteriormente mantuvo un nivel bajo de actividad caracterizada por pequeños geysers y algunas emisiones menores de ceniza, hasta que en 1922, se inició el emplazamiento de un domo cercano al cráter de la erupción de 1902, conocido como domo Santiaguito. De 1922 a 1984, ocurrieron al menos 22 fases de emplazamiento acumulando un volumen cercano a 0.9 km^3 con una tasa promedio de $\sim 0.4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. En el período de 1984 al 2000, el aporte de material continuó. Esta actividad se ha caracterizado por colapsos de porciones de ese

domo, con formación de flujos piroclásticos (figura 38, así como explosiones de bajo nivel con alturas de columna >1km (Harris, et al 2003).



Figura 37. Volcán Santa María con el domo Santiaguito. Tomada de www.es.wikipedia.org

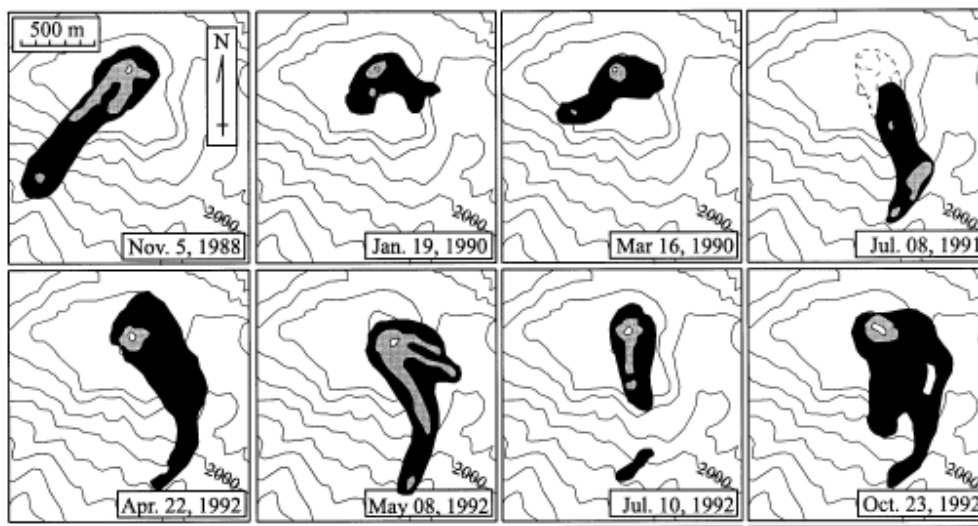


Figura 38. Esquema de crecimiento del domo Santiaguito de 1988 a 1992, sección en planta, tomada de Harris, et al 2003.

2.5.3 Montserrat

En la isla Soufriere Hills se ubica el volcán Montserrat, en la zona de las Antillas y forma parte de un arco de de islas asociado a la subducción de la placa Atlántica bajo la del Caribe. Es un estrato- volcán andesítico, ubicando en el interior de la isla (figura 39) y forma parte de una estructura compleja donde conviven varios centros de emisión o estructuras de diferentes edades (<http://www.mvo.ms>). En julio de 1995, actividad sísmica previa a una erupción freática con la formación de flujos piroclásticos fríos, marcó el inicio de un incremento en la actividad magmática del volcán. En noviembre de ese año se emplazó un domo en la cima y sobre uno de los costados, con una tasa de $0.2-0.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, incrementando su tasa para enero de 1996 a $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y para julio a $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, generando múltiples flujos piroclásticos por colapsos de domo. Este primer domo fue destruido por una explosión en septiembre de 1996, y posteriormente en 1997 se produjeron varios pulsos de emisión, expandiéndose en otras direcciones. El volumen alcanzado para esa fecha fue de aproximadamente $60 \times 10^6 \text{ m}^3$. Para noviembre de 1999 este domo había sido degradado por varios colapsos. A finales de ese año se observó el emplazamiento de un nuevo domo que alcanzó cerca de $162 \times 10^6 \text{ m}^3$, perdiendo parte de su volumen por colapsos. Posterior a ese año se observó el emplazamiento de varias espinas, algunas con 90 m de altura. Después se ha observado nuevas fases de emisión y destrucción de domos en los años 2003, 2005, 2006, 2008 (figura 40). Para julio de 2008 el volumen remanente de domos era de $\sim 200 \times 10^6 \text{ m}^3$. En 2009 y 2010, se observaron

nuevos pulsos de emisión y emplazamiento de domos.
(<http://www.volcano.si.edu/world/volcano.cfm>).



Figura 39. Volcán Soufriere Hills Isla Montserrat. Tomada de www.mvo.ms



Figura 40. Domo en el volcán Montserrat, Soufriere Hills de junio de 2006.

2.5.4 Colima

Es un estrato volcán situado al occidente de México, con una elevación de 3850 msnm, construido sobre una caldera de 5 km (Somma) (figura 41). Junto al Nevado de Colima, este complejo volcánico se sitúa en el piso de un graben. Una de las erupciones más importantes ocurrida en los últimos 200 años en este

volcán fue la de 1913 con VEI 4~5 (Saucedo et al, 2010; 2011). Posteriormente, el cráter remanente dejado por esa erupción fue parcialmente llenado por varios episodios de ascenso de lava. En 1960, 1975 y 1981 fueron reportados emplazamiento de domos en la cima del cráter. El volumen del domo de 1975 alcanzo 10^8m^3 , y el de 1981 tuvo ~150m de diámetro por ~50m de altura y terminando su emplazamiento en junio de 1982. En marzo de 1991 un nuevo emplazamiento de domo fue confirmado, el cuál para esa fecha tenia 100m de diámetro por 40m de altura, y para junio de ese año era evidente la presencia de colapsos, asociados con flujos de bloques y cenizas. En noviembre de 1998 un nuevo episodio de emplazamiento de domo fue observado creciendo en el cráter sumital (figura 42), y produciendo flujos de lava hacia el sector sur del cráter, siendo destruido por varias explosiones entre las que destaca la del 17 de julio de 1999. En noviembre de 2001, un nuevo episodio de emplazamiento de domo fue detectado, en esta ocasión con forma de espina, con 40m de altura y 40 de base. En febrero de 2002 otro emplazamiento de domo fue detectado (figura 43), con un volumen de $720,000\text{ m}^3$, y una tasa de extrusión de $\sim 0.9\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$. Este domo fue destruido por varias explosiones como la del 17 de julio de 2003. En septiembre de ese año, un domo nuevo con una tasa alta de emisión fue reportado, causando un flujo de lava hacia el sector norte del volcán. Explosiones posteriores dejaron un cráter remanente en la cima del volcán de ~269m de diámetro por ~30m de profundidad. En octubre de 2007 un nuevo domo inició su crecimiento en el cráter remanente. Para marzo de 2009, ese domo había alcanzado un volumen de $1,400,000\text{ m}^3$ con tasas de emisión en el rango de $\sim 0.03\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$. Ese domo continua emplazado en la cima hasta la fecha, ha llenado parcialmente el cráter y

ha producido colapsos con flujos piroclásticos (figura 44) (<http://www.volcano.si.edu/world/volcano.cfm>)



Figura 41. Imagen del volcán de Fuego de Colima. Tomada por James Allan, 1981 (Smithsonian Institution)



Figura 42. Imagen del domo de 1998. Tomada por J.C. Gavilanes, 1998.



Figura 43. Imagen del domo de 2002. Tomada por M. Bretón, feb.2002



Figura 44. Imagen del domo de 2011. Tomada por Protección Civil del estado de Jalisco, 2011.

3.- METODOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN Y CÁLCULO DE VOLÚMENES DE LOS DOMOS EN EL VOLCÁN POPOCATÉPETL

3.1. Métodos de fotogrametría

La fotogrametría es la técnica de obtener información fidedigna cuantitativa y cualitativa a partir de imágenes fotográficas denominadas fotogramas o fotografías especialmente obtenidas en pares para este propósito y con una cámara especial.

La fotogrametría tiene como base sobrevuelos del territorio tomando fotografías estereoscópicas de formato especial, de eje vertical, cubriendo el terreno con fotogramas que se traslapan tanto longitudinal como transversalmente.

Como norma general, estos traslapes o recubrimientos suelen ser del 60% en el eje longitudinal y del 20% en el eje transversal (figura 45) aunque dependiendo del objetivo del vuelo, estos porcentajes pueden variar.

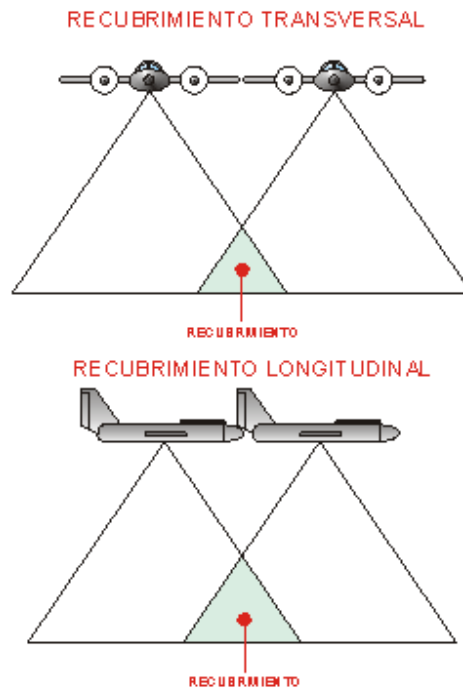


Figura 45. Recubrimientos en una fotografía Aérea

Las fotografías resultantes deben tener una desviación en su centro muy reducida con respecto a la vertical del avión para que puedan ser útiles.

Por otro lado, las cámaras que se utilizan para este tipo de trabajos, denominadas cámaras métricas, son equipos especiales de funcionamiento similar a las cámaras métricas, son equipos especiales de funcionamiento similar a las convencionales pero con negativos de formato muy grande y una calibración muy exacta de sus parámetros ópticos, de los cuales el más importante es la distancia focal definida como la distancia desde el centro del objetivo hasta el plano focal donde se ubica la película y se forma la imagen.

Las fotografías aéreas resultantes de un vuelo fotogramétrico no tienen una escala exacta, al ser el resultado de una perspectiva cónica y por el efecto ondulatorio del terreno. Así, cada punto dentro de una foto tiene su propia escala, dependiendo del lugar con respecto al centro de la foto y de la altura del terreno.

No obstante, es posible establecer una escala media aproximada de los fotogramas, (Moffitt et al 1982).

A la vez, la escala media de los fotogramas está ligada a los objetivos del vuelo; generalmente la finalidad del vuelo es formar cartografía a partir de restitución fotogramétrica, en cuyo caso hay que tener en cuenta la escala de la cartografía buscada.

Los fotogramas resultantes de un vuelo fotogramétrico deben contener además de la información gráfica del territorio de análisis, la siguiente información:

- Organismo contratante del vuelo.
- Empresa que realiza el vuelo.
- Zona del vuelo.
- Fecha.
- Hora.
- Escala aproximada de los fotogramas.
- Número de pasada.
- Número de foto.
- Información sobre la cámara métrica (distancia focal, modelo).
- Marcas fiduciales (marcas ubicadas en las esquinas de la foto que son la referencia para calcular el centro geométrico de la misma. Son un elemento imprescindible para la posterior restitución).
- Nivel para comprobar la verticalidad del fotograma.
- Altimetro, con indicación de la altura aproximada sobre el nivel del mar.

El recubrimiento común entre los fotogramas; permite obtener imágenes estereoscópicas. Cuando se observan los objetos en relieve se debe a que los ojos proporcionan al mismo tiempo dos visuales del mismo objeto desde dos puntos de vista ligeramente distintos que se intersectan. Estas dos imágenes son mezcladas en el cerebro y como consecuencia se ve una tercera dimensión o perspectiva. Este principio de estereoscopia natural sirve también a la cartografía para extraer la tercera dimensión a partir de imágenes bidimensionales. En realidad, lo que se hace en un vuelo fotogramétrico es sustituir los ojos por la cámara métrica del avión, y la distancia interpupilar por la distancia entre disparos consecutivos.

Posteriormente, aparatos denominados estereoscopios (figura 46) permiten visualizar las imágenes en tres dimensiones. Para que se puedan reproducir la estereoscopia se deben satisfacer dos condiciones esenciales, como son que cada ojo vea sólo la perspectiva que le corresponde y que las visuales tengan intersección entre sí. Con respecto a este último aspecto, esa intersección se produce cuando los fotogramas tienen zonas en común, por eso es esencial el recubrimiento estereoscópico.

La incorporación de una segunda perspectiva de la misma zona incrementa notablemente la información tridimensional, con la incorporación del concepto de par estereoscópico (dos fotografías consecutivas).



Figura 46. Estereoscopio de Espejos.

A través de restituidores estereoscopios es posible la compilación de mapas topográficos, los cuales tienen una gran cantidad de aplicaciones ya sea en trabajos de ingeniería o de investigación (Lerma-García, 2002).

3.2. Fotogrametría digital

La fotogrametría se encuentra en la actualidad ligada a disciplinas, entornos y sistemas digitales que permiten la máxima automatización de las tareas que tradicionalmente venía utilizando el operador fotogramétrico.

Este desarrollo de la fotogrametría (digital) está ligado a la rápida y constante evolución de la microelectrónica, al incremento de la potencia de las computadoras personales y a la aparición de software especializado de tratamiento digital de imágenes

Con la aplicación de la fotogrametría digital, las posibilidades de explotación de las imágenes se amplían y se simplifican permitiendo, por ejemplo, la generación automática de modelos digitales del terreno (MDT), de modelos digitales de superficie (MDS), de ortoimágenes, la generación y visualización de fotomodelos tridimensionales, la extracción automática de entidades y elementos cartográficos, la captura y visualización de fenómenos dinámicos

La parte final del proceso fotogramétrico tanto digital como analógico es la restitución fotogramétrica. En ella converge todo el trabajo anterior (vuelo y apoyo) para trazar los mapas propiamente dichos.

La restitución consiste en la formación precisa de los pares estereoscópicos en un proceso que se denomina orientación de imágenes, y en la extracción posterior de los elementos contenidos en ellas mediante unos aparatos llamados estereo-restituidores.

La tecnología de restitución ha evolucionado de los primeros restituidores analógicos a los analíticos y por fin a los de última generación digitales, que en realidad no son más que un computador con el software adecuado. Mientras los analógicos y los analíticos se basaban en los negativos de las fotos para realizar el proceso de restitución, los digitales realizan una copia digital de las fotos (escaneado) que divide en millones de puntos (píxeles) la foto.

Esta tecnología fotogramétrica digital presenta dos incrementos de la efectividad muy importantes frente a la tecnología de restituidores analíticos:

Por un lado, la extracción de la orografía y la formación de modelos digitales del terreno está altamente automatizada y se realiza de forma mucho más rápida. Por otro lado, la tecnología digital presenta grandes mejoras a la hora de formar ortofotos.

Al igual que en el caso de los últimos restituidores analíticos, los digitales obtienen la geometría de la restitución directamente en formato digital. Finalmente, es necesario considerar que se trata de una metodología sujeta a ciertas restricciones de precisión; así que para levantamientos de una gran precisión la resolución que la fotogrametría proporciona -sobre todo en el eje Z- no es suficiente, debiendo en esos casos recurrir a otros métodos más precisos de la topografía clásica

3.3. Fotogrametría aplicada en otros volcanes, ejemplos.

Existen numerosas aplicaciones de este método en estudios sobre volcanes. Se muestran sólo dos ejemplos. Baldi P., et al 2000., en la isla Volcán en Italia, realiza mediante fotogrametría la obtención de modelos digitales del terreno de este volcán con alta precisión (figura 47), para la observación de deformaciones y cambios morfológicos en el volcán.

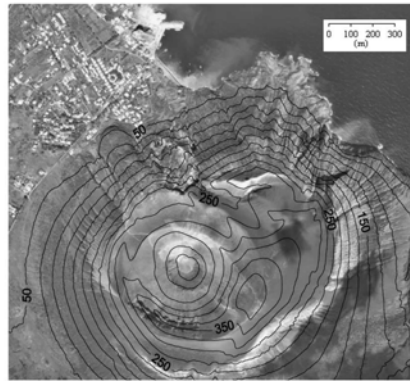


Figura 47. Imagen que muestra el modelo digital de elevación en la isla volcán en el arco Aeolian, Italia, obtenido mediante fotogrametría. Tomada de Baldi P., et al 2000.

En 2011, Thomas R. Walter, realiza para el volcán Santa Helena, un trabajo con fotogrametría terrestre, empleando cámaras digitales convencionales, para analizar que la deformación sobre la espina formada en el cráter del volcán era mas compleja de lo que se pensaba (figura 48) .

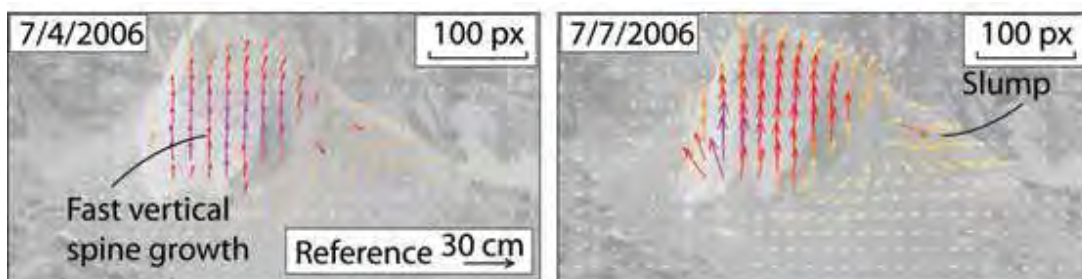


Figura 48. Imágenes de domo tipo espina emplazado en el cráter del volcán Santa Helena, 2006.

Tomada de Thomas R. Walter. 2011.

3.4. Fotogrametría en el volcán Popocatépetl y métodos de cálculo de volúmenes

Desde 1996, con el apoyo fundamental de la Dirección General de Carreteras de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (DGCF-SCT), el CENAPRED ha

contado con fotografías aéreas verticales del cráter del volcán Popocatepetl. La fotogrametría aplicada al monitoreo volcánico, combina aspectos cualitativos y cuantitativos. Los aspectos cualitativos permiten describir cambios en la morfología del cráter y del edificio volcánico, y los aspectos cuantitativos permitir calcular las dimensiones y volúmenes de los cambios que ocurran en el interior del cráter, como es el caso en el emplazamiento de domos de lava.

La metodología manual utilizada en este trabajo consiste en seleccionar puntos conocidos y reconocibles, de preferencia cercanos al borde del cráter y establecerlos como puntos fijos de referencia para escalar la fotografía y medir distancias directamente sobre ella, de tal manera que no es necesario el escaneo de las fotografías y solo se utiliza la impresión en papel, involucrando exclusivamente el área del cráter, de tal manera que no importa si en general la calidad de la toma fotográfica fue mala, dado que sólo se utiliza una porción de ella. Esta selección de puntos fijos ha permitido establecer y transformar errores aleatorios en un error sistemático que puede ser cancelado en las mediciones relativas, logrando obtener con buena precisión la determinación de dimensiones horizontales. En concreto, este método ha permitido obtener distancias horizontales de cualquier formación de domo emplazado en el área del cráter. La precisión de las estimaciones de las dimensiones horizontales de los domos está definida por la apreciación mínima en la medición directa con “regla o escalímetro” sobre las impresiones fotogramétricas, que combinada con la escala de vuelo nos arroja un valor neto de la precisión. Por ejemplo en una fotografía con escala 1:10000, la mínima distancia que se puede medir es de 0.5mm, lo cuál se traduce

en una distancia real de 5 m, de tal suerte que la precisión para las distancias horizontales se puede establecer como de $\pm 5\text{m}$. Una porción importante de las fotografías aéreas verticales fueron tomadas a una escala aproximada de 1:14000, de tal manera que la mínima distancia apreciada directamente estaría en el orden $\pm 7\text{m}$. Para el caso de las dimensiones verticales de los domos, estas se determinaron por medio de un proceso de restitución fotogramétrica. Por lo general, para este tipo de trabajos, la precisión vertical esta regida por la experiencia y destreza de los operadores de restituidores analógicos, así como por la por la calidad en la fotografía y la calidad y cantidad de los puntos de control. La precisión convencional para este método esta en el orden de $\pm 0.5\text{m}$. En el presente trabajo, la estimación de las dimensiones verticales de los domos, se basó en el siguiente método: Se marcaron puntos de control en el interior del cráter (figura 49), fijando sus coordenadas horizontales, y por medio de métodos fotogramétricos convencionales se obtuvo las coordenadas Z de esos puntos en forma sistemática. Los puntos se ubicaron en lugares donde se consideró que era más factible que se emplazaran los domos, basándose en la información de la actividad de 1919-1927 y en la ubicación del emplazamiento de los primeros domos de 1996. Finalmente, para determinar la dimensión vertical de un domo en particular, sólo se determinaba la diferencia de cotas en dos fotografías sucesivas.

Para la estimación de la precisión se debe tomar asimismo en cuenta que para la estimación de los volúmenes, los domos se han aproximando a figuras geométricas regulares, y los errores implicados serían difíciles de estimar, ya que no se tienen datos precisos de las irregularidades que separan las formas.

Para fijar una precisión para las distancias horizontales y verticales, tomando en cuenta $\pm 7.0\text{m}$ para las distancias horizontales y $\pm 0.5\text{m}$ para las verticales, de manera conservadora se consideró que el valor mínimo observado es de 10m , para ambas medidas, de tal forma que sí obtenemos un volumen idealizado (equidimensional), formado por tres valores mínimos, se obtiene que la precisión en el volumen estimado es de $\pm 1000\text{m}^3$, es decir $\pm 0.001 \times 10^6\text{m}^3$.

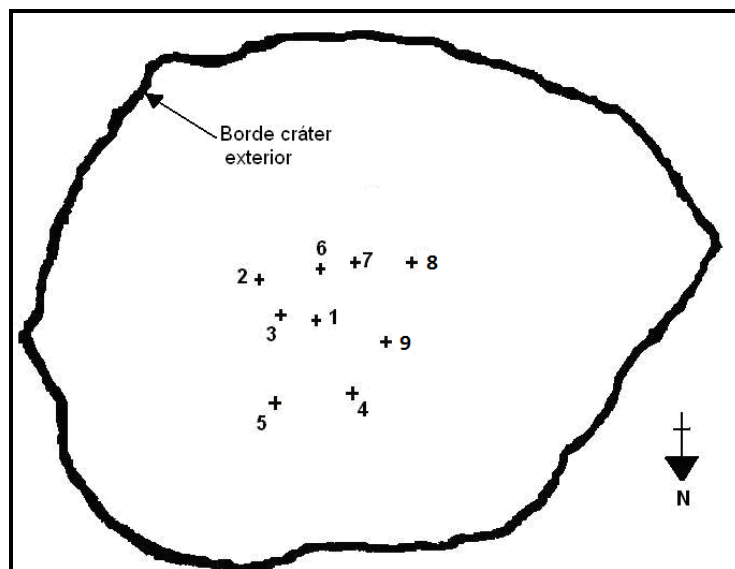
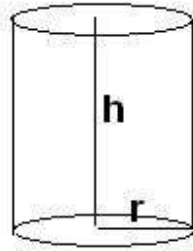


Figura 49. Puntos de Control en el interior del cráter para el cálculo de los volúmenes de los domos. Con las dimensiones horizontales y verticales de los domos se calcularon sus volúmenes, para lo cual se observó estereoscópicamente cada domo, y se determinó cual era la figura geométrica o combinaciones de ellas, que mas se asemejara con la forma de cada domo. Posteriormente se aplicó la formula que define el volumen de cada figura a cada domo, o bien se diseño la formula específica para algunos casos. Esa forma de cálculo sin duda representa una aproximación a la forma real de los domos, sin embargo puede considerarse

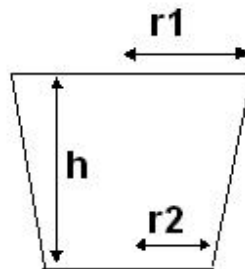
aceptable para este estudio. Sin embargo no se descarta en un futuro trabajar sobre las imágenes para afinar los datos presentados.

Las formulas y figuras que se emplearon con mayor frecuencia son las siguientes:



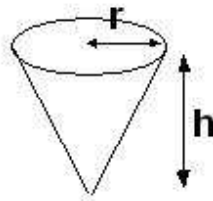
Cilindro

$$\text{Volumen cilindro} = \pi * r^2 * h$$



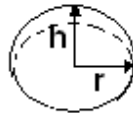
Cono truncado

$$\text{Volumen cono truncado} = \frac{\pi \cdot h}{3} (r1^2 + r1 * r2 + r2^2)$$



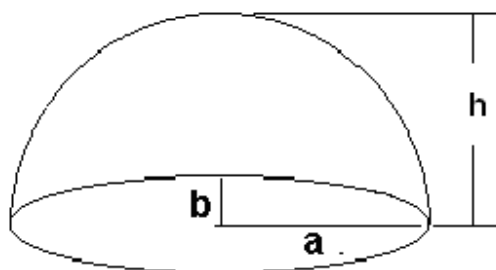
Cono

$$\text{Volumen cono} = \frac{\pi \cdot r^2 h}{3}$$



Semiesfera

$$\text{Volumen de la semiesfera} = \frac{2\pi \cdot r^3}{3}$$



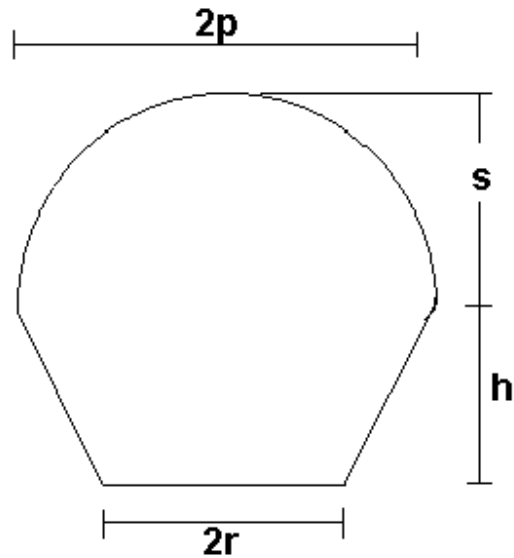
Domo hemisférico de base elíptica

Primero se obtienen dos elementos de la formula general del volumen para facilidad de cálculo (p y w).

$$p = (a * b)^{1/2}$$

$$w = \frac{p^2 + h^2}{2h}$$

$$\text{Volumen} = \frac{\pi}{3} \cdot [h^2 * ((3 * w) - h)]$$



Domo semiesférico sobre un cono truncado invertido

$$w = \frac{p^2 + s^2}{2s}$$

$$\text{Volumen} = \frac{\pi}{3} \cdot \left[s^2 * ((3 * w) - s) + \frac{1}{3} * \pi * h * (p^2 + r * p + r^2) \right]$$

3.5. Métodos indirectos de identificación de domos emplazados: EDM, tremor volcánico y eventos LP.

3.5.1.EDM

Una forma para identificar el emplazamiento de un domo del volcán Popocatepetl es a través de mediciones con EDM (Electronic Distance Meter), particularmente observando deformaciones superficiales de los flancos del edificio volcánico.

Los cambios en las distancias medidas se atribuyen específicamente a variaciones en la presión del conducto magmático causados por el tránsito de magma al nivel donde se ubican los prismas, generando una deformación temporal (reversible) que es observada con las mediciones de distancia obtenidas electrónicamente (EDM), y que es interpretada como una inflación (figura 51).

Las mediciones EDM se realizan desde la estación Tlamacas hacia vértices para prisma ubicados en el flanco norte del volcán entre las cotas 3800 y 4300 msnm. Se efectuaron con un Distanciómetro Leica DI3000S montando en un Teodolito Wild T2 (figura 52) (Gómez V. 2000).

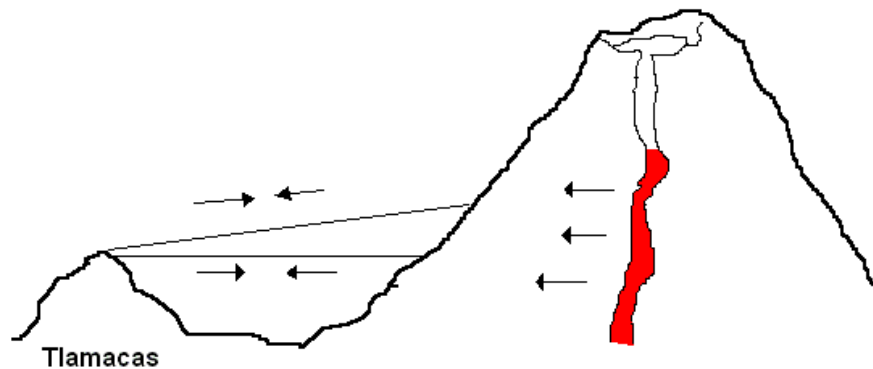


Figura 51. Esquema idealizado que muestra cuáles serían las direcciones ideales de las deformaciones asociadas con el ascenso de magma al cráter del volcán Popocatepetl, y que serían medidas con EDM.

De las mediciones con EDM realizadas desde 1993, se han observado correlaciones entre las deformaciones (inflaciones) reversibles con el emplazamiento de domos en el cráter del volcán. Se han identificado en los años 1996 y 1997, episodios de formación de domos. En estos casos las deformaciones características observadas fueron del orden de 1.2cm a 2.5cm, caracterizadas por acortamiento en las distancias asociadas con una inflación. En la figura 53 se muestran los datos de deformación desde la estación Tlamacas al vértice 3 Amigos, en ella se aprecian los cambios asociados con inflaciones reversibles, y son igualmente del orden de 1.5 a 2.5 cm. Es importante mencionar que este proceso se observó en casi todos los vértices que se median en ese entonces desde esta estación. Otro ejemplo de estos cambios, se muestra en la figura 54 con la línea de medición Tlamacas- Texcalco, en ella son muy notorios los cambios temporales “valles” en las gráficas asociados con inflaciones

reversibles que ocurrieron contemporáneas con la formación de domos, en los años 1996 y 1997.



Figura 52. Mediciones con EDM (Leica DI3000S) desde Tlamacas en el flanco norte del volcán Popocatepetl. A la derecha distanciómetro Leica DI3000S

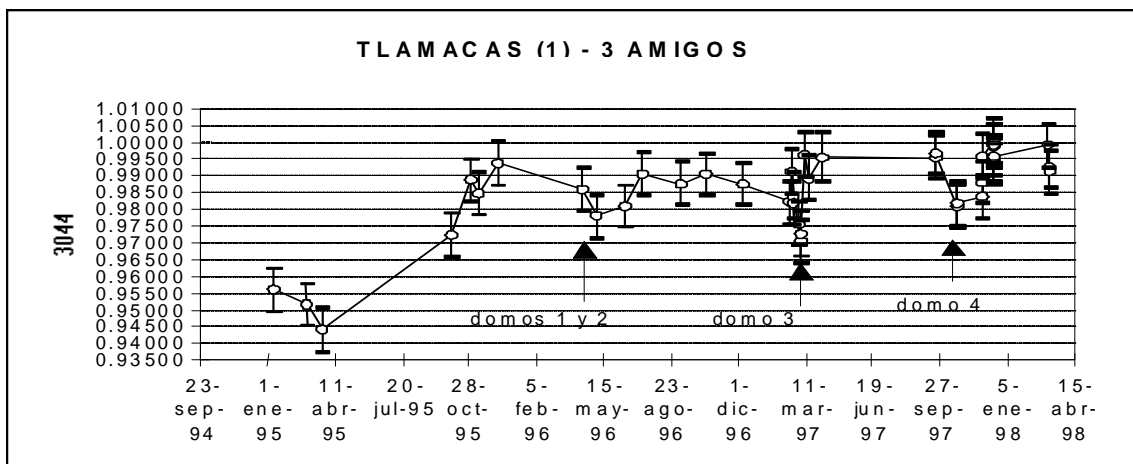


Figura 53. Mediciones EDM en el período de septiembre de 1994 a abril de 1998. La escala vertical son 5mm por división. Los datos son de la línea Tlamacas 3 Amigos en el flanco norte del volcán Popocatepetl. Las flechas indican la fecha de emplazamiento de domos.

Con la línea de medición (manual) Tlamacas-Canario de igual manera se han identificado al menos tres episodios de inflación asociados con emplazamientos de domo. Particularmente se correlacionaron con los domos de los años 2001, 2002 y 2005, en este ejemplo los cambios medidos fueron del orden de 2.5 a 3cm, igualmente reversibles (figura 55).

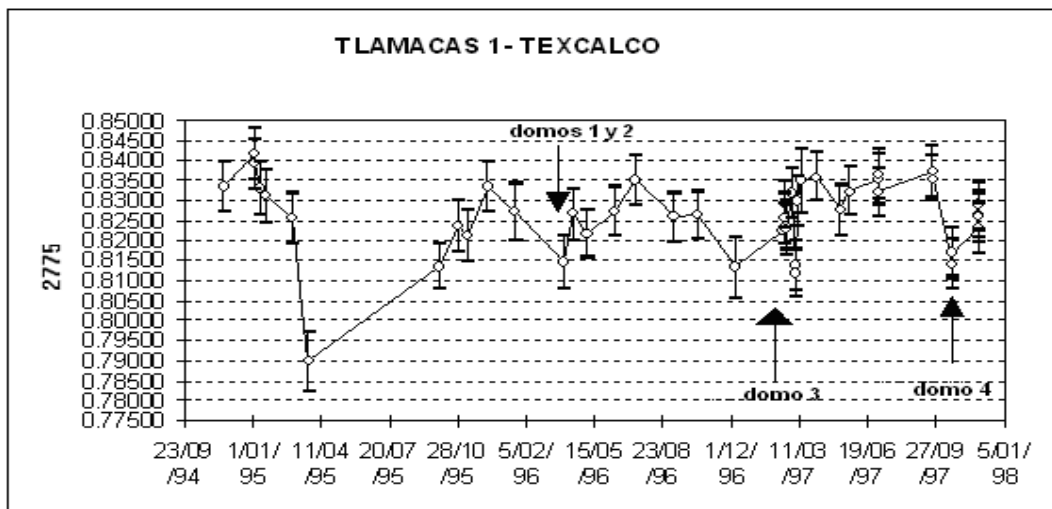


Figura 54. Mediciones EDM en el período de septiembre de 1994 a abril de 1998. La escala vertical son 5mm por división. Los datos son de la línea Tlamacas - Texcalco en el flanco norte del volcán Popocatépetl. Las flechas indican la fecha de emplazamiento de domos.

