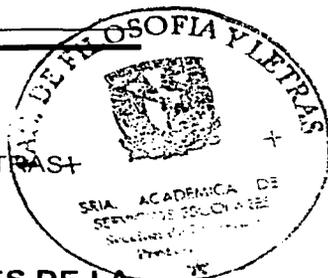


01026
29

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO



FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

COLEGIO DE GEOGRAFÍA

**CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES DE LA
SISMICIDAD ASOCIADA A LA ACTIVIDAD ERUPTIVA
(OCTUBRE, NOVIEMBRE Y DICIEMBRE, 1998 –
ENERO, 1999) DEL VOLCÁN**

POPOCATÉPETL

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN GEOGRAFÍA**

**PRESENTA:
YAHIR GERARDO GARCÍA LÓPEZ
ASESOR:
DR. CINNA LOMNITZ ARONSFRAU**

Avísalo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de tu trabajo intelectual.
NOMBRE: Yahir Gerardo García López
FECHA: 2003/02/03
FIRMA: [Signature]

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA



Ciudad Universitaria, febrero de 2003.



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

EL BESO
1886
Bronze
Auguste Rodin

*Let me kiss him with the kisses of his mouth;
for thy love is better than wine.*

— *Song of Solomon*, Israel, 1st millennium B.C.

Throughout his career, Rodin sought to express in three dimensions the gamut of human emotions. In **The Kiss**, the artist achieved what is undoubtedly one of the most powerful and universal expressions of romantic love.

The basic concept of **The Kiss** — a male and a female figure embracing derived from Rodin's monumental work **The Gates of Hell**. For that work, the artist had intended a figural group representing Paolo and Francesca, the doomed lovers of Dante's **Inferno**. When this original group, executed in bronze in 1886, was exhibited publicly in 1887, critics dubbed it **Le Baiser**, or **The Kiss**, thereby supplanting its literary title and associations with a more universal designation.

Though Rodin began this enlarged version in 1888, he did not finish carving his masterwork in marble until 1898. In May of that year, Rodin included it in the **Salon de la Société national des Beaux-Arts**, an exhibition for which he was responsible for the sculpture section. It has been argued persuasively by Daniel Rosenfeld that Rodin finished **The Kiss** in time for that exhibition because he wished to preempt the negative criticism that he expected to receive for the full-scale plaster model of one of his most daring and controversial pieces, the **Monument to Balzac**. While the latter piece was criticized by some for its apparent lack of finish and finesse, the carefully worked carving of the **The Kiss** showed the artist to be more than capable of finishing his works. Indeed, contemporary critics hailed **The Kiss** as a masterpiece of the sculptor's craft.

The Kiss eventually made its way into the sculpture garden of the Musée du Luxembourg, where it could be seen among the greatest works of Rodin's contemporaries. After the dispersal of the collections of the Luxembourg, **The Kiss** found its new home in the Musée Rodin, an institution devoted to the works of this great master and has since become one of Rodin's best-known and loved pieces.

— David A. Brenneman

*"Mi interpretación es la siguiente: El "enemigo" es el sismo.
El "juego" que jugamos es la estrategia de control del riesgo sísmico.
El "comandante" es el sismólogo. El consejo que nos da Sun Tse
desde su remota prehistoria es
el siguiente: la invulnerabilidad contra los sismos
puede hallarse solamente en la prevención.
No busquemos predecir las movidas del enemigo
(o sea, el temblor) hasta que no seamos invulnerable al sismo".*

Cinna Lomnitz

Resumen.4
Nota Introductoria.6
I.- Volcán Popocatepetl.11
I.1.- Origen y edad.	
I.2.- Geomorfología volcánica.	
I.3.- Actividad reciente.	
II.- Monitoreo y Vigilancia Volcánica.25
II.1.- Técnicas de monitoreo y vigilancia en el volcán Popocatepetl.	
II.2.- Instrumentación de monitoreo volcánico.	
II.3.- Instrumentación sísmica.	
III.- Sísmicidad Volcánica.33
III.1.- Sísmicidad en el Popocatepetl desde el 21 de diciembre, 1994.	
III.2.- Clasificación de eventos sísmicos.	
III.3.- Eventos Tipo "A" [octubre, noviembre, diciembre, 1998 y enero, 1999].	
IV.- Análisis de Fourier.51
IV.1.- Teoría de Fourier.	
IV.2.- Espectros de Fourier para cada señal sísmica. [Estación Canario, PPP y Estación Chipiquixtle, PPP].	
IV.3.- Frecuencias dominantes y principales explosiones en el volcán.	
IV.4.- Relación entre las frecuencias dominantes y las principales explosiones. Análisis y Resultados.	
V.- Discusión y Conclusiones.61

RESUMEN

Actualmente, el campo de investigación en la sismología volcánica tiene una mayor participación en el monitoreo volcánico y con ello, ha logrado poseer mayor confiabilidad en la adquisición, procesamiento y análisis de datos. Hoy día se considera a la sismología volcánica una de las principales técnicas auxiliares de monitoreo en volcanes activos en el mundo.

En este trabajo se presenta la relación existente entre las frecuencias máximas calculadas para los eventos volcanotectónicos una vez estimado el espectro de Fourier de cada evento y los días en que se presentaron las principales explosiones en el volcán. Se consideran eventos exclusivamente Tipo "A" (o también llamados volcanotectónicos) ocurridos en los días en que se presentaron las principales explosiones registradas en el volcán durante los meses de octubre - noviembre - diciembre (1998) y enero (1999). Para tal fin, se analizaron todos los eventos Tipo "A" registrados en las estaciones sísmicas de banda ancha Canario (PPP) y Chipiquixtle (PPX). Posteriormente, y con base a una regionalización de la estructura cónica del volcán, se consideraron solo los eventos volcanotectónicos cuyo epicentro está localizado dentro de la región diagnóstica, que consiste en un área de 6 km² a profundidad en el perfil del volcán. Los *eventos seleccionados*, se relacionaron con la actividad explosiva del volcán.

1). Para el periodo que considera el presente análisis, los eventos volcanotectónicos registrados por las estaciones PPP y PPX conservan los valores de frecuencias dominantes típicas de 5 Hz . Se dividió el periodo eruptivo en tres fases:

A) Observado *a priori* la crisis: El valor puntual de las frecuencias dominantes mostró un incremento conforme se presentaban los meses de crisis (noviembre-diciembre de 1998). La Estación Canario en su componente vertical, PPV, presentó el valor promedio más bajo, 5.7 Hz., con respecto a las otras dos componentes restantes. Es notorio un incremento en la actividad explosiva en el volcán.

B) Observado durante la crisis: El valor de las frecuencias promedio dominantes aumentó considerablemente. La componente PPV, mostró un valor promedio de 6.6 Hz, mientras que la PPE fue de 11.8 Hz, y la PPN de 11.2. La actividad explosiva se manifiesta de manera importante.

C) Observado *a posteriori* la crisis: La componente vertical de la Estación Canario presentó un valor promedio de frecuencia dominante de 6.7 Hz, una décima más con su respectivo valor estimado durante la crisis. La componente PPN presentó un valor de 12.4 Hz, y la PPE presentó el valor de 15.3 Hz. Decremento en la actividad explosiva en el volcán.

La incertidumbre en el comportamiento activo del Popocatepetl hace que la necesidad de realizar este tipo de análisis en tiempo real sea cada vez más apremiante, ya que podría ampliar el conocimiento sobre el comportamiento activo del Popocatepetl, y la predicción de eventos explosivos en el volcán.

NOTA INTRODUCTORIA

"Pienso en Malcom Lowry y en su estupor volcánico y en Cuernavaca, y en una jacaranda que primero echa flores y después las hojas, como la glicina. Lowry bajo el volcán. Yo bajo la glicina".

Gonzalo Celorio.

NOTA INTRODUCTORIA

El volcán Popocatépetl ($19^{\circ} 03'N$; $98^{\circ} 35'W$), es un estratovolcán constituido por un cono de 5, 452 metros sobre el nivel del mar (msnm). Es el segundo volcán más alto del país y está ubicado a 70 km al sureste de la Ciudad de México. Es uno de los volcanes de composición andesítica más importantes del mundo.

Por sus dimensiones, actividad actual, localización y condiciones climáticas, es una de las formas del relieve volcánico más interesantes de México. El cono se eleva unos 1, 500 metros sobre su base, con una pendiente de unos 33° hacia la cumbre. Su cima posee un cráter amplio de forma elipsoidal, con ejes de aproximadamente 600 por 400 m, con orientación predominantemente noreste [Lugo, 1984].

La importancia de estudiar al volcán Popocatépetl, es la de ofrecer un mayor acercamiento a su actividad eruptiva actual y conocer las posibles consecuencias, presentes y futuras, que podrían ser desencadenadas en la eventualidad de una erupción volcánica.

Hoy sabemos, que la emanación de cenizas de este volcán, como las del 21 de diciembre de 1994, es una muestra más de su actividad continua desde el pasado [Lermo, 1995]. Se han reportado emanaciones de cenizas en 1519, 1539, 1664, 1697, 1720, 1802 y 1919-1938 [Carrasco, et al., 1986]. Su último periodo de actividad volcánica, hasta antes de 21 de diciembre de 1994, fue provocada artificialmente con explosiones con el objeto de extraer azufre [Dr. Atl., 1939].

Las emanaciones iniciadas en diciembre de 1994 indican el episodio más reciente, el cual consta de erupciones freáticas y freatomagmáticas que liberan grandes cantidades de gases magmáticos y que arrastran materiales depositados en el conducto volcánico. El inicio de la actividad sísmica en el Popocatepetl es desconocido, no obstante, es a fines de octubre (1994) cuando se observó un incremento en su actividad sísmica y fumarólica [Rodríguez, et al., 1994], despertando un profundo interés en los especialistas de diversas áreas científicas relacionadas con el volcán, no solo de México, sino del extranjero.

Ciertamente, el volcán Popocatepetl constituye una zona con alto riesgo y alta vulnerabilidad en el país, debido principalmente a los numerosos asentamientos humanos e industrias ubicados en sus alrededores. Tres son las Entidades Federativas que colindan con el Popocatepetl: México, Morelos y Puebla. Por ello, de acuerdo con cálculos actuales, en la eventualidad de una erupción volcánica, esta podría afectar a unos 20 millones de personas, provocando así, un fuerte impacto social y económico [Valdés, et al., 1995]. No obstante, las técnicas de monitoreo volcánico se han perfeccionado en lo posible de acuerdo con el conocimiento del comportamiento de los volcanes activos.