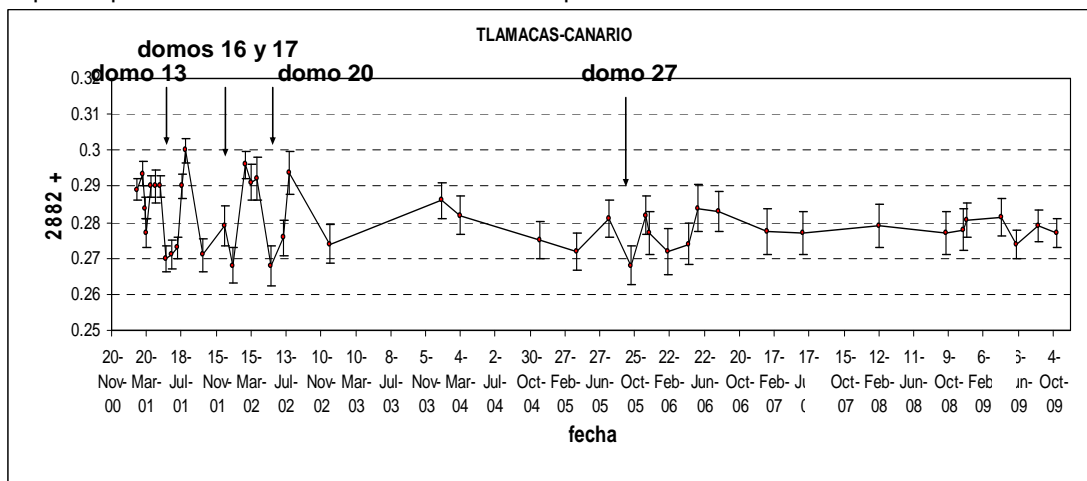


Figura 55. Mediciones EDM en el período de noviembre de 2000 a octubre de 2009. La escala vertical son 10mm por división. Los datos son de la línea Tlamacas - Canario en el flanco norte del volcán Popocatépetl y son mediciones manuales. Las flechas indican la fecha de emplazamiento de domos.

3.5.2. El tremor volcánico y los eventos de largo período LP como indicadores de emplazamiento de domos

Dentro de las señales sísmicas características asociadas al movimiento de fluidos en el interior de un volcán activo se encuentra el tremor volcánico. En el caso del Popocatepetl, esta señal mantiene amplitudes y frecuencias más o menos constantes, por un tiempo sostenido que puede ir de varios minutos a horas. Presenta un contenido espectral con picos agudos y centrados en las bajas frecuencias. En ocasiones es común observar una o dos frecuencias dominantes (Arambula 2002). Presentan frecuencias de 0.1 a 3.0 Hz, generalmente en múltiplos de 0.5 y 1 Hz (Martínez, 2003) (figura 56)

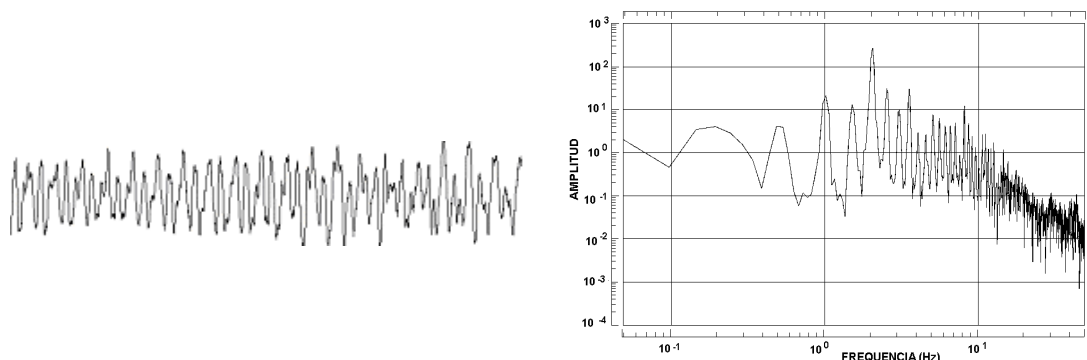


Figura 56. Tremor armónico en el Popocatepetl: a la derecha el registro sísmico y a la izquierda su correspondiente espectro de Fourier, sus picos mayores se encuentran entre 1-3 Hz en múltiplos de 0.5 Hz.

La fuente del tremor se atribuye a una actividad sostenida interna producto del flujo de fluidos, gases o magma.

En el actual período eruptivo que presenta el volcán Popocatepetl, este tipo de señales ha ocurrido en diversos períodos y se ha asociado comúnmente al movimiento de magma en el interior y posteriormente la formación de domos en el

cráter del volcán, particularmente cuando se trata de tremores armónicos sostenidos (figura 57). Posterior a la detección de este tipo de tremores, en ocasiones ha sido posible corroborar mediante una imagen del cráter el crecimiento de un domo.

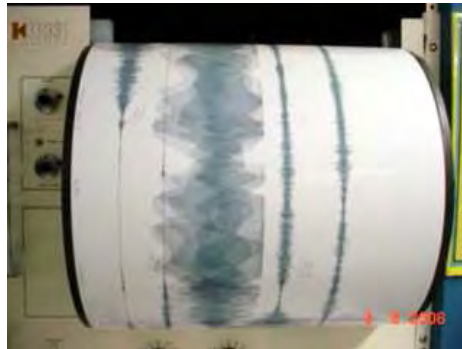


Figura 57. Tremor armónico del 3 de agosto de 2006 en el volcán Popocatepetl

En el caso del registro mostrado en agosto de 2006. En una fotografía del 24 de noviembre de 2006 se pudo corroborar el crecimiento del domo mostrado en la figura 58.

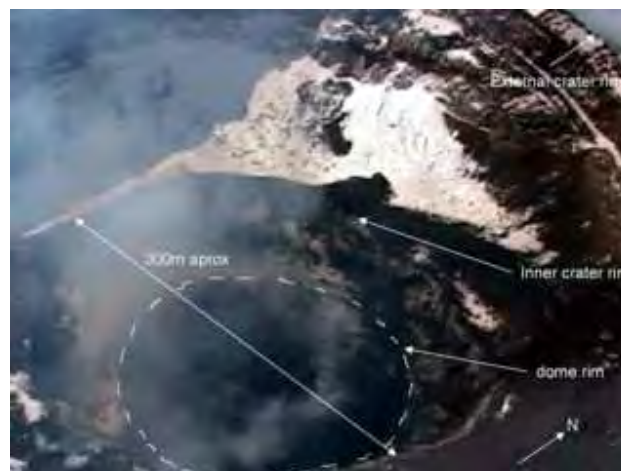


Figura 58. Imagen del cráter del volcán Popocatepetl del 24 de noviembre de 2006.

En diciembre de 2000, se presentó el episodio de registro de tremor más importante ocurrido en el volcán Popocatepetl en los últimos 15 años. El tremor

armónico se sostuvo por aproximadamente 36 horas, saturando los registros. En este episodio fue posible la toma de fotografías aéreas casi de forma inmediata, por lo que fue posible corroborar el crecimiento de un domo de grandes dimensiones emplazado en el cráter (figura 59).

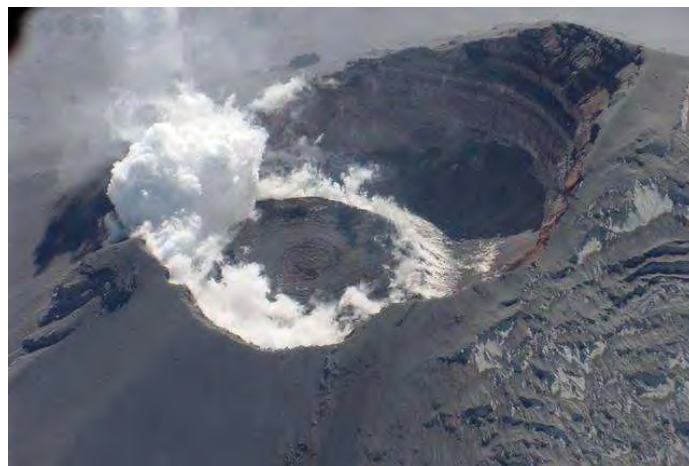


Figura 59. Imagen del domo formado en el cráter del volcán Popocatepetl el 18 y 19 de diciembre de 2000.

Es importante mencionar que en el volcán Popocatepetl, en estos 15 años de monitoreo, se han registrado en varias ocasiones episodios de tremor que no se asocian al emplazamiento de un domo visible. Aunque en algunos casos no se obtuvieron imágenes del cráter para verificar su existencia y pudieron ser desalojados por una explosión antes de ser observados, en otros casos es posible que el magma desplazado no haya alcanzado la superficie. Es también necesario enfatizar que no siempre el tremor es condición para que haya un emplazamiento de domo inmediato, dado que se asocia también al movimiento de fluidos y gases, y esta manifestación sólo puede quedarse a nivel interno.

En el Popocatepetl, la variedad de actividad sísmica permite distinguir las siguientes señales: la combinación de eventos LP con tremor de alta frecuencia se les ha denominado exhalaciones grandes, las cuales producen columnas de ceniza de más de 2 km, con menor energía que una explosión y tienen una duración de 1 a 60 min. EL registro sísmico de estos eventos es parecido aun tremor de alta frecuencia (Martínez, 2003). Una exhalación moderada es similar a la anterior pero de menor duración y produce columnas de ceniza de menos de 2 km de altura (Martínez, 2003) Por otra parte en el Popocatepetl, es posible distinguir la señal sísmica LP a la cuál se le denomina exhalación, presentan una pequeña prefase de duración variable seguida de una señal de baja frecuencia (Martínez, 2003). Estos eventos sísmicos LP tienen características espectrales semejantes al tremor y pueden persistir durante varias horas. A diferencia del tremor los LPs, si tienen una onda P emergente (McNutt, 2000). Por otra parte las exhalaciones producen pequeñas columnas de vapor (Martínez, 2003) y (Wright, et al 2002). De acuerdo con muchos autores el tremor es una serie sucesiva de eventos de baja frecuencia (McNutt, 2000). Asimismo también hay una estrecha vinculación entre las señales de sismos LPs con el tremor, dado su contenido espectral semejante. En el período de 1996 a 2009 en el Popocatepetl, se ha observado que la señal de LPs en algunos episodios, es casi continua, por lo que se ha asociado con el emplazamiento de domos. Esta característica también ha sido observada en otros volcanes, como por ejemplo en el volcán Galeras (Gil Cruz F, et al 1996). Este tipo de señal ha sido observada particularmente en agosto de 2001 (figura 60), la frecuencia característica de los eventos LPs que

formaron estos domos en particular estuvo en el rango de 1.75 a 3.5 Hz (Gómez, 2009), y fue observada por varias por varias horas y un día después, en un sobrevuelo se detecto la formación de un nuevo domo



Figura 60. Fotografía del domo en agosto de 2001, que creció con señales tipo LP, casi continuas.

4. DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD DE EMPLAZAMIENTO Y DESTRUCCIÓN DE DOMOS EN EL VOLCÁN POPOCATÉPETL EN EL PERIODO 1996-2009.

Parte de la información de la actividad del volcán que se menciona en esta sección fue tomada de la página del Cenapred www.cenapred.unam.mx.

Domo 1. Marzo de 1996.

A partir del 5 de marzo de 1996 la actividad del volcán Popocatepetl presentó un cambio significativo. Se registraron importantes señales sísmicas, algunos eventos volcanotéctónicos y emisiones de ceniza. El incremento de la actividad sísmica motivó que días después, en un sobrevuelo, se comprobara que estos eventos estuvieron asociados con el crecimiento del primer domo de lava, que se formó en la actual etapa eruptiva del volcán Popocatepetl, iniciada en diciembre de 1994. Este primer domo, apareció tras casi 15 meses de actividad eruptiva, tuvo una forma elíptica en su base, creciendo sobre los remanentes del domo de 1919-1922. La cota media de la base del domo fue de 5030 m, la máxima fue de 5090 m (figura 61). La parte más profunda se ubicó cercana a los 4966 m de altitud. Esta cota mínima se relaciona con la erupción de 1922 que produjo un cráter interno en el cráter principal, en el cual se formó una laguna que persistió hasta antes de diciembre de 1994 (Armienta et al, 2008). A partir de una fotografía de mayo de 1996 (figura 62) se calculó un volumen máximo de ese domo de lava de $(2.405 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. La lava primero llenó el fondo del cráter de 1922 y

después adquirió una forma de hemisferio o cúpula con base elíptica, de diámetro mayor 158.5 m y diámetro menor 108 m, con una altura promedio de 60 m. El color de este domo era oscuro, con una serie de grietas en forma de de anillos concéntricos. Una de las fases iniciales de destrucción de este domo es la explosión del 30 de abril de 1996, en donde hay una pérdida de volumen de $(0.050 \pm 0.001) \times 10^6 \text{m}^3$. Con el propósito de crear una base de datos de los domos y sus características, se denomina a este domo D0396-1, por lo que partir de ahora la denominación de cada domo será como D, seguido del mes de formación, posteriormente el año y al final el número consecutivo de domo formado en el periodo de análisis.

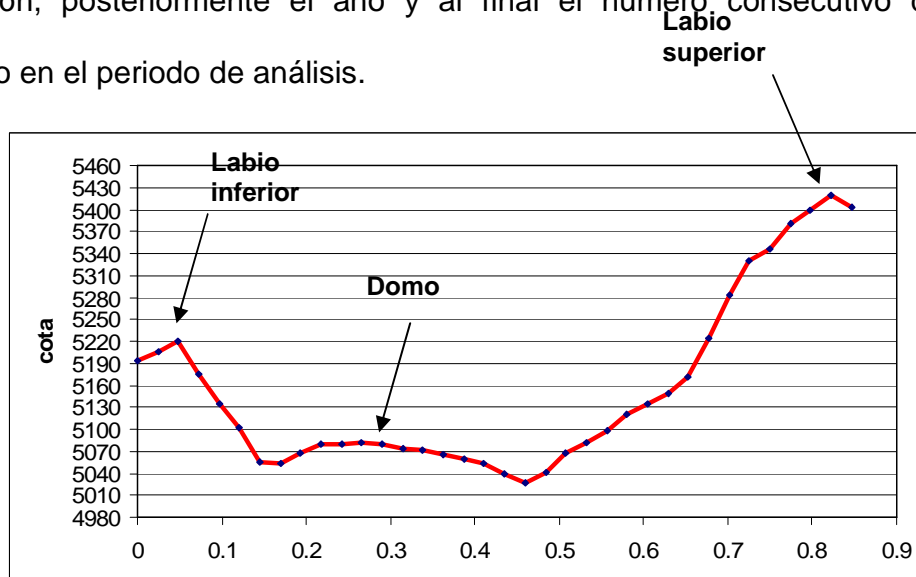


Figura 61. Perfil dirección E-W, labio superior-labio inferior del volcán Popocatepetl en mayo de 1996. La escala vertical son las cotas y la horizontal son las distancias horizontales en decimos de kilómetro, partiendo de cero, 40 m antes del labio inferior. Este perfil fue obtenido con mediciones directas sobre la fotografía. Las cotas de los puntos base fueron proporcionadas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

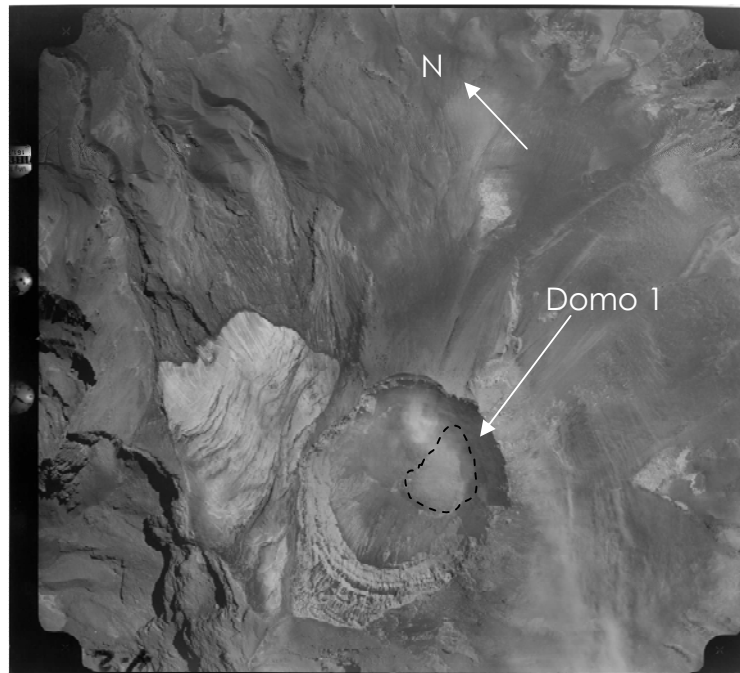


Figura 62. Fotografía aérea del volcán Popocatepetl del 21 de mayo de 1996 que muestra al domo 1 (D0396-1). Fuente: Secretaría de comunicaciones y Transportes. La línea punteada define la ubicación del domo, previamente en una visión estereoscópica se definió su localización.

Domo 2. Marzo de 1996

Por medio de las observaciones directas de marzo de 1996 fue posible identificar que el domo 1 había crecido en la parte inferior del cráter y lentamente cubrió al formado en 1922. Antes del 21 de mayo de 1996, asociado con señales de tremor se inició el crecimiento del domo 2 (D0596-2). La persistencia de las señales de tremor que ocurrían en el volcán, hecho que fue verificado mediante fotografías aéreas, sugirió la presencia del nuevo domo de lava, este fenómeno que vincula a la actividad sísmica con el crecimiento de domos, ha sido observado en otros volcanes como el Galeras (Gil Cruz, et al 2007). La estructura externa de este domo se vio alterada por exhalaciones y pequeñas explosiones. En mayo de 1996

el domo 2 cubrió completamente el cráter de 1922. Como se muestra en la figura 63, los domos 1 y 2 crecieron sobre el piso del cráter principal. El 26 de mayo de 1996, el punto más alto del domo 2 (D0596-2) llegó a 5,109 msnm de altitud y alcanzó un volumen de $(1.515 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, y el volumen acumulado en los dos primeros domos en este momento fue de $(3.869 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. Luego, después de julio de 1996 se produjo un crecimiento moderado del domo 2. Posteriormente fracturas circulares en el domo indicaron probablemente subsidencia en su estructura. En septiembre de 1996, las emisiones y explosiones fueron menos frecuentes, pero más intensas (por ejemplo, entre el 28 y 31 de octubre de 1996). Después de esos eventos la estimación del volumen desalojado fue de $(2.537 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. En noviembre de 1996, el domo 2 creció radialmente, hacia las paredes del cráter. Al parecer, la actividad explosiva en ese momento causó una subsidencia mayor en la parte central del domo y formó fracturas concéntricas que produjeron una reducción a 5090 msnm en la elevación. Este tipo de manifestación se ha observado en otros volcanes, como por ejemplo en el Lascar (Matthews, et al 1997). Más explosiones se registraron los días 27, 28 y 29 de noviembre, y los días 2, 5, 7 y 29 de diciembre de 1996 y 5, 12, 17 y 19 de enero de 1997. Observaciones efectuadas en enero de 1997 mostraron que el domo 2 presentaba una superficie lisa, debido a una cubierta de ceniza fresca que cayó sobre su superficie. La depresión central dentro del domo 2 aumentó en profundidad, creando lo que parecía un nuevo cráter. El volumen acumulado del material remanente de los 2 primeros domos hasta el 14 de marzo de 1997 era de $(1.332 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$.

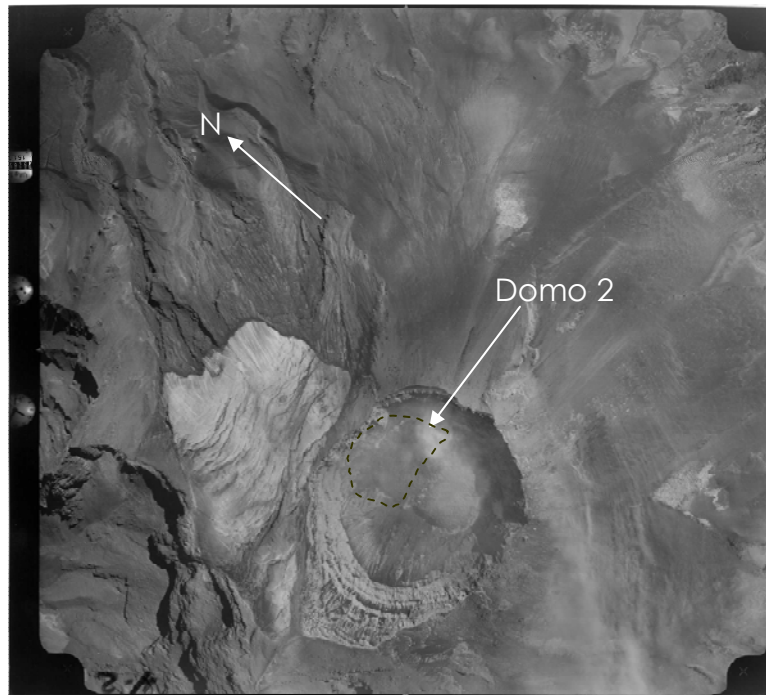


Figura 63. Fotografía aérea del volcán Popocatepetl del 21 de mayo de 1996, que muestra el domo 2 (D0596-2).

Domo 3. Marzo de 1997

En la depresión formada sobre los domos 1 y 2 fue observado el domo 3 (D0397-3) a finales de marzo de 1997, mismo que creció sobre los remanentes de los dos anteriores. Con el par estereoscópico del 15 de marzo del 97 (figura 64) se estimó el volumen del domo 3 en $(2.231 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, y un acumulado de $(3.563 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. Contrariamente a lo esperado, las importantes explosiones los días 19 y 20 de marzo de 1997 no eliminaron una proporción significativa del domo 3. El 23 de abril el domo 3 en su parte central llegó a 5060 m de altitud. Posteriormente, series de explosiones (24 y 29 de abril, 11, 14, 15, 24 y 27 de mayo, y 3 y 11 de junio de 1997) destruyeron parcialmente el domo 3, con una

pérdida estimada de $(0.411 \pm 0.01) \times 10^6 \text{ m}^3$. En la fotografía de esa fecha, se identificaron algunos clastos de diferentes tamaños que cubrieron parte de la superficie del domo 3, producto de las explosiones ocurridas. Por otra parte, la región central del domo 3 nuevamente mostró subsidencia, ubicando su punto más bajo en 5049 m de altitud. Ocurrieron más explosiones el 14, 19, 21 y 30 de junio y el 2 de julio. El 30 de junio de 1997 se produjo la mayor explosión desde el comienzo de la erupción en 1994, la cual rápidamente formó una columna de ceniza de 13 km de altitud (unos 8 km sobre la cima del volcán). En algunas observaciones en el interior del cráter del 4 de julio de 1997, se apreció que el domo 3 había sido parcialmente destruido y contenía un gran cráter.



Figura 64. Fotografía aérea del volcán Popocatepetl del 16 de marzo de 1997, que muestra el domo 3 (D0397-3).

Domo 4. Julio de 1997

Aunque la explosión del 30 de junio fue de intensidad considerable, la actividad sísmica de ese día muestra señales de tremor, probablemente asociadas con nuevos movimientos de magma o de fluidos. Esta condición en la que señales sísmicas como el tremor acompañan al movimiento y emplazamiento de domos ya ha sido observada en otros volcanes (Gil Cruz, et al 1997).

Una fotografía de julio de 1997 (figura 65) indica que dentro del cráter producto de la explosión del 30 de junio se formó el nuevo domo 4 (D0797-4), que alcanzó un volumen de $(0.416 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, con un acumulado de $(3.567 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. Adicionalmente, por medio de la fotografía del 12 de julio del 97 se identificaron “lenguas” de material emitido del cráter externo del volcán hacia los flancos S y SE, que fueron interpretadas como flujos granulares de densidad depositados durante el evento del 30 de junio (figura 65). El 10 de agosto de 1997, el domo 4 presentó hundimientos y fracturas radiales, producto de las explosiones ocurridas en julio y principios de agosto. El volumen de pérdida por estos eventos se estima en $(0.506 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, quedando un remanente de $(3.061 \pm 0.01) \times 10^6 \text{ m}^3$.

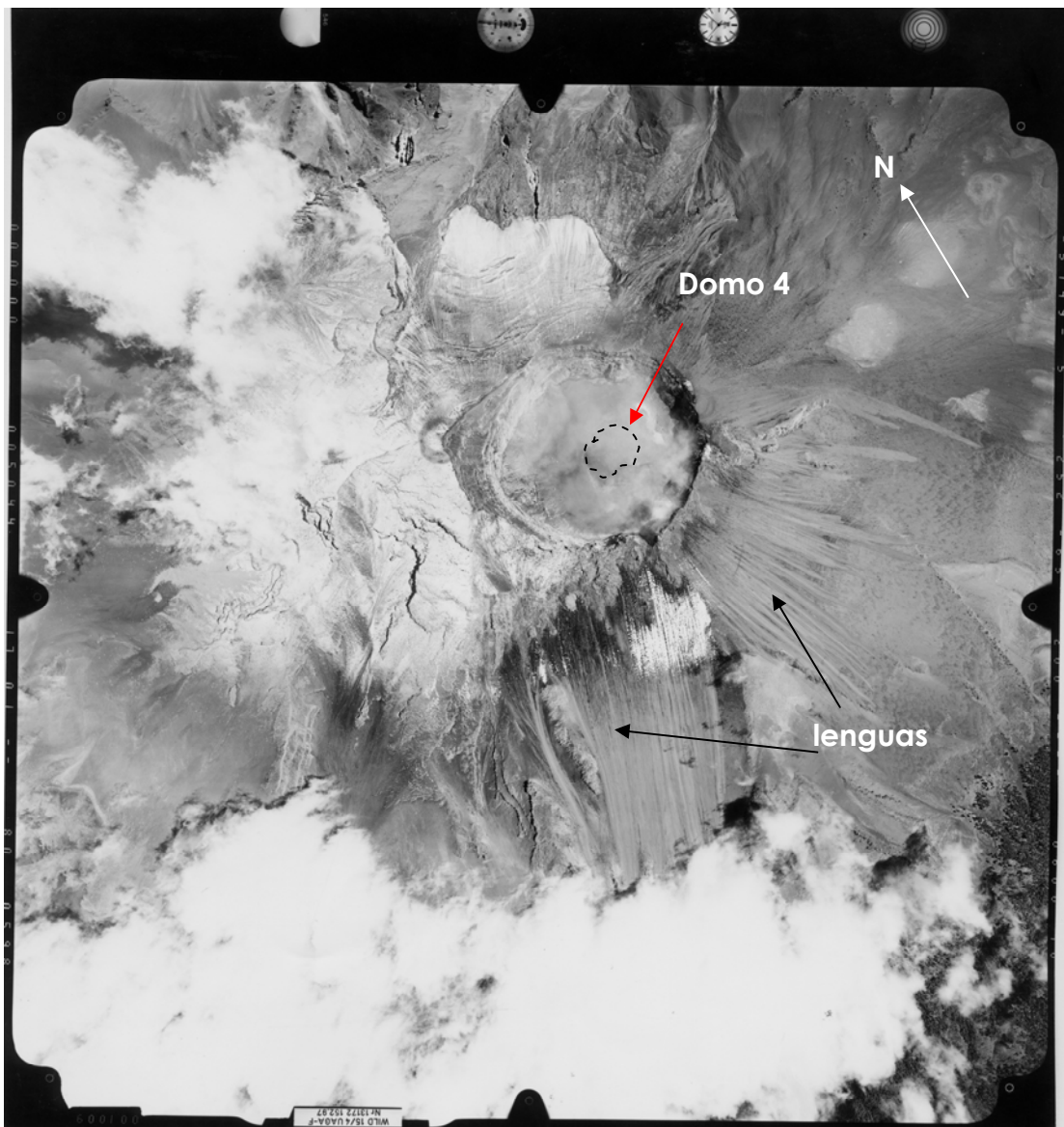


Figura 65. Fotografía aérea del volcán Popocatepetl del 12 de julio de 1997, que muestra el domo 4 (D0797-4). Fuente: Secretaria de Comunicaciones y Transportes.

Domo 5. Agosto de 1997

Más adelante, después del 19 de agosto, y después de algún crecimiento adicional del domo 4, se detectó la formación del domo 5 (D0897-5), que

inicialmente tenía una forma elíptica de 50 m de largo, 36 m de ancho, y 6 m de altura, con una textura superficial muy áspera, probablemente formado por lava de bloques (figura 66). Después el domo 4 tomó una forma circular, y el 10 de septiembre de 1997 casi había llenado las depresiones formadas en los remanentes de los domos precedentes. Aparte de algunas fracturas radiales, la superficie era de apariencia más bien regular, con una ligera depresión interior y una región en el centro con marcada actividad fumarólica. El centro de esta superficie circular tuvo una altitud de 5105 m. A partir de entonces, el domo 5 tomó una forma similar a la de un pistón, efecto corroborado con una fotografía del 22 de octubre. El domo 4 conservó una forma casi cilíndrica: Su altura creció alrededor de 15 m, sin cambios significativos en la dirección horizontal. El 29 de noviembre la superficie del domo 5 parecía más suave con excepción de la presencia de algunos cráteres pequeños sobre su estructura, producidos por algunas explosiones menores. El volumen máximo que alcanzó este domo, sumando todos sus crecimientos fue de $(1.303 \pm 0.01) \times 10^6 \text{ m}^3$, del que el 22 de octubre de ese año quedaba un remanente de $(4.364 \pm 0.01) \times 10^6 \text{ m}^3$.

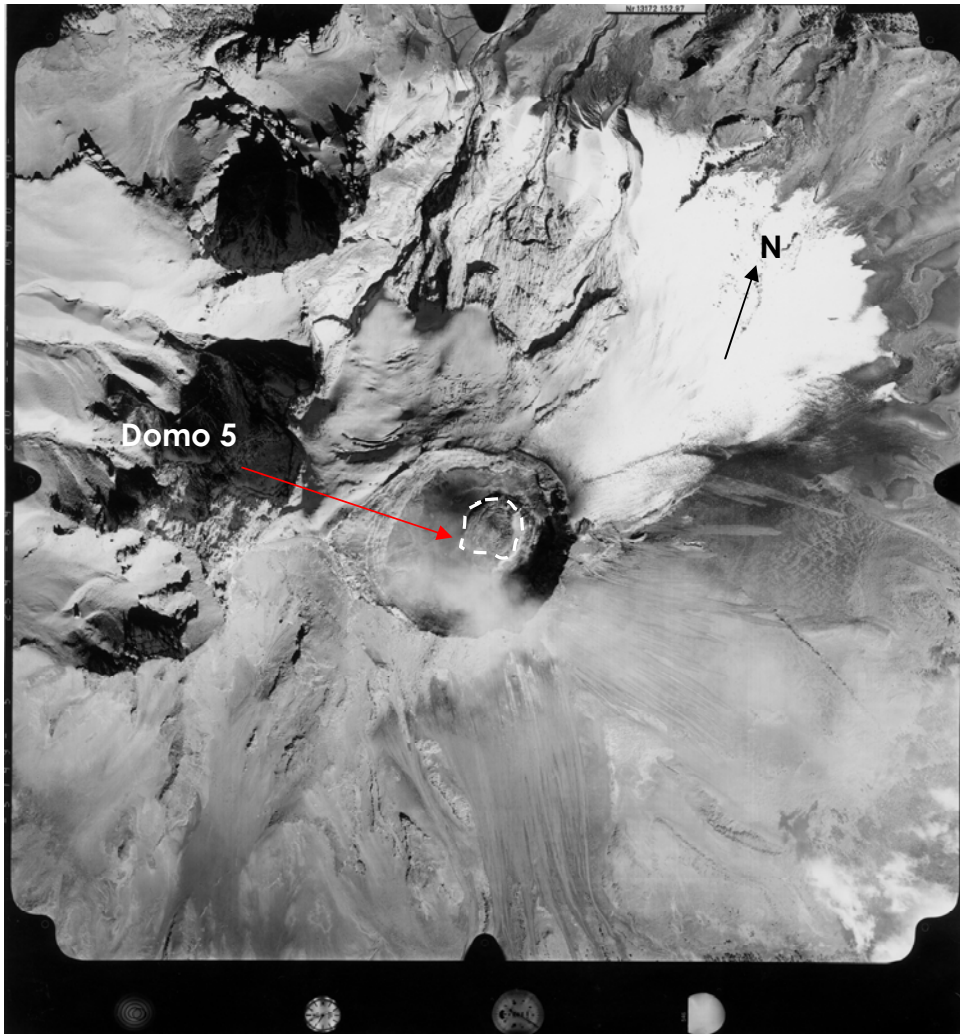


Figura 66. Fotografía aérea del volcán Popocatepetl del 22 de octubre de 1997, que muestra el domo 5 (D0897-5).

Domo 6. Diciembre de 1997 (D1297-6)

A partir del 25 de noviembre de 1997, la actividad sísmica se incrementó. El 2 de diciembre se observaron algunas leves emisiones de ceniza y en ocasiones incandescencia nocturna. El 7 de diciembre, por medio de sobrevuelos de helicóptero, se reconoció otro nuevo domo de lava de considerable volumen. El

color de la lava de este domo fue negra. (figura 67). Este domo alcanzó un diámetro máximo de 380 metros y superó por 20 m la altura del domo anterior. El crecimiento de este cuerpo, fue de tal manera, que produjo sobre la superficie del domo una serie de grietas con forma de anillos concéntricos y alcanzó un volumen de $(1.764 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, y con un volumen acumulado de $(6.129 \pm 0.01) \times 10^6 \text{ m}^3$. Visualmente ese domo parecía ser el de mayores proporciones que se había formado hasta ahora, creciendo principalmente en dirección horizontal, sobre restos de sus predecesores. La cota máxima que alcanzó esta formación fue de 5133 msnm (figura 68). Posteriormente, la actividad presentó una relativa calma del 7 al 24 Diciembre de 1997, que culminaron con explosiones y emisiones moderadas de ceniza. Algunos eventos volcano-tectónicos se detectaron en los últimos días de 1997, precediendo a una explosión de magnitud considerable ocurrida el 1 de Enero de 1998 (figura 69). Imágenes de sobrevuelos realizados el 6 de enero de 1998 mostraron que el domo (D1297-6) había sido parcialmente destruido y cubierto por escombros. La explosión del 1 de enero 1998 formó un cráter en el centro del domo 6. Este cráter de 250 m de diámetro y 60 m de profundidad, tomó una forma similar a la de 1922. Este evento también arrojó gran cantidad de bloques de lava incandescente sobre los flancos del cono volcánico. Posteriormente, hasta principios de febrero de 1998, el volcán se mantuvo en relativa calma. Llegando en ese momento el volumen remante en el interior del cráter a $(5.232 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$.