Actualmente, un elemento notable lo constituye el uso de estaciones sísmológicas que continuamente transmiten información desde el volcán a un centro de monitoreo. En su trabajo pionero realizado durante el primer cuarto del siglo, Camacho [1925] intentó establecer una relación entre la actividad volcánica y sísmica del Popocatepetl, al tratar de relacionar las emisiones de cenizas (explosiones volcánicas) y los sismos producidos en el interior del volcán [Martínez, 1998].

En la presente investigación fueron analizados los registros sísmicos asociados al Popocatepetl durante un periodo continuo (octubre, noviembre, diciembre de 1998, y enero de 1999), ya que representan los intervalos de tiempo de mayor actividad desde comienzos de la crisis del 21 de diciembre de 1994. Los eventos analizados corresponden solamente al Tipo "A". Los eventos Tipo "A", o también llamados volcanotectónicos, son de origen muy similar a los tectónicos, con frecuencias características promedio de 5 Hz. Estos eventos, representan fallamientos o fracturas de corte [Malone, 1982], siendo los esfuerzos que producen originados regional o localmente por el sistema volcánico. Con la finalidad de caracterizarlos por su frecuencia máxima, se estimaron sus espectros de Fourier utilizando los datos aportados por la estaciones telemétricas Canario (PPP) y Chipiquixtle (PPX), considerando sus tres componentes. Los valores de las frecuencias dominantes, una vez estimados sus espectros de Fourier para cada señal sísmica, y en especial, para los llamados *eventos selectos*, fueron correlacionadas con los periodos más activos del volcán, y con las supuestas variaciones en la estructura del cono. De la misma manera, los valores de las frecuencias dominantes estimadas para cada *evento seleccionado* fueron relacionados con los días en que se presentaron las principales explosiones en el volcán. Para tales efectos, el Popocatepetl fue regionalizado en perfil por celdillas de kilómetro cuadrado en profundidad. De esta forma, los eventos Tipo "A" considerados durante el presente estudio provienen de una misma región hipocentral en el volcán.

El análisis incluyó los siguientes parámetros: 1) tipo de evento sísmico, 2) frecuencia máxima, 3) relación con los periodos de mayor actividad en el Popocatepetl, 4) una región hipocentral de diagnóstico, vinculada con las diferencias y similitudes del registro digital y del espectro de la microsismicidad estudiada, y 5) relación con las fechas de ocurrencia de las principales explosiones en el volcán.

Los resultados muestran variaciones en la forma de onda de los *eventos seleccionados* Tipo "A", y en sus respectivos espectros de Fourier, a pesar de provenir de una misma región. Sin embargo, se aprecian similitudes entre los espectros de los eventos registrados en las estaciones PPP y PPX, cuando, los eventos coinciden en su localización. Dichas diferencias y similitudes pueden ser entendidas por la estructura diferencial del área de diagnóstico propuesta. Los valores puntuales de las frecuencias dominantes para cada *evento seleccionado*, tanto de los eventos registrados por la estación PPP y la estación PPX, demuestran variaciones muy similares en las dos estaciones, aunque la estación PPP, mantiene valores mayores con respecto a la estación PPX. Esto indica que cada evento Tipo "A", a pesar de ser registrados en dos distintas estaciones sísmicas, mantiene su valor de frecuencia dominante en tiempo, durante una serie de eventos Tipo "A" en un periodo activo en el volcán. Finalmente, se agruparon las características espectrales en tres diferentes grupos: periodo *a priori* (octubre, 1998), periodo *durante la crisis* (noviembre y diciembre, 1998), y periodo *a posteriori* (enero, 1999), y fueron encontradas diferencias espectrales notorias durante el periodo que involucra este estudio.

I. VOLCÁN POPOCATÉPETL

*"We need to be more than just seismologist
to understand the Earth's
constitution and dynamics".*

David Gubbins

I. VOLCÁN POPOCATÉPETL

I.1. ORIGEN Y EDAD

El volcán Popocatepetl (Figura 1.1) forma parte del Sistema Volcánico Transmexicano (SVT) cuyo origen, sorpresivamente, es aún incierto. El Popocatepetl junto con el volcán Iztaccíhuatl, forman la Sierra Nevada, que divide a las cuencas de Puebla-Tlaxcala y México. Existen varias hipótesis sobre la génesis del SVT, desde aquellas que favorecen una asociación directa entre la subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa Norteamericana y el vulcanismo del SVT [e.g., Molnar y Sykes, 1986; Demant y Robin, 1975; Nixon, 1982; Burbach et al., 1984; Suárez y Singh, 1986; Singh y Mortera, 1991], a las que proponen la nula existencia de relación con el proceso de subducción entre ambas placas, sino que con antiguas zonas de debilidad litosférica del sur de México provenientes de antiguos episodios de deformación [e.g., Mooser, 1972; Gastil y Jensky, 1973; Shurbet y Cebull, 1984; Johnson y Harrison, 1989]. El rasgo geométrico principal de Sistema Volcánico Transmexicano lo constituye su orientación no paralela a la trinchera ($\sim 16^\circ$). La historia tectónica de la zona para los últimos 25 m.a. incluye al menos tres grandes reorganizaciones en los movimientos de la placa oceánica. En cada reorganización la antigua placa de Farallón, que evolucionó primero como la placa de Guadalupe, fue reducida a las actuales placas de Rivera y Cocos, cambiando la posición de los centros de esparcimiento del fondo oceánico, primeramente hacia los montes marinos *Mathematician* entre los 12.5 y 11 millones de años (m.a.), y luego a la actual posición de la dorsal del Pacífico occidental entre los 6.3 y 3.5 m.a. [Mammerickx y Klitgord, 1982; Pardo, 1993].

Es importante mencionar, que la presencia de derrumbes parciales del edificio volcánico del Popocatepetl fue estudiado por primera vez por Robin y Boundal [1984; 1987]. Ambos investigadores, describen la última erupción del tipo Santa Elena en el Popocatepetl, hacen referencia a las extensas áreas que cubren la ladera sur del volcán [Siebe, 1996]. Mooser et al. [1996] proponen un mapa geológico de la zona, el cual se presenta en la Figura 1.2. Siebe y colaboradores [1993] argumentan que no solo fue un depósito, sino por lo menos cuatro.

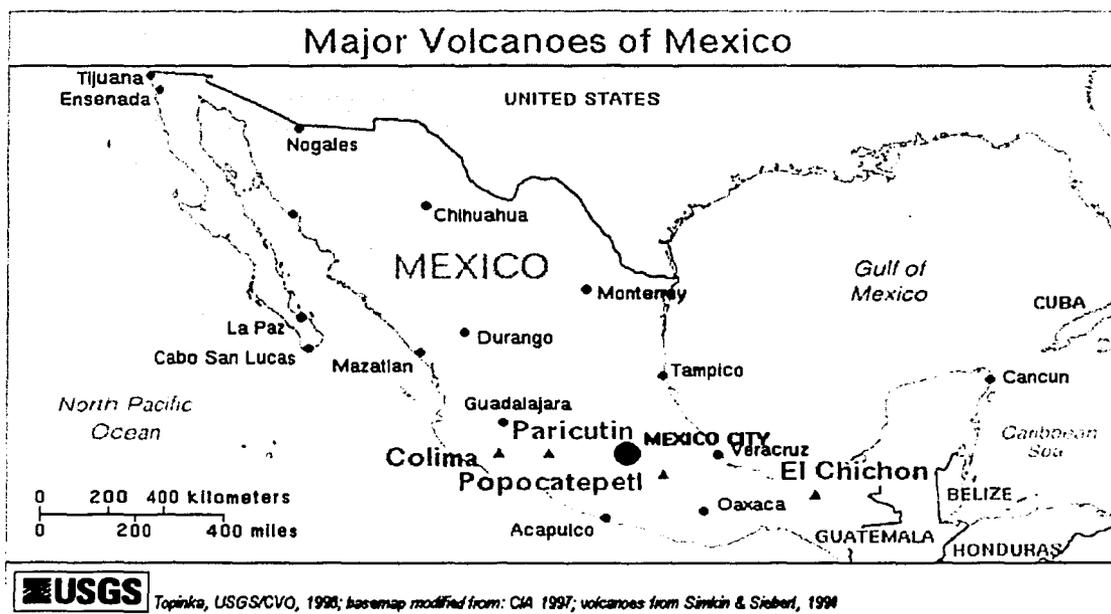


Figura 1.1 Ubicación del volcán Popocatepetl [Fuente: USGS / CVO].

TEMPERATURA
 FALLA DE ORIGEN

De esta forma, declaran que el cono actual del Popocatepetl no ha sido el único, sino que han existido varios en tiempos pasados. En la edificación del volcán se han distinguido dos grandes etapas, la primera de ellas se inició con emisiones de andesitas básicas pasando por dacitas y finalizando con lavas riódacíticas; la segunda, que sugiere una reactivación del vulcanismo, expulsó andesitas ácidas, dacitas y un volumen de materiales piroclásticos que fueron dispersados ampliamente [Carrasco, 1985]. Según el mismo autor, los productos que integran el volcán Popocatepetl son esencialmente derrames de lavas que en la parte superior se intercalan con brechas y materiales piroclásticos. También posee productos originados por algunos procesos erosivos de tipo glacial y aquellos formados por procesos aluviales que han modelado su estructura actual.

98°46'17"
19°06'5"

98°35'36"
19°06'5"



18°54'43"
98°46'17"

18°54'43"
98°35'36"
0 3 km



Volcanes cineríticos.



Domos.



Caldera.



Cráter.



Falla normal.

Colapso.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

LEYENDA

1. Lavas del volcán Amamalocoxco.

4. Flujos piroclásticos.

5. Aluvial cuaternario.

6. Lavas de volcanes piroclásticos.

7. Caldera venacho.

8. Depósitos de cineritas.

I. Caldera Cuicatlan

II. Complejo Tetela.

III. Caldera Tlamacas-Tlacholone.

IV. Volcán Apapasco

V. Volcán Nexpayantla.

Figura 1.2. Geología de la zona de estudio [Mooser et al., 1996].