Figura 67. Domo (D1297-6) de diciembre de 1997. Fuente www.cenapred.unam.mx

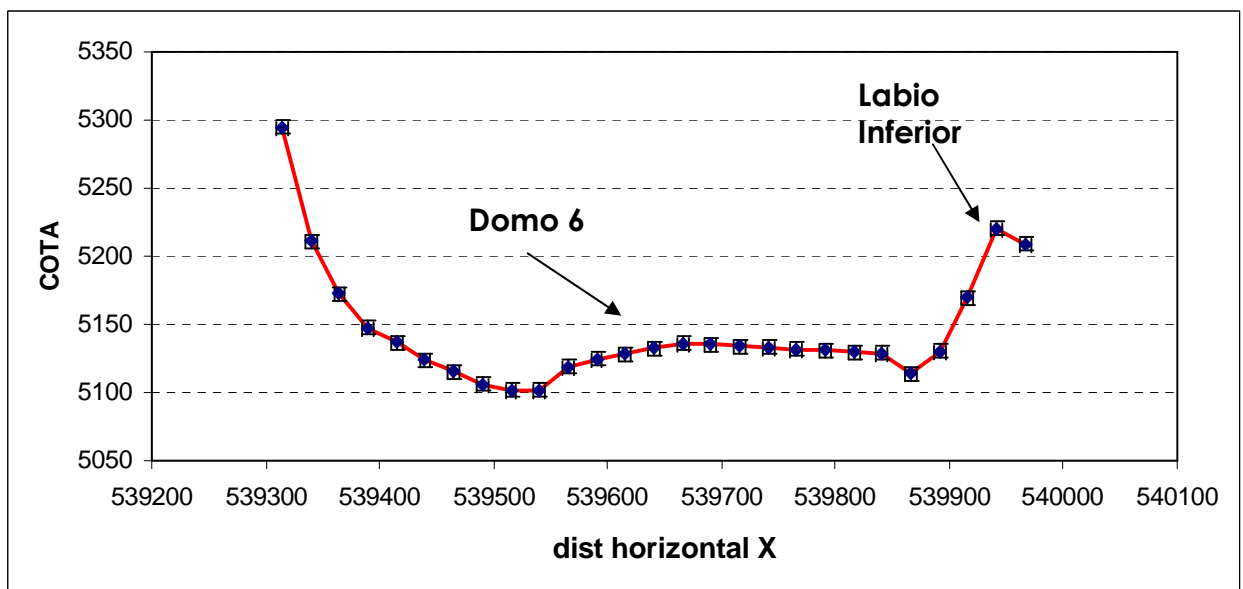


Figura 68. Perfil N-S del domo 6 en diciembre de 1997. Los datos se obtuvieron de medir directamente sobre un plano restituído de esa fecha, proporcionado por SCT.



Figura 69. Explosión del 1 de enero de 1998. Fuente www.cenapred.unam.mx

Domo 7. Marzo de 1998 (D0398-7)

Durante enero de 1998, ocurrieron explosiones que contribuyeron a la reducción del volumen remanente de los domos, reduciéndose a $(5.150 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, con una cota mínima de la superficie que formaban los domos remanentes de 5070 msnm.

El 14 de marzo de 1998, se detectaron señales de tremor armónico y algunos eventos volcanotéctónicos que ocurrieron probablemente contemporáneos a la formación de un nuevo domo (D0398-7), esta característica ha sido observada en otros volcanes donde se ha presentado el emplazamiento de domos, como el volcán Santiaguito en Monserrat (Sparks, 2007, Harris, 2008). Sobre el domo D1297-6 y los productos depositados de las explosiones de enero de 1998 se formó un cráter sobre el domo (D0398-7). El cráter adquirió la forma de un cono truncado invertido. Posteriormente, en el fondo de éste cráter creció otro pequeño domo (D0398-7) (figura 70) de 48 m de radio y 11m de altura, con un volumen de

$(0.027 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. El crecimiento de este domo fue acompañado de una considerable actividad de exhalaciones, cubriendo parcialmente al domo con clastos y ceniza. Posteriormente se presentaron dos explosiones mayores el 21 de marzo y el 21 de abril de 1998, que emitieron importantes cantidades de ceniza y generaron columnas de hasta 3 km de altura sobre la cima (figura 71). Estos eventos contribuyeron al desalojo completo del domo 7, e inclusive desalojaron parte de los remanentes de los domos previos. El volumen residual posterior a estos eventos se estima en $(5.082 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$.

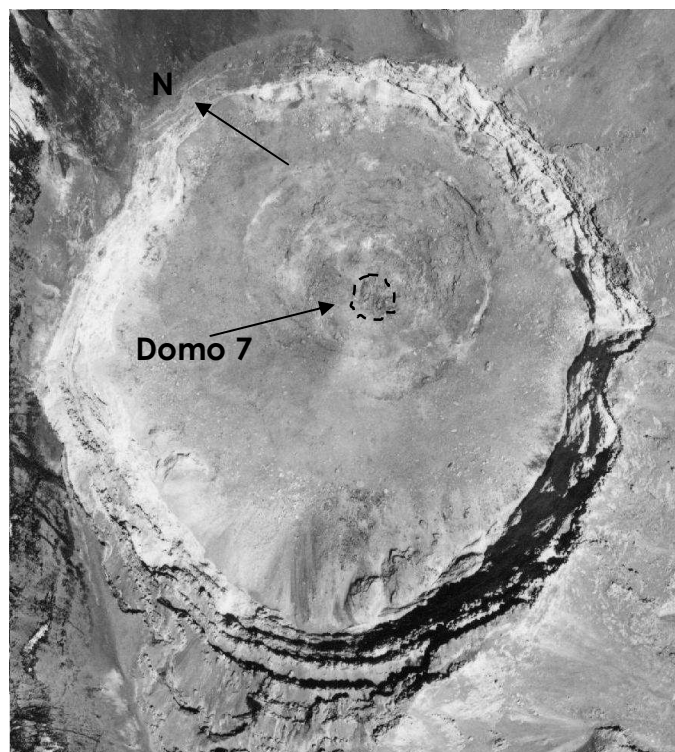


Figura 70. Domo (D0398-7) de marzo de 1998



Figura 71. Explosión del 21 de marzo de 1998. Fuente www.cenapred.unam.mx

Domo 8. Mayo de 1998 (D0598-8)

Después de las explosiones de marzo de 1998, el primero de abril se registró intensa actividad volcanotéctica. Posteriormente, los días 11 y 12 del mismo mes se detectaron episodios de tremor armónico así como dos explosiones importantes los días 21 y 27. Asimismo, el 23 de abril se registraron episodios de tremor. Como consecuencia de los eventos explosivos del 21 y 27 (figura 72) el volumen remanente disminuyó hasta $(4.947 \pm 0.001) \times 10^6$ m³. Los días 10, 15 y 17 de mayo se presentaron nuevamente episodios importantes de tremor. Algunas exhalaciones mayores ocurrieron los días 14, 25 y 31 de ese mes. En una fotografía del 8 de junio de 1998 se corroboró la presencia de un nuevo cuerpo de lava que creció en los remanentes de los domos 6 y 7. Este domo 8 (D0598-8) alcanzó un radio de 74 m y una altura de 20 m (figura 73). La actividad registrada sugiere que este domo creció en varios episodios, alcanzando un

volumen de $(0.241 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$ con una cota máxima de 5110 msnm, acumulando para el 29 de junio de 1998 un total de $(5.153 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$.



Figura 72. Explosión del 27 de abril de 1998. Fuente www.cenapred.unam.mx

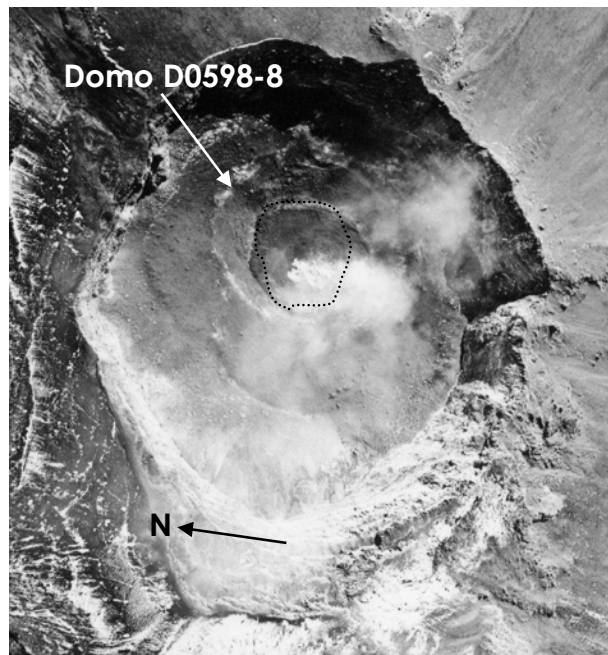


Figura 73. Domo (D0598-8) de mayo de 1998. Fotografía de junio de 1998, tomada por SCT.

Domo 9. Noviembre de 1998 (D1198-9)

Los días 22 y 23 de septiembre y 5 de octubre de 1998 se registraron explosiones que lanzaron al exterior del cráter material del domo y dejaron un volumen remanente de $(4.948 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. Es importante destacar que en el mes de junio y a principios de noviembre ocurrieron sismos profundos. (González-Pomposo, 2003).

A principios de noviembre el cráter interior presentaba una forma de cono truncado invertido (Figura 74). Después del día 10 de noviembre, y durante ese mes se detectó un promedio de un evento volcanotéctónico por día con localizaciones bajo el cráter y al sureste del mismo. El día 23 de noviembre se registró un incremento significativo de la actividad, caracterizada por episodios importantes de temblor armónico y exhalaciones frecuentes. A raíz de esta actividad se detectó el domo D1198-9 que creció en el fondo del cráter interno sin sobrepasarlo. Las dimensiones que alcanzó el domo para principios de diciembre de 1998 fueron de 70 m de diámetro y 32 m de altura, con una cota máxima de 5080 msnm y un volumen de $(0.716 \pm 0.01) \times 10^6 \text{ m}^3$ con un total remanente de $(4.989 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$.

En este periodo de actividad ocurrieron gran cantidad de exhalaciones con emisiones de ceniza, parte de la cual se depositaba dentro del cráter y sobre el domo, impidiendo observarlo con claridad. Sólo fue posible distinguir con la imagen estereoscópica de esa fecha los restos de ese domo, y no obstante lo

cual se logró medir. Por otra parte las señales de tremor armónico asociadas con el crecimiento de este domo fueron contemporáneas a las exhalaciones, por lo que se ha supuesto que el crecimiento se daba al mismo tiempo que la destrucción. En una fotografía aérea de principio del mes de noviembre, sólo se pudo apreciar parcialmente el crecimiento de este domo, dado que fue cubierto por escombros (figura 75).

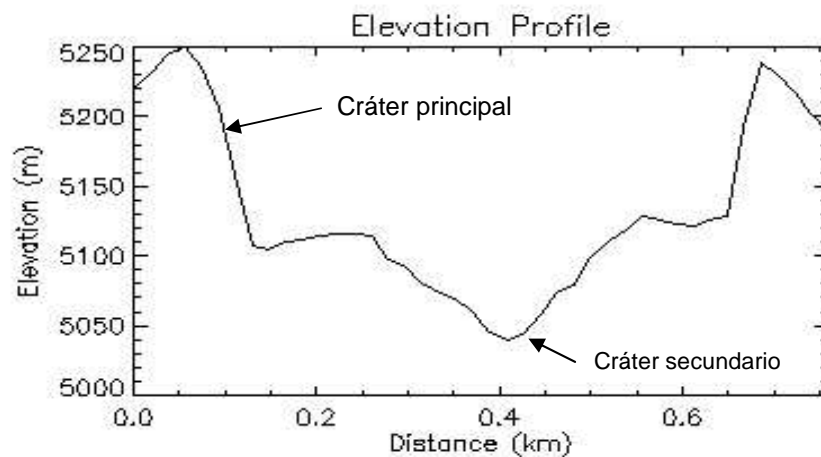


Figura 74. Perfil del cráter (W-E), en el se observa que el cráter interior tiene forma de cono truncado invertido para principios de noviembre de 1998. Los datos se obtuvieron de medir directamente sobre un plano restituído para esa fecha por SCT:

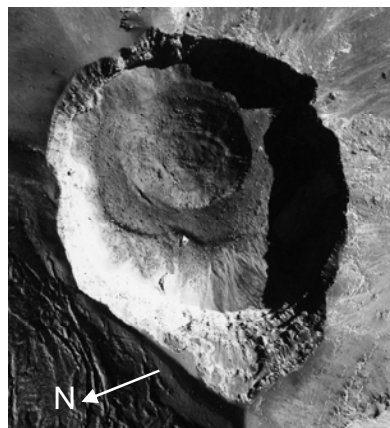


Figura 75 Fotografía de principios de noviembre de 1998, se observa el fondo del cráter cubierto con escombros, pero en estereoscopia se distingue el domo D1198-9. Cortesía de la SCT.

A finales de noviembre y durante diciembre de 1998 ocurrieron explosiones de intensidad moderada a alta (Figura 76), que redujeron el volumen remanente (medido el día 19 de diciembre) hasta $(3.489 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. En esta fase se produjeron durante 25 días consecutivos, explosiones y exhalaciones importantes y posteriormente, en enero de 1999, la actividad disminuyó significativamente. También se registró a principios de noviembre un evento volcanotectónico con profundidad de 7km que probablemente dio la pauta para la actividad que se registró en esa fase (González-Pomposo et al 2003)



Figura 76. Explosión en el volcán Popocatepetl del 30 de noviembre de 1998. Fuente www.cenapred.unam.mx

Con datos obtenidos de una fotografía aérea de enero de 1999 se pudo constatar que a causa de la actividad de noviembre y diciembre de 1998, el fondo del cráter descendió hasta una cota de 5050 msnm (Figura 77). Posteriormente, en marzo de 1999 este domo registró un aumento en el volumen producto de una nueva lava aportada durante este mes. Este incremento de volumen del domo estuvo

asociado con tremor armónico. Casi de manera paralela ocurrieron exhalaciones y explosiones de intensidad moderada (figura 78).

Se destaca en junio de este año el 15 de junio ocurrido en la zona de Huajuapán de León y Tehuacán de M_w 7.0, 23 horas después de este evento los días 16 y el 17 de junio se presentó un enjambre sísmico consistente de 35 eventos volcanotéctónicos, con magnitudes que oscilaron entre 2.5 y 3, siendo dos ellos mayores a 3.

Posteriormente, a lo largo del resto del año 1999 la actividad del volcán se caracterizó por exhalaciones y esporádicas explosiones de nivel bajo a medio, que causaron una disminución en el volumen remanente de los domos, llegando en enero del 2000 a un valor de $(3.358 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. Las dimensiones del cráter interno para esa fecha fueron de: diámetro exterior 300m; diámetro interior 140 m; profundidad 78m, adquiriendo la forma de cono truncado invertido, y con una cota en el piso del cráter de 5042 msnm. Por otro lado por medio de una fotografía aérea de enero de 2000 fue posible apreciar que el cráter interior contenía gran cantidad de escombros, sus paredes eran más verticales, el fondo se apreciaba sensiblemente plano, y se distinguían algunos “cratercillos” producto tal vez de impactos o de subsidencias locales. Pequeñas fumarolas en el piso de cráter eran apreciables (figura 79).

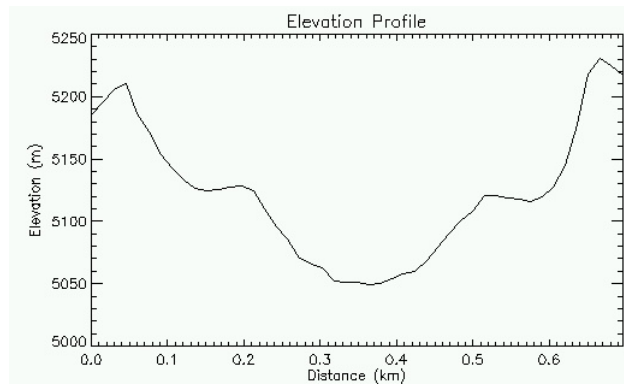


Figura 77. Perfil del cráter (NW-SE), en el se observa que la cota máxima del domo descendió a 5050msnm en promedio para enero de 1999. Datos obtenidos de plano restituído por SCT:



Figura 78. Exhalación en el volcán Popocatépetl del 9 de marzo de 1999. Fuente www.cenapred.unam.mx

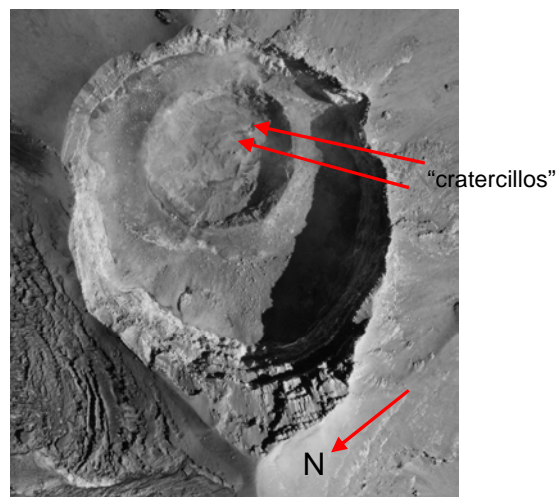


Figura 79. Fotografía aérea del cráter del volcán Popocatépetl de enero de 2000, se aprecia el fondo del cráter interior con el piso semiplano y la presencia de los pequeños “cratercillos”.

Domo 10. Febrero de 2000 (D0200-10)

A partir del 11 de febrero de 2000 se comenzaron a detectar señales de tremor armónico. En los días subsecuentes a ese mes se registraron más episodios similares. Posteriormente, y mediante un sobrevuelo se observó la presencia de un pequeño domo creciendo en el fondo del cráter interior. Esta nueva formación tenía un tono gris (figura 80), con 59m de diámetro y 14m de altura aproximadas. La forma de este domo se asemejaba a un pequeño pistón de forma cilíndrica emplazado en el centro del cráter interno, el cual tenía una forma de cono truncado invertido con ~290 m de base y una profundidad de ~78m, el volumen de este pequeño domo fue de $(0.027 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. La cota media del piso del cráter interno para el 16 de marzo de 2000 era de 5049 msnm. En este período el piso del cráter se observaban pequeños “cratercillos” probablemente producidos por exhalaciones moderadas (figura 80). También se apreciaban escombros finos cubriendo parte de este domo y pequeñas fumarolas en las paredes de este cráter interno.



Figura 80. Cráter del volcán Popocatepetl, que muestra el domo D(0200-10) observado en febrero del año 2000. Fuente www.cenapred.unam.mx

Posteriormente este domo fue removido por explosiones y exhalaciones ocurridas entre febrero y agosto de 2000 (figuras 81a y 81b).



Figura 81a. Exhalación del 19 de abril del
Fuente www.cenapred.unam.mx



Figura 81b. Exhalación del 14 de julio del año 2000
Fuente www.cenapred.unam.mx

Por efecto de estos eventos, para el 4 de agosto el volumen de material remanente se redujo a $(3.35 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. El 10 de agosto de 2000 ocurrió una explosión de intensidad moderada que probablemente causó la destrucción casi completa de ese domo. La actividad sísmica registrada en el volcán de febrero a agosto del 2000 estuvo caracterizada por eventos LP, episodios de tremor armónico de baja amplitud y eventos volcanotéctonicos con profundidades entre 2 y -4 km. Se destaca en junio un evento VT con profundidad de aproximadamente 7 km. La localización epicentral predominante de esos eventos fue bajo el cráter, sin embargo otros sismos se ubicaron en la zona sureste del volcán (González - Pomposo, 2003).

Domo 11. Agosto- Septiembre de 2000 (D0800-11)

El 28 de agosto de 2000 se detectó tremor armónico de baja amplitud en varias de las estaciones, sugiriendo un ascenso de magma hacia el cráter y la posible formación de un nuevo domo (D0900-11). Exhalaciones registradas los días 1 y 2 de septiembre (figura 82), acompañadas por tremor armónico, revelaban probablemente un crecimiento y destrucción simultánea de este domo. Una explosión moderada el 3 de septiembre con duración de 3 minutos, seguida por 25 minutos de tremor de alta frecuencia, posiblemente señaló la destrucción parcial de este cuerpo de lava. Algunos días más tarde, entre el 8 y 12 de septiembre, el número de eventos LP por día se incrementó rápidamente hasta alcanzar 140 (González - Pomposo, 2003), estos eventos emitieron pequeñas cantidades de ceniza que permitieron acelerar el proceso de construcción - destrucción. En este periodo estudios de manantiales de aguas revelaron la presencia de boro, el cuál resulto ser indicador de nuevo material magmático al cráter (Armienta, et al 2007).



Figura 82. Exhalación en el volcán Popocatepetl del 2 de septiembre de 2000. Fuente

www.cenapred.unam.mx

En un sobrevuelo del día 15 de septiembre se pudo corroborar la presencia del nuevo domo. Para esa fecha este cuerpo presentaba una tonalidad oscura y su tamaño era aún pequeño. El volumen de este cuerpo de lava en octubre de 2000 era de $(0.076 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, con su cota máxima a 5060 msnm (figura 83). El radio medio fue de 45m y su altura de aproximadamente 12m. En una fotografía aérea del 3 de octubre de 2000 fue posible distinguir con claridad este domo (figura 84) alojado en el centro del cráter interior, presentaba un tono grisáceo y una pequeña subsidencia producto de los eventos de destrucción y de procesos de degasificación. Fue posible distinguir cuando menos una grieta anular en la cima de este domo. Dentro del cráter interior para esta fecha se observaban nuevamente algunos “cratercillos” y gran cantidad de escombros finos que rodeaban al domo D0800-11. Posteriormente se presentaron nuevas fase de destrucción los días 16 y 29 de octubre con explosiones moderadas y eyección de clastos incandescentes que fueron arrojados en su mayor parte en el flanco este del volcán.

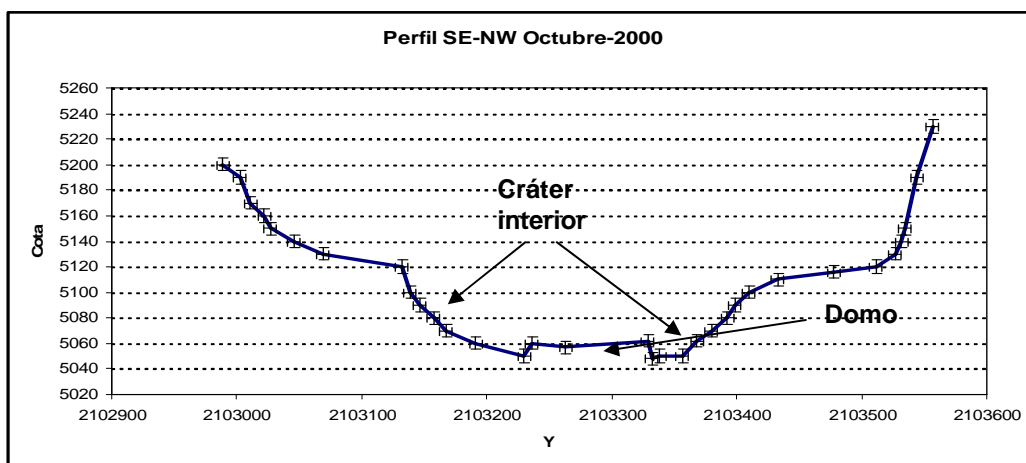


Figura 83. Perfil SE-NW en el volcán Popocatepetl del 3 de octubre de 2000. Datos obtenidos de medir directamente en el plano restituído fotogrametricamente por SCT.

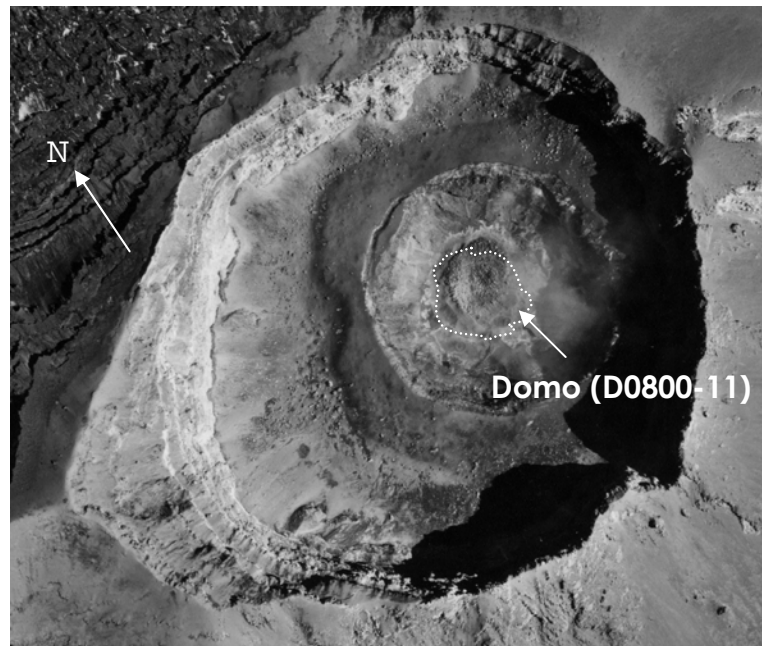


Figura 84. Fotografía aérea del volcán Popocatepetl del 3 de octubre de 2000. Fuente SCT.

En el resto de octubre y principios de noviembre este domo creció muy poco, alcanzando finalmente $(0.170 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$ y un dejando un remanente acumulado de $(3.528 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, lo que se manifestó como un aumento pequeño en las dimensión horizontales hasta un radio de 60m con una cota máxima promedio de 5065msnm. Explosiones y exhalaciones los días 1, 6, 7 y 9 de noviembre contribuyeron a la destrucción del domo D0800-1 (Figura 85). El número de LPs llegó a ser el día 12 de 110 eventos y 124 el día 15,



Figura 85. Exhalación en el volcán Popocatepetl del 9 de noviembre de 2000. Tomada de www.cenapred.unam.mx

Es difícil saber en que momento el domo D0800-11 se destruyó por completo. El promedio de LPs en noviembre mayor a 75 eventos por día. En un sobrevuelo de este mes, se observó que el fondo del piso del cráter se encontraba incandescente. Para el 4 de diciembre, fecha en que ocurrió el último evento de destrucción de este domo, el volumen total de material remanente descendió a $(3.358 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$.

Domo 12. Diciembre de 2000 (D1200-12)

Precediendo a la formación del domo D1200-12 ocurre el 5 de diciembre ocurrió un sismo volcanotectónico de magnitud 3.4 ubicado al sureste del cráter, y el día 6, 9 otros eventos VT de magnitudes entre 1.7 y 2.4. Del 5 al 12 de diciembre se presentaron episodios de tremor armónico de amplitud pequeña. Los días 12, 13, 14 y 15 aumentó el número de exhalaciones, y ocurrieron explosiones de tamaño moderado con emisión de clastos incandescentes. Es probable que estos eventos hayan desalojado parte del material remanente de los domos predecesores. El 15 de diciembre inició una fase de tremor armónico de amplitud moderada que sugirió un nuevo aporte de lava al cráter. El día 16 aumentó la duración y la amplitud de esta señal, manteniéndose por varias horas en niveles de saturación. Intercaladas con estos eventos se presentaron algunas explosiones de nivel medio a moderado. Por otra parte se detectaron en los inclinómetros de la estación Canario y Chipiquixtle deformaciones oscilantes en rangos de 150 a 200 microradianes. Nuevamente, el 17 de diciembre se registraron episodios de tremor armónico de amplitud moderada, y algunos episodios de tremor de alta

frecuencia, También ocurrieron tres exhalaciones de tamaño moderado con importante emisión de ceniza. El 18 de diciembre en un sobrevuelo a cargo de la SCT se confirmó la presencia del domo D1200-12, con dimensiones que sobrepasaban todas las observadas con anterioridad. Esta información evidenció que se estaba produciendo la mayor tasa de producción de magma del episodio. Con fotografías de este mismo vuelo se pudo apreciar el tamaño alcanzado por este domo, de color negro y que mostraba en su centro una emisión fumarólica (figura 86). A raíz de la actividad del 18 y 19 de diciembre, la cota máxima alcanzada por el domo D-1200-12 fué de 5152 msnm (figura 87), con un radio medio de 213m y una altura máxima de 91m. La actividad del volcán, particularmente las explosiones no permitieron calcular el volumen emitido en esta fase, por lo que es probable que haya sido mayor. Sin embargo la estimación del volumen de este domo fue de $(6.824 \pm 0.001) \times 10^6$ m³, la cuál se puede considerar confiable, dado que se tomaron imágenes casi cada día en este periodo de intensa actividad. Con esto el volumen acumulado llegó a $(9.434 \pm 0.001) \times 10^6$ m³. La actividad de estos días culminó el 18 y 19 de diciembre, con pequeñas explosiones en el cráter, acompañados de emisiones de balísticos.. Particularmente el 18 a las 19:15 h (local), produjo emisión de gran cantidad de balísticos tanto fuera como dentro del cráter, así como emisiones de ceniza durante algunas horas que inicio desde la tarde de ese día. Este evento presentó una apariencia de fuente de lava. En una fotografía aérea del 23 de este mes se observó una subsidencia sobre el domo D-1200-12 de ~10m (figura 88), en esta fecha se aprecian también grietas anulares concéntricas sobre la superficie de este cuerpo. Posteriormente se presentó un período de relativa calma durante los

siguientes días, el 24, nuevamente se registró una explosión de tamaño moderado.



Figura 86. Imagen del domo D1200-12 el 18 de diciembre de 2000, se observa casi en el centro del domo una fumarola que asciende casi vertical. Fuente SCT.

A principio de enero de 2001 continuo la fase de destrucción del domo D1200-12 al ocurrir explosiones de tamaño pequeño a moderado, para el 13 de enero la cota media de este domo había descendido a ~ 5074 msnm (figura 89) y el volumen total era de $(8.296 \pm 0.001) \times 10^6 \text{m}^3$. El 22 de enero ocurrió un sismo volcanotectónico, más tarde se presentó una exhalación con tonalidad blanca, que evoluciono segundos mas tarde hacia un evento continuo que emitía ceniza con una altura de columna de mas de 8 Km. (figura 90), probablemente debido al peso de la columna eruptiva se presentaron flujos piroclásticos que descendieron por varios flanco del volcán, y que a su vez al haberse dirigido sobre el glaciar del sector norte de la cima, fundieron parte de el, produciendo un lahar que llegó aproximadamente a 2 km del poblado de Santiago Xalitzintla, Puebla (Valdés, et

al 2001). Este evento y los ocurridos los días 25, 29 de enero, y 10, 15 de febrero de 2001, contribuyeron a la pérdida de volumen en el domo D1200-12, de tal manera que el remanente llegó a ser para el 21 de febrero de $(6.057 \pm 0.001) \times 10^6$ m³, y una cota mas baja para el fondo del domo de 5055 msnm (figura 91), la forma adquirida del cráter interior después de toda esta fase destructiva fue de un cono truncado invertido de ~340 m de diámetro y ~80m de profundidad.

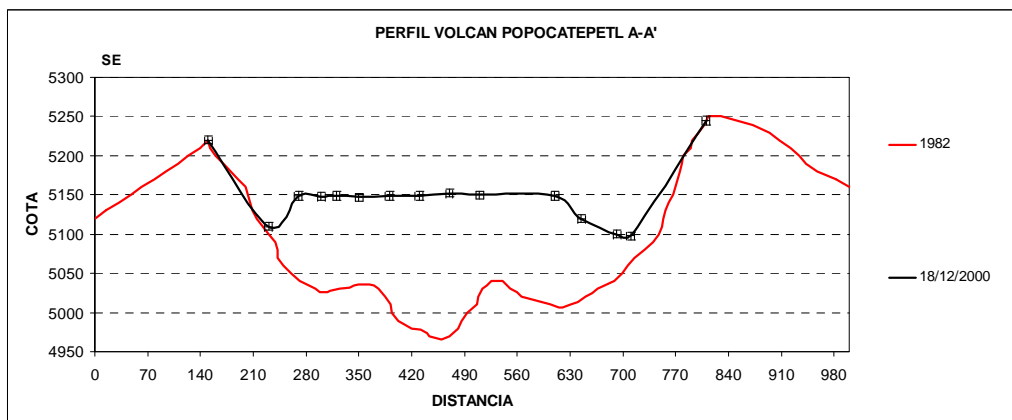


Figura 87. Perfil SE-NW del domo D1200-12 el 18 de diciembre de 2000. Obtenido directamente de medir sobre la fotografía y con información de SCT.



Figura 88. Subsistencia en el domo D1200-12 el 23 de diciembre de 2000, se observan las grietas anulares. Fuente SCT.

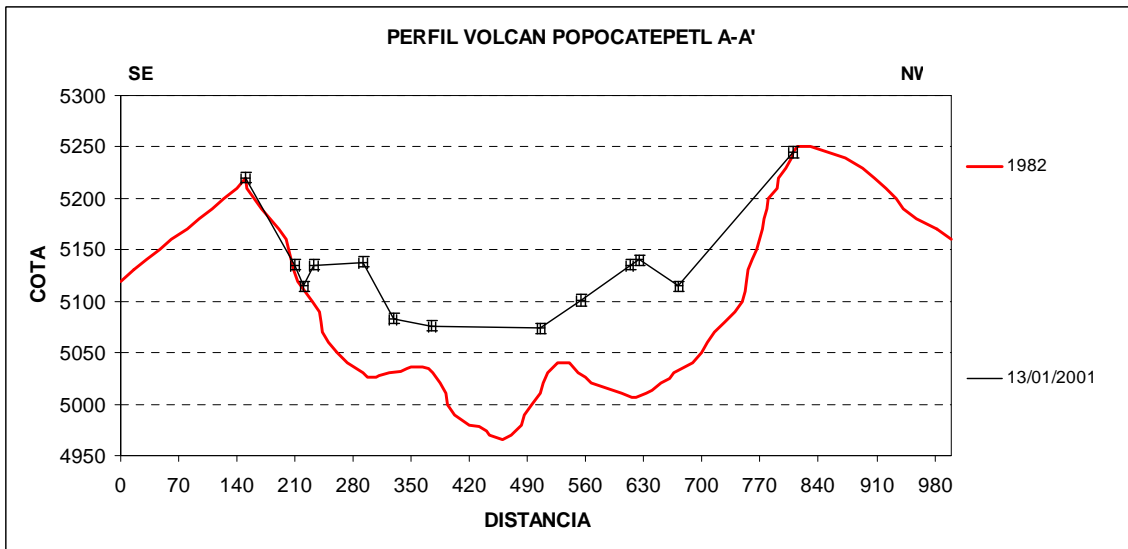


Figura 89 Perfil SW.NW en el domo D1200-12 el 13 de enero de 2001. Obtenido directamente de medir sobre la fotografía y con información de SCT. Se muestran las barras de error.



Figura 90 Erupción del 22 de enero de 2001. Fuente www.cenapred.unam.mx

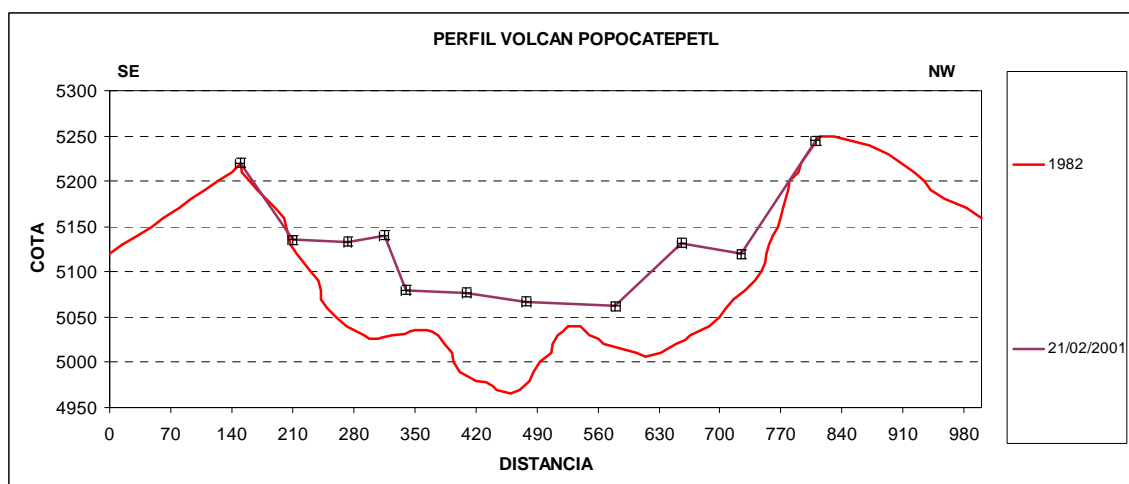


Figura 91 Perfil SW.NW en el domo D1200-12 el 10 de febrero de 2001. Obtenido directamente de medir sobre la fotografía y con información de SCT. Se indican también las barras de error.

Domo 13. Febrero de 2001 (D0201-13)

Los últimos días de febrero de 2001, se detectaron nuevamente señales de tremor armónico y algunos VTs de magnitud alrededor de 2.0. El 6 de marzo el número de LPs fue de 68. El 13 de este mes se presentó tremor armónico de mayor amplitud, este día se presentó una pequeña explosión con balísticos, durante un sobrevuelo de la SCT de ese día se corroboró que en el fondo del último cráter interno se formo el domo D0301-13, la fotografía del cráter tomada el 15 de marzo muestra un cuerpo con grietas anilladas, presentando una tonalidad oscura en su superficie (figura 92). Este domo de forma casi circular tenia un diámetro de 160m y una altura media de 43m., y una cota máxima de 5102 msnm con un volumen de $(0.828 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$ (figura 93)., El volumen remante alcanzado con este nuevo domo, hasta el 15 de marzo fue de $(6.878 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. La fase destructiva de este domo comenzó desde el 13 de marzo cuando ocurrió una

pequeña explosión. Las señales de tremor de amplitudes y duraciones variables continuaron durante varios días de marzo y principios de abril. Una fotografía aérea tomada por personal de SCT el 6 de abril indicó que el domo D0301-13 había perdido volumen, presentando una pequeña subsidencia de ~6m. Este proceso de pérdida de volumen ocurrió de manera contemporánea al registro de señales de tremor. El volumen remanente hasta el 6 de abril fue de $(6.807 \pm 0.001) \times 10^6 \text{m}^3$. De forma contemporánea se presentaron eventos volcanotéctónicos los días 17 y 19 de marzo destacándose el 21 por la ocurrencia de 3 VTs.

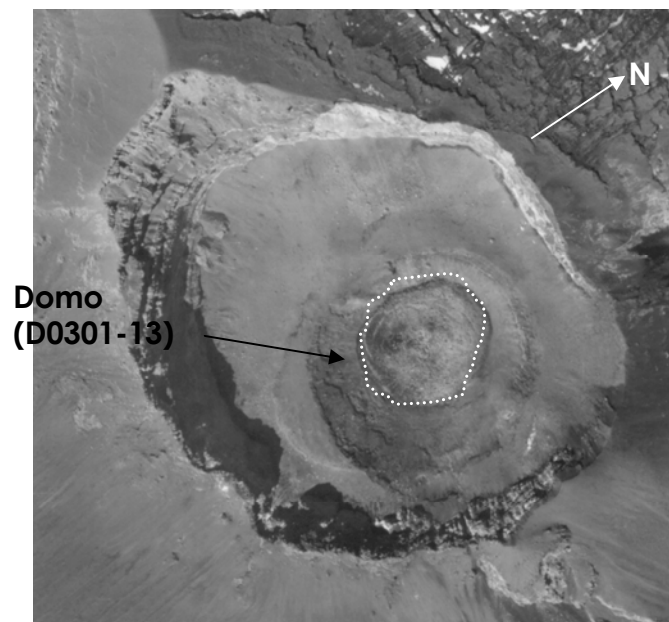


Figura 92. Imagen del domo D0301-13, tomada el 15 de marzo de 2001 por la SCT.

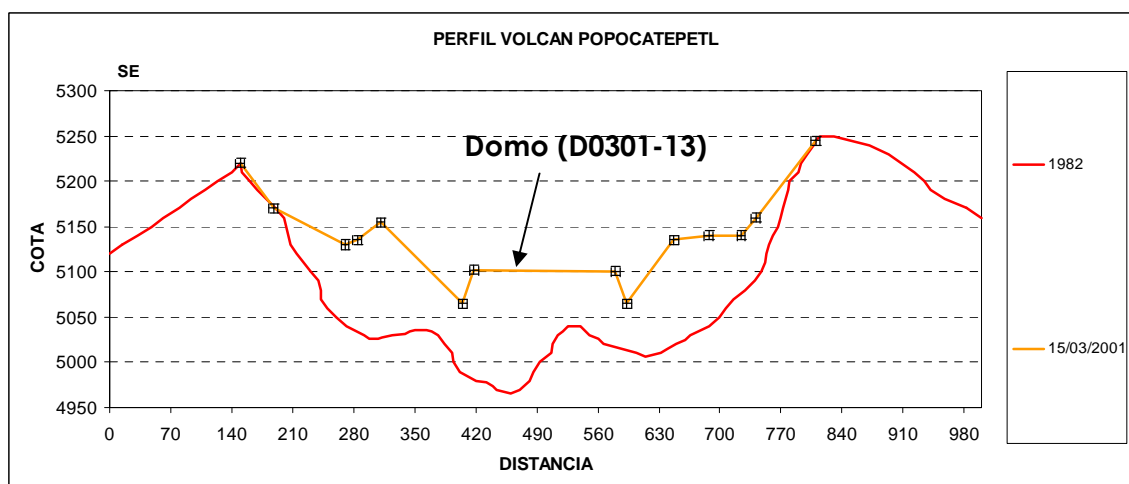


Figura 93 Perfil SE.NW en el domo D0301-13 el 15 de marzo de 2001. Obtenido directamente de medir sobre la fotografía y con información de SCT. También se indican las barras de error.

En abril continuó la degasificación y la destrucción del domo D0301-13, particularmente la explosión del 16 de abril (figura 94). Las explosiones del 29 de abril, 4, 14 de mayo contribuyeron a la destrucción de este domo. A fines de abril, durante las dos primeras semanas de mayo, se detectó tremor armónico. La medición de SO_2 del 17 de mayo (14,800 tons/día) (www.cenapred.unam.mx) estuvo asociada a la emisión de gas desde el cráter que ocurría en este período. Adicionalmente una fotografía aérea del 15 de mayo de 2001, muestra que no apareció un nuevo domo, ni se presentó crecimiento del D0301-13, por lo que es posible que el tremor de este periodo estuvo asociado principalmente con degasificación intensa. Sin embargo, en una fotografía aérea del 5 de junio, la reducción en el tamaño del domo D0301-13 no era significativa, dado que su volumen remanente sólo había descendido a $(6.369 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, por lo que aún cuando si hubo una degasificación intensa, es probable que el tremor detectado haya estado asociado con un ascenso de material nuevo que mantenía

la tasa de emisión en balance con la destrucción del domo. Posteriormente, exhalaciones y explosiones ocurridas principalmente el 23,26 y 31 de mayo, 17 de junio, y el 3 de julio, contribuyeron al desalojo del domo D0301-13. Otra fotografía aérea, de la SCT del 13 de julio de 2001, muestra que el domo D0301-13 había sido removido en buena parte, producto de gran cantidad de exhalaciones de diversa intensidad ocurridas en este período. El volumen remanente en esta fecha era de $(6.231 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. Nuevamente la morfología del interior del cráter cambio de manera substancial, ahora sobre los remantes de los domos predecesores se formó un cráter interno, que adquirió la geometría semejante a la de un cono truncado invertido con 300 m de base y 80 m de profundidad. La cota media del fondo de este cráter fue de ~5060msnm (figura 95).



Figura 94. Explosión en el volcán Popocatepetl del 16 de abril de 2001. Fuente www.cenapred.unam.mx

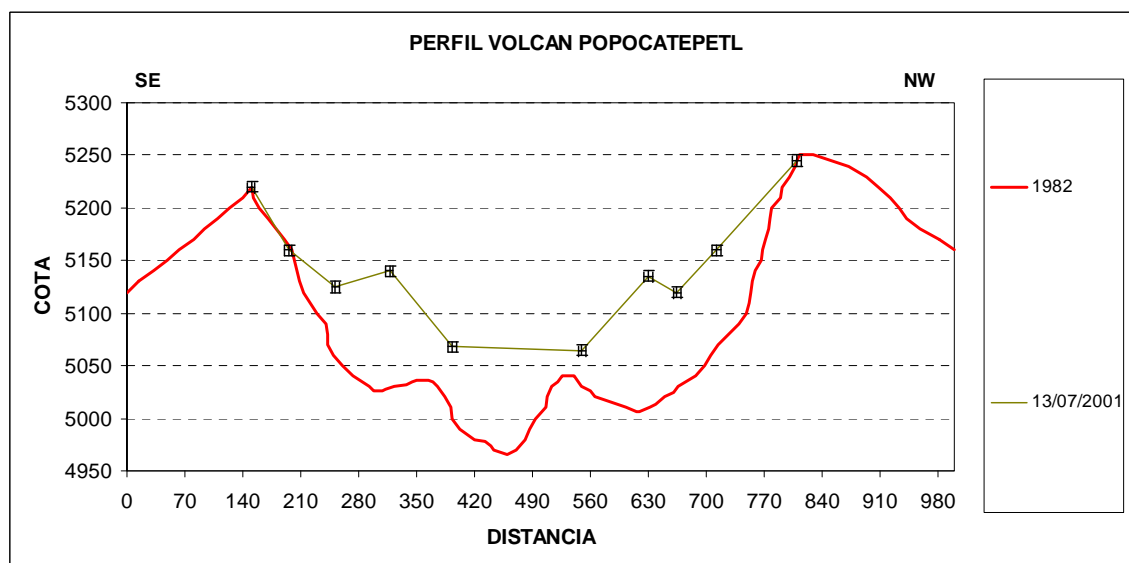


Figura 95 Perfil SE-NW en el domo D0301-13 el 13 de julio de 2001. Obtenido directamente de medir sobre la fotografía y con información de SCT. Se muestran las barras de error.

Domo 14. Agosto de 2001 (D130801-14)

Durante la segunda parte de julio la actividad sísmica se caracterizó por la detección de algunas fases de tremor armónico. El 9 y 10 de agosto aumentó considerablemente el número de exhalaciones, llegando a ser mayor a 100; en un momento dado esta señal de LPs fue continua y saturada, y con una duración de varias horas, en este tiempo la imagen visible del volcán no mostraba ninguna emisión apreciable, por lo tanto esta señal se asoció con el movimiento de magma hacia la superficie. Señales de tremor armónico de baja amplitud fueron detectadas los días 11 y 12 con la presencia de algunos eventos volcanotéctónicos. El 13 de agosto en una fotografía de la SCT se pudo corroborar la presencia del domo D130801-14, emplazado en el cráter interior

sobre los remanentes de los domos anteriores (figura 96). Este cuerpo era de tono oscuro, y se observaban fracturas anilladas. La forma adquirida por este domo es de un semihemisferio con radio de 100m y una altura aproximada de 34m. El volumen de este cuerpo, para esta fecha fue de $(0.562 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, que sumado al remante alcanzó un valor de $(6.793 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. La cota máxima promedio que alcanzó fue de 5093 msnm (figura 97). Este cuerpo no fue desalojado con alguna exhalación o explosión, por lo que sólo perdió volumen producto de la degasificación.

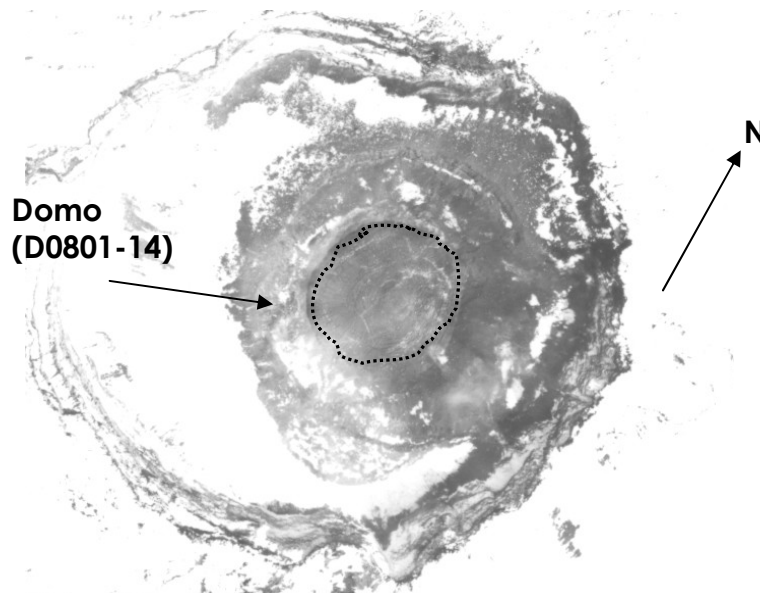


Figura 96. Domo D130801-14. Del 13 de agosto de 2001.

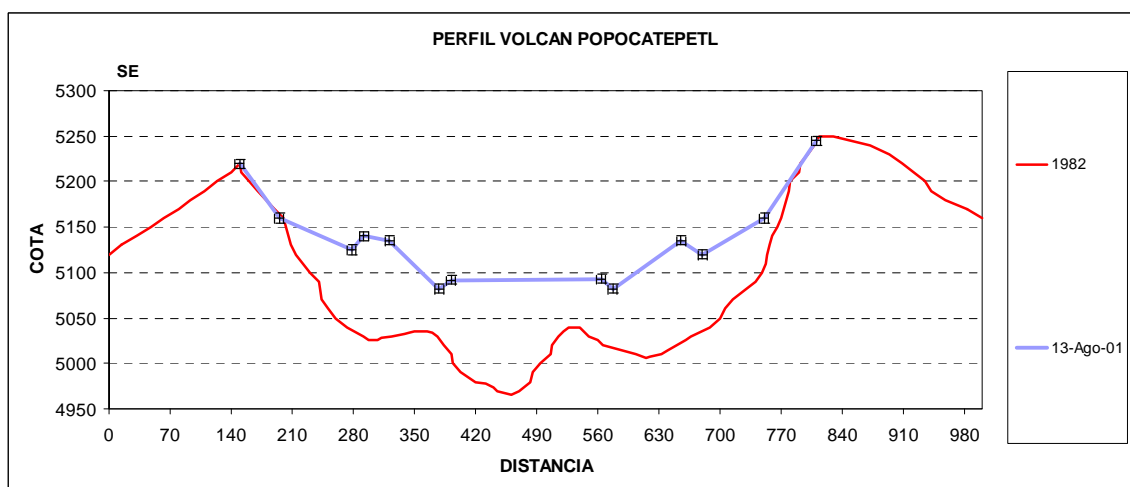


Figura 97. Perfil SE-NW en el domo D130801-14 el 13 de agosto de 2001. Obtenido directamente de medir sobre la fotografía y con información de SCT. También se muestran las barras de error.

Domo 15. Agosto de 2001 (D200801-15)

Entre el 11 y el 14 de agosto la actividad sísmica en el volcán fue menor, solo el 14 se registró un sismo volcanotéctónico ubicado bajo el cráter. En la imagen de la cámara que observa el flanco norte del volcán Popocatepetl se apreciaba una considerable emisión de gas. El 15 de agosto nuevamente se registró gran número de eventos LPs, que en un momento dado fueron casi continuos, es decir la señal sísmica característica este día correspondida al tipo LP, con registro casi continuo. Esta señal se presentó de forma contemporánea al crecimiento de un nuevo cuerpo de lava en el interior del cráter. En una fotografía aérea tomada el 20 de agosto se observa el nuevo domo D200801-15 (figura 98), el cual creció sobre los remanentes de sus predecesor y probablemente a una taza alta, tenía un color oscuro, presentaba grietas anulares y en la cima de este cuerpo se

apreciaba un pequeño lóbulo de lava con un tono más negro que el resto del cuerpo. Los 18 y 19, se registraron señales de tremor armónico que probablemente estuvieron asociadas con la formación de este pequeño lóbulo. La forma aproximada del domo era semejante a un cuerpo semihemisférico. El radio máximo alcanzado, y que se observa en la fotografía de septiembre fue de 127m y una altura de 57 m. El volumen de este cuerpo fue de $(1.058 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, que sumado al acumulado nos arrojaba un total para el 20 de agosto de 2001 de $(7.852 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. La cota máxima que alcanzo este domo fue de 5128msnm (figura 99).

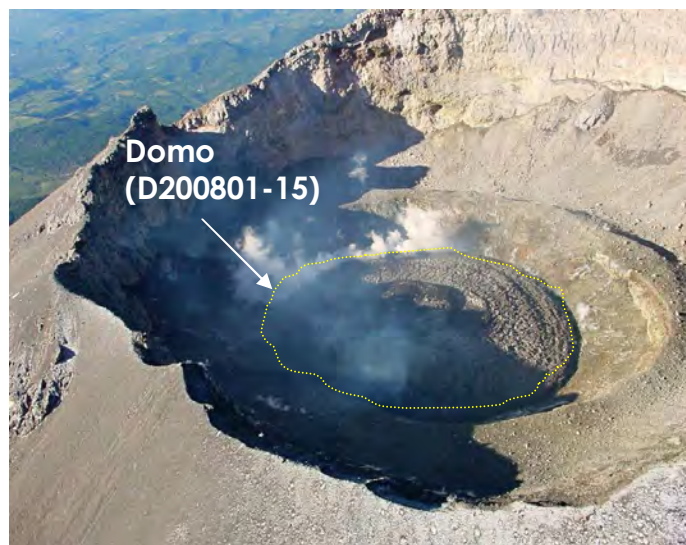


Figura 98 Domo D200801-15. Fotografía tomada por la SCT el 20 de Agosto de 2001 Fuente

www.cenapred.unam.mx.

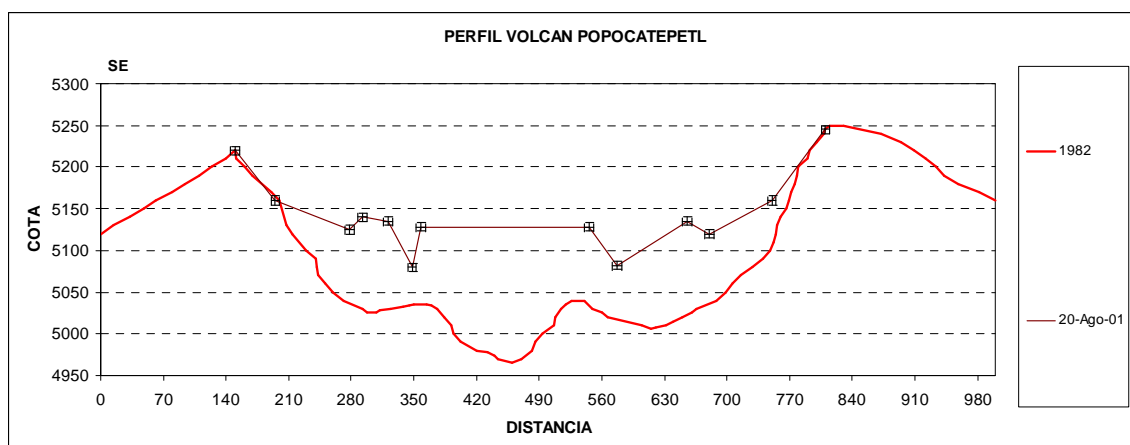


Figura 99. Perfil SE-NW en el domo D200801-15 el 20 de agosto de 2001. Obtenido directamente de medir sobre la fotografía y con información de SCT. También se muestran las barras de error.

Dado que en los siguientes días se continuaron observando señales de tremor armónico, es posible que el crecimiento de este cuerpo terminó el 31 de agosto, Durante la primera semana de septiembre de 2001 se registraron exhalaciones y en el crater del volcán era posible distinguir una degasificación intensa.

Domo 16. Septiembre de 2001 (D200901-16)

El día 8 de septiembre se detectaron señales continuas de tremor armónico de tamaño moderado a grande, durante casi 6 horas, esta señal probablemente ocurrió de forma paralela a la formación del domo D0909-16 (figura 100). El día 9 se incrementó el número de exhalaciones acompañadas de ceniza y gas. Del 10 al 19 de este mes continuaron registrándose pequeños episodios de tremor armónico y algunas exhalaciones pequeñas acompañadas por emisiones de ceniza. Destaca el 19 la ocurrencia de un evento volcanotéctónico de magnitud

3.0 a 4km al suroeste del cráter. En una fotografía tomada por la SCT el 20 de septiembre, se observó que este nuevo cuerpo creció dentro de un hueco con forma de cono truncado invertido que se formó en el interior del domo del 20 de agosto, y que fue producto de una degasificación intensa. Este nuevo domo tuvo un radio de 77m y una altura de 10m, con un volumen de $(0.103 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. Esta nueva formación era de tono oscuro. El remanente a esta fecha sumaba $(7.955 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. La cota máxima que alcanzó se ubicó en 5120msnm (figura 101).

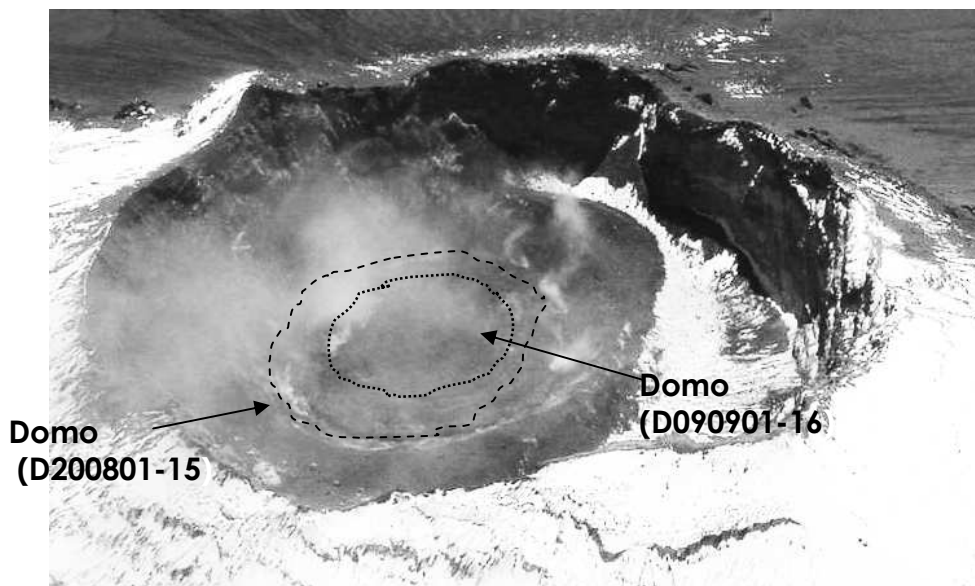


Figura 100 Domo D0901-16. Fotografía tomada por la SCT el 20 de septiembre de 2001. Fuente

www.cenapred.unam.mx

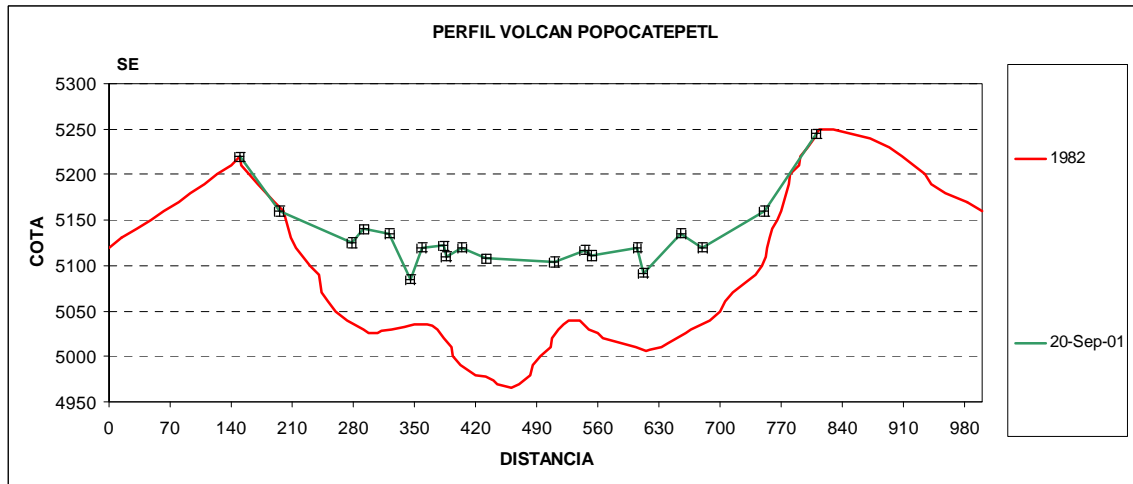


Figura 101 Perfil SE-NW en el domo D0901-16 el 20 de septiembre de 2001. Obtenido directamente de medir sobre la fotografía y con información de SCT. Se indican las barras de error.

En la fotografía del 20 de septiembre fue posible apreciar de igual manera que el domo D0901-16 tenía una pequeña subsidencia debido a que entre el 8 y el 11 de este mes ocurrieron algunas pequeñas explosiones que desalojaron parte de este domo. El 26 de septiembre, así como los días 1 y 4 de octubre nuevamente ocurrió una fase de destrucción de este domo. Los días del 5 al 25 se destacan por la presencia de tremor de alta frecuencia en lapsos importantes. En este período ocurrieron algunas emisiones de ceniza con columnas pequeñas (figura 102).



Figura 102. Exhalación en el volcán Popocatepetl del 9 de octubre de 2001 Fuente www.cenapred.unam.mx.

Una fotografía tomada por la SCT el 25 de octubre muestra que los domos D200801-15 y D0901-16 se encontraban desalojados en gran parte y sólo quedaban restos de ellos. El volumen remanente de los domos hasta esta fecha era de $(7.446 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, y la cota media del piso del cráter interno se encontraba a 5093msnm. Es importante mencionar que en la misma fotografía se aprecia un pequeño lóbulo de lava muy oscuro, de unos ~35m de diámetro y poca altura (~5m) que fue destruido con exhalaciones moderadas con emisión de ceniza que ocurrieron entre el 25 octubre y el 9 de noviembre, y seguramente fue desalojado completamente con la explosión ocurrida el 10 de noviembre.

Domo 17. Noviembre de 2001 (D1101-17)

El 12 y 13 de noviembre se registró un sismo volcanotéctónico cada día, el 14 se detectaron episodios de tremor armónico y el 15 ocurren 2 microsismos más. El 18 aumentó el número de LPs hasta ser casi continuo por 4 horas, posteriormente

se registró otro episodio de tremor armónico de regular amplitud. Todas estas señales fueron probablemente asociadas con el emplazamiento de un nuevo domo, el cual fue corroborado con la fotografía del 20 de noviembre tomada por la SCT. Es importante notar que este domo, al igual que los de agosto y el de septiembre crecieron asociados con señales sísmicas tipo LP, que en general se presentaron por enjambres con duración de horas. Este tipo de actividad se presentó nuevamente los días 6,7 y principalmente el 10 y 12 de diciembre. El 11 de diciembre se tomó una imagen del cráter del volcán, en ella se muestra un domo de tono oscuro (figura 103) de 95 de radio y 25 de altura, incrustado en el cráter interior, sobre los residuos de los domos de agosto y septiembre pasados. El volumen de este domo fue de $(0.502 \pm 0.001) \times 10^3 \text{ m}^3$, y contribuyó a un tener un acumulado de $(7.949 \pm 0.001) \times 10^3 \text{ m}^3$, la cota media máxima alcanzada por este domo fue de 5128msnm (figura 104).

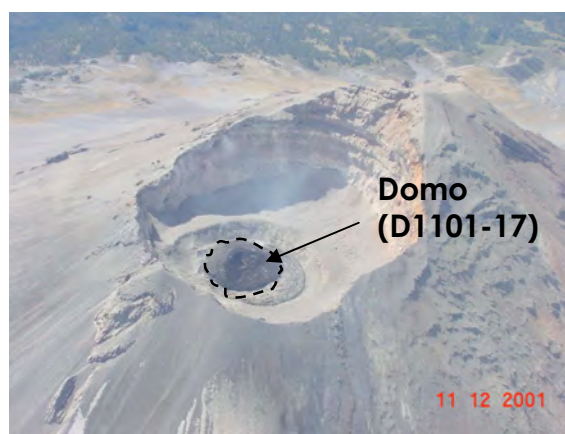


Figura 103. Domo D1101-17. Fotografía tomada por la SCT el 11 de noviembre de 2001. Fuente

SCT:

De los días 12 a 17 de diciembre la actividad sísmica del volcán consistió básicamente en el registro de exhalaciones que fue de 47 el 13 y disminuyó

paulatinamente hasta 8 el día 17. Los eventos explosivos principales que contribuyeron a la destrucción del domo D1101-17 se presentaron el 18, 19 y 22 de diciembre, expulsando fragmentos incandescentes a distancias de entre uno y dos kilómetros (figura 105). Mezclada con esta actividad explosiva de estos días se detectaron episodios adicionales de tremor y numerosos eventos LPs de corta duración, que contribuyeron seguramente al aumento de volumen, sin embargo no fue posible cuantificarlo debido a que el material nuevo fue desalojado casi de manera inmediata. Durante los últimos días de diciembre y los primeros 10 días de enero de 2002 la actividad disminuyó de manera significativa. Una fotografía del 11 de enero reveló que del cráter interior fueron desalojados los domos formados en la segunda mitad del año 2001, y se formó una subsidencia en este cráter interno dejándolo con una forma de cono truncado invertido y con una cota media de 5075msnm. El volumen remanente de los domos que se formaron de 1996 hasta esta fecha era de $(5.924 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$.

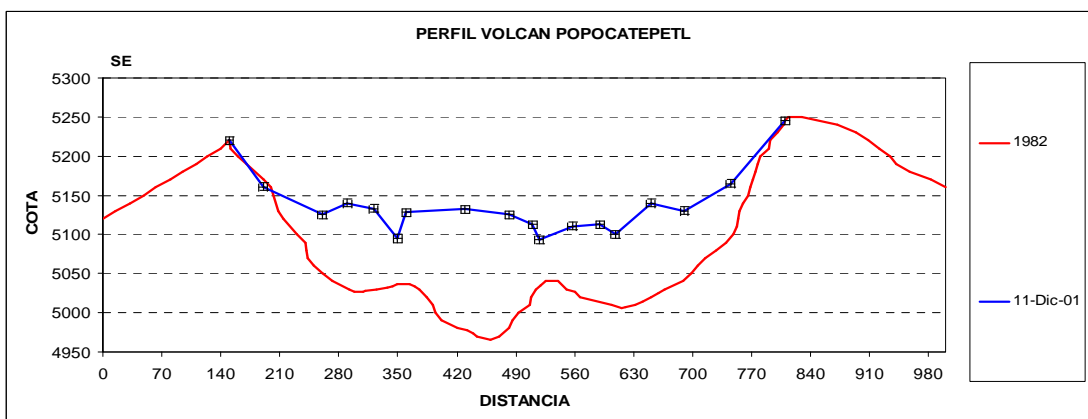


Figura 104. Perfil SE-NW en el domo D1101-17, el 12 de diciembre de 2001. Obtenido directamente de medir sobre la fotografía y con información de SCT. Se muestran también las barras de error.



Figura 105. Explosión en el volcán Popocatepetl del día 19 de diciembre de 2001. Fuente

www.cenapred.unam.mx

Domo 18. Enero de 2002 (D0102-18)

El 11 de enero se registro tremor armónico; después entre este día y el 22 la actividad del volcán en general fue menor. El 23 y 24 de enero ocurrió nuevamente tremor armónico continuo intercalado con emisiones de ceniza y explosiones de bajo nivel. Esta actividad fue correlacionada con la formación de un nuevo domo (D0102-18), el cual se avistó mediante una fotografía aérea tomada por la SCT el 24 de enero. Esta nueva formación se caracterizó por su tono gris oscuro, con grietas anulares, en cuyo borde se apreciaban pequeñas fumarolas. Este cuerpo creció en la base del cráter interior, además presentaba un tono oscuro sobre su superficie (figura 106). Este domo tuvo una forma de semihemisferio con radio de 90m y una altura media de 73m tomada desde el fondo del cráter interior. El volumen de este domo fue de $(1.041 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, que adicionado arrojó un acumulado de domos con un valor de $(6.939 \pm 0.001) \times$

10^6 m^3 . La cota media máxima que alcanzó este domo fue de 5110msnm (figura 107).

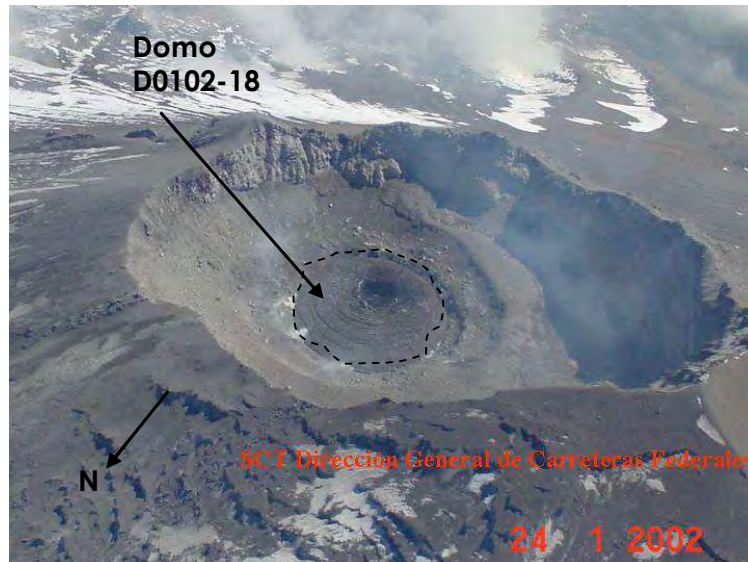


Figura 106. Domo 0102-18. El 24 de enero de 2002. Fuente SCT.