Por su parte, White [1951] considera que la etapa del volcán base está representada por el conocido Volcán Nexpayantla, antecesor del actual Popocatepetl. El volcán base presenta una composición andesítica predominante. Las primeras manifestaciones que dieron lugar a la formación del cráter Nexpayantla fueron en su mayoría lávicas. Una nueva etapa de reactivación en el volcán corresponde a la formación del nuevo cono y cráter principal, sobreponiéndose al antiguo volcán Nexpayantla de manera parcial. Su explosividad fue mayor ya que presenta productos piroclásticos tanto de composición básica como ácida. Por su parte, Martin et al., [1997], proponen ocho unidades geológicas (Figura 1.3).

98°46'17''
19°06'5''

98°35'36''
19°06'5''



18°54'43''
98°46'17''

0 3 km

18°54'43''
98°35'36''

LEYENDA

- I. Flujos de lava de volcanes antiguos modificados por procesos glaciales. Actualmente presentan capas de material piroclástico.
- II. Lavas y brechas del volcán Nexpayantla.
- III. Secuencias gruesas de pómez de caída y depósitos de flujo y lahares.
- IV. Flujos piroclásticos y lahares, cubriendo antiguos flujos de lava.
- V. Flujos de lava (flanco Holoceno).
- VI. Depósitos de avalancha de escombros caída de piroclastos y depósitos de flujos piroclásticos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 1.3. Geología del Volcán Popocatepetl según Martin et al.[1997].

I.2. GEOMORFOLOGÍA VOLCÁNICA

Como una disciplina más de las llamadas ciencias de la Tierra, la Geomorfología ha aportado importantes contribuciones al conocimiento y apreciación del comportamiento en volcanes activos en todo el mundo.

Como es de esperarse, se han realizado diversos y muy variados trabajos sobre la geomorfología del volcán Popocatepetl. Para tales efectos, se han utilizado varios métodos de análisis, entre los que destacan la morfometría. En dicho método, se agrupa una serie de técnicas metodológicas como lo son el análisis altimétrico, la densidad de la disección, la profundidad de la disección, la energía del relieve, y las pendientes del terreno. Los análisis de morfogénesis realizados por Gómez [1998], proponen la clasificación del relieve del volcán Popocatepetl en tres grandes grupos genéticos:

- I. Relieve endógeno.
- II. Relieve endógeno modelado.
- III. Relieve exógeno.

De esta manera, los principales elementos posibles de ser cuantificados a partir de las formas del relieve son: longitud, superficie, volumen, altura absoluta y relativa, pendientes, orientación, densidad, frecuencia y otros elementos numéricos [Lugo, 1991]. Los análisis morfométricos permiten clasificar el relieve en función de sus propiedades cuantitativas. Al correlacionarlas con los agentes exógenos y la estructura geológica regional, permite relacionar variables de origen, edad y procesos geomorfológicos evolutivos en el volcán.

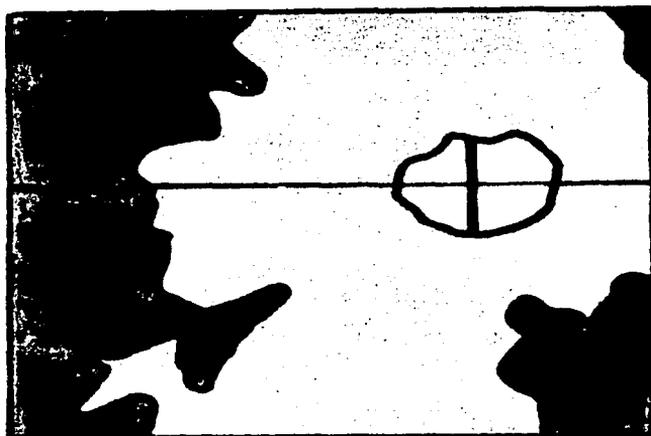
Gómez [1998], sintetiza en el Cuadro A, las principales características del relieve y su dinámica, en relación con las principales unidades morfológicas (génesis) y sus valores de altitud. Asimismo, propone la clasificación general de tres unidades morfológicas, como resultado de su incisivo análisis altimétrico (Figura 1.4):

- II. Zona de Piedemonte (volcánico-acumulativo)
- III. Zona de Piedemonte (erosivo-acumulativo)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

98°46'17"

8°35'36"



18°54'43"

919°06'5"

0 5 km

Figura 1.4. Clasificación general en tres unidades morfológicas del Popocatepetl [Gómez, 1998].

INTERVALO EN (msnm) DE A	UNIDADES MORFOLÓGICAS (GÉNESIS)	CARACTERÍSTICAS DEL RELIEVE Y DINÁMICA
>5300 5080 5300 4860 5080 4640 4860 4420 4640 4200 4420	CONO (VOLCÁNICO-ACUMULATIVO)	Se compone de coladas de lava (dacíticas) tabulares y cortas en longitud (200 a 700 mts.) y material piroclástico superpuesto. Los rasgos morfológicos originales se han erosionado o cubierto por piroclastos recientes. Al SE y NW dichas estructuras presentan un modelo glacial pleistocénico, aunado a este fenómeno se tiene escarpes (>45°) que actualmente son circos de desprendimiento y forman la parte más inestable (en la mayoría de los casos) de los circos glaciales. La actividad glacial actual se restringe al flanco NE y está representada por una masa glacial que fluctúa por la acción estacional y por la actividad volcánica; dicha masa aporta agua de deshielo a la cuenca de captación inmediata y genera procesos fluviales de alta energía (debris flow). En todos los sectores predominan los procesos gravitacionales, su génesis esta condicionada por el intemperismo, la estructura geológica, las pendientes abruptas de las laderas y la escasa o nula cobertura vegetal.
3980 4200 3760 3980 3540 3760 3320 3540 3100 3320 2880 3100	PIEDEMONTE (VOLCÁNICO-ACUMULATIVO)	Se compone de materiales volcánoclasticos emitidos por el Popocatepetl y otros centros de emisión asociados. Entre los materiales más representativos se tienen los depósitos de flujo piroclástico, arenas, cenizas y coladas de lava de variada composición. La estratificación heterogénea de estos materiales, ha ocasionado una variedad de formas que hacen de este territorio una zona compleja, que se refleja en una variedad de laderas con dos rangos de inclinación preferencial. El primero de 15° a 30° cuya distribución es de N a S en respuesta a un predominio de materiales volcánicos no consolidados, que en la mayoría de los casos cubren un relieve preexistente a manera de mantos y flujos (en valles). El segundo, de 30° a 40° tiene una orientación preferencial E-W, representa distintas secuencias de coladas de lava, en ellas se distingue un modelado glacial ocurrido en el Pleistoceno. En esta zona se ubica la Barranca de Nexpayantla y Cocoyo, NW. Aquí se distinguen dos procesos erosivos dominantes: la remoción en masa, característica de laderas de origen glacial en la mayoría de los casos y el fluvial; representado por barrancos con una configuración radial centrífuga en respuesta al control estructural del volcán.
2660 2880 2440 2660 2220 2440 <2220	PIEDEMONTE (EROSIVO-ACUMULATIVO)	Resultado de la actividad de procesos exógenos glaciales (que tuvieron una mayor influencia en el pleistoceno) y fluviales actuales. Los primeros representados por mantos caóticos, debido a que las formas originales ya no existen, en respuesta a la acción fluvial que los transportó a posiciones altitudinales menores, a manera de aluviones (transporte de ríos permanentes) y proluviaciones (transportados por ríos estacionales), estos depósitos crearon nuevas formas de relieve, los abanicos aluviales coalescentes, con pendientes de 3 a 6°, entre los 2400 y 2500 msnm.

FALLA DE ORIGEN
 FESIS CON

Cuadro A. Relación entre altitudes, unidades morfológicas v procesos geomorfológicos asociados. Tomado de Gómez, 1998.

1.3. ACTIVIDAD RECIENTE

El volcán Popocatépetl ha mostrado una gran variedad de formas de actividad eruptiva a lo largo de su historia. Se conoce la actividad eruptiva del volcán Popocatépetl desde tiempos remotos gracias a los escritos de índole histórico y geográfico de Díaz del Castillo [1532], Orozco y Berra [1888] y del Dr. Atl [1940]. Existen a su vez, varios y muy diversos estudios vulcanológicos, geológicos y geofísicos realizados por destacados estudiosos, como Aguilera y Ordoñez [1985], Camacho [1925], Friedlaender [1922], Martínez [1925], Waitz [1921], White [1951, 1954], Blazquez [1956], Mooser [1963, 1968, 1972], Lorenzo [1964], Schlaepfer [1968], Demant [1976, 1978, 1981], Pal y Urrutia [1977], Urrutia y del Castillo [1977], Carrasco [1985], Robin [1982, 1984], Lugo [1984], Robin y Boudal [1987], Martin del Pozo et al. [1995, 1997] y Siebe et al. [1995, 1996, 1997]. Con base a estos trabajos, y colaboraciones entre varios institutos y centros de investigación de diversas universidades del mundo, se realizó un primer Mapa de Peligros Volcánicos del Popocatépetl [Boudal y Robin, 1989]. En 1995, Macías y colaboradores, publicaron en el Instituto de Geofísica (IGF) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en colaboración con el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), una versión más completa y actualizada de este mapa.

Es importante mencionar que existen evidencias geológicas en forma de depósitos volcánicos de aquellas erupciones de gran magnitud, sin embargo, en muy pocas ocasiones pueden ser reconocidas las evidencias geológicas de actividad volcánica de pequeña magnitud. La descripción más antigua respecto a la actividad eruptiva del volcán está situada en el año 1354 de acuerdo con Cruz-Reina [1994].

El 21 de diciembre de 1994 (01:31 hora local), comienza una nueva etapa en la actividad eruptiva del volcán (Figura 1.5). Se registraron una serie de microsismos de magnitud entre 1.4 y 3.4 grados, con una profundidad promedio de 2.36 km registrados por la red de monitoreo del volcán Popocatepetl. Al amanecer, cayó una tenue lluvia de cenizas sobre la Ciudad de Puebla y otras localidades cercanas [Valdés, 1994]. En ese mismo día, a las 16:00 horas, la Secretaría de Gobernación dio a conocer a los gobiernos de los Estados de Puebla y Tlaxcala la condición del Popocatepetl, activando el "Plan Operativo Volcán Popocatepetl".

Es a partir de esta crisis en el volcán cuando se inicia el periodo de monitoreo sísmico, geodésico y geoquímico, más completo en su historia eruptiva.