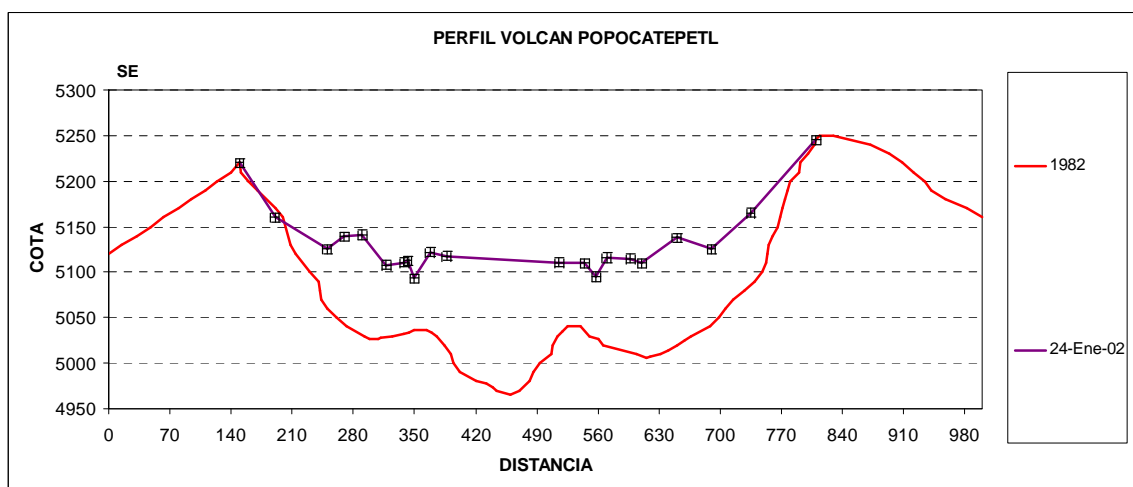


Figura 107. Perfil SE-NW en el domo D0102-18, el 24 de enero de 2002. Obtenido directamente de medir sobre la fotografía y con información de SCT.

Una baja actividad caracterizó los últimos días de enero. En febrero destaca el día 6 por la ocurrencia de dos sismos volcanotéctonicos. Un crecimiento adicional de este domo ocurrió el 16 de febrero, asociado con el registro de 3 horas de tremor

armónico. El 19 ocurrieron pequeñas exhalaciones y explosiones que indican una fase de destrucción de este domo. Entre el 21 y 28 de febrero y los días 6 y 7 de marzo, nuevamente se registran señales de temblor en varios episodios, destacándose el del día 26, todos estos eventos estuvieron relacionados con un crecimiento adicional de este domo. En un sobrevuelo realizado por personal del CENAPRED el 7 de marzo de 2002, se pudo corroborar que este cuerpo de lava creció principalmente en sentido horizontal, teniendo ahora un radio de 107m y básicamente manteniendo una altura media desde el piso del cráter interior de 73m, conservando su tono oscuro (figura 108). El volumen alcanzado por este domo hasta esta fecha fue de $(1.379 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, y el acumulado en ese momento era de $(7.304 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$.

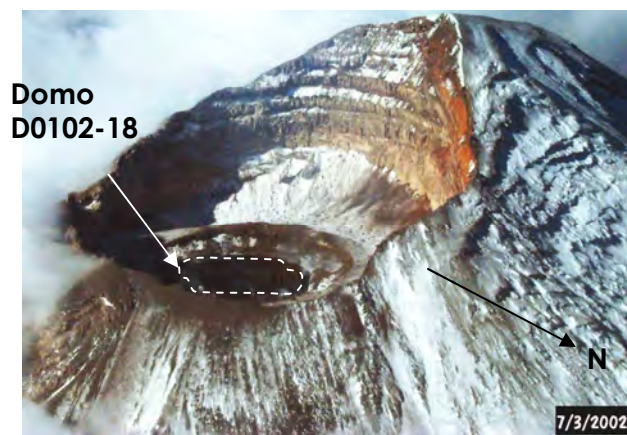


Figura 108. Domo 0102-18, Imagen tomada por el CENAPRED el 7 de marzo de 2002.

La segunda mitad de marzo se caracterizó por la degasificación en el volcán y ocasionales emisiones de ceniza. El 8 de abril se presenta una etapa destructiva de este domo, dado que este día se registra una explosión. Posteriormente

durante las dos semanas siguientes, este último domo se desgasifica y decrece su volumen de forma importante. El volumen remanente hasta el 28 de abril fue de $(6.385 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$.

Domo 19. Abril de 2002 (D0402-19)

El 28 y 29 de abril se registran gran cantidad de eventos LP, y algunos episodios de tremor. El 29 de abril la SCT toma una imagen del cráter y muestra un nuevo domo que creció en los restos de los domos predecesores. Este nuevo cuerpo (D0402-19), era de tono oscuro (figura 109), y probablemente creció con la actividad marcada por los LP del 28 y 29. Esta nueva formación tuvo un radio de 85m, una altura media de 65m, con un volumen de $(1.024 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, y llegó hasta una cota máxima de 5124msnm (figura 110). El volumen acumulado hasta este día era de $(7.410 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. El 29 por la noche ocurrió una explosión con emisión de fragmentos incandescentes. El 30 de abril y el 1 de mayo se registraron 61 y 41 exhalaciones respectivamente. Posterior a esta actividad se presentaron el 2 y el 8 de mayo, 5 y 4 microsismos VT respectivamente. Los días 11 al 15 de mayo continuó la fase de destrucción de este domo, ocurriendo exhalaciones con emisiones de ceniza y lapilli así como una explosión el día 12, con emisión de clastos que alcanzaron unos 500m desde el borde del cráter. Durante esta actividad se presentó una subsidencia en este domo, de 70m de radio y 54m de altura promedio. Esto hizo que el volumen remanente descendiera a $(6.908 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$.

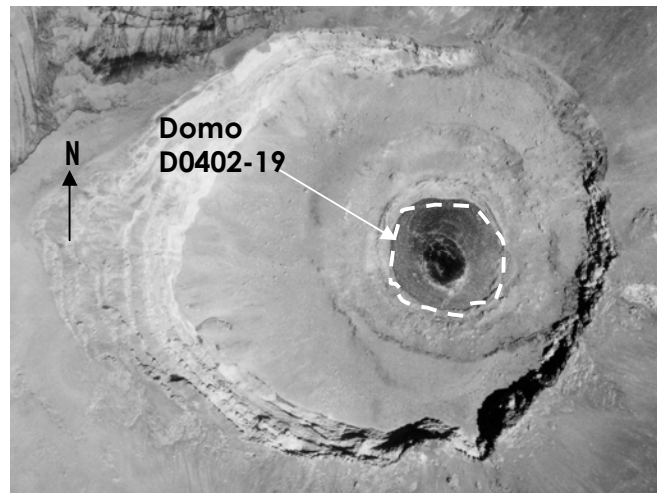


Figura 109. Fotografía de tomada por la SCT el 29 de abril de 2002. Muestra el domo D-0402-19.

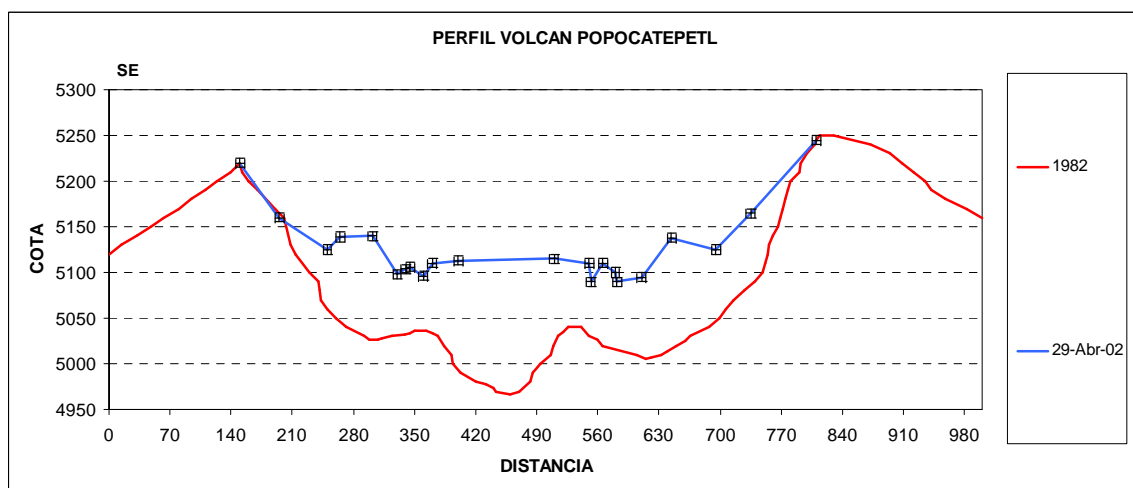


Figura 110. Perfil Sureste-Noroeste del cráter del volcán Popocatépetl el 29 de abril de 2002. Obtenido directamente de medir sobre la fotografía y con información de SCT.

Domo 20. Mayo de 2002 (D0502-20)

El 15 de mayo ocurrió un microsismo VT de mag. 3.7 seguido de 17 eventos con magnitudes entre 1.8 y 2.4. Ese mismo día se registraron 2 horas de tremor

armónico. Del 16 al 22 se registraron episodios adicionales de tremor y algunas secuencias de eventos LP. Estos eventos en conjunto nos indicaron la posibilidad de un nuevo domo, posteriormente corroborada su presencia con una fotografía tomada por la SCT el 22 de mayo. En ella se aprecia la subsidencia formada en el domo anterior, y el nuevo domo (D0502-20). Este cuerpo tenía un tono grisáceo (figura 111), presentaba unas fracturas con dirección casi Norte-Sur de ~60m de longitud y ~4m de ancho aproximadamente. En la fotografía ya era posible observar una pequeña subsidencia sobre este domo producto de una explosión ocurrida el 21 de mayo. El nuevo domo tuvo un radio de 74m y una altura media de 11m, con un volumen de $(0.658 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, generando un acumulado de $(7.567 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. La cota promedio máxima alcanzada por este domo fue de 5122msnm (figura 112). La última semana de mayo el número de exhalaciones disminuye, el 30 se detectan cuatro microsismos con profundidades de entre 4.5 y 9 km y magnitudes de 2 a 2.6. El 31 de mayo se presentan dos fases de tremor de alta frecuencia, asociados con la degasificación del domo.

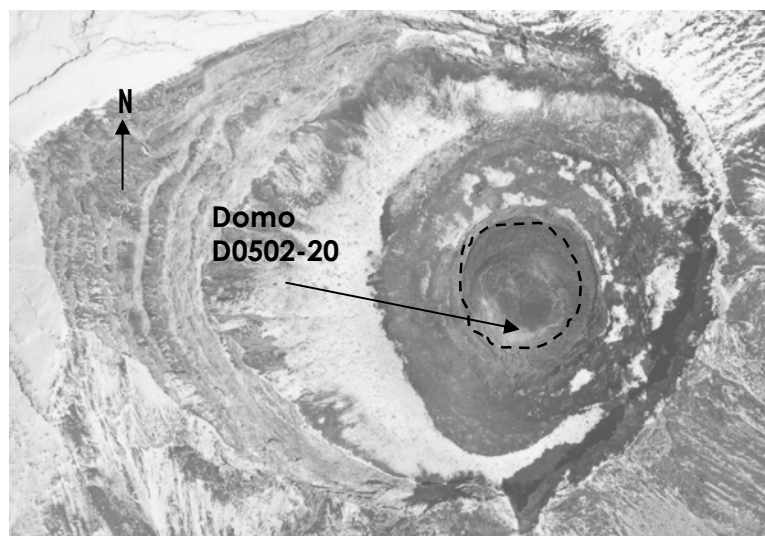


Figura 111. Fotografía del 22 de mayo de 2002. Muestra el domo.D-0502-20. Fuente SCT.

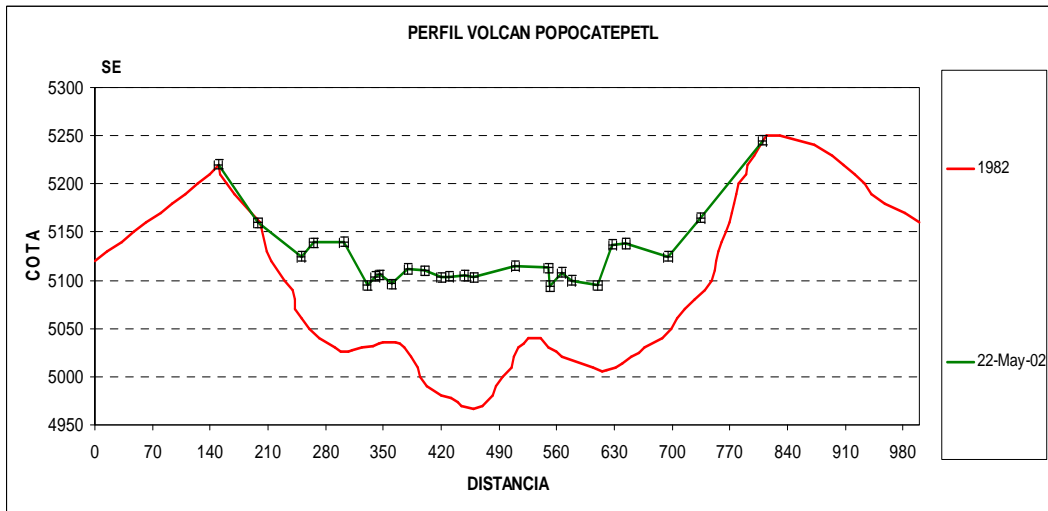


Figura 112. Perfil Sureste-Noroeste del cráter del volcán Popocatépetl el 22 de mayo de 2002. Las distancias horizontales fueron medidas directamente en la fotografía.

Los días 12 y 13 de junio se detectaron 9 microsismos, con magnitudes entre 2 y 2.4. El 17 de junio (figura 113) se presentó una exhalación moderada con emisión de ceniza, que contribuyó a la destrucción del domo, 4 microsismos se registraron posteriormente. En una imagen aérea tomada por la SCT en la misma fecha (17 de junio) se observa una subsidencia de forma de hemisferio invertido, se pudo calcular que para esta fecha se habían desalojado $(0.250 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, dejando el volumen remanente en $(7.316 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. La cota media mas baja de este domo se ubicó en 5097msnm. Durante los días restantes de junio se registraron exhalaciones moderadas con emisión de ceniza que contribuyeron con la fase de destrucción del domo. El 2 de julio ocurren 14 microsismos con magnitudes de entre 1.9 y 2.8. Del 12 al 21 de julio se presentaron episodios de baja amplitud de tremor armónico, que no se reflejó en un aumento de volumen, dado que las fases de destrucción fueron muy frecuentes. En una fotografía aérea

tomada por la SCT el 25 de julio, se aprecia mas grande la subsidencia observada en junio pasado, la cota media del fondo del cráter interior descendió a 5090 msnm, el volumen perdido entre junio y julio se calculó en $(0.419 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, dejando un remanente en el interior de $(6.896 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. Durante los últimos días de julio se caracterizó por la ocurrencia de en promedio 2 microsismos volcanotectónicos por día.



Figura 113 Exhalación moderada del 17 de junio de 2002 en el volcán Popocatepetl. Fuente

www.cenapred.unam.mx

Domo 21. Agosto de 2002 (D0802-21)

Del 1 al 12 de agosto se observó un incremento en la actividad, se registraron episodios de tremor armónico de amplitud variable durante varias horas al día. Este aumento se asoció con la formación de un nuevo domo (D0802-21). Del 14 al 17 de ese mes aumentó la cantidad de exhalaciones algunas con ceniza, llegando a 70 el día 17. Estas manifestaciones representaban el inicio de la destrucción de este nuevo domo. Continuaron las exhalaciones durante el resto

de agosto, en promedio 25 al día. El 2 de septiembre se presentan 5 microsismos volcanotéctonicos. Los siguientes días se registraron nuevamente algunos episodios de tremor armónico de baja amplitud. Del 12 al 14 se presentaron exhalaciones de tamaño pequeño a moderado, que aumentaron la destrucción de este domo. El 17 de septiembre la SCT tomo una fotografía del interior del cráter, en ella fue posible identificar este nuevo domo, sólo que ya presentaba una subsidencia, tenía un tono oscuro con dos pequeños lóbulos secundarios en su interior (figura 114). Con esta imagen se calculó el volumen de domo, siendo de $(0.146 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, y con un volumen acumulado de $(7.043 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$ para esta fecha. Para el 17 de septiembre, la cota media de la parte superior de ese domo fue de 5108 msnm.

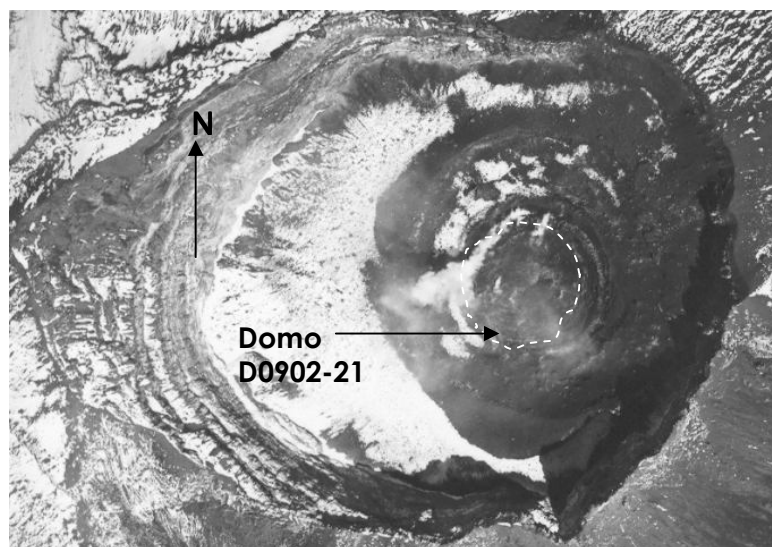


Figura 114. Fotografía tomada por SCT el 17 de septiembre de 2002, en ella se muestra el domo D0902-21.

En la última fotografía de septiembre, no se apreció un domo de gran tamaño, a pesar de que se registraron varias horas de tremor armónico. Los días restantes

de septiembre se detectó tremor armónico de baja amplitud casi todos los días. De acuerdo con lo observado posiblemente este último tremor registrado producía una emisión de lava a tasa baja. En los primeros días de octubre decrecieron significativamente los episodios de tremor armónico. Entre el 12 y el 18 de octubre el número de exhalaciones disminuyó, sin embargo ocurrieron en promedio 2 VT por día, se destaca un evento de magnitud 3.0 con profundidad de 10km el 25 de este mes. El 7 de noviembre se registró una exhalación grande con una columna de ceniza de 4km, que muestra que continuaba la fase de desalojo de este último domo. Se presentaban durante los primeros días de noviembre algunos episodios de tremor armónico, sin embargo en las imágenes visibles se pudo apreciar una degasificación intensa, lo que nos indicaba que la etapa de destrucción proseguía. El 18 de noviembre la SCT tomó una nueva fotografía del cráter, en ella se aprecia que la subsidencia ya observada en septiembre había crecido, y adquirió la forma semejante a un hemisferio invertido con radio de 70m y una profundidad de 14m. El volumen perdido hasta esta fecha era de $(0.109 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, el remanente era de $(6.934 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. La cota media del fondo para esta fecha fue de 5078 msnm (figura 115).

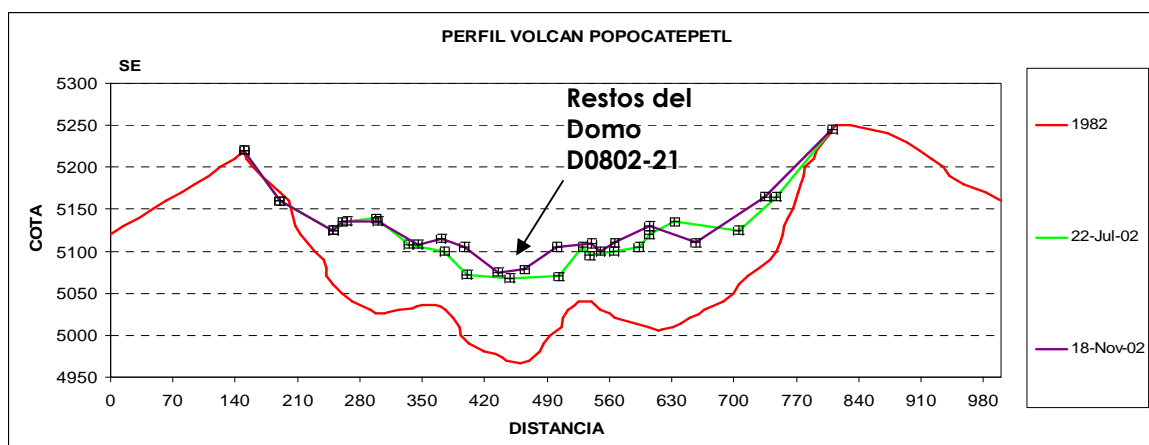


Figura 115. Perfil Sureste- Noroeste del cráter del Popocatepetl. Se muestran los datos de julio y noviembre de 2002. Las distancias horizontales fueron medidas directamente en la fotografía. Las cotas se determinaron con información de SCT.

Domo 22. Diciembre de 2002 (D1202-22)

Previo a este domo, el 17 de noviembre ocurre una secuencia inusual de eventos VT, localizados bajo el volcán de Iztaccihuatl, a 15 kilómetros al norte del Popocatepetl. El 23 de noviembre se registró un aumento significativo de LPs (78) y se detectaron algunos episodios de tremor armónico. Este incremento en la actividad estuvo asociado con la formación de un nuevo domo D1202-22,. En los días subsecuentes de noviembre la actividad disminuyó, sólo el 30 de este mes se detectaron 5 horas de tremor armónico. El 2 de diciembre la SCT tomó una imagen del cráter, en ella se pudo apreciar el nuevo domo, de color negro (figura 116), este cuerpo presentaba agrietamiento anillado en su cima, y en la base se observaban grietas radiales. Este nuevo cuerpo creció dentro de la subsidencia formada por el domo predecesor, adquiriendo una forma de hemisferio. Es

importante mencionar que dentro del cráter interior se formaron en el periodo de julio a finales de noviembre algunos cratercillos secundarios, por donde había emisiones de gas.



Figura 116. Fotografía tomada por SCT el 2 de diciembre de 2002, en ella se muestra el domo D1202-22

El 10 de diciembre se presenta tremor armónico de moderada a amplitud saturada, por espacio de 6 horas, Esto indicia un aumento en el tamaño del domo D1202-22. El 11 de este mes la SCT toma una nueva imagen aérea, la cual nos corrobora que este domo aumentó en la horizontal y en vertical, pasando de un radio de 92 a 95 metros y de 53 a 59m de altura. El volumen de este cuerpo hasta el día 11 fue de $(0.926 \pm 0.001) \times 10^6 \text{m}^3$. El acumulado era de $(7.860 \pm 0.001) \times 10^6 \text{m}^3$. La cota máxima que alcanzo fue de 5128 msnm (figura 117) En este último domo, aún cuando ocurrieron varios episodios de tremor el aumento en el volumen no fue significativo. Entre el 11 y el 18 la actividad se caracteriza en general por algunos episodios de tremor y exhalaciones que tienen su máximo el 14, día en que se registran 90 eventos. A primeras horas del día 18 se producen 2 explosiones, la principal genera una columna de ceniza de 6 km de altura y emite

clastos incandescentes a unos 1500m del cráter (figura 118). Este evento produce una pequeña subsidencia en este domo y una pérdida de volumen de $(0.062 \pm 0.001) \times 10^6 \text{m}^3$, dejando un remanente de $(7.797 \pm 0.001) \times 10^6 \text{m}^3$.

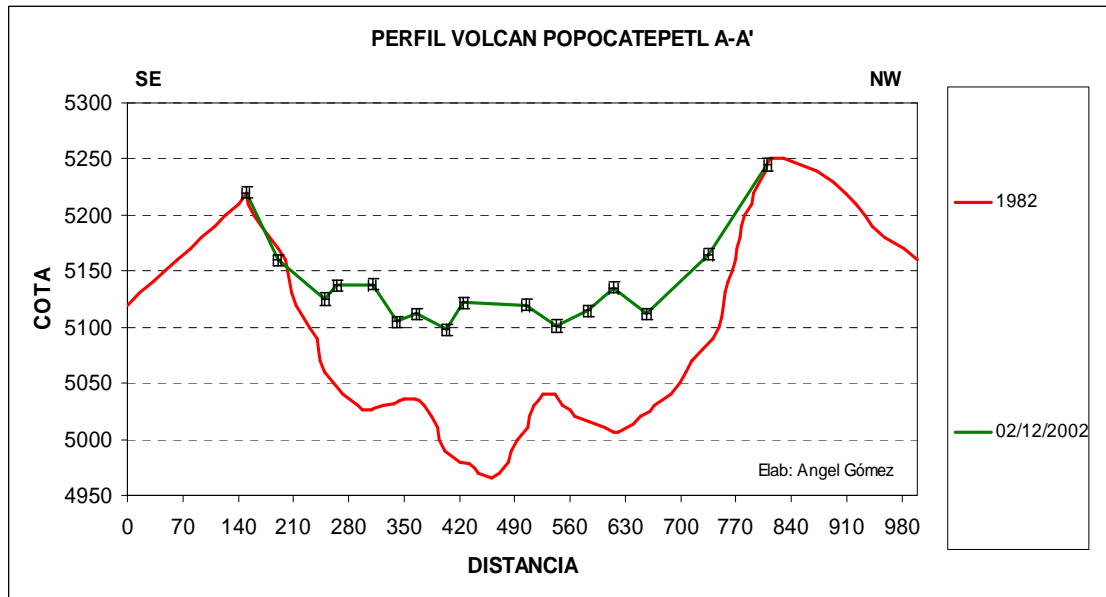


Figura 117. Perfil Sureste- Noroeste del cráter del Popocatépetl. Se muestran los datos del 2 de diciembre de 2002. Las distancias horizontales fueron medidas directamente en la fotografía. Las cotas se determinaron con información de SCT.



Figura 118 Explosión del 18 de diciembre de 2002 en el volcán Popocatépetl. Fuente www.cenapred.unam.mx

Domo 23. Diciembre de 2002 (D1202-23)

De enero de 2001 a diciembre de 2002, la actividad de los eventos VTs presentó dos agrupamientos; el primero con profundidades de 1 a -2 kilómetros y el segundo en un rango más estrecho, entre -2 y -4 kilómetros (figura 119). En marzo y junio de 2002 se localizaron dos eventos con profundidad mayor a los -6 kilómetros, situados bajo el cráter y en el sector sureste, respectivamente. Es notorio como en noviembre y diciembre el número de VTs disminuye respecto a todo el resto del año (González Pomposo, et al 2003). Esta información se incluye como parte del marco general de la actividad que ocurría para este período, al momento del emplazamiento y destrucción de los domos en el Popocatépetl. El 10 de diciembre de 2002, se registran 6 horas de tremor armónico de amplitud moderada a grande. El 14 aumenta el número de LPs y se presenta nuevamente tremor armónico.

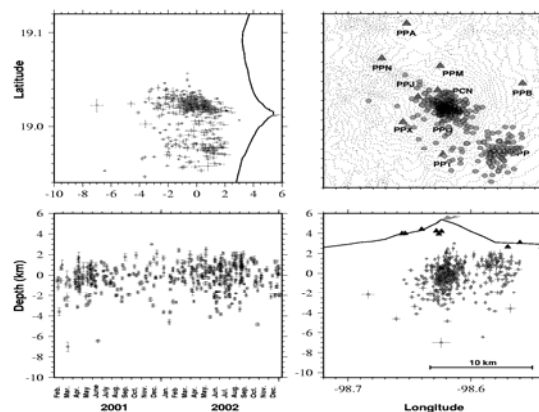


Figura 119. Actividad sísmica en el volcán Popocatépetl, de enero de 2001 a diciembre de 2002. Nótese que continúan ubicándose gran parte de los eventos en el sureste del volcán. (Tomado de González Pomposo, et al 2003).

Con el evento del día 18 de diciembre de 2002, de forma contemporánea se da un crecimiento adicional del domo D1202-23. En una fotografía tomada por SCT el 18 a las 11:00 AM, se muestra una pequeña nueva formación dómica que creció en la subsidencia del domo 22. El nuevo domo es de tono muy oscuro (figura 120), con un volumen para esta fecha de $(0.041 \pm 0.01) \times 10^6 \text{m}^3$, adquirió una forma semejante a un hemisferio de 55m de radio y una altura de 10m.

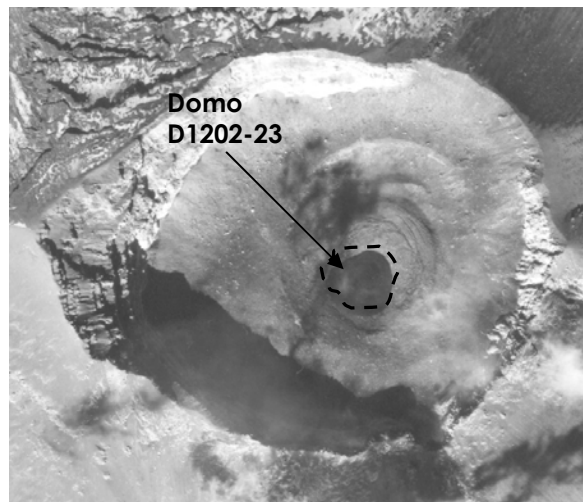


Figura 120. Fotografía tomada por al SCT el 18 de diciembre de 2002. En ella se muestra el domo D1202-23.

Este domo se destruyó con la actividad de entre el 18 y el 22, particularmente con la actividad del 23 y 29 de este mes. Del 2 al 4 de enero de 2003 se registran nuevos episodios de tremor armónico, lo que nos indicó que se producía un crecimiento adicional de este domo. Con una imagen aérea del cráter del 9 de enero de 2003 adquirida por SCT, se pudo corroborar que se había generado un crecimiento hacia los lados de Este domo, aumentando el radio a 82m. El nuevo volumen subió a $(0.106 \pm 0.001) \times 10^6 \text{m}^3$, que nos arrojó un acumulado para la

fecha de registro del tremor (4 de enero) de $(7.904 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. La cota máxima alcanzada por este domo fue de 5123 msnm. Con la misma imagen del 9 de enero se pudo observar que en los remanentes de los domos predecesores, y el actual (D1202-23) se presentó una subsidencia que adquirió una forma de hemisferio invertido de volumen $(0.260 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, de tal forma que el remanente de material acumulado a esta fecha era de $(7.643 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$.

Domo 24. Enero de 2003 (D0103-24)

El 9 de enero por la tarde ocurrió una exhalación grande con una columna de ceniza de 3 km, ese mismo día se produjo un episodio de tremor armónico. En el período del 10 al 15 de enero se registraron episodios adicionales de tremor, es importante mencionar que aunque no son episodios grandes los que se observaron, es posible que para esta fecha la actividad se encontrara a conducto abierto y el tránsito de magma hacia la superficie se daba con facilidad. En una fotografía aérea del 17 de enero se logró identificar el nuevo domo D0103-24, asociado con esta actividad (figura 121). Este domo creció dentro de la subsidencia del domo anterior, era de color oscuro con fracturas anulares en la cima. Este domo adquirió una forma cilíndrica de radio 82 y altura 11m. El volumen máximo alcanzado por este cuerpo fue de $(0.493 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, y el acumulado remanente era de $(8.136 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. La cota máxima alcanzada por este cuerpo el 15 de enero se ubicó en 5129msnm (figura 122)

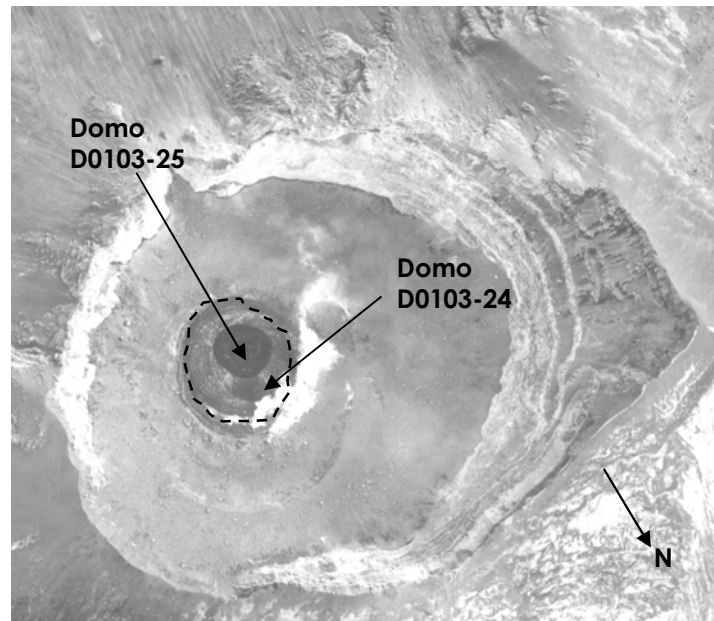


Figura 121. Fotografía tomada por el SCT el 17 de enero de 2003. En ella se muestra el domo D0103-24.

En la misma imagen aérea del 17 de enero fue posible identificar que este domo presentaba una subsidencia, con una forma semejante a hemisferio invertido con un volumen de $(0.036 \pm 0.01) \times 10^6 \text{ m}^3$, de tal forma que el volumen remanente era de $(8.099 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$.

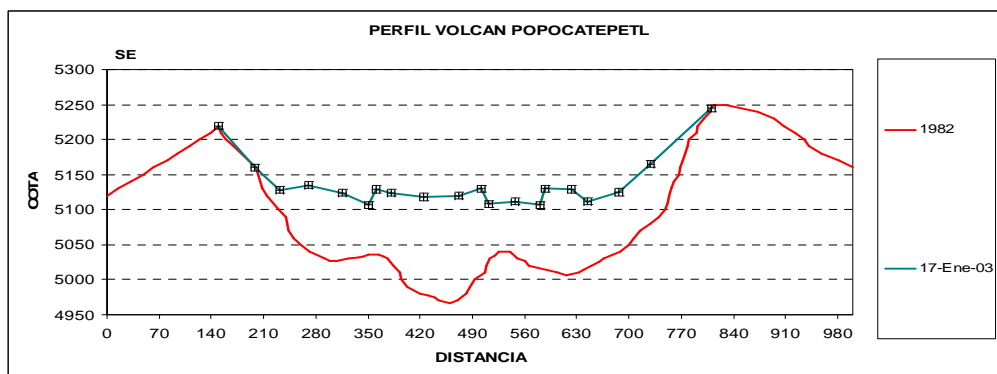


Figura 122. Perfil Sureste- Noroeste del cráter del Popocatépetl para el 17 de enero de 2003. Se muestra el domo D0103-24. Las distancias horizontales fueron medidas directamente en la fotografía. Las cotas se determinaron con información de SCT.

Domo 25. Enero de 2003 (D0103-25)

El 16 de enero de 2003 se detectó un episodio de tremor armónico de amplitud variable. En la fotografía del 17 de enero del mismo año (figura 121), se pudo constatar que la señal de tremor observada el día 16, probablemente estuvo asociada a la formación de un nuevo domo. Este pequeño cuerpo de lava era más oscuro que su predecesor. En ese momento tenía un volumen de $(0.056 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. La última semana de enero de 2003 ocurrieron varios episodios más de tremor que se asociaron con el crecimiento adicional de ese domo, entre los que destaca el ocurrido el 22. Entre el 1 y 8 de febrero de 2003 hubo una sucesión de fases de destrucción y crecimiento. Ocurrieron explosiones con emisión de clastos incandescentes y exhalaciones con emisiones de ceniza (figura 123).

En una fotografía del 13 de febrero de 2003 tomada por la SCT se pudo corroborar que ese domo había crecido, y que el volumen máximo alcanzado fue de $(0.739 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, con un acumulado remanente de $(8.895 \pm 0.01) \times 10^6 \text{ m}^3$. La cota máxima a la que llegó fue de 5131msnm. El domo para esa fecha mantenía un tono oscuro y había crecido en el sentido horizontal (figura 124). Los días siguientes de febrero continuó la fase de destrucción. El evento más destacado fue una explosión ocurrida el 14 de febrero que produjo una columna de ceniza de 5 km de altitud y la emisión de clastos incandescentes a 3 km del cráter (figura 125). Exhalaciones de tamaño moderado el 16, 19, y 20 de febrero de 2003, aumentaron el grado de destrucción del domo. El 21 ocurrió otra

explosión con una columna de ceniza de 4 km y la emisión de fragmentos incandescentes a 1.5 km del cráter.



Figura 123. Exhalación grande en el volcán Popocatepetl del 5 de febrero de 2003. Fuente www.cenapred.unam.mx

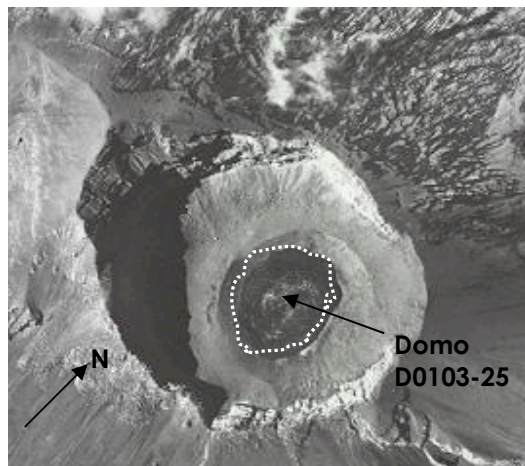


Figura 124 Fotografía del 13 de Febrero de 2003, se muestra el domo D0103-25



Figura 125. Explosión en el volcán Popocatepetl del día 14 de febrero de 2003 Fuente www.cenapred.unam.mx.

En otra fotografía tomada por la SCT el 25 de febrero de 2003 se pudo observar subsidencia en el domo D0103-25, con forma de cono truncado invertido. Se estimó la pérdida de volumen producto de estas fases de destrucción en $(0.584 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. El volumen remanente se ubicó en $(8.302 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, y la cota máxima promedio del domo descendió a 5099 msnm. Es importante mencionar que aunque hubo un importante desalojo, la redistribución de los materiales al interior del cráter, causó que el cráter interior se cubriera parcialmente con escombros.

Domo 26. Abril de 2003 (D0403-26)

Durante finales de marzo y principios de abril de 2003, la actividad se mantuvo en niveles bajos. Sin embargo se detectaron algunos microsismos VTs. El 8 de abril nuevamente se registraron episodios de tremor armónico de baja amplitud, que se

repetieron las dos semanas siguientes. En una imagen tomada por la SCT el 21 de abril de 2003 se pudo verificar el crecimiento del domo D0403-26 (figura 126) asociado con esas fases de tremor. Ese domo creció sobre la subsidencia de forma de cono truncado invertido en el domo predecesor. La forma del nuevo cuerpo fue la de un domo semiesférico, con radio de 92 m y altura promedio de 15m. El volumen de ese domo a la fecha de la fotografía era de $(0.134 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, con un acumulado de $(8.436 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. La cota media máxima que alcanzó fue 5110 msnm (figura 127).

Es importante recalcar que la considerable actividad de explosiones y exhalaciones registrada en esa época redistribuía material del domo y depositaba escombros en el interior del cráter, modificando substancialmente su morfología. Algunos de estos escombros se depositaron alrededor de este último domo, produciendo un ascenso del piso medio del fondo del cráter. El 24 de abril ocurrió una fase de destrucción causada por una explosión que produjo una columna de ceniza de 2.5 km de altura y emisión de fragmentos a 2 km del cráter. Los días 27 y 28 de abril ocurrieron explosiones menores y el 28 se registró un episodio de tremor de amplitud variable que se redujo para el 29 y 30.

En una fotografía tomada por SCT el 30 de abril de 2003, se observó una subsidencia sobre el domo con forma de cono truncado invertido, que redujo el volumen remanente a $(8.267 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$.

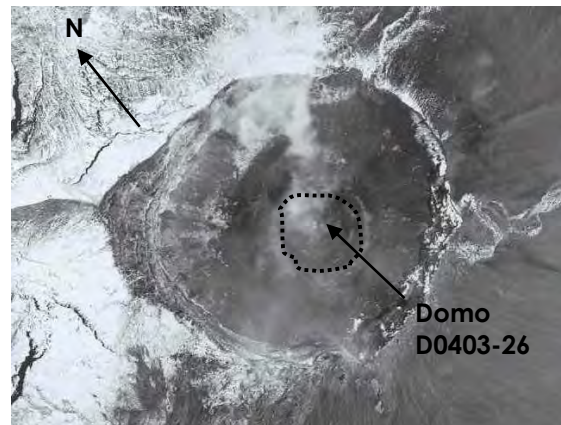


Figura 126 Fotografía del 21 de abril de 2003, se muestra el domo D0403-26. Fuente SCT.

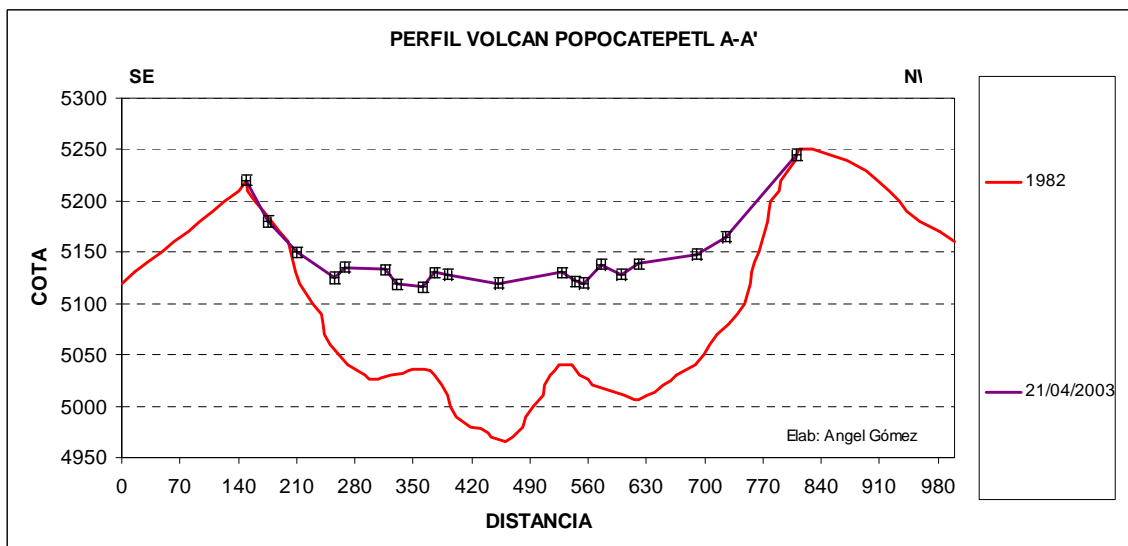


Figura 127. Perfil del interior del cráter del Popocatepetl, del día 21 de abril de 2003. Se muestra el domo D0403-26. Las distancias horizontales fueron medidas directamente en la fotografía. Las cotas se determinaron con información de SCT. Se muestran también las barras de error.

El 1 de mayo de 2003 se registró un microsismo VT de magnitud 3.0, a 6 km de profundidad. Del 1 al 7 de ese mes se registraron fases de tremor armónico y el 8 se detectó un episodio de tremor pulsante. El 10 de mayo se registró una señal de

tremor armónico de mayor amplitud que indicaba la posibilidad de un crecimiento adicional en ese domo. Esto no fue confirmado ya que en una fotografía tomada el 19 de mayo, fue posible observar que el domo D0403-26 había perdido volumen, y que las dimensiones de la subsidencia observada en ese domo el 30 de abril habían aumentado. Entre el 10 y el 19 de mayo no ocurrieron exhalaciones o explosiones relevantes, pero si se registraron algunas señales de tremor, de tal forma que es posible que esa pérdida de volumen fuera producto de una degasificación intensa y que el tremor registrado en esa fase no se relacionara con ascenso de lava a la superficie, sino con esa degasificación. Una fotografía del 19 de mayo tomada por la SCT muestra una ligera pérdida de volumen en ese domo de $(-0.092 \pm 0.001) \times 10^6 \text{m}^3$, dejando el volumen remanente en $(8.175 \pm 0.001) \times 10^6 \text{m}^3$. La cota mas baja del cráter interior se ubicó en los 5082 msnm. A finales de mayo y principios de junio de 2003 se detectaron algunos episodios de tremor armónico de baja amplitud, alcanzando sus niveles más altos el 8 de junio, pero manteniendo amplitudes moderadas. El 10, 20 y 23 de junio se detectaron exhalaciones moderadas importantes que contribuyeron a la fase de destrucción de ese domo y de los domos predecesores. El 26 de junio es adquirida por SCT otra imagen aérea, en la que se corrobora que la fase destructiva continúa. En el cráter interior se ampliaron las dimensiones de la subsidencia en forma de cono truncado invertido, de tal forma que en aquel momento el volumen del material remanente se ubicó en $(7.869 \pm 0.001) \times 10^6 \text{m}^3$. La cota mas baja del cráter interior se situó en los 5064 msnm (figura 128). Aún cuando se registraron episodios de tremor armónico a finales de junio de 2003, la fase de destrucción fue más alta, dado que el 28 de junio se registran 102

exhalaciones pequeñas, algunas con emisión de ceniza. El 1 de julio de 2003 se detectaron 128, y el día 2, 75 exhalaciones menores. Sin embargo, de ellas destacan 2 que tuvieron columnas de ceniza de 3 km de altura. Durante julio persiste la fase de destrucción, destacando el evento explosivo del 19, con emisión de clastos incandescentes a 1 km del cráter y una columna de ceniza de 3 km de altura (figura 129). La dirección de los vientos de ese día ocasionaron una ligera caída de ceniza en la CD de México. En las dos semanas finales de julio disminuyó claramente el registro de señales de tremor armónico. En una fotografía del 21 de julio de 2003 se apreció que el último domo había sido desalojado completamente, además de que la morfología del cráter interior había cambiado sensiblemente, ya que su cota mínima se situó en 5052msnm. El volumen remanente en esta fecha era de $(7.212 \pm 0.001) \times 10^6 \text{m}^3$.

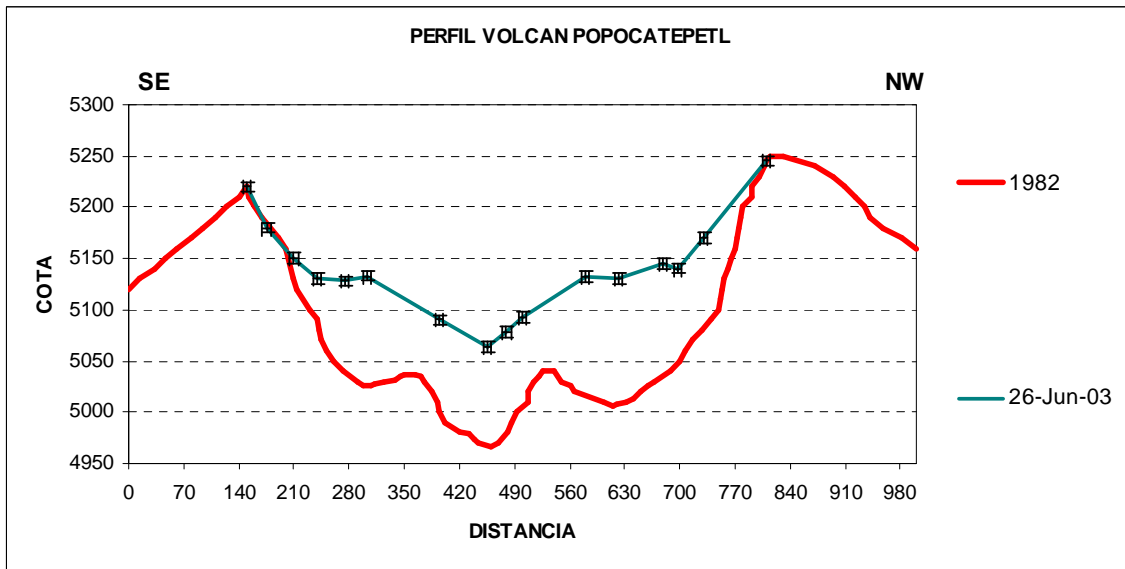


Figura 128. Perfil del interior del cráter del Popocatpetl, del día 26 de junio de 2003. Las distancias horizontales fueron medidas directamente en la fotografía. Las cotas se determinaron con información de SCT.



Figura 129 Explosión del volcán Popocatépetl del día 19 de julio de 2003. Fuente www.cenapred.unam.mx

Durante agosto de 2003 la actividad del volcán disminuyó: únicamente se registraron 3 microsismos VTs en ese mes y ya no se detectó tremor armónico. Sólo destacan una pequeña explosión el 13 y una exhalación moderada el 28, que indicaron que proseguía la fase de destrucción. Una imagen aérea tomada por

SCT el 25 de agosto permitió observar que la subsidencia había aumentado y determinar que el volumen del material remanente de los domos, se había reducido a $(6.456 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, y la cota más baja del cráter interno se ubicó en 5052msnm. También se pudo apreciar que el fondo de ese cráter se encontraba cubierto de escombros, además se pudo identificar una grieta en el fondo con dirección Oeste-Este. Durante los últimos días de agosto ocurrieron exhalaciones moderadas con emisión de ceniza. De septiembre a diciembre de 2003, la actividad disminuyó aun más y sólo se presentaron exhalaciones pequeñas. Una fotografía del 10 de diciembre de 2003 tomada por SCT (figura 130), permitió constatar que las dimensiones del cráter interno habían crecido y que esto representaba una disminución del volumen del material remanente de los domos anteriores, que en ese momento se ubicó en $(6.031 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. La cota media del fondo del cráter interior se situó en 5044msnm.

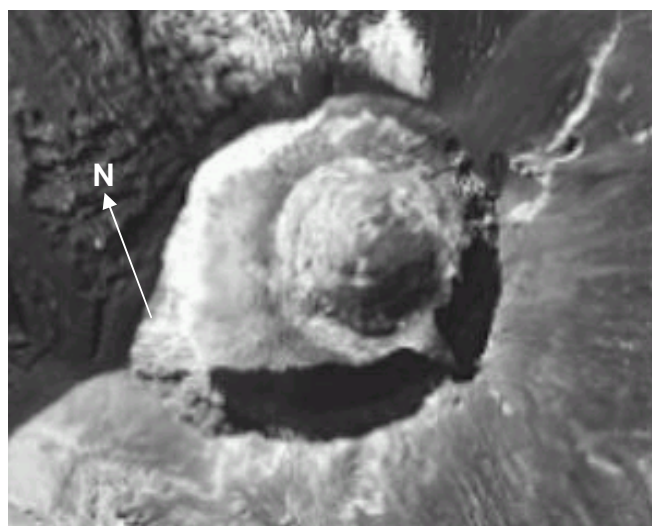


Figura 130. Fotografía tomada por la SCT el 10 de diciembre de 2003. En ella se muestra la subsidencia en el cráter interior.

Enero de 2004 se caracterizó por un nivel de actividad bajo, con sólo pequeñas exhalaciones y la ocurrencia de 3 sismos VT de baja magnitud. Una fotografía tomada por SCT el 3 de febrero de 2004 muestra ligeros cambios en el cráter interior. Se calculó el volumen remanente de material, encontrándose que disminuyó respecto a diciembre de 2003, ubicándose ahora en $(5.929 \pm 0.001) \times 10^6$ m³. La cota del fondo del cráter interior era de 5042 msnm. De febrero a noviembre de 2004 la actividad en general se mantuvo en niveles bajos. El 15 de abril y en algunos días de octubre aumentó el número de exhalaciones llegando a ser más de 20 por día. Esta actividad sugería que continuaba la fase de destrucción, lo cuál se corroboró con una fotografía tomada por la SCT el 12 noviembre de 2004. En ella se observó que en el cráter interno no se apreciaban cambios importantes, salvo que el piso tenía depósitos de material finamente fragmentado. Se calculó el volumen remanente de material de los domos de 1996 a esa fecha, y el valor fue de $(5.880 \pm 0.001) \times 10^6$ m³, y la cota mas baja del cráter interior fue de 5042msnm.

Domo 27. Abril de 2005 (D0405-27)

El 9 y 22 de enero de 2005, después de meses sin actividad importante, se registraron dos exhalaciones de moderada intensidad. El 2 de febrero, aumentó el número de eventos LP, después de meses de no registrarse ninguno. Los días 13 y 14 se detectó tremor armónico de baja amplitud. Entre febrero y noviembre de 2005 se registraron episodios esporádicos de tremor armónico en varias fechas se destacan los de los días (13 de mayo, 1 y 2 de julio, 18 de agosto, 18 de

septiembre.). En ese período se registraron numerosas exhalaciones de tamaño pequeño a moderado, con emisiones de ceniza, y al menos 2 explosiones menores. En una fotografía oblicua tomada en noviembre de 2005, se pudo observar que las fases de tremor ocurridas en el período mencionado, posiblemente estuvieron asociadas al crecimiento del domo D1105-27 en el fondo del cráter interior. El 10 de febrero de 2006, en una fotografía de la SCT, se corroboró que en el fondo del cráter interior (figura 131), se había formado un domo que rellenó parte de este cráter, probablemente desde febrero de 2005, fecha en que se observaron los primeros indicios del crecimiento de ese domo. Dado que no se obtuvieron imágenes del interior del cráter durante todo el año 2005, salvo la oblicua de noviembre, no fue posible apreciar el detalle del crecimiento. Con la fotografía del 10 de febrero de 2006 se calculó el volumen del domo D1105-27, en $(1.035 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, de tal manera que el acumulado remanente alcanzó $(6.916 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. En la misma imagen se observa que ese domo mostraba una pequeña subsidencia producto de las explosiones y exhalaciones ocurridas en casi todo 2005. Sin embargo, es probable que haya sido parcialmente rellenada con un crecimiento adicional de este mismo domo, asociado con alguno de los episodios de tremor armónico registrados durante 2005.

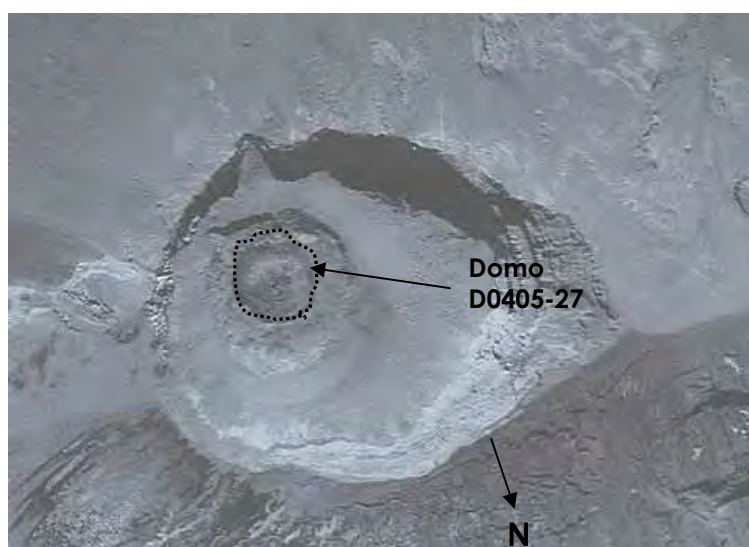


Figura 131. Fotografía tomada por SCT el 10 de febrero de 2006 y que muestra el domo D0405-27.

Domo 28. Noviembre de 2005 (D1105-28)

El 9 de noviembre de 2005 se detectaron 3 microsismos VT. Posteriormente, con una fotografía oblicua del 11 de noviembre se pudo verificar la probabilidad de que se gestara el crecimiento de un nuevo pequeño domo sobre su predecesor (D1105-28). El 1 de diciembre se detectó una exhalación de tamaño moderado. El 12, y del 20 al 23 de diciembre de ese año aumentó nuevamente la cantidad de eventos LPs (en promedio más de 70), que sugerían una fase de crecimiento adicional de este domo. Intercalado con esta actividad del 14 y 25 de ese mes, así como del 6 de enero de 2006 se presentaron pequeñas explosiones, además de que en otros días de diciembre ocurrieron exhalaciones con emisiones de ceniza. Del 4 al 7 de febrero de 2006 nuevamente se registran episodios de tremor armónico. El 10 de febrero, de una imagen tomada por SCT, se logró observar

que efectivamente estaba creciendo el domo D110528, sobre su predecesor y más o menos sobre el centro del cráter interior. Esta nueva formación era de tono oscuro (figura 132) con una forma semejante a un hemisferio con radio de 70m y que hasta esa fecha tenía un volumen de $(0.145 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, de tal forma que el acumulado remanente alcanzó $(7.062 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$. La cota máxima a la que hasta ese momento había llegado ese domo era de 5107msnm (figura 133). Durante mayo y junio se registran nuevamente señales de tremor armónico. Además ocurrieron algunas exhalaciones el 3 de abril, 23 de mayo, 13 de junio y el 25 de julio de 2006. El 3 de agosto se registró una fase de tremor armónico casi continuo, de baja a alta amplitud y con una duración de unas 14 horas. De agosto a diciembre de 2006, se registraron 77 microsismos volcanotectónicos con magnitudes de 2.0 a 3.0. De esos eventos, 66 se ubicaron bajo el cráter con profundidades entre 3 y 7 km (BGVN-04-2007). Del 2 al 6 de noviembre de ese año nuevamente ocurrieron episodios de tremor armónico de amplitud variable y de varias horas de duración. Fases de esa misma señal, aunque de amplitud menor, ocurrieron del 2 al 6 de diciembre. El 30 de diciembre de 2006 ocurrió una exhalación pequeña con emisión de ceniza. Asimismo, el 6 de enero de 2007 ocurrió una explosión menor, lo que indica que en ese período se presentaba una intercalación de fases de construcción con fases de destrucción.

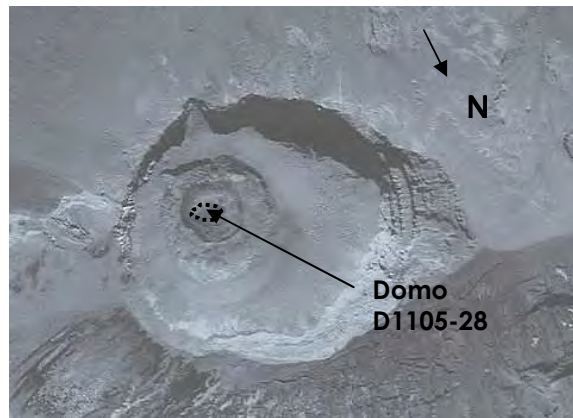


Figura 132. Fotografía tomada por SCT el 10 de febrero de 2006 y que muestra el domo D1105-28

El 6, y del 11 al 14 de enero se produjeron fases de tremor armónico de baja amplitud. En una fotografía tomada por SCT el 24 de enero de 2007 se pudo observar que el domo D1105-28 había crecido sobrepasando a su predecesor (figura 134). En ese momento tenía una forma semejante a un cilindro o pistón con radio mayor de 92 m y altura de 32m con un volumen estimado en $(0.495 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, de tal forma que el acumulado de material remanente para esa fecha era de $(7.556 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, con una cota máxima en el domo de 5132 msnm (figura 135).

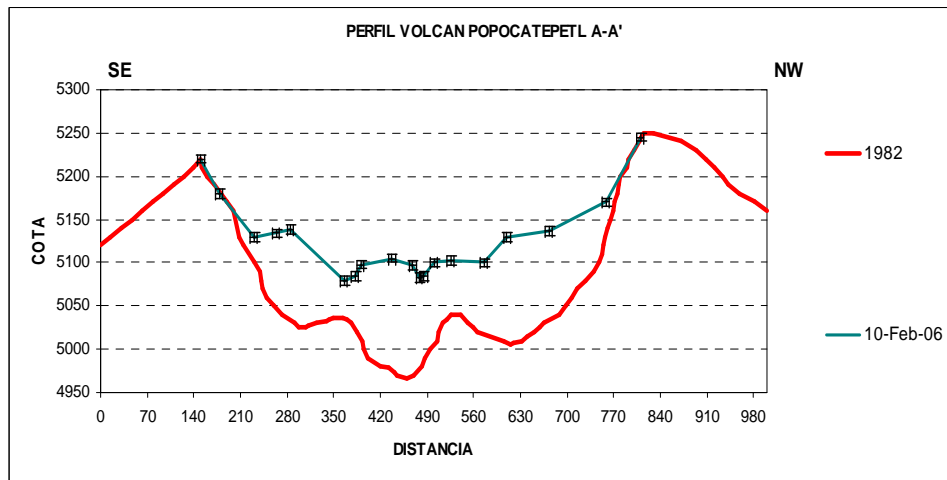


Figura 133. Perfil del interior del cráter del Popocatepetl, del día 10 de febrero de 2006. Las distancias horizontales fueron medidas directamente en la fotografía. Las cotas se determinaron con información de SCT.



Figura 134. Fotografía del cráter del volcán Popocatépetl del 24 de enero de 2007, tomada por SCT. Se muestra el domo D1105-28

Del 2 al 6, y del 22 al 23 de febrero de 2007, se registraron más episodios de tremor armónico de amplitud baja a moderada y de duración variable a intervalos irregulares. El 18 de ese mes se presentó una secuencia de exhalaciones. El 6 de

marzo la SCT tomó una fotografía aérea del cráter, en la que se aprecia que el domo D1105-28 presentaba una pequeña subsidencia de forma de hemisferio invertido con un volumen calculado de $(-0.041 \pm 0.001) \times 10^6 \text{m}^3$. El remanente de los domos de 1996 a marzo de 2007 se encontraba en esa fecha en $(7.515 \pm 0.001) \times 10^6 \text{m}^3$. En abril, mayo y junio se detectan episodios adicionales de tremor armónico de baja amplitud. El 15 de junio de 2007 se registraron 5 microsismos VTs. El 3 y 4 de agosto ocurrieron fases de destrucción por efecto de exhalaciones moderadas con ceniza. El mismo caso se detecta del 26 al 29 de septiembre de 2007, y en algunos días en noviembre y diciembre. El 15 de enero de 2008 ocurrió una explosión. El 22, 23 y 26 se presentaron fases de tremor armónico de baja amplitud. El 4 de febrero ocurrió una pequeña explosión. En una fotografía tomada por SCT el 8 de febrero es posible apreciar que el domo D1105-28, presentaba una subsidencia. Las fumarolas de vapor en el interior del cráter no permitieron medir la pérdida de volumen asociada. El 11, 13 y 14 de febrero de 2008 ocurrieron explosiones pequeñas adicionales, y el 9 de marzo se registró una explosión con emisión de clastos incandescentes a una distancia de 3 km del cráter (figura 136). El 19 y 25 de abril de 2008 se presentaron episodios adicionales de tremor armónico de amplitud variable. En mayo y junio prevalecieron las fases de destrucción del domo, dado que se presentaron exhalaciones pequeñas con emisión de ceniza. Destacan el 27 y 28 de junio por la ocurrencia de 3 y 5 microsismos VTs respectivamente. Los meses de julio a diciembre de 2008 se caracterizaron por su baja actividad, pero también por episodios cortos de tremor armónico intercalados por secuencias de pequeñas

exhalaciones con emisión de ceniza. El 22 de enero de 2009 ocurrió una exhalación con una columna de ceniza de 2km.

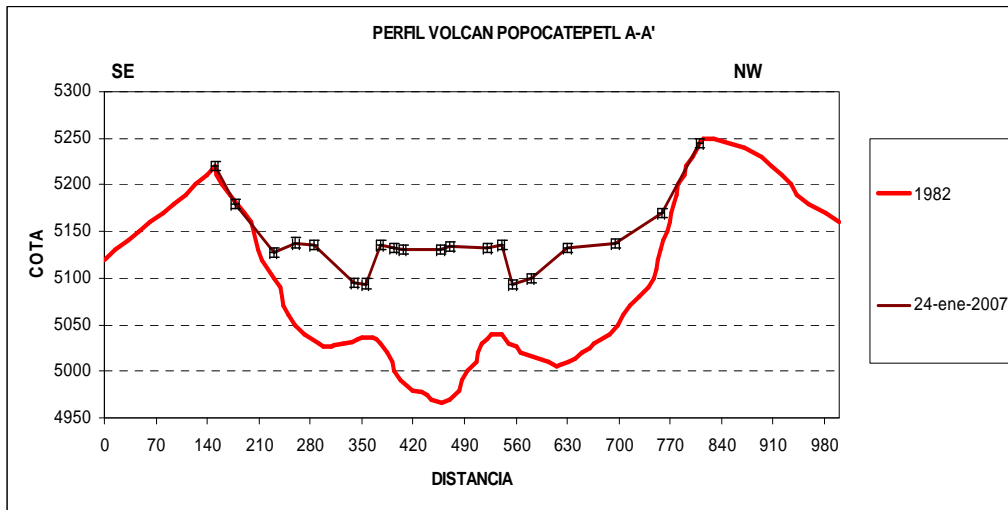


Figura 135. Perfil del interior del cráter del Popocatpetl, del día 24 de enero de 2007. Las distancias horizontales fueron medidas directamente en la fotografía. Las cotas se determinaron con información de SCT.



Figura 136. Explosión en el volcán Popocatépetl del día 9 de marzo de 2008. Fuente www.cenapred.unam.mx

La fotografía aérea del 8 de febrero de 2009 tomada por la SCT, revela que el domo D1105-28, creció hasta alcanzar una radio de 150m y una altura de 32m. En ese tiempo, ese domo tenía un color grisáceo (figura 137). En esa imagen es posible apreciar que el domo presentaba una subsidencia en forma de hemisferio con radio de 95 m y ~20m en la vertical. En resumen, el volumen probable que alcanzó el domo D1105-28 fue de $(1.183 \pm 0.001) \times 10^6 \text{m}^3$, y se infiere que creció en varios pulsos, dado que ocurrieron episodios de tremor en varias fechas. El volumen total remanente de los 28 domos que crecieron en el cráter del volcán Popocatepetl de marzo de 1996 a febrero de 2009 se estima es de $(7.770 \pm 0.001) \times 10^6 \text{m}^3$.

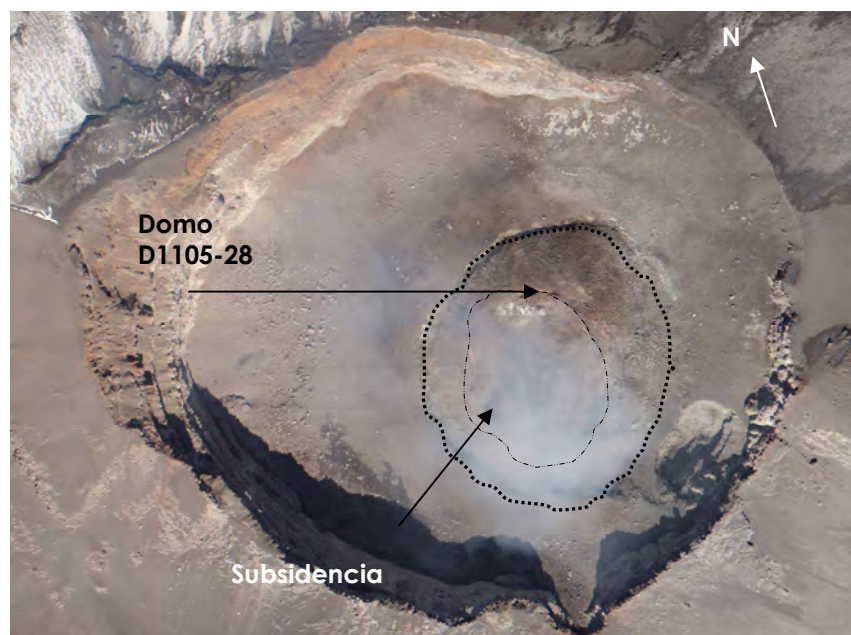


Figura 137. Fotografía del cráter del volcán Popocatepetl del 8 de febrero de 2009, tomada por SCT. Se muestra el domo D1105-28

En esta última fotografía fue posible apreciar una “nueva” boca al sureste del cráter principal.

5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Volúmenes y tasas de emisión

A continuación se presentan los resultados de la determinación de los volúmenes de los domos del volcán Popocatepetl. De 1996 a 2009 se identificaron 28 eventos de crecimiento de domos. La tabla 5.1.1, y la figura 138 muestran los volúmenes obtenidos en cada domo. Se destaca que el episodio de crecimiento con mayor volumen emitido ocurrió en domo 12, en diciembre del 2000. El volumen promedio de material emitido en cada evento de formación y crecimiento de domo es de $(1.020 \pm 0.01) \times 10^6 \text{ m}^3$. En 13 años de actividad, de 1996 a 2009, se tiene en promedio la formación de 2 domos por año, aunque como se ve en la figura 127, en el proceso de construcción y destrucción de los domos algunos episodios se encuentran agrupados, y en otros casos, hay años donde no ocurre ninguna nueva formación (figura 139).

Tabla 5.1.1. Volúmenes absolutos de los 28 episodios de crecimiento de domo en el volcán Popocatepetl de 1996 a 2009. La fecha significa el momento en que se pudo cuantificar cada domo, de acuerdo principalmente a la disponibilidad de fotografías.