21/dic/94. Popocatepetl. Ladera noroeste. (foto: autor desconocido)

p1221941.jpg

Figura 1.5 Fotografía de la ladera noroeste del Popocatepetl. (21/dic/94)
(CENAPRED).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Esta serie de observaciones y la intensificación en las tareas de monitoreo constante han contribuido de manera muy significativa para lograr un mayor entendimiento del carácter eruptivo del Popocatepetl. La actividad se mantuvo entre varios episodios de exhalaciones moderadas a fuertes, eventos sísmicos en el interior del volcán y explosiones liberando grandes volúmenes de gases y material piroclástico. Es hasta octubre de 1998 cuando se presenta uno de los periodos más activos desde finales de diciembre de 1994 (Figura 1.6).



Figura 1.6 Fotografía del volcán del 21 de octubre de 1998 (CENAPRED).

El numero total de eventos volcanotectónicos registrados durante octubre, noviembre y diciembre de 1998 fue 51, y estos se vieron acompañados con un incremento considerable de explosiones y exhalaciones en el volcán. La expansión volumétrica del domo en el volcán también pudo ser apreciada.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

De manera inesperada, en enero de 1999, la actividad sísmica y fumarólica decreció de manera importante. De acuerdo con Nahum y Valdés [2001], los días 16 y 17 de junio de 1999 se presentó un enjambre sísmico (35 eventos volcanotectónicos) en el Popocatepetl, justo después del sismo de Tehuacán, Puebla (Mw=7.0). La mayoría de los sismos volcanotectónicos (VT) que se presentaron fueron de magnitud entre 2.5 y 3 y únicamente dos mayores a 3, los cuales se localizaron entre los 4 y 7 km de profundidad desde la cima del volcán. Posteriormente, los registros de los sismos VT disminuyeron (dos eventos por día). Es hasta el día 16 de junio cuando ocurren 35 sismos de ese tipo.

De acuerdo con Valdés et al., (2001), desde el crecimiento de un domo en febrero del año 2000, y por cierto, el más pequeño desde 1996, el Popocatepetl presentó un incremento en su actividad eruptiva a principios de septiembre de 2000. Presumiblemente, este episodio marcó el crecimiento del domo de lava más grande desde 1994. Una actividad, considerablemente baja continuó hasta el final de noviembre y la primera semana de diciembre. La actividad en el volcán se incrementó notablemente el día 12 de diciembre de 2000, con hasta 200 exhalaciones por día. Por la noche fue posible apreciar incandescencia en el cráter y la emisión de fragmentos incandescentes. El inicio del siguiente episodio importante de actividad fue el 18 de diciembre, tal y como pudo ser pronosticado presumiblemente con un día de anticipación por el Comité Científico Asesor del CENAPRED.

Actualmente el nivel del volcán Popocatepetl muestra un notable equilibrio. No obstante, el Comité Científico Asesor ha recomendado mantener la atención a cualquier cambio en el comportamiento eruptivo del volcán, y la situación de alerta (semáforo en color amarillo).

II. MONITOREO Y VIGILANCIA VOLCÁNICA

***“De la Ilustración se dijo que, a veces, persiguiendo
a los fantasmas mató al espíritu”.***

Fernando Savater

II. MONITOREO Y VIGILANCIA VOLCÁNICA

II.1.- TÉCNICAS DE MONITOREO Y VIGILANCIA EN EL VOLCÁN POPOCATÉPETL

México se encuentra situado en una región de gran actividad sísmica y volcánica. De los 3,000 volcanes que aproximadamente tiene nuestro país, 14 son considerados activos. El país ha vivido actividad reciente de volcanes que han presentado fases eruptivas importantes, algunas con consecuencias desastrosas, ejemplo de ello son el Parícutín, en Michoacán, que nació en 1943 y el Chichón, en Chiapas, en 1982; el Tacaná, en Chiapas, en 1986 y el volcán de Colima, el cual ha tenido episodios de gran actividad en los últimos años. Estos dos últimos sin desastres.

La prueba más reciente de que México es un país con gran actividad endógena, se vivió a finales de 1994 cuando el volcán Popocatepetl pasó de una fase moderada de actividad a una de gran actividad sísmica y fumarólica con abundante emisión de gases, cenizas, extrusión de lava e incluso producción de flujos piroclásticos durante los eventos eruptivos de mayo y junio de 1997. Es por ello que la observación directa y la constante vigilancia sistemática mediante diversos métodos visuales e instrumentales constituyen la única manera de percibir y evaluar el estado de actividad de un volcán. De ahí la importancia de contar con un sistema completo y eficaz de vigilancia y monitoreo en todos los volcanes potencialmente peligrosos del país, con la finalidad de crear programas preventivos eficaces para cualquier eventualidad de una erupción volcánica.

Actualmente, el monitoreo volcánico se realiza a través de la observación directa y vigilancia sistemática mediante diversos métodos visuales e instrumentales de alta tecnología. Si estos se aplican en forma anticipada en las fases previas a un proceso eruptivo, es posible, en la mayoría de los casos, detectar oportunamente un cambio cualitativo y cuantitativo en la actividad que inclusive pudiese conducir a una predicción en el corto plazo de un proceso eruptivo inminente y poner en marcha, de parte de las autoridades de Protección Civil y de la Secretaría de Gobernación, un plan de emergencia previamente establecido. Presumiblemente, una muestra fehaciente de un sistema de vigilancia y monitoreo oportunamente establecido es el del volcán Popocatepetl. En un esfuerzo conjunto del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), de la Secretaría de Gobernación, los Institutos de Geofísica y de Ingeniería de la UNAM y con la colaboración del Cascades Volcano Observatory del U.S. Geological Survey (USGS), se estableció en los últimos años un complejo y moderno sistema de observación telemétrico con una central de adquisición y procesamiento de datos. Durante los periodos de mayor actividad eruptiva registrados en el volcán Popocatepetl, la UNAM no abjuró de su responsabilidad académica en ningún momento, ni perdió su espíritu de investigación y difusión del conocimiento.

Hoy en día se han establecido de manera ordenada y eficiente en el volcán, cuatro tipos de monitoreo: visual, sísmico, geodésico y geoquímico. La red de monitoreo del Popocatepetl está compuesta por 12 estaciones sísmicas localizadas en las laderas circundantes del volcán en sitios con altitud de hasta 4.3 a 1.5 km del cráter. La instrumentación consta de 8 sismógrafos triaxiales de periodo corto, 4 de banda ancha, 4 inclinómetros biaxiales para medir deformación, una cámara de video con enlace de microondas, un radar *doppler* meteorológico y diversos equipos para mediciones geodésicas, análisis químicos y determinación de las concentraciones de gases SO_2 y CO_2 . De forma continua, más de 50 señales de telemetría son transmitidas hacia un puesto central de registro y procesamiento localizado oportunamente en el CENAPRED.

Allí y mediante una extensa y eficaz red de computadoras, la actividad es monitoreada y procesada las 24 horas del día. Cuando es detectado cualquier incremento anormal de la actividad sísmica del volcán, se activa inmediatamente un sistema de alarma acústica y a través de un sistema de marcado automático, se envían mensajes a teléfonos particulares celulares y localizadores del personal de guardia. Del análisis de la información, las recomendaciones relativas al nivel de alertamiento son emitidas por el Comité Técnico Científico Asesor, integrado por investigadores de la UNAM y del CENAPRED. De esta manera, y mediante reportes especiales, autoridades del Gobierno Federal y de Protección Civil son informadas periódicamente acerca del nivel de actividad del volcán. Con ese mismo espíritu de servicio, y para el público en general, se ha dispuesto de un buzón telefónico con mensajes sobre su estado de actividad.

De esta forma, con la participación y la voluntad creativa y empeñosa de diversas instituciones, y un solícito esfuerzo realizado por parte del personal encargado, se logró en un plazo corto, poner en operación una extensa infraestructura de registro y monitoreo que permite la vigilancia estrecha del volcán así como la detección oportuna de cualquier cambio en su estado de actividad.

Tal como se mencionó anteriormente, los diferentes tipos de monitoreo en el volcán Popocatepetl pueden clasificarse de la siguiente manera:

La vigilancia visual consiste en la observación continua y se apoya en registros frecuentes de las condiciones físicas del volcán, como emanaciones de cenizas y gases, deformación, derrumbes o deslaves, o cualquier fenómeno anómalo.

El monitoreo sísmico se realiza por la medición local o remota de la actividad microsísmica, permitiendo localizar la fuente de energía e inferir la estructura del interior volcánico (Fig. 2.1). Por lo regular, durante las crisis volcánicas se instalan redes portátiles de tres o más sismógrafos sobre y alrededor de las laderas del volcán, así como otros instrumentos asociados como son los acelerógrafos, piezómetros y deformímetros. Los equipos digitales permiten mayor resolución y una mayor facilidad en el procesamiento de datos obtenidos, que aquellos provenientes de estaciones analógicas. Aunque la sismología volcánica es una técnica relativamente nueva, pero con grandes expectativas presentes y futuras, aunado a la aplicabilidad de sus métodos, esta ha sido bien acogida por un amplio contingente de geólogos, geógrafos, geofísicos, vulcanólogos y sismólogos en todo el mundo. No obstante, los estudios sismológicos en el volcán Popocatepetl han sido en número muy reducido pero con métodos y técnicas sistemáticas y en sumo confiables [Valdés, et al., 1995, 1997; Lermo et al., 1995, Arciniega, 1997]. Podemos mencionar los trabajos de Valdés [1995]; Valdés y González [1994]; Lermo [1995]; de la Cruz-Reyna et al. [1995]; Martínez [1998].

El monitoreo geodésico consiste en medir las deformaciones que el edificio volcánico sufre a consecuencia de los esfuerzos ejercidos desde el interior del volcán. Las mediciones pueden hacerse por medio de métodos geodésicos tradicionales, como la nivelación, la triangulación, y la inclinometría. También por medio de la gravimetría, la radiotelemetría y sistemas de posicionamiento global (GPS).

El monitoreo geoquímico consiste en el análisis químico de concentrados y elementos en gases de fumarolas, manantiales, cenizas, lavas y otros productos volcánicos.

ESTACIONES DE LA RED DE MONITOREO SISMICO DEL VOLCAN POPOCATEPETL

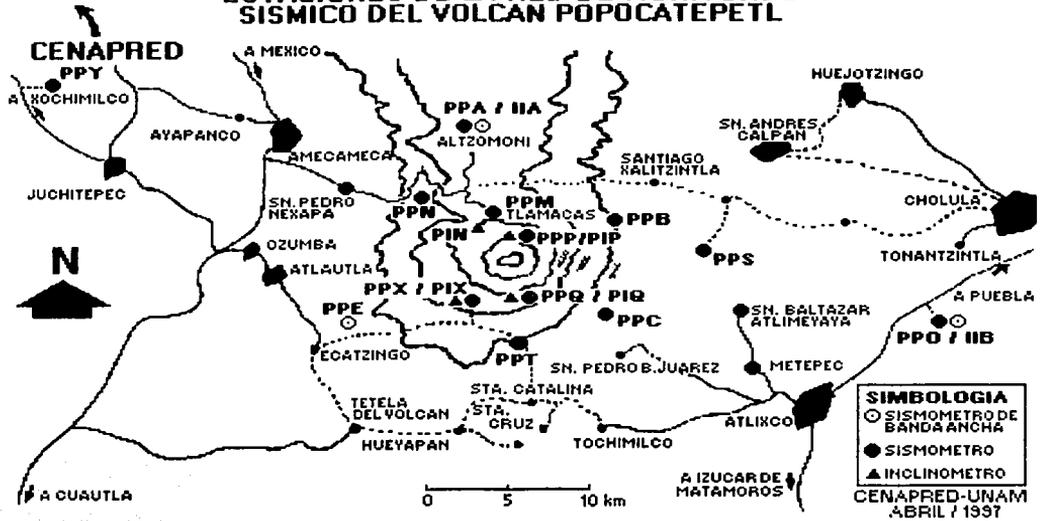


Fig. 2.1. Red de Monitoreo Sísmico del Volcán Popocatepetl. (Tomado de CENAPRED, 1997).

II.2.- INSTRUMENTACIÓN DE MONITOREO VOLCÁNICO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Las estaciones de campo se encuentran instaladas sobre la estructura cónica y en el piedemonte del volcán, entre los 2500 y 4450 m, las más cercanas a 2.1 km de distancia del cráter. En el presente trabajo los datos analizados fueron los registros provenientes de dos de las estaciones más cercanas al cráter, Refugio el Canario (PPP) y estación Chipiquixtle (PPX). PPP fue considerada como estación diagnóstico y PPX estación control.

Como se mencionó anteriormente, la red de monitoreo consta de 8 estaciones con sismómetros de periodo corto, 3 sismómetros de banda ancha, 5 estaciones con inclinómetros, 4 estaciones hidrométricas y de detección de flujos, una estación con radar y una estación con una cámara de video para la observación remota del volcán [CENAPRED, 1998]. Con dicho complejo instrumental de monitoreo, el volcán Popocatepetl es beneficiario de uno de los más eficaces y cuidadosamente instalado sistema moderno de monitoreo volcánico en el mundo.

II.3- INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA

Sismómetro digital de banda ancha en la estación de Canario PPP

La estación Canario (PPP) está localizada a 4170 msnm en la ladera norte del volcán y a poco menos de 2 km del cráter. Consiste en un sismómetro triaxial digital de banda ancha y un equipo de telemetría para enviar señales continuas hacia la estación central en el CENAPRED. Cabe decir que este sismómetro tiene una amplia respuesta en frecuencia (50 segundos de periodo hasta 50 Hz).

Sismómetro digital de banda ancha en la estación de Chipiquixtle PPX

La estación Chipiquixtle (PPX) está localizada a 3980 msnm en la ladera sur del Popocatepetl, constituida por un sismómetro triaxial (1Hz). Fue instalada en octubre de 1998 por el CENAPRED y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). La Figura 2.2, muestra la ubicación de la estación Canario (PPP), y la estación Chipiquixtle (PPX) con cuadros, en las laderas del volcán.

III. SISMICIDAD VOLCÁNICA

*“А как первая любовь –она сердце жжёт,
А вторая любовь –она к первой льнёт”*

Жанна Бичевская

III. SISMICIDAD VOLCÁNICA

La fenomenología asociada a un volcán activo involucra diversos factores que debida y cuidadosamente analizados, pueden dar pauta a un mejor entendimiento sobre el estado actual de actividad en algún volcán. Gracias al estudio detallado de la sismicidad volcánica, podemos lograr un mayor conocimiento sobre su constitución física interna, o sobre su estructura geológica, pero sobre todo, el estado actual de actividad.

El conocimiento del estado actual de actividad en un volcán activo, marca una fuerte distinción en la calidad de la toma de decisiones en cuanto a mitigación de riesgos. Paradójicamente, y con base en una serie de estudios recientes, se ha demostrado a nivel mundial, que las zonas con mayores indicadores de densidad de población, corresponden a aquellas donde existen uno o mas volcanes activos. Es por ello, y como respuesta a tales necesidades de conocimiento inmediato, para predecir erupciones volcánicas, que se ha utilizado la cuantificación de los diferentes eventos sismovolcánicos y sus cambios temporales, tanto en su número como en la energía total liberada [Simouzuru, 1971, Tokarev, 1978; Malone, 1982, Power et. al., 1994, Lahr et. al., 1994 y Chouet et. al., 1994].

III.1.- SISMICIDAD EN EL POPOCATEPETL DESDE EL 21 DE DICIEMBRE, 1994

Aproximadamente 22 horas después de la crisis explosiva del 21 de diciembre de 1994, se presentó un tremor volcánico registrado claramente por las estaciones PPX y PPM [Valdés, 1995]. Valdés y colaboradores [1995], propusieron inicialmente, que el conducto entre la cámara y el cráter debió haber sido fracturado y rugoso, por lo que el sellamiento entre sus paredes era ineficaz. Se permitía, pues, que el gas y la ceniza salieran de manera continua, generándose asimismo, un tremor de poca amplitud. Los mismos autores proponen que durante la segunda fase de actividad, el conducto fue inevitablemente erosionado, con sus paredes pulidas, para dar lugar finalmente a un sellamiento efectivo. Esto explica que el tremor se vuelva esporádico en el tiempo.

De esta forma, la actividad explosiva ha ido acompañada con la actividad sísmica en el volcán. Posteriormente al periodo eruptivo de diciembre de 1994, el volcán ha presentado altibajos en sus niveles de sismicidad. En la Sección III. 3 del presente capítulo, se describe detalladamente el comportamiento sísmico del volcán, en los meses de octubre, noviembre y diciembre de 1998, y enero de 1999, el periodo de análisis considerado para el presente estudio.

III.2.- CLASIFICACIÓN DE EVENTOS SÍSMICOS

Valdés y colaboradores [1995], propusieron cuatro tipos de eventos para el volcán Popocatépetl: Tipos "A", "B", "AB" y tremor. Las características de cada uno de ellos se mencionan a continuación:

Tipo "A". Estos eventos son similares a los tectónicos, con frecuencias típicas de 5 Hz, con fases de las ondas P y S claramente definidas y con tiempos S-P de 1.5 a 3.0 seg. La duración de su coda es menor a los 40 seg. Estos eventos representan fallamientos o fracturas de corte, muy similares a los que producen los eventos tectónicos. Los esfuerzos que los generan pueden ser de origen regional o local del sistema volcánico [Malone, 1982]. Como se ha mencionado con anterioridad, los eventos sísmicos involucrados en este estudio pertenecen a esta clasificación (Figura 3.1).

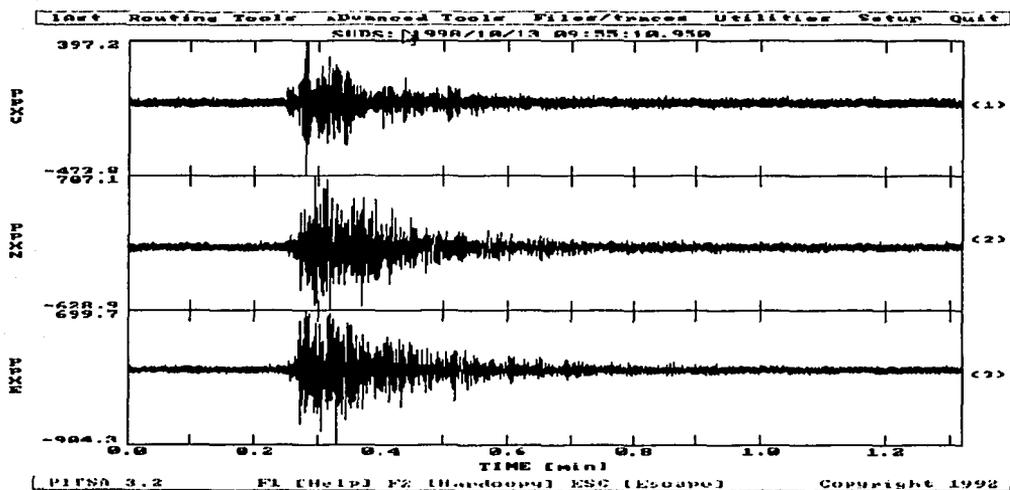


Figura 3.1. Evento Tipo "A", registrado el 13 de octubre de 1998 en la estación PPX.

Tipo "B". Los periodos característicos de estos eventos se encuentran en el rango de 0.8 a 1.6 seg. La fase de la onda P es emergente y no es posible identificar la fase de la onda S; la duración de la coda es menor a los 125 seg. Chouet [1985, 1988] ha modelado teóricamente este tipo de eventos y sugiere que son causados por resonancia iniciada por presiones transitorias en un conducto o una fractura saturada con fluido.

Tipo "AB". Estos eventos se caracterizan por componentes de alta y baja frecuencia. Las altas incluyen fases impulsivas de las ondas P de 5.5 seg. En general, la amplitud de las ondas P y S es más pequeña que las de los eventos Tipo "A". Los periodos característicos de la componente de baja frecuencia son de 0.8 a 1.1 seg. y la duración de coda de todo el evento es menor a los 150 seg. El mecanismo que genera estos eventos puede ser una mezcla de los que generan los tipos A y B,

Tremor. Este tipo de señal sísmica se debe a una oscilación o vibración continua de elementos del aparato volcánico. El tremor comúnmente se asocia a los eventos de periodo largo o Tipo B, ya que los espectros de frecuencia de ambas señales son consistentes [Chouet, 1992]. El origen del tremor es todavía debatible y entre las explicaciones más comunes son por ejemplo el que sugiere un conducto o fractura saturado con fluido a alta presión [Chouet, 1986].

III.3.- EVENTOS TIPO A [OCTUBRE, NOVIEMBRE, DICIEMBRE, 1998; ENERO, 1999]

Sismos volcano-tectónicos registrados en octubre de 1998

La actividad comienza con el evento Tipo "A" registrado a las 9:34 horas del Meridiano de Greenwich (GMT) el día 13 de octubre de 1998. El último evento registrado en este mes fue el del 30 de octubre a las 22:32 (GMT). En total, y de manera esporádica, fueron registrados 12 eventos provenientes del volcán, dando inicio a una de las etapas más activas desde diciembre de 1994 (año en que reinició su actividad).