DOMO	FECHA	Volumen $\pm 0.001 \times 10^6$ m^3
1	26/03/1996	2.405
2	08/05/1996	1.515
3	15/03/1997	2.231
4	04/07/1997	0.416
5	16/08/1997	1.304
6	12/12/1997	1.765
7	14/03/1998	0.027
8	10/05/1998	0.241
9	22/11/1998	0.717
10	12/02/2000	0.027
11	28/08/2000	0.170
12	13/12/2000	6.825
13	28/02/2001	0.827
14	09/08/2001	0.562
15	20/08/2001	1.059

16	08/09/2001	0.103
17	11/11/2001	0.503
18	24/01/2002	1.379
19	28/04/2002	1.025
20	22/05/2002	0.659
21	02/08/2002	0.147
22	23/11/2002	0.926
23	18/12/2002	0.106
24	10/01/2003	0.493
25	16/01/2003	0.796
26	08/04/2003	0.134
27	10/02/2006	1.036
28	11/05/2006	1.183

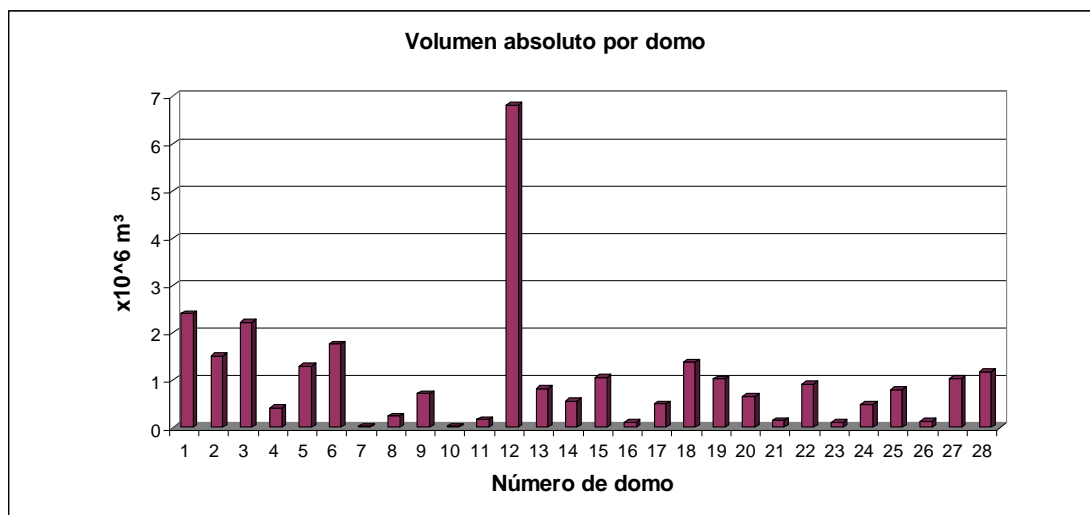


Figura 138. Volúmenes absolutos de cada domo. La escala vertical es el volumen en m³.

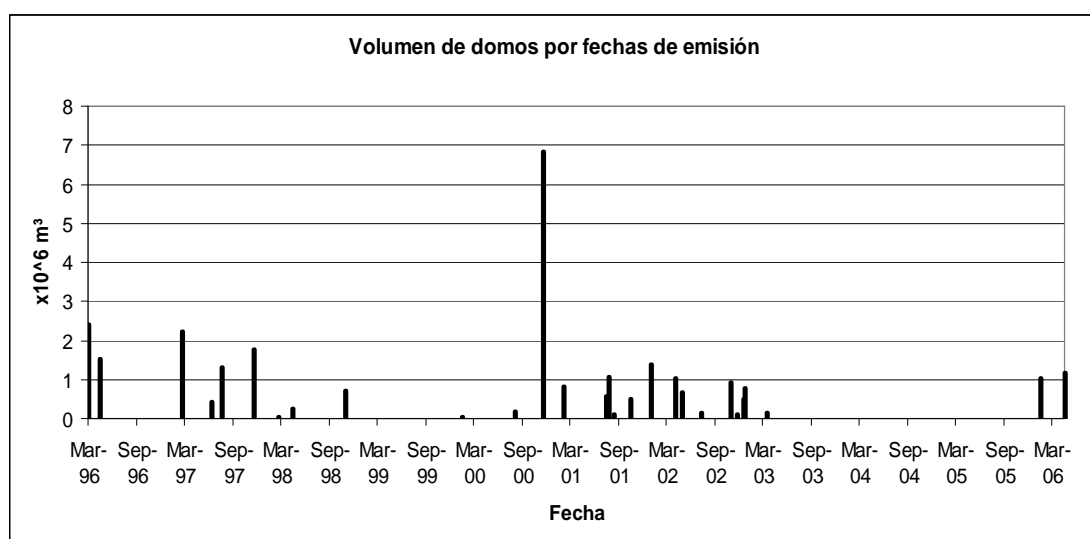


Figura 139. Volúmenes absolutos por domo y por fecha. La escala vertical es el volumen en m³.

El proceso eruptivo de 1996 a 2009, involucra la emisión y desalojo de material lávico del cráter. Hasta 2009 el volumen remanente que resulta de sumar el volumen de las emisiones de los 28 domos y sustraer el valor estimado del material desalojado por explosiones y exhalaciones es de $(7.770 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$ (figura 140). En este volumen se contemplan los escombros y material sólido acumulado que no fue arrojado fuera del cráter.

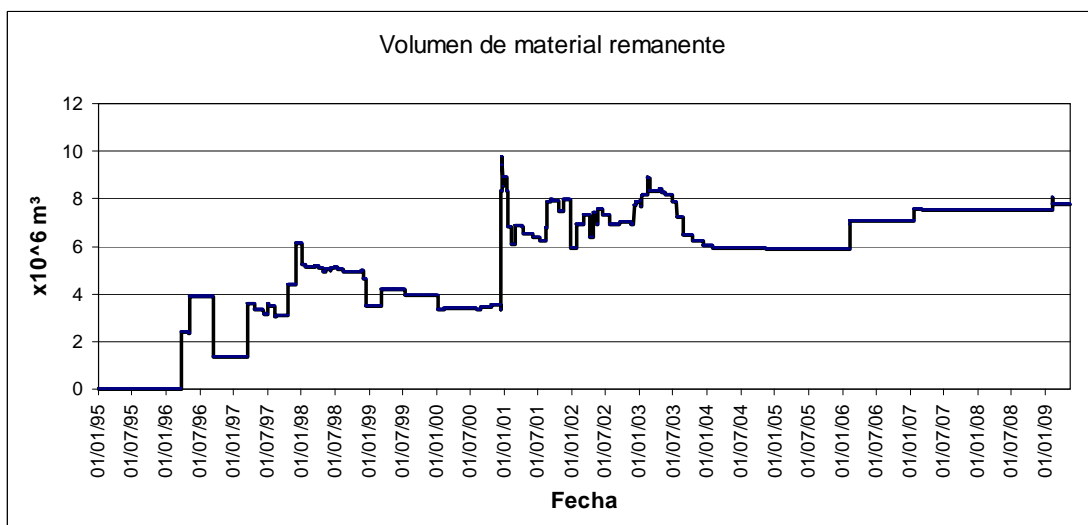


Figura 140. Volumen remanente que se encuentra en el interior del cráter del volcán Popocatepetl hasta mayo de 2009.

La producción neta de lava, producto de la formación de 28 episodios de crecimiento entre 1996 y 2008 es de $(28.50 \pm 0.01) \times 10^6 \text{ m}^3$ (figura 141). En esta figura se muestra como hay dos periodos en donde hay mas emisión de material, el primero de marzo de 1996 a diciembre de 1997 y el segundo de diciembre de 2000 a diciembre de 2002. En los demás años de observación se aprecian episodios de crecimiento aislados.

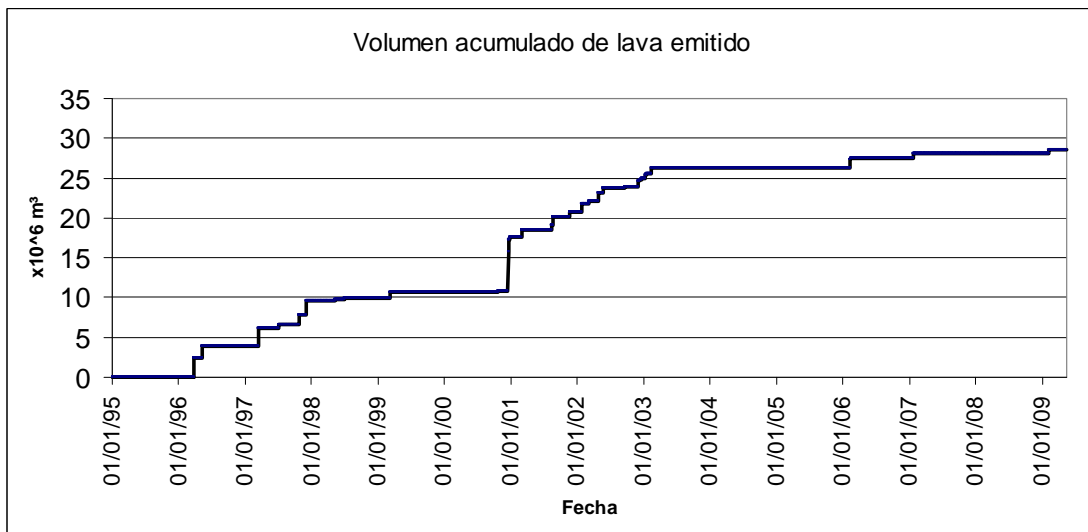


Figura 141. Volumen acumulado de lava emitida por los 28 episodios de formación de domos en el interior del cráter del volcán Popocatepetl hasta mayo de 2009

En los años 2001 y 2002, así como está considerada en estos años la mayor concentración de producción de domos, en estos mismos años se acumula los mayores episodios de destrucción de domos (figura 142). Asimismo después de la formación de los primeros domos de 1996, ocurren los mayores episodios puntuales de destrucción.

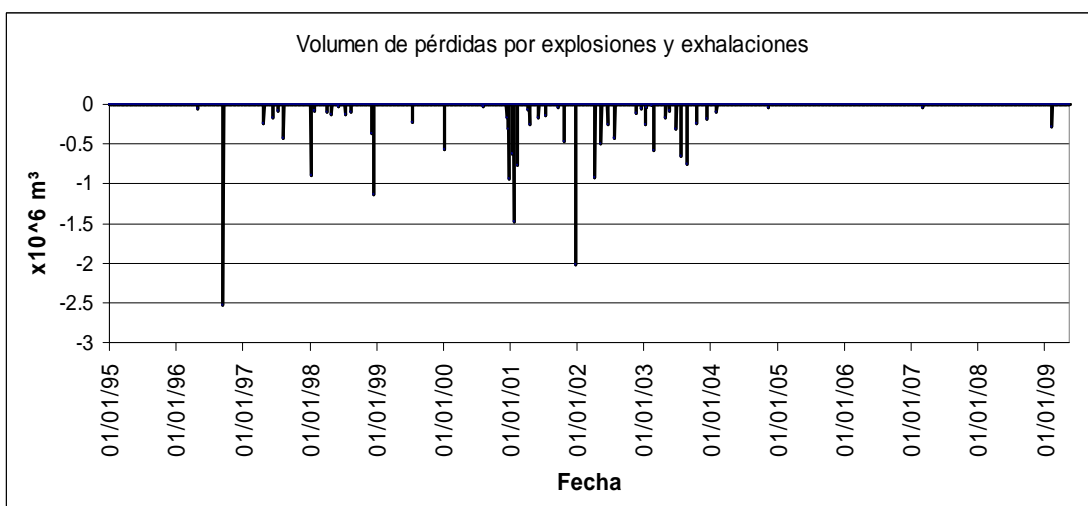


Figura 142. Volumen de pérdidas de material por fecha, ocurridas en el cráter del volcán Popocatepetl entre 1996 y mayo de 2009.

En términos de las pérdidas acumuladas por exhalaciones y explosiones (figura 143), sin duda las mayores pérdidas acumuladas se producen entre los años 2001 a 2003. Posterior a esto, se presenta una relativa situación de equilibrio entre el balance de emisión con la pérdida de volumen.

Otro aspecto importante a destacar, es que considerando que la capacidad media de almacenaje antes de 1994 del cráter se estimaba en aproximadamente $38 \times 10^6 \text{ m}^3$, y considerando que para mayo de 2009 el volumen remanente que se encuentra para esa fecha es de $(7.770 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ m}^3$, se estima que el material acumulado ocupa cerca del 28% de la capacidad del cráter.

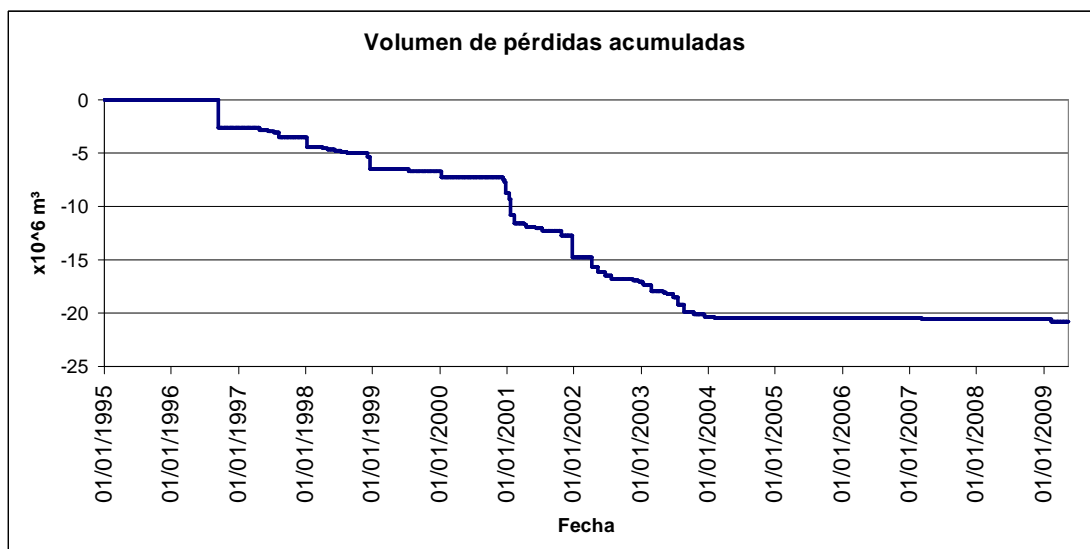


Figura 143. Balance de emisión y pérdidas de material por fecha, ocurridas en el cráter del volcán Popocatepetl entre 1996 y mayo de 2009

Para el propósito de este estudio, se estima la tasa media de emisión de lava como la razón entre la diferencia de volúmenes estimados en dos fechas sucesivas. La figura 144 muestra las tasas medias obtenidas para el período de

1996 a mayo de 2009. La mayor tasa de emisión de lava ocurrió en diciembre del año 2000 con un valor de 28m³/seg, la tasa promedio de emisión de lava en este período es de ~2 m³/seg. Los domos formados entre los años 2005 y 2009 son los que presentan el promedio menor de todo el período de análisis siendo de ~0.05 m³/seg.

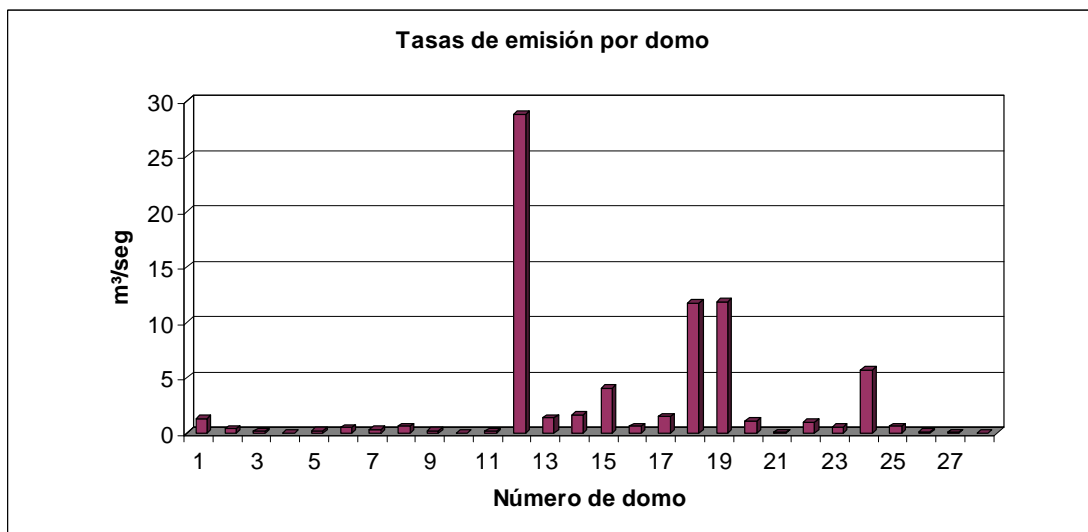


Figura 144. Tasa de emisión media de lava, ocurrida en el cráter del volcán Popocatepetl entre 1996 y mayo de 2009.

5.2 Comparación del proceso de crecimiento de los domos del Popocatepetl con otros volcanes

De 1996 a 2009 en el volcán Popocatepetl se produjeron 28 episodios de formación de domos. Estas formaciones han sido acompañadas por la presencia de señales de tremor volcánico y en ocasiones de eventos LPs. Esta característica no es particular para este volcán, ya que esta asociación ha sido reportada para otros volcanes, como Galeras (Gil Cruz, et al 1997) o Unzen (Mcnutt, 1996). La tasa de emisión de lava promedio para el período analizado, cuyo valor es aproximadamente de ~2 m³/seg, es análoga a la de otros volcanes

como el Unzen que tiene un pico de emisión con $8\text{m}^3/\text{s}$ y declina posteriormente a $3\text{m}^3/\text{s}$ (Sparks et al., 1998). En Mt. St Helens, para el período de 1980 a 1986 se reportan 20 pulsos de emisión con tasas que oscilan entre 1 y $40\text{m}^3/\text{s}$, teniendo un promedio de $0.35\text{m}^3/\text{s}$ (Swanson et al., 1990). En el domo Santiaguito, del volcán Santa María en Guatemala, se han observado diversos pulsos de emisión con tasas de 0.6 a $1.9\text{m}^3/\text{s}$, presentando una reducción en la tasa de 1988 al 2000 (Harris et al., 2003). Adicionalmente, como en el caso del Santiaguito y otros volcanes, el Popocatépetl ha presentado un descenso en la tasa de emisión en el período 2005 - 2009. Esta particularidad se ha interpretado como una disminución en la presión por agotamiento de la fuente, así como una migración en el centro de emisión de los domos (Harris et al., 2003). Aunque demostrar esa migración requiere mayor sustento, algunas evidencias de alteraciones de la “plomería” del sistema de conductos magmáticos del volcán podría reflejar alguna evolución del centro de emisión, aunque dada su profundidad, es difícil demostrarlo. Por ejemplo, la imagen de febrero de 2009 (figura 149) muestra una “boca nueva” que se identifico al sureste del cráter.

El proceso o “ciclo” de emplazamiento, seguido en ocasiones por degasificación o subsidencia en el domo, así como la culminación con actividad explosiva que se observó en las 28 fases de emplazamiento de domos en el Popocatépetl para el período de 1996 a 2009, se ha observado en varios volcanes como el Lascar (Matthews et al 1997) o el Galeras (Gil Cruz et al 1997).

5.3 Mecanismos de emplazamiento y destrucción

Existen varios modelos que pueden explicar los mecanismos que producen el emplazamiento de los domos en el Popocatepetl. El proceso de construcción de este tipo de domos puede ser descrito como proceso causiastático representado como el ascenso lento y episódico de magma en un conducto de dimensiones y geometría desconocidas resultante del contraste de densidades entre el magma y la roca encajonante, que depende del contenido variable de volátiles en el magma (González- Mellado, et al 2008). En todo caso, el conducto volcánico se puede visualizar como un complejo sistema de grietas, diques y tubos hidráulicamente conectados con una longitud vertical probable de unos 6 a 10 Km. (Valdés, et al 1995). El fundido magmático que rellena el conducto volcánico (columna magmática) (figura 145), está sujeto en toda su extensión a una presión hidrostática equivalente a la que tendría una columna cilíndrica vertical a la misma profundidad. Un aspecto importante en este modelo es que antes que los domos sean destruidos por explosiones antes de que dejen detengan su crecimiento. Se asume que cuando dejan de crecer otros procesos como la cristalización y la pérdida de gas, ocurren en una región ubicada por debajo de los domos, llegando hasta unos pocos cientos sobre el conducto volcánico, y siendo esta la causa de la destrucción de los mismos (Sparks, 1997), una vez limpios los conductos se reduce la longitud vertical de la columna de magma, restableciendo el ascenso de magma y el crecimiento de domos. Este requerimiento de que a cierta profundidad existe una condición de flotabilidad neutral del magma respecto a la roca encajonante, define la altura de la columna por equilibrio isostático. Esta cuestión se refiere que a cierta profundidad existe un nivel de compensación que satisface el principio isostático del tipo Pratt (González- Mellado, 2008). Importante es

mencionar que este modelo es independiente de la geometría y complejidad de sistema de conductos del volcán y sólo requiere que este sistema se encuentre hidráulicamente conectado.

Aún considerando que las velocidades de ascenso son relativamente bajas (generando una producción promedio de $\sim 2 \text{ m}^3/\text{seg}$), el desplazamiento hacia arriba ocurre en una escala de tiempo que es corta comparado con el tiempo entre emplazamientos, como se evidencia por la duración del tremor armónico asociado generalmente al crecimiento de los domos (González Mellado, et al, 2008). Eventualmente, los desplazamientos verticales del magma cuando el material pierde la capacidad de liberar los volátiles ensueltos, finalizan con una violenta explosión o secuencia de varias explosiones, que expulsa hacia el exterior fragmentos de domo de varios tamaños y probablemente arrastra restos de conducto como líticos accidentales.

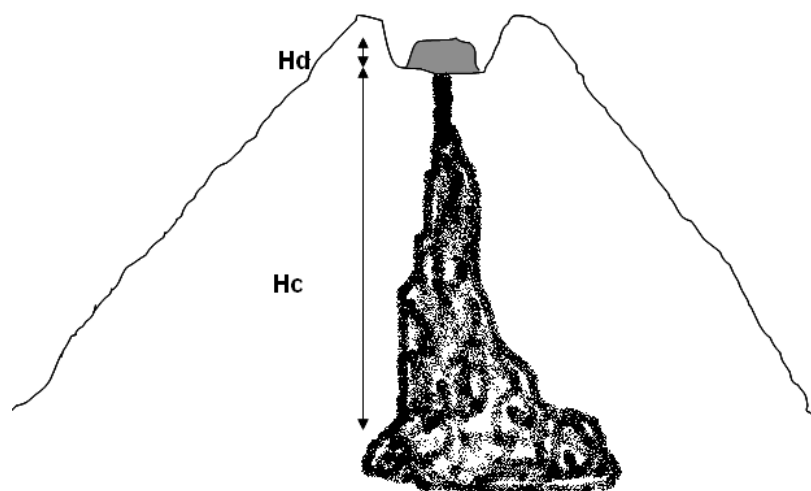


Figura 145- Esquema idealizado de la columna magmática que asciende y genera el emplazamiento de domos en el volcán Popocatepetl. Hc es la altura de la columna de magma, Hd, altura del domo. (Modificado de González-Mellado y De la Cruz-Reyna, 2008).

5.4 Consecuencias para la estimación del peligro volcánico

La actividad del volcán Popocatepetl de 1996 a 2009 ha sido caracterizada por el crecimiento y expulsión de domos mediante explosiones y exhalaciones que por lo general no han rebasado un VEI 2 o 3 (González-Mellado, et al 2008). La actividad efusiva vinculada a los crecimientos de domos en general no ha representado hasta ahora un aumento en el nivel de peligro del volcán. Sin embargo, producto de estas formaciones domicas la morfología del cráter ha cambiado. En 1982 la cota del fondo del cráter era de ~4966 msnm (figura 146). En febrero de 2008 la cota media del fondo es de ~5140 msnm (figura 147). La implicación que representa este ascenso en el nivel medio del cráter es que de ocurrir eventos explosivos, la barrera topográfica que representaban las paredes del cráter, ahora son menores, por lo que el recorrido para la salida de material del cráter es menor y por lo tanto el alcance estos eventos puede ser mayor. Esta situación ya había sido evidenciada por Macias J.L., et al 2005, quién menciona que en 2005 el cráter del Popocatepetl, presentaba un nivel de llenado producto de los domos emplazados hasta esa fecha. De ocurrir una explosión en la que se generaran flujos piroclásticos como el del 22 de junio de 2011, que hasta esa fecha habían tenido un alcance que se limitaba a la zona roja del mapa de peligros, era posible que ahora que las paredes del cráter eran mas pequeñas, el alcance de posible flujos seria mayor. Por otra parte, de generarse una extrusión de lava con un tasa alta e involucrando un volumen de magma grande, el tiempo que tardaría en rebasar las limites del cráter es ahora menor, dado que el porcentaje de llenado (escombros y roca) que actualmente tiene el cráter

representa un ~28 % del total de su capacidad (figura 148) por lo que la probabilidad de que ocurran derrames de lava potencialmente causantes de flujos de bloques y ceniza ha aumentado.

También se ha producido una reducción del espesor de las paredes del cráter principal, lo que produce que tengan una disminución en su resistencia a fuerzas laterales. Esto es, disminuyo en la zona del Chimuelo de 420 m a 220m su espesor, esto significa una disminución del 48%.

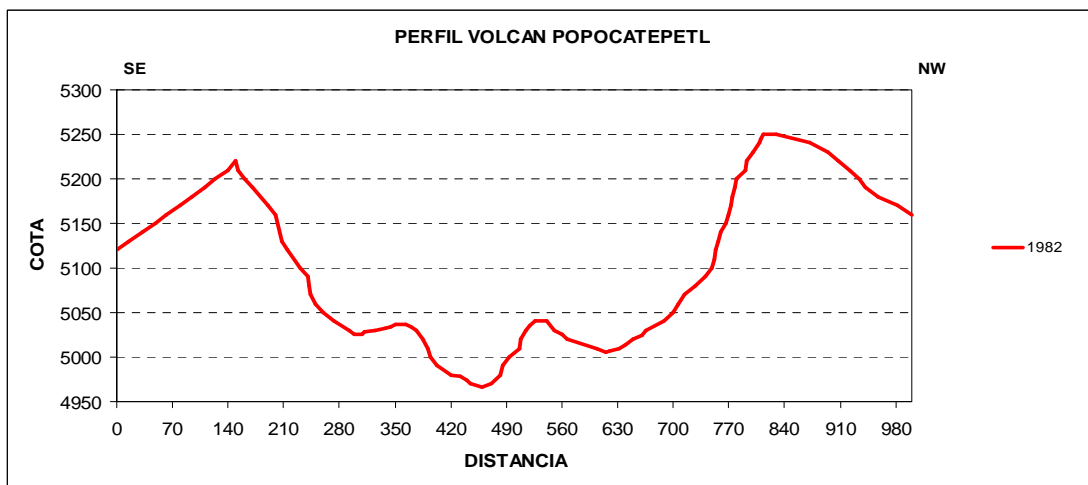


Figura 146. Perfil SE-NW del cráter del volcán Popocatépetl en 1982.

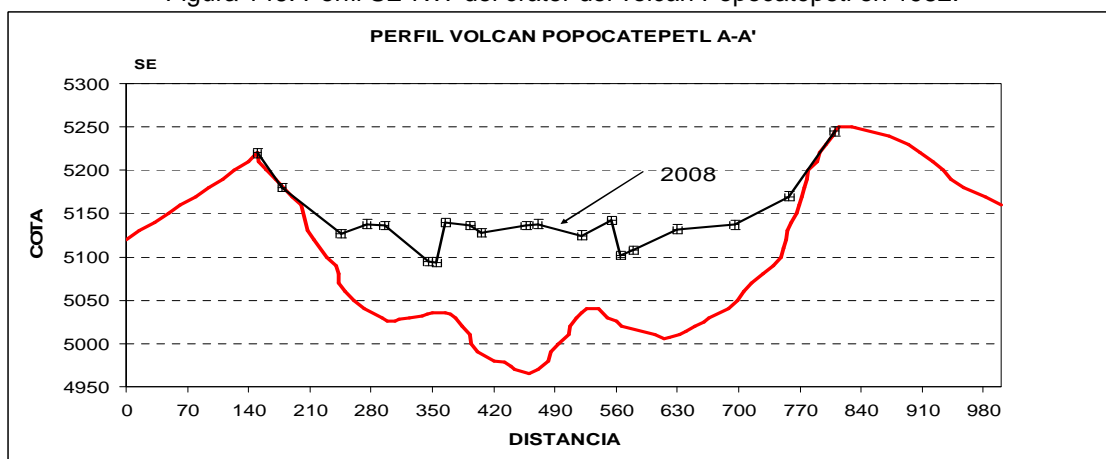


Figura 147. Perfil SE-NW del cráter del volcán Popocatépetl en 2008

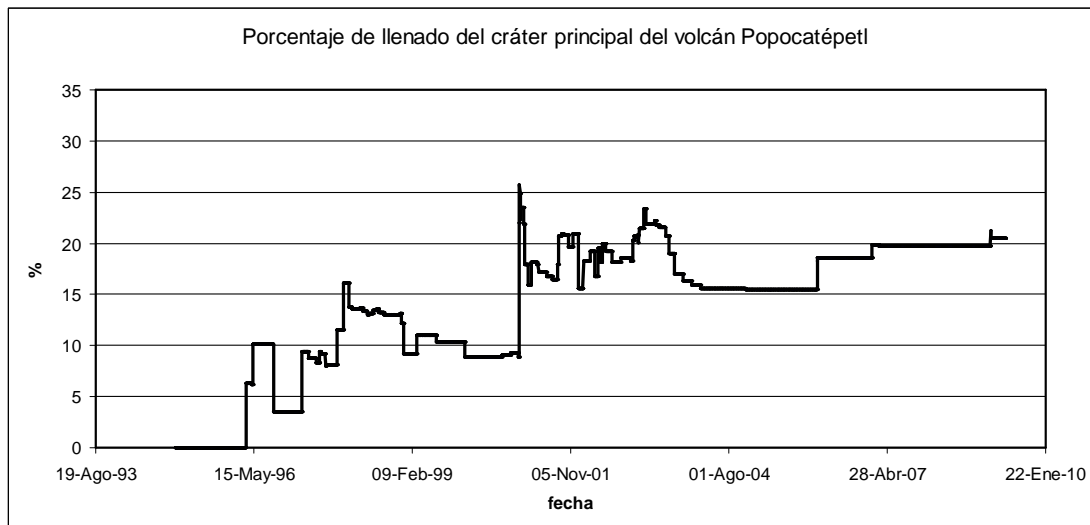


Figura 148. Porcentaje de llenado del cráter del volcán Popocatépetl

En la más reciente fotografía vertical del cráter del volcán Popocatépetl de febrero de 2009, se aprecia sobre el último domo una subsidencia de aproximadamente 95 m de radio y ~30m de profundidad... En esa misma imagen, se distingue al sureste del cráter interior, y al pie de la pared interior del cráter principal una nueva “boca” con forma semi-elíptica, con un diámetro mayor de aproximadamente ~140m y una profundidad de ~40m (figura 149). Esta zona, dada su cercanía con el borde exterior del cráter principal puede propiciar un debilitamiento de esa área producida por la formación de la boca. La ubicación de esa boca esta orientada hacia el sector sureste del volcán (figura 150).

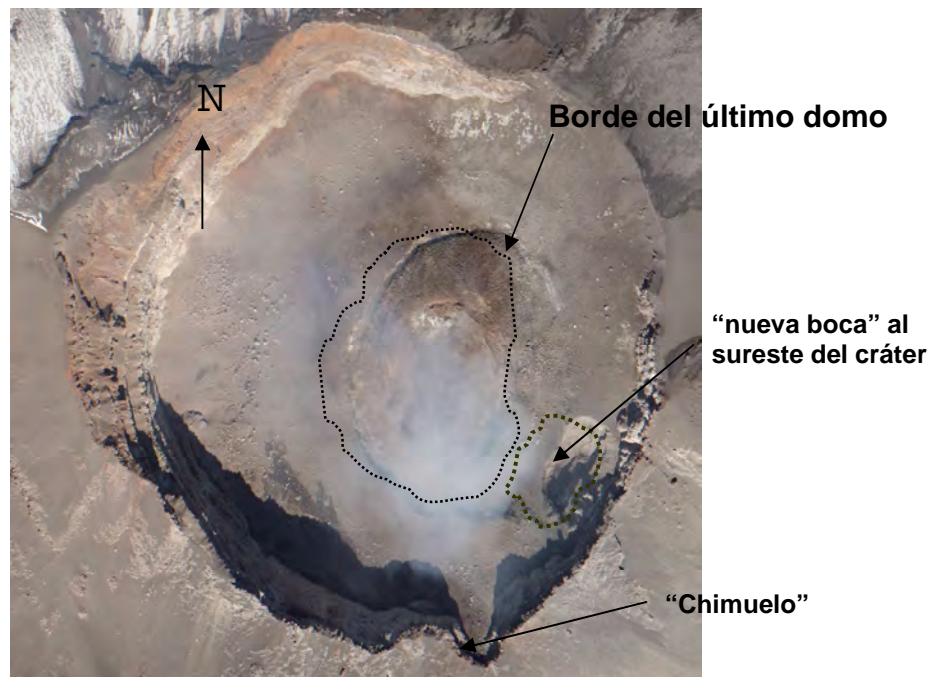


Figura 149. Fotografía tomada por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes el 12 de febrero de 2009.

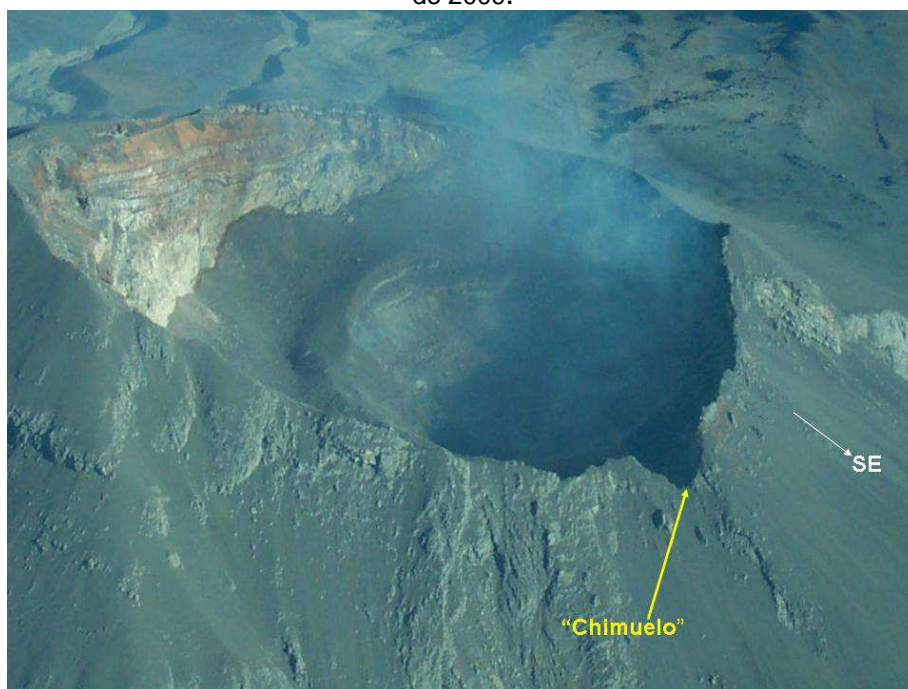


Figura 150. Imagen del cráter del volcán Popocatepetl, que muestra la ubicación del "Chimuelo".