Para el presente análisis, fueron considerados siete eventos Tipo "A" de este periodo. Los registros de estos eventos se muestran en la **Figura 3.2**: 3,4,5,7,8,9 y 11. Los números al pie de cada registro, señalan el número correspondiente del evento localizado hipocentralmente en la Figura 3.3. Estos eventos fueron seleccionados con base en que su localización hipocentral se encuentra en el área de muestreo previamente establecida para este estudio en el perfil del volcán Popocatepetl (6x6 km). La localización hipocentral de cada evento fue tomada del CENAPRED [2000].

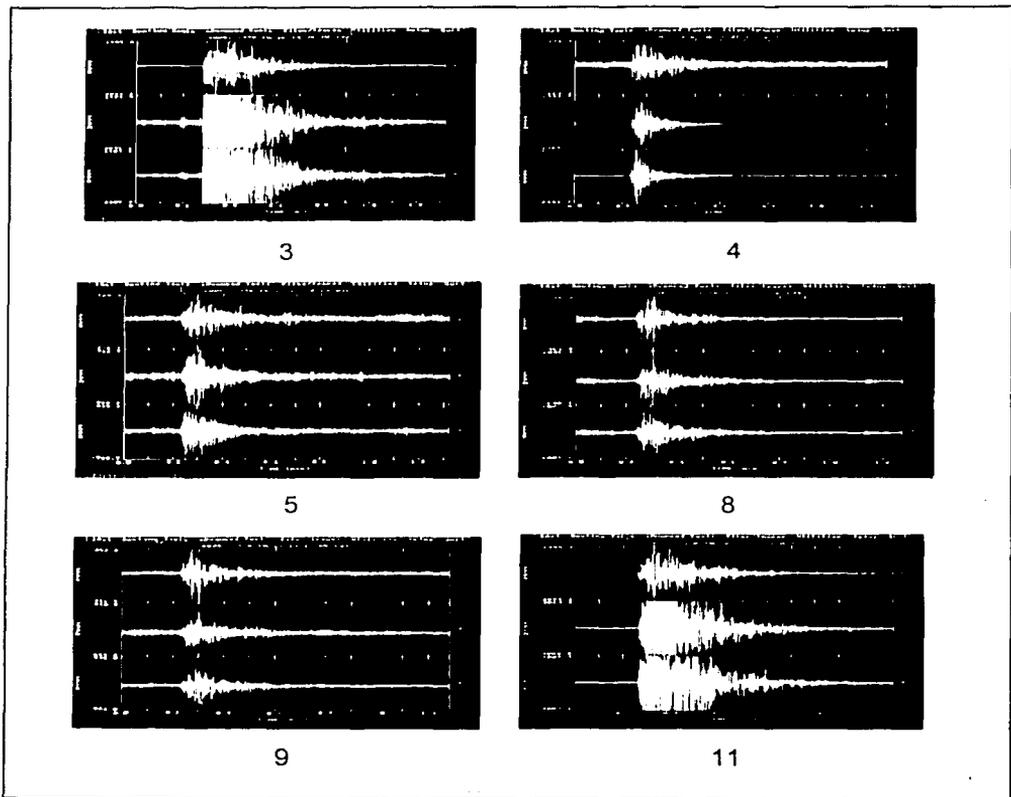
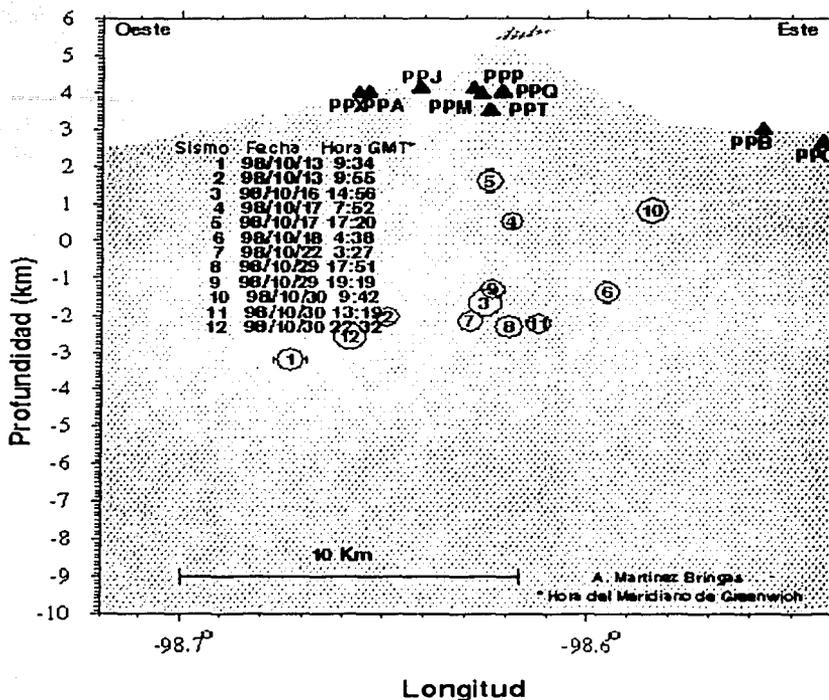


Figura 3.2. Eventos seleccionados de la estación PPP (octubre, 1998).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CENAPRED / I. de Geofísica UNAM
Localización Sismos Tectonovolcanicos



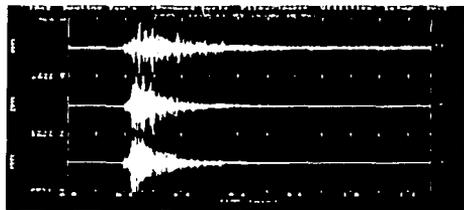
**TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN**

Figura 3.3. Perfil del volcán Popocatepetl y ubicación del área de muestreo (octubre, 1998), tomado del CENAPRED.

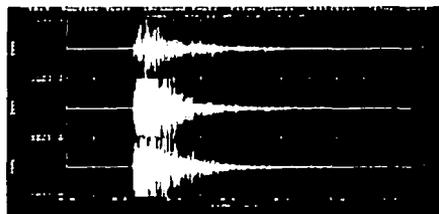
Sismos volcano-tectónicos registrados en noviembre de 1998

Durante el mes de noviembre de 1998 se registraron 14 eventos volcanotectónicos, con una mayor concentración hipocentral promedio a 5 kilómetros de profundidad del cráter. El primer evento ocurrió a las 16:05 (GMT) del 4 de noviembre de 1998. El último evento del mes, el día 24 a las 4:52 (GMT).

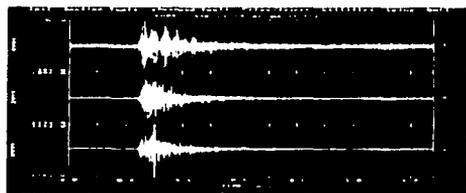
El número total de eventos Tipo "A" seleccionados fueron 9, ya que se localizaron dentro del área de muestreo. Estos fueron los numerados 1,2,3,6,7,8,9,11 y 12 (Figura 3.4). Los números al pie de cada registro corresponden a los eventos enlistados en la Figura 3.5, la cual muestra la ubicación hipocentral de los del Tipo "A" provenientes del volcán en noviembre de 1998.



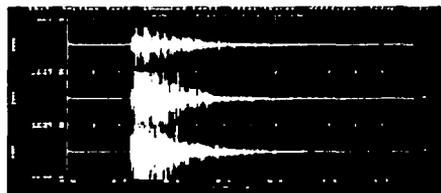
1



2

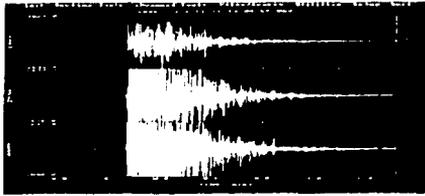


3

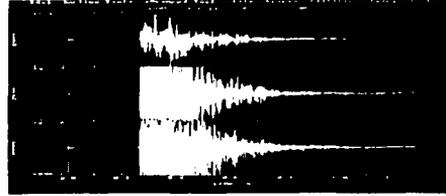


6

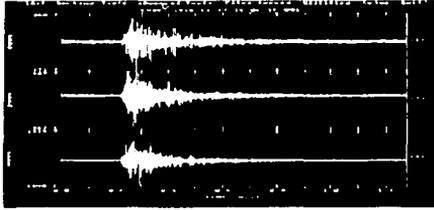
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



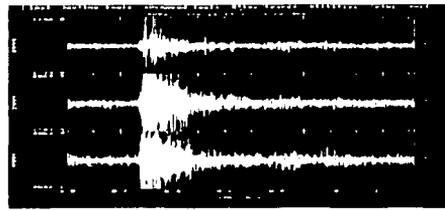
7



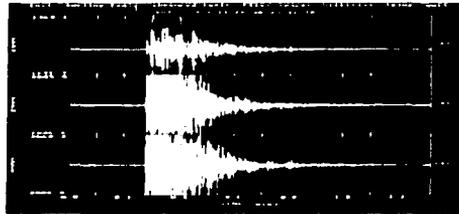
8



9



11

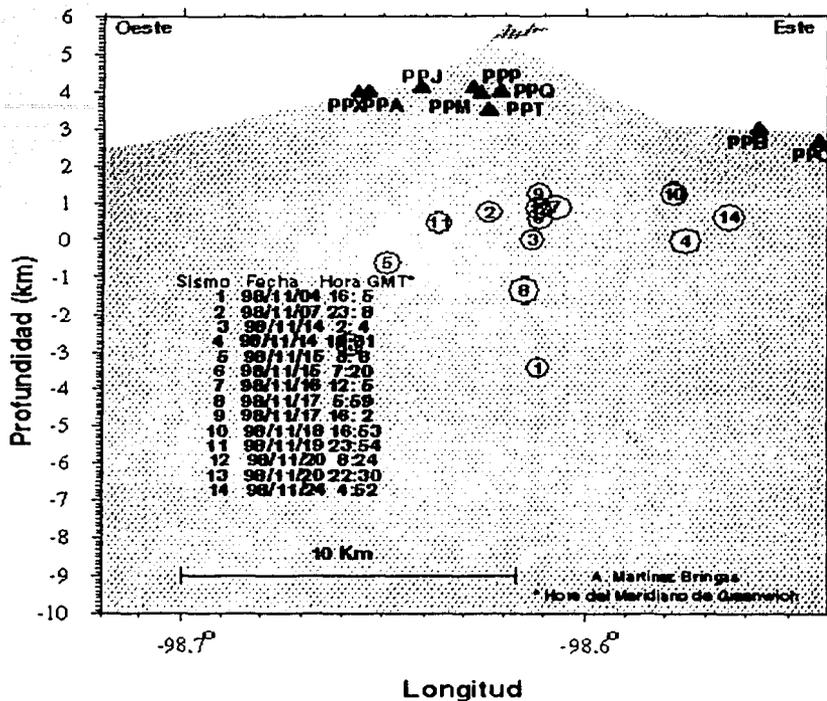


12

Figura 3.4 Eventos seleccionados de noviembre de 1998 (PPP).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CENAPRED / I. de Geofísica UNAM
Localización Sismos Tectonovolcanicos



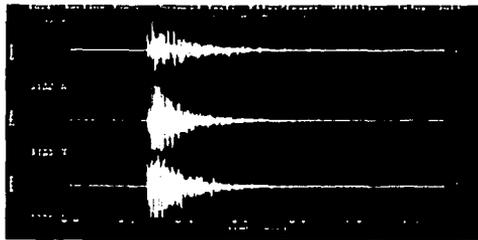
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 3.5. Perfil del volcán Popocatepetl y ubicación del área de muestreo (noviembre, 1998) tomado del CENAPRED.

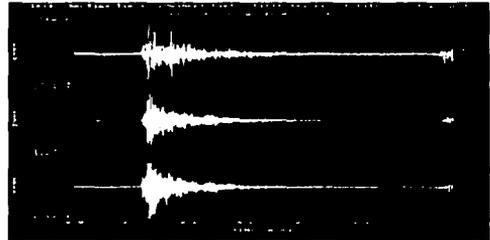
Sismos volcano-tectónicos registrados en diciembre de 1998

Durante el mes de diciembre de 1998, se registró el mayor número de eventos Tipo "A" del periodo de análisis de este estudio. Se registraron un total de 25 eventos, de los cuales, 16 fueron seleccionados (Figura 3.6), ya que su localización hipocentral está dentro del marco de muestreo (Figura 3.7).

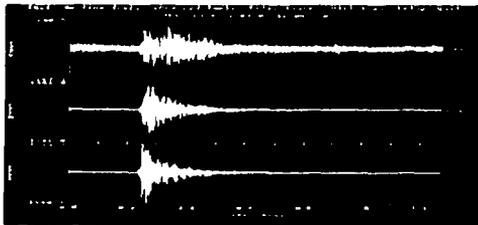
Esta actividad microsísmica se vio acompañada de grandes explosiones y exhalaciones en el volcán.



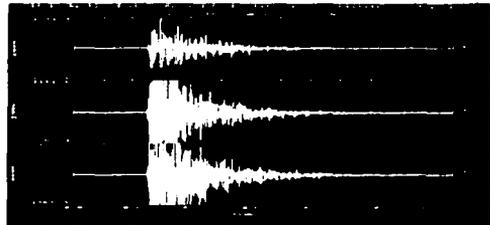
2



3

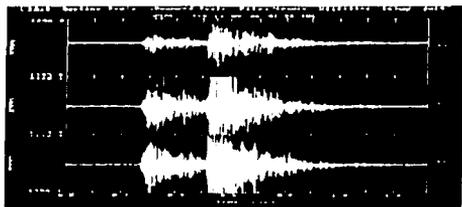


5

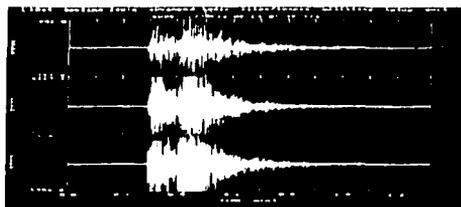


6

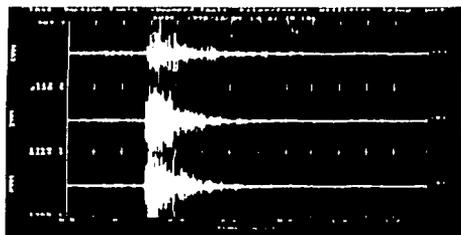
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



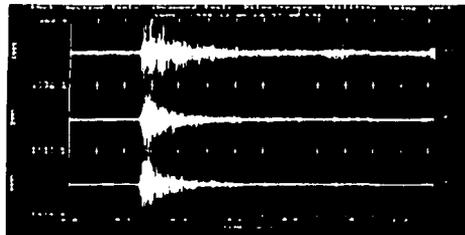
9



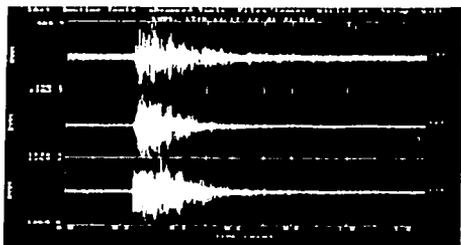
11



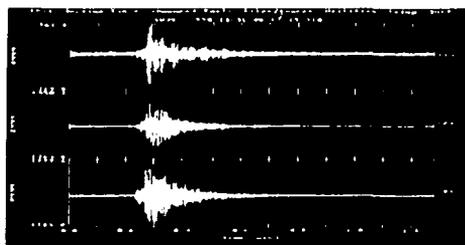
13



14

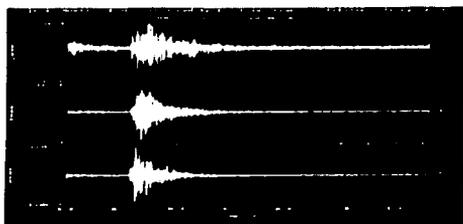


18

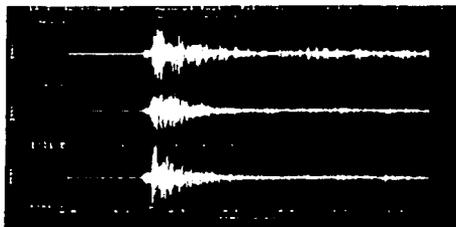


22

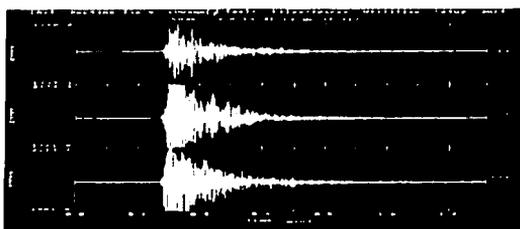
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



23



24

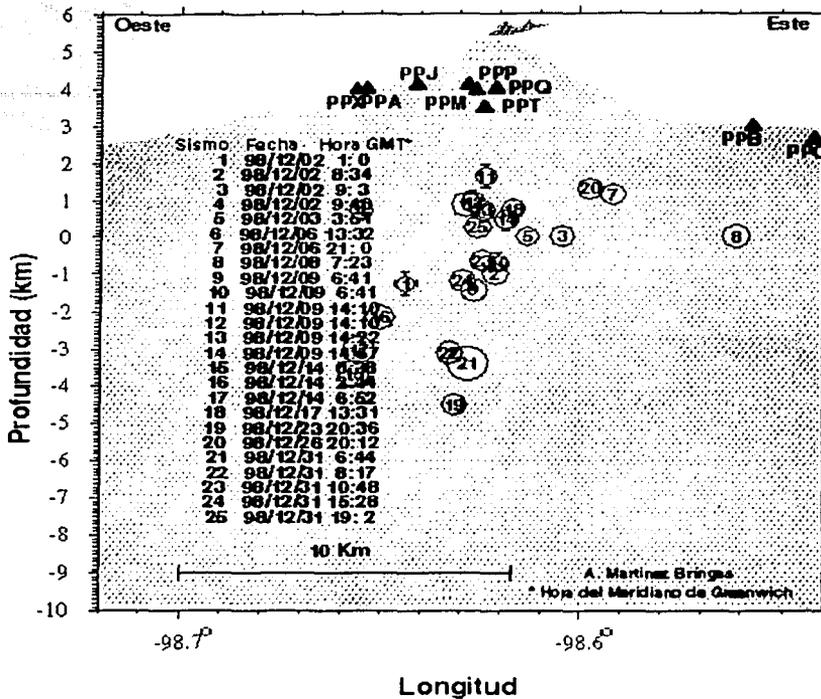


25

Figura 3.6. Eventos seleccionados de diciembre de 1998.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CENAPRED / I. de Geofísica UNAM
Localización Sismos Tectonovolcanicos

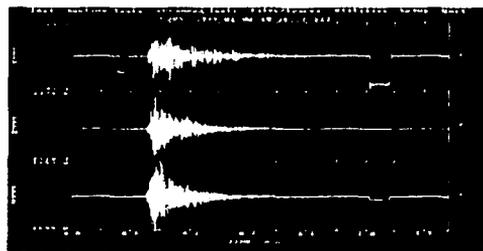


**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

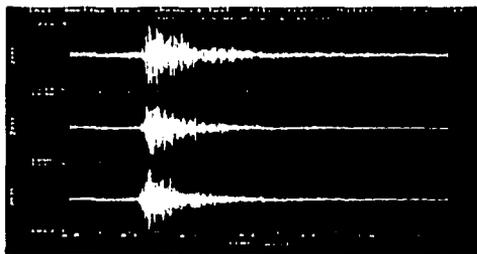
Figura 3.7. Perfil del volcán Popocatépetl y área de muestreo (diciembre de 1998) tomado del CENAPRED.

Sismos volcano-tectónicos registrados en enero de 1999

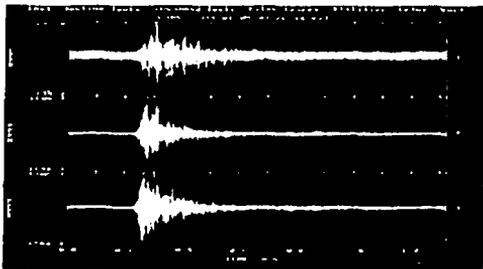
Durante el mes de enero de 1999 disminuyó el número de eventos Tipo "A", registrándose 14 de este tipo. De ellos, 10 eventos fueron considerados para el presente estudio: 3,4,5,6,7,8,9,10,11, y 13 (Figura 3.8). El primer evento ocurrió a las 5:27 (GMT) del día 1 de enero de 1999. El último evento registrado en este mes fue a las 5:53 (GMT) del 15 de enero del mismo año. Es importante notar que durante este mes la localización hipocentral (Figura 3.9) tuvo una mayor dispersión a profundidad, por debajo de la considerable en la emisión del material volcánico, de explosiones y exhalaciones en el Popocatepetl.