6.- CONCLUSIONES

El episodio eruptivo actual del volcán Popocatepetl, cuyos precursores sísmicos más tempranos aparecieron alrededor de 1990 (De la Cruz-Reyna et al., 2008), se inició en diciembre en 1994 y continúa hasta la fecha (2010). Se ha caracterizado por una alternancia de fases efusivas y explosivas, que han resultado en al menos 28 episodios de formación y destrucción de domos por explosiones o exhalaciones que no han rebasado un VEI 3.

En términos generales, las características del actual proceso eruptivo en el volcán son semejantes a las ocurridas entre los años 1919-1927, y a las de otros 11 episodios similares reportados desde el siglo XVI (De la Cruz-Reyna et al., 1995).

Como apoyo a los distintos tipos de monitoreo y vigilancia existentes en el Popocatepetl desde 1989, las observaciones geodésico-fotogramétricas realizadas de manera directa por medio de fotografías aéreas han sido fundamentales para la evaluación de la actividad del volcán Popocatepetl y del riesgo que representa el actual proceso eruptivo.

De los 28 domos que se han podido identificar, el de diciembre del año 2000 es el más grande en volumen y el que presentó la mayor tasa de emisión. Asociado a la destrucción de ese domo, en enero de 2001 ocurrió uno de los mayores eventos

explosivos de los últimos 15 años con un VEI 3 y la generación de importantes flujos piroclásticos.

Uno de los parámetros de mayor importancia para evaluar la naturaleza y el grado de amenaza que presenta el emplazamiento de un domo de lava es su tasa de crecimiento. Las técnicas fotogramétricas, son inherentemente discretas y sólo permiten determinar tasas medias entre imágenes sucesivas por medio de la estimación de ganancias (o pérdidas) de volumen de los domos. En forma adicional a la determinación de las morfologías y los volúmenes de los domos emplazados, se proponen técnicas que permiten la estimación de las tasas instantáneas de crecimiento basadas en las correlaciones con otras observables del monitoreo volcánico. En muchos casos, la formación de los domos estuvo acompañada por episodios de tremor armónico. Otros crecieron con secuencias casi continuas de eventos LP. Algunos otros se formaron contemporáneos con exhalaciones de larga duración, lo cuál fue corroborado con fotografías aéreas tomadas pocas horas después de haber ocurrido ese tipo de eventos.

Aunque el sistema de monitoreo del volcán Popocatepetl no cuenta con un sistema de adquisición de imágenes en tiempo real de los domos que permita, establecer la relación entre la duración de los tremores y de otras señales sísmicas y el volumen emitido, es posible obtener una estimación de las tasas instantáneas de emisión midiendo la duración de las señales, particularmente del tremor y a partir de las imágenes fotogramétricas obtenidas después de ocurrido el tremor, es posible la estimación de la tasa de emisión partiendo de la hipótesis

de que las emisión más significativa de magma ocurren durante los episodios de temblor, lo que permite una evaluación de la intensidad eruptiva.

La tasa media a la que han sido emitidos los domos en el volcán Popocatepetl de 1996 a la fecha es $\sim 2 \text{ m}^3/\text{seg}$, calculada como el promedio de todas las tasas de los 28 episodios de domos emitidos, las que se calcularon con base a las diferencias de volúmenes estimados entre fechas sucesivas en que se midieron, dividido entre el tiempo transcurrido entre esas fechas, correspondientes a la disponibilidad de las fotografías. Los primeros 11 domos emplazados entre 1996 y antes de diciembre del 2000, crecieron a una tasa media de $\sim 0.20 \text{ m}^3/\text{seg}$. El domo formado en diciembre de 2000 presentó la tasa más alta de $\sim 28 \text{ m}^3/\text{seg}$. Este valor es 140 veces más alto que el registrado en la etapa predecesora de 1996 a noviembre de 2000. Posteriormente, de esta fecha hasta enero de 2003 la tasa promedio fue de $\sim 2.60 \text{ m}^3/\text{seg}$, resultando ligeramente por arriba del promedio general y 10.7 veces menor que la máxima ocurrida en diciembre de 2000. De 2003 a 2009 la tasa media decreció a $\sim 0.1 \text{ m}^3/\text{seg}$, un orden de magnitud mas baja que la de la primera etapa, 280 veces más pequeña que la máxima ocurrida en diciembre de 2000, y 20 veces menor que la del promedio general.

En otros volcanes la reducción de la tasa de emisión en el tiempo ha sido interpretada como una migración del centro de emisión, lo cual de estar ocurriendo en el Popocatepetl sería difícil de verificar dada la profundidad a la que probablemente este sucediendo.

Las variaciones en las tasas de emisión y otros aspectos del proceso de emplazamiento de los domos en el volcán Popocatepetl, pueden ser explicados, al menos parcialmente en términos de un modelo cuasi-estático de flotación boyante de la columna de magma, cuya densidad, de acuerdo con la ecuación de estado propuesta por González-Mellado y De la Cruz-Reyna (2008) está controlada por el contenido de volátiles, de tal forma que el contraste variable de densidades con la roca encajonante a lo largo de la columnas genera las fuerzas boyantes. La disminución en la tasa de emisión que muestran los últimos domos puede indicar una despresurización de la fuente, o una reducción en el contenido de volátiles que se traduce en incrementos de la densidad y la viscosidad de la columna.

El periodo en el que se produce el mayor volumen asociado con la formación de domos es entre diciembre del 2000 y diciembre de 2002. Los 9 domos emplazados en ese periodo suman un volumen de $14.30 \times 10^6 \text{ m}^3$, lo que representa la mitad de todo el volumen emitido entre 1996 y 2009, y es cuando se registran los eventos explosivos mas grandes de todo el episodio. De marzo de 2003 a mayo de 2009 se presenta la tasa de extrusión más baja. En general, en este lapso la actividad del volcán fue caracterizada por pocas explosiones y algunas exhalaciones asociadas con este ritmo de crecimiento lento.

La producción neta de lava emitida por las 28 fases de construcción de domos es de $\sim 28.50 \times 10^6 \text{ m}^3$. La destrucción neta ocurrida es de $\sim 20.80 \times 10^6 \text{ m}^3$, de tal

forma que el balance de lava remanente estimado para mayo de 2009 es de $\sim 7.70 \times 10^6 \text{m}^3$.

El material remanente de los domos ocupa aproximadamente un 28 % del total de la capacidad neta que puede almacenar el cráter del volcán. La última fotografía aérea del volcán Popocatepetl, refleja que las paredes del cráter exterior ahora son de menor altura sobre el fondo, como resultado del ascenso y de los cambios de la topografía del piso del cráter.

Otro resultado de interés es la correlación del emplazamiento de algunos de los domos de los años 1996, 2000, 2001 y 2002, con deformaciones superficiales reversibles observables en los flancos del cono volcánico del Popocatepetl. Estas deformaciones no excedieron 2 cm en la mayoría de los casos. Este tipo de deformaciones se atribuyen a una fuente de presión (gas o magma) que transita a la altitud donde se ubican los prismas produciendo una “inflación” transitoria, seguida de una “deflación” asociada con degasificaciones o explosiones .

Con las imágenes fotográficas del volcán Popocatepetl de mayo de 2009, fue posible identificar una nueva boca ubicada en el sector sureste del mismo, con forma semielíptica, con un diámetro mayor de aproximadamente $\sim 140\text{m}$ y una profundidad de $\sim 40\text{m}$. Esta boca se sitúa muy próxima al sitio de aparición de los primeros domos de 1996. La boca original fue cubierta por lava y escombros de los domos subsecuentes. La aparición casi en el mismo sitio de esta nueva boca refleja que las condiciones de la “tubería” interna en esa zona no han sido

alteradas significativamente en estos años. Por otra parte, de ocurrir una explosión de nivel moderado a alto en esta nueva boca, podría producir un colapso de sector en esa área de la pared del cráter, lo cual podría generar un evento similar al ocurrido en el siglo XVI, cuando se formó la apertura del sector SE del labio del cráter referida como el “Chimuelo”.

En el desarrollo de estos casi 15 años de actividad ocurrió la formación de domos con tasas de emisión muy variables. En ocasiones fue posible dar seguimiento a los domos que se formaron en tiempos muy cortos, sin embargo, en tiempos recientes la adquisición de las fotografías aéreas del cráter del volcán Popocatepetl ha disminuido, por lo que es recomendable que se reanude con un período de captura de fotografías regular, de al menos 2 meses.

REFERENCIAS

Arambula Mendoza Raúl. 2002. Tesis de licenciatura de Ingeniería Geofísica. Interpretación del tremor registrado en el volcán Popocatepetl durante la crisis eruptiva de diciembre del 2000. Facultad de Ingeniería UNAM.

Arciniega-Ceballos A., C. Valdés-González, P. Dawson.2000. Temporal and spectral characteristics of seismicity observed at Popocatepetl volcano, central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Volume 102, Issues 3–4, November 2000, Pages 207–216.

Armienta Hernández M.A. 1993. Actas del Simposio Internacional sobre riesgos naturales e inducidos en los grandes centros urbanos de América Latina. Instituto Italo Latinoamericano - CENAPRED, México. p72-79

Armienta H., M.A, , S. De la Cruz-Reyna, A. Gómez, E. Ramos, N. Cenicerros, O. Cruz, A. Aguayo, A. 2008 Hydrogeochemical indicators of the Popocatepetl volcano activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* Volume 170, Issues 1-2, 20 . Pages 35-50

Atl.Dr. 1939. Volcanes de México Vol.1. La Actividad del Popocatepetl, Ed. Polis. México.

Baldi P., Onvalot S. B., Briole P., y Marsella M. 2000. Digital photogrammetry and kinematic GPS applied to the monitoring of Vulcano Island, Aeolian Arc, Italy. *Geophysics Journal International*. V. 142. p. 801-811.

Blake, S., 1989, Viscoplastic models of lava domes, *IAVCEI Proceedings in Volcanology*, Vol.2. Lava flowsand domes, Springer Verlag, Heidelberg, 88-126.

Boudal, C., & Robin, C., *Volcán Popocatépetl*. 1989. Recent Eruptive History and Potential Hazard and Risk in Future Eruptions. *Volcanic Hazards*, IAVCEI Proceedings in Volcanology 1. J. H. Latter. Ed. Springer Verlag, Berlin. p.110-128.

Cruz Atienza V.M., J.F. Pacheco, S.K. Sinhg, N.M. Shapiro, C. Valdes y A. Iglesias Mendoza. 2001. Size of Popocatepetl volcano explosions (1997-2001) from wavefrom inversión. *Geophysical Research Letters*. 28 4027-4030 , 2001

Dzurisin Daniel. *Volcano Deformation. Geodetic Monitoring Techniques*. 2007. Springer–praxis books in Geophysical Sciences.

De la Cruz Reyna Servando, J.L. Quezada, C. Peña, O. Zepeda y T Sanchez. *Historia de la Actividad del volcán Popocatépetl*, 1995. Estudios realizados durante la crisis 1994-1995. Ed. CENAPRED.

De la Cruz-Reyna Servando. *Fasciculo Volcanes*.1991. Publicado por el CENAPRED. 36pp.

De la Cruz-Reyna Servando and Robert I. Tilling. Scientific and public responses to the ongoing volcanic crisis at Popocatépetl Volcano, Mexico. 2008: Importance of an effective hazards-warning system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 170, Issues 1-2, 20 February 2008, Pages 121-134.

Gil Cruz Fernando y Chouet Bernard A. 1997. Long-period events, the most characteristic seismicity accompanying the emplacement and extrusion of a lava dome in Galeras Volcano, Colombia, in 1991. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 77 (1997) 121- 158.

Global volcanism network. GVN: 01/1986 (SEAN 11:01) Increased fumarolic activity in summit crater. Popocatépetl.

Global volcanism network. GVN: 04/1989 (SEAN 14:04) New fumaroles and large sulfur deposits Popocatépetl.

Global volcanism network. GVN. 08/1990 (BGVN 15:08) Most nearby earthquakes tectonic, but a few small B-type events detected.

Global volcanism network. GVN 05/1993 (BGVN 18:05) Increased fumarolic activity; crater lake temperature rises.

Global volcanism network. GVN. 04/1994 (BGVN 19:04) Seismicity, SO₂ flux measurements, and crater observations reported.

Global volcanism network. GVN. 06/1994 (BGVN 19:06) Seismicity increases in April and May, but declines in June.

Global volcanism network. GVN 11/1994 (BGVN 19:11) Small eruption on 21 December ends decades-long slumber.

Global volcanism network. GVN. 02/1995 (BGVN 20:02) Small ash cone observed in summit crater; plume rises 3 km.

Global volcanism network. GVN. 04/2007 (BGVN-04-2007)

Gómez Vázquez Ángel. 2000. Tesis de licenciatura de Ingeniería topográfica y geodésica. Métodos topográficos aplicados en el monitoreo de la corteza terrestre en el volcán Popocatepetl. Facultad de Ingeniería UNAM

Gómez Santiago Fernando. 2009. Tesis de maestría Instituto de Geofísica UNAM. Sismicidad del Volcán Popocatepetl durante el crecimiento de dos domos de lava en

Agosto de 2001

González-Mellado Alex Onar and De la Cruz-Reyna Servando. 2008. A simplified equation of state for the density of silicate hydrous magmas: An application to the Popocatépetl buoyancy-driven dome growth process. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 171, Issues 3-4, 20 April 2008, Pages 287-300.

González Pomposo Guillermo. 2003. Análisis de la sismicidad asociada a la actividad del volcán Popocatépetl y determinación de su estructura por medio de tomografía sísmica. Tesis de doctorado. Instituto de Geofísica de la UNAM.

Guevara Enrique y colaboradores. 2003. Instrumentación y monitoreo del volcán Popocatépetl. CENAPRED:101.pag

Harris Andrew J. L., Rose William I. · Luke P. Flynn. 2002. Temporal trends in lava dome extrusion at Santiaguito 1922–2000. *Bulletin of Volcanology* (2003) 65:77–89.

Ibáñez J.M. y E. Carmona. 2000. Sismicidad Volcánica. Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica. Edición 2000.

Lerma García José Luis. 2002. Fotogrametría moderna: analítica y digital.2002

Macías José Luis, Siebe Claus. 2005. Popocatépetl's crater filled to the brim: significance for hazard evaluation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 141 (2005) 327– 330.

Macias J. L., Carrasco G. y Siebe C. 1995. Mapa de peligros del Volcán Popocatépetl. Coedición UNAM Cenapred.

Martínez Bringas Alicia: 2003 Variaciones temporales de la atenuación de las ondas coda y del valor b, asociadas a la actividad del volcán Popocatépetl de 1995 a 2003. Tesis de Maestría, Instituto de Geofísica, UNAM.

McNutt, S.R. 1996. Seismic monitoring of volcanoes: A review of the state-of-the-art and recent trends. in: Scarpa, R., and R. Tilling (eds) Monitoring and Mitigation of Volcanic Hazards, Chapter 3, Springer-Verlag, Berlin, p. 99-146, 1996 .

McNutt, S.R. 2000. Seismic Monitoring, Chapter 68 of Encyclopedia of Volcanoes, Sigurdsson, H., B. Houghton, S.R. McNutt, H. Rymer, and J. Stix (eds.), Academic Press, San Diego, CA, 1095-1119, 2000.

Mendoza-Rosas Ana Teresa and De la Cruz-Reyna Servando. 2008. A statistical method linking geological and historical eruption time series for volcanic hazard estimations: Applications to active polygenetic volcanoes. Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 176, Issue 2, 20 September 2008, Pages 277-290.

Moffitt Francis H. and Bouchard Harry.1982. Surveying.Ed Harper and Row. Seventh Edition

Mogi,K. 1958. Relations between of the Eruptions of various Volcanoes and the Deformations of the ground around them. Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ.No.36 p.99-134.

Ortiz R. 2000. Riesgo Volcánico. En serie Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánicas. Año 2000. p-371-386.

Robin C., 1984, "LE VOLCÁN POPOCATÉPETL (MEXIQUE): STRUCTURE, EVOLUTION PÉTROLOGIQUE ET RISQUES", Bulletin of Volcanology, 47, pp. 1-23.

Saucedo R., Macías J.L., Gavilanes J.C., Arce J.L., J.C. Komorowski, Gardner J.E., Valdez-Moreno G. Eyewitness, stratigraphy, chemistry, and eruptive dynamics of the 1913 Plinian eruption of Volcán de Colima, México. 2010. Original Research Article. Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 191, Issues 3-4, 1 April 2010, Pages 149-166

Saucedo R., Macías J.L., Gavilanes J.C., Arce J.L., J.C. Komorowski, Gardner J.E., Valdez-Moreno G. 2011. "Corrigendum to Eyewitness, stratigraphy, chemistry, and eruptive dynamics of the 1913 Plinian eruption of Volcan de Colima, Mexico" [Journal of Volcanology and Geothermal Research 191 (2010) 149–166. Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 207, Issues 1-2, 1 October 2011, Page 67

Secretaria de Comunicaciones y Transportes

Siebe, C., Abrams, M., Macias, J.L. 1995. Derrumbes Gigantes, Depósitos de Avalancha de Escombros y Edad del Actual Cono del Volcán Popocatépetl. "Volcán Popocatépetl, Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994-1995". SEGOB.CENAPRED.UNAM. p.195-220

Simkin Tom and Lee Siebert. 2000. Earth Volcanoes and Eruptions: an Overview. Enciclopedia of Volcanoes. Academic Press. Pp. 249-261
39.-Universidad Nacional Autónoma de México, Museo del Palacio de Bellas Artes, 2005. Mitos de dos Volcanes, Exposición.

Sparks R.S.J. S.R.Young. J. Barclay, E.S. Calder, P.Cole, B. Darroux, .M.A. Davies, T.H. Druitt, C. Harford, R.Herd, M. James, A.M. Lejeune, S.Loughlin, G. Norton, G. Skerrit, M.V. Stasiuk, N.S. Stevens, J. Toothill, G. Wadge y r. Watts. 1998. Magma production and growth of the lava dome of the Soufriere Hills volcano, Montserrat, West Indies: november 1995 to December 1997. Geophysical Research Letters. Vol. 25. No.18. p- 3421-3424. september 1998.

Sparks, R.S.J., 1997. Causes and consequences of pressurization in lava an dome eruptions. Earth Planetary Sciences Letters 150, 177–189.

Swanson D.A., Holcomb R.T. 1990. Regularities in growth of the Mount St. Helens dacite dome 1980-1986, in: J.H.Fink (Ed.), Lava Flows and Domes; Emplacement Mechanisms and Hazard Implications, Springer, Berlin, 1990, pp. 3-24.

Valdés C. González G., Arciniega A., Guzmán M., Nava E., Gutiérrez C., Santoyo M. 1995. Sismicidad del volcán Popocatepetl. Volcán Popocatepetl: Estudios realizados durante la crisis de 1994-1995. CENAPRED. p129-138.

UNAM. 2005. Mitos de dos volcanes,, Museo del Palacio de Bellas Artes

Wright Robert, De La Cruz-Reyna Servando Harris Andrew, Flynn Luke, and Gomez-Palacios Juan Jose. 2000. Infrared satellite monitoring at Popocatepetl: Explosions, exhalations, and cycles of dome growth. Journal of Geophysical Research, Vol. 107, No B8. 2002.

www.cenapred.unam.mx

www.ingeminas.gov.co

Anexo

**Resumen de la formación y destrucción de domos en el Volcán
Popocatepetl 1996-2009.**

DOMO	Volumen $\pm 0.001\text{m}^3 \times 10^6 \text{m}^3$	Geometría y otras características	Actividad relevante asociada
D0396-1	2.405	Domo con forma de hemisferio con base elíptica. 158.5 m de diámetro, 60m de altura. Presenta grietas en forma de anillos concéntricos	El 5 de marzo la actividad sísmica sube. El primer domo observado desde los años 20's. Una de las fases de destrucción es con la explosión del 30 de abril de 1996, misma que ocasiona 5 decesos de alpinistas.
D0596-2	1.515	Domo de 128 m de diámetro, 71m de altura. Alcanzó una cota en la parte superior de 5109 msnm.	Cubre el cráter remanente de 1922. Señales de tremor asociadas al crecimiento de este domo. Explosiones entre el 28 y el 31 de octubre de 1996 producen parcial destrucción de este domo.
D0397-3	2.231	Domo con las siguientes dimensiones: base 260m y altura 37m subsidencia en el centro de este domo. Alcanzó una cota en la parte superior de 5060 msnm.	Explosiones del 19 y 20 de abril con poca destrucción. Las del 24 de abril. Mayo e inicios de junio, destruyen parcialmente este domo. El 30 de junio explosión con flujos piroclásticos y se produce un lahar.
D0797-4	0.416	Domo de 91m de radio y 16m de altura. Presenta hundimiento y fracturas radiales	Se logra apreciar que producto de la erupción del 30 de junio, hacia el sur y sureste se produjeron lenguas o flujos granulares de densidad.
D0897-5	1.304	El domo tiene forma de cono truncado. Radio 38m, altura 11m. Presenta fracturas radiales, pequeña subsidencia en el centro. El domo cambia su morfología, asta parecer un tipo pistón.	En esa época se presentaba una actividad fumarólica intensa.
D1297-6	1.765	Domo de color oscuro y con grietas concéntricas. Cota máxima alcanzada 5133 msnm. Semejante a un lago de lava.	Tremor observado desde finales de noviembre de 1997. Explosión del 1 de enero de 1998, con emisión de clastos incandescentes hacia el exterior del cráter. Destruye parcialmente este domo y forma un cráter interno.
D0398-7	0.027	Domo con forma de cono, contenido en cráter, con radio de 48m.	Continúan explosiones durante enero de 1998, una mayor el 21 de marzo que producen aumento en la destrucción considerable de los domos.

D0598-8	0.241	Domo contenido en cráter interior, de radio 74m y altura de 20m. Alcanza una cota de 5110 msnm	Actividad volcanotectónica desde inicio de abril, 21 de ese mes explosión mayor. 23 de abril, 10, 15 y 17 de mayo episodios de temblor.
D1198-9	0.717	Domo contenido en cráter, de radio 35m y altura de 32m. En enero de 1999 la cota del piso del cráter descendió hasta 5050 msnm y para enero de 2000 bajo hasta 5042 msnm. Pulsos de crecimiento de este domo en febrero y marzo de 1999.	De septiembre a octubre explosiones que desalojan material del cráter. Actividad de VTs profundos en junio y noviembre de 1998. Desde el 23 de noviembre temblor armónico y LPs. Diciembre de ese año actividad explosiva intensa. Sismo del 15 de junio de 1999, provoca proceso de difusión rectificadora, 16 y 17 35 VTs en el volcán. Durante 1999, intensa actividad de destrucción.
D0200-10	0.027	Dimensiones 59m de diámetro, 14m de altura, forma de pistón, sobre un cráter de cota promedio 5049msnm, tenía un tono gris.	Apartir del 11 de febrero de 2000 ocurre temblor armónico y persiste durante ese mes. De febrero a agosto, explosiones y exhalaciones destruyen este domo, de las más relevantes las del 17 de abril, 14 de julio y 10 de agosto.
D0800-11	0.170	Crecimiento del domo en varios pulsos, primero de 45 de radio y 12m de altura, forma de cilindro, finaliza con 60m de radio pero presenta subsidencia que deja espesor en 15m. Tonalidad en superficie cuando es avistado, de color negro. Cota máxima alcanzada 5065msnm.	El 28 de agosto temblor armónico, 1 y 2 de septiembre emisiones de ceniza, intercaladas con señal de temblor armónico. Explosiones: 3 de septiembre, 16 y 29 de octubre que destruyen este domo.
D1200-12	6.825	Domo mayor en todo el período de observación, a una tasa de $\sim 28\text{m}^3/\text{s}$, de color negro, radio, espesor y cota máximas alcanzadas fueron: 212,87 y 5150 msnm respectivamente. Para el 23 se observa subsidencia en este domo con agrietamiento concéntrico. Para el 13 de enero cota superior del domo desciende a 5074 msnm. Para el 21 de febrero producto de las fases de destrucción la cota del cráter interno desciende hasta 5055 msnm.	Sismos volcanotectónicos el 5, 6 y 9 de diciembre de 2000. Temblor armónico del 5 al 12 de diciembre. 15 de diciembre temblor de amplitud moderada, creciendo el 16 a grado de saturación, se intercalan explosiones con esta señal. Deformaciones reversibles de 150 a 200 microradianes. 17 y 18 de diciembre persiste señal de temblor, 18 y 19 explosiones en forma de fuente, eyección de clastos. Otra explosión relevante el 24 de diciembre. El 22 de enero de 2001, erupción mayor, 8km de altura de columna y generación de flujos piroclásticos que funden parcialmente el glaciar, generando un lahar hacia el flanco norte. Nuevas explosiones el 25 y 29 de enero y 15 de febrero.

D0201-13	0.827	Domo de base circular de 160m de diámetro y 43m de altura. Agrietamiento anillado, tono oscuro. Subsistencia para el 13 de abril de ~6m de espesor.	Finales de febrero de 2001, señales de tremor armónico. El 6 de marzo aumento de señales LP, 13 de ese mes tremor armónico de a grado de saturación de señal, actividad volcanotéctonica los días 17,19 y 21. Explosiones el 16 de abril, 4 y 14,23,26 y 31 de mayo.
D0801-14	0.562	Domo con forma de hemisferio con radio de 100m y 34 de altura. De tono oscuro con grietas anilladas, cota máxima alcanzada 5093msmn.	9 y 10 de agosto señales de LP que pasaron de 110 a ser una señal casi continua, con duración de horas. Sólo se desgasificó.
D0801-15	1.059	Domo con radio máximo de 127m. Tono oscuro. Cota máxima alcanzada 5128msnm. La destrucción origina un cráter con forma de cono truncado invertido.	15 de agosto, gran cantidad de LPs, siendo en un momento dado casi una señal continua, cubre a su predecesor y tiene pulsos de crecimiento con señales de tremor armónico asociados. Primera semana de septiembre ocurren exhalaciones.
D0901-16	0.103	Este domo se emplaza en el cráter del domo predecesor con un radio de 77m y una altura de 10m. La cota máxima alcanzada fue de 5120m. El 20 de septiembre se aprecia una subsidencia en este domo. Para el 20 octubre domo destruido, cota media del piso del cráter interior 5093 msnm. Un pequeño pulso de crecimiento que no permaneció mucho tiempo ya que fue desalojado rápidamente.	Señales de tremor armónico saturado el 8 de septiembre durante 6 horas. Del 10 al 19 nuevamente se presenta esta señal aunque de menor amplitud. Así también del 8 al 11 de septiembre y el 1 y 4 de octubre, así como el 9 y 10 de noviembre ocurren explosiones que contribuyeron significativamente a la fase de destrucción de este domo.
D1101-17	0.503	Este domo tuvo 95m de radio, 25 de altura incrustado en el cráter interno formado en su domos predecesor. Tuvo una tonalidad oscura. El 11 de enero de 2002, se aprecia que fue desalojado este domo siendo para esta fecha la cota media del piso del cráter interno de 5075 msnm.	Sismos volcanotéctónicos el 12,13 y 15 de noviembre. Señales de tremor armónico el 14 y el 18 aumento de LPs y tremor. Nuevamente el 6,7,10 y 12 de diciembre detección de LPs por pulsos de varias horas en forma continua. Explosiones el 18, 19 y 22 de diciembre de 2001.

D0102-18	1.379	Domo con tono gris oscuro con grietas anulares, con un radio de 90m de altura y altura media de 73m, tomada desde el fondo del cráter interior. Cota superior máxima 5110msnm. Crecimiento horizontal, hasta un radio de 107m.	El 23 y 24 de enero de 2002, señales de tremor continuo intercalado con algunas explosiones menores. 16 de febrero nuevamente tremor armónico por 3 horas. El 19 de ese mes, explosiones y exhalaciones con emisión de ceniza. Del 21 al 28 nuevas fases de tremor armónico fueron detectadas. 8 de abril explosión significativa.
D0402-19	1.025	Domo con radio de 85m y altura de 65m. Cota máxima alcanzada 5124msnm. Subsistencia posterior de 70m de radio y 54m de altura.	28 y 29 de abril gran cantidad de eventos LPs y registro de tremor armónico. La noche del 20 de abril ocurre una explosión con emisión de clastos. 30 de abril, y 1 de mayo numerosas exhalaciones. 2 y 8 de mayo varios eventos volcanotéctónicos. El 12 de mayo una explosión relevante.
D0502-20	0.659	Domo de tono grisáceo, con pequeñas fracturas N-S. El radio del domo fue de 74m y 11m de altura. Cota máxima superior del domo fue de 5122 msnm. Subsistencia que deja que la parte superior del domo se ubicó en una cota de 5090 msnm.	El 15 de mayo enjambre de 17 eventos volcanotéctónicos así como registro de tremor armónico y secuencias de LPs. El 12 y 13 de junio 9 VTs. 17 de junio explosión importante. Los últimos días de julio hay un promedio de 2 eventos VTs por día.
D0802-21	0.147	Domo que creció en varios pulsos de color negro. Radio de 70m y 14 m de altura aproximada, esta contenido en la subsidencia del domo predecesor. También presenta subsidencia con forma de hemisferio invertido.	Del 1 al 12 de agosto varias secuencias de tremor armónico. Del 14 al 17 inicia destrucción con exhalaciones con emisiones de ceniza. El 2 de septiembre se registran 5 VTs. Continúa registro de tremor armónico hasta los inicios de octubre. Del 12 al 18 de octubre 2 VTs por día. El 7 de noviembre explosión de 4 km de altura de columna.
D1102-22	0.926	Este cuerpo presentó una tonalidad muy oscura con agrietamiento anillado. Adquirió una forma de hemisferio, con una radio de 95m. Cota máxima alcanzada 5128 msnm.	El 17 de noviembre secuencia de VTs ubicados bajo el Iztacihuatl. 23 de noviembre aumento de LPs y registro de tremor armónico. El 30 de ese mes 5 horas de tremor. El 6 de diciembre se registra tremor por 6 horas. 18 de diciembre 2 explosiones, la principal con una altura de columna de 6 km.

D1202-23	0.106	Cuerpo de lava con forma de hemisferio de 55 de radio. De tono muy oscuro. Cota máxima alcanzada 5123 msnm. Crece en sentido horizontal, el radio aumenta a 82m. Domo que subside.	En noviembre y diciembre el número de VTs disminuye respecto al promedio observado durante el año.El 10 y el 14 de diciembre de 2002, se registran episodios de tremor armónico y numerosos eventos LPs. Destrucción parcial el 18,22, 23 y 29 de diciembre.Crecimiento adicional del 2 al 4 de enero de 2003, que incrementa el volumen del domo.
D0103-24	0.493	Domo de forma de pistón de radio 82m, también de color negro, con grietas anulares en la cima. Cota máxima alcanzada 5129 msnm.Pequeña subsidencia en la cima de este domo.	9 de enero de 2003, exhalación grande con emisión de ceniza, ese mismo día registro de tremor así como del 10 al 15 de ese mes.El 10 ocurre una exhalación moderada que representa fase de destrucción de este domo.
D0103-25	0.796	Domo con varios pulsos de crecimiento, radio máximo alcanzado 125m, con una base elíptica y de tono oscuro. La cota máxima alcanzada 5131 msnm.	Tremor armónico desde el 16 de enero, y casi durante todo es lo restante de ese mes, intercalado con exhalaciones con emisiones de ceniza. Del 1 al 8 y de febrero fases de destrucción y crecimiento adicionales.Las explosiones más relevantes que aumentan la destrucción de este domo son las del 14 y 21 de febrero, en la que se presentó emisión de clastos incandescentes. También hubo exhalaciones con emisión de ceniza el 16,19 y 20 de febrero.
D0403-26	0.134	Domo de forma semiesférica, con radio de 92 m y altura media de 15m. La cota máxima alcanzada 5110 msnm. Domo que se destruye incluyendo a parte de sus predecesores, la cota del piso del cráter interior desciende para el 26 de junio a 5064 msnm, y para el 21 de julio disminuye aún mas llegando a 5052 msnm.	Actividad baja durante marzo e inicios de abril. El 8 de abril se detecta tremor armónico de baja amplitud que se repite casi todo el mes. Durante segunda quincena de abril ocurren tres explosiones y numerosas exhalaciones que desalojan parte de este cráter y sus predecesores, modificando la morfología del cráter interior. 28 de abril registro de tremor pulsante. Durante mayo, junio y julio persiste la fase de destrucción de los domos remanentes. Destaca la explosión del 19 de julio con caída de ceniza en la CD. de México. Aunque menor la fase de destrucción se mantiene durante el resto del 2003.Durante 2004 la actividad se mantiene en niveles bajos.

D0505-27	1.036	Domo con agrietamiento anillado, y con las siguientes dimensiones: radio 135m y una altura de 44m. Presentó subsidencia.	El 9 y 22 de enero de 2005 aumento ligeramente el número de exhalaciones, y el 2 de febrero el registro de LPs. El 13 y 14 de febrero después de meses de no ocurrir se detectó tremor armónico de baja amplitud. Durante 2005 ocurrieron en varias fechas episodios de tremor armónico, destacan el 13 de mayo, 1 y 2 de julio, 18 de agosto y 18 de septiembre. También en el año ocurrieron exhalaciones con emisiones de ceniza. Este domo permaneció durante todo el año emplazado.
D0506-28	1.183	Domo que creció en varios pulsos primero tuvo un radio de 70m y de tono oscuro. Posteriormente adquirió en enero de 2007 una forma de pistón con radio de 92 m y llegando a medir 150m en su máximo crecimiento. Subsidencia detectada en febrero de 2009 con forma de cúpula invertida.	Este domo, es probable que iniciara su emplazamiento sobre el predecesor a inicios de noviembre. A fines de diciembre de 2005 aumenta el registro de LPs, intercalado con fases de destrucción en ese mes y a inicios de 2006. Del 4 al 7 de febrero, así como algunos días de mayo y junio se detecta tremor armónico, destacándose en ese año el registrado el 3 de agosto, y el detectado a inicios de 2007. Esta fase de detección de tremor armónico persistió durante 2008, mezclándose con exhalaciones con emisiones de ceniza, de tal forma que para febrero de 2009 había sido parcialmente destruido.