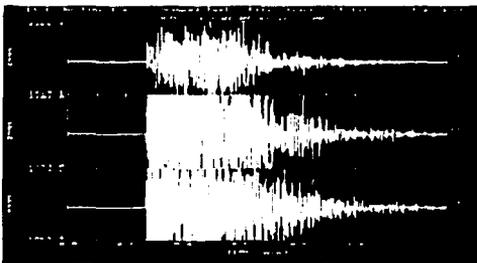
3



4

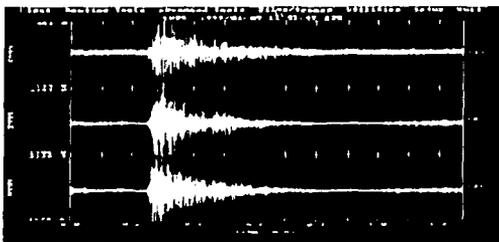


5

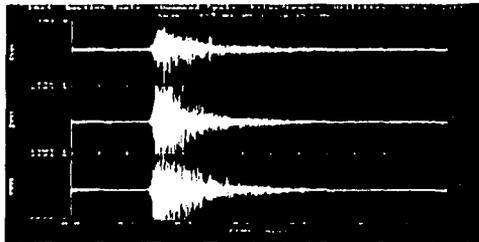


6

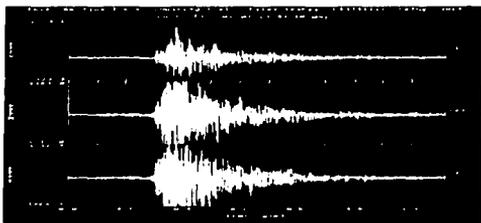
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



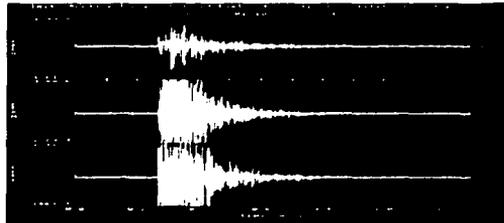
7



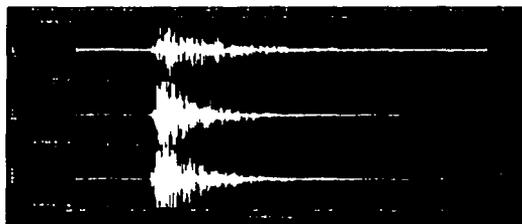
8



9



10

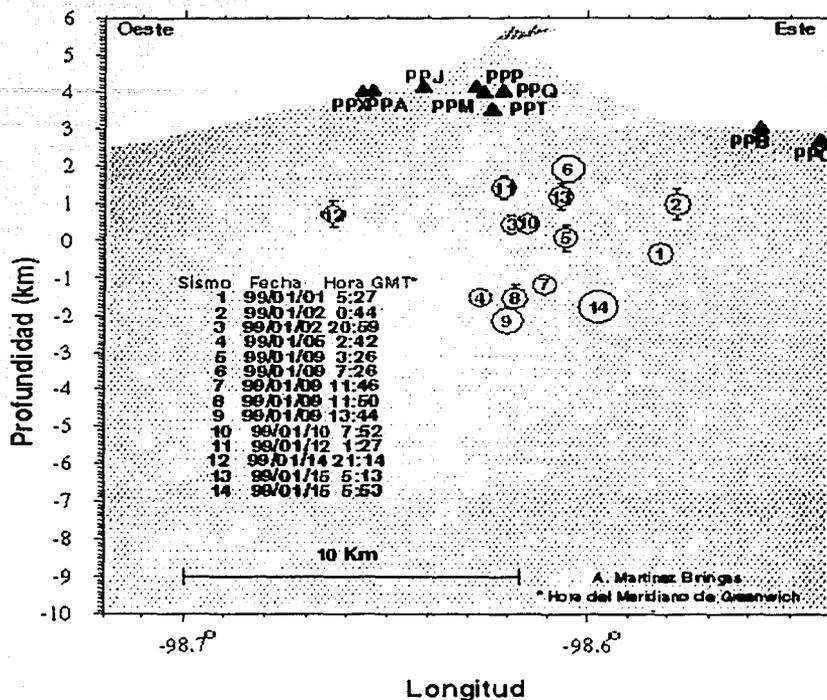


13

Figura 3.8. Eventos Selectos para enero de 1999, estación PPP.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CENAPRED / I. de Geofísica UNAM
 Localización Sismos Tectonovolcanicos



TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Figura 3.9. Localización hipocentral de los eventos Tipo "A" provenientes del volcán (enero, 1999) tomado del CENAPRED.

IV. ANÁLISIS DE FOURIER

“Quiero recordar a un gran escritor mexicano quien falleció a fines del año pasado, Juan José Arreola, con algunos renglones de La FERIA, donde con veracidad y prosa exclusiva se refiere a un sismo:

*¡Está temblando! Santo Dios, Santo Fuerte, Santo Inmortal...
¡Me lleva la chingada, está temblando!
La campana mayor está de aquí para allá, de aquí para allá,
¡ya va a dar el golpe, ya va a dar el golpe!
¡Si la campana mayor se toca sola se acaba el mundo!”*

José Lugo Hubp

IV. ANÁLISIS DE FOURIER

Lord Kelvin denominó al análisis de Fourier un "gran poema matemático". Desarrollado por Jean-Baptiste-Joseph Fourier en la *Théorie Analytique de la Chaleur*, introdujo los métodos en el tratamiento analítico de la conducción del calor. Hoy en día, el análisis de Fourier es aplicado en una variada gama de problemas de orden físico.

IV.1.- TEORÍA DE FOURIER

Considerando $f(t)$ una función continua, la transformada de Fourier se expresa de la siguiente manera [Anguiano, 1998]:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

donde $i = \sqrt{-1}$. La transformada inversa de Fourier se expresa como:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{i\omega t} dt \quad (2)$$

Como su nombre lo indica, la transformada de Fourier es un proceso matemático que consiste básicamente en transformar una función del dominio del tiempo al dominio de las frecuencias. Si la función está en el dominio espacial, la transformada de Fourier la convierte al dominio del número de onda.

Cuando nuestra función es discreta, la transformada de Fourier está dada por:

$$F(\omega) = \sum_{i=1}^n f(t) e^{-i\omega t} \Delta t \quad (3)$$

la transformada inversa de Fourier es:

$$f(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n F(\omega) e^{i\omega t} \Delta \omega \quad (4)$$

Cuando la función es discreta se debe considerar el intervalo de muestreo para evitar el efecto de enmascaramiento. El intervalo de muestreo adecuado es obtenido de la siguiente forma:

$$\Delta x = \frac{1}{2f_N} \quad (5)$$

donde f_N es conocida como frecuencia de Nyquist. Dicha frecuencia es la más grande que puede estar contenida en una serie de tiempo. El algoritmo usado comúnmente se conoce como Transformada Rápida de Fourier (FFT).

IV.2.- ESPECTROS DE FOURIER PARA CADA SEÑAL SÍSMICA [ESTACIÓN SÍSMICA CANARIO PPP]

En este trabajo, el espectro de Fourier fue estimado por medio del programa PICK_EM, el cual a través de la aplicación de ventanas de alta resolución (ventanas de hanning) en el registro digital del sismograma, pueden ser identificadas con mucha claridad los arribos de las ondas P, lo que facilita, entre otros menesteres, su localización epicentral. Se tomó una ventana de 100 puntos, y con un valor de tapering para cada señal de 0.5. Los valores de frecuencia dominante fueron estimados en hertz (Hz), y la amplitud de la onda en metros (m). La relación entre ambos ejes de las gráficas para cada FFT es lineal-lineal.

IV.3.- RELACIÓN ENTRE LAS FRECUENCIAS DOMINANTES Y PRINCIPALES EXPLOSIONES EN EL VOLCÁN

ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para cada señal digital, una vez estimado su espectro de Fourier, se tomó en cuenta el valor numérico puntual de las Frecuencias Dominantes para ser graficado junto con cada evento Tipo "A" registrado en el volcán. Por otro lado, se graficaron contra tiempo las explosiones más fuertes presentadas en el volcán durante el periodo de análisis (Figura 4.1) y se relacionaron con el comportamiento de los valores numéricos puntuales de cada espectro de Fourier para cada evento, considerando sus tres componentes.

Principales Explosiones Volcanicas Oct-Nov-Dic (1998) - Ene (1999)

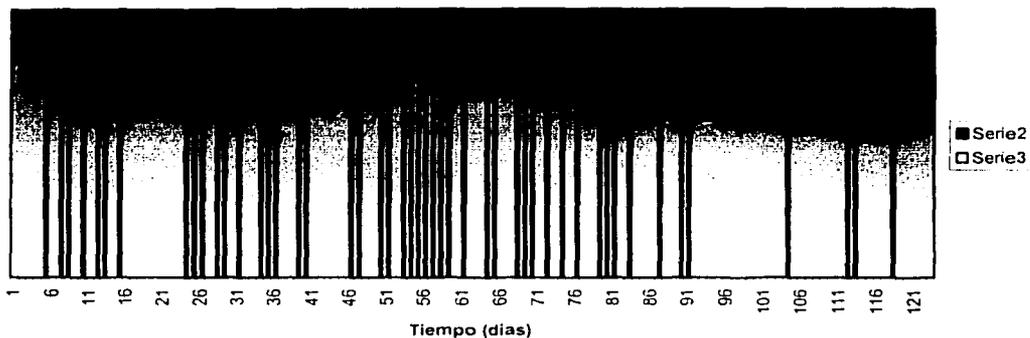


Figura 4.1. Principales explosiones registradas en el volcán Popocatepetl, durante el periodo de estudio.

Las Figuras 4.2 y 4.3, muestran el comportamiento de los valores puntuales de las frecuencias dominantes para todos los eventos Tipo "A" registrados durante el periodo de estudio. La Figura 4.2 pertenece a los valores obtenidos para la estación PPP y la Figura 4.3 a la estación PPX.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Valores puntuales del Espectro de Frecuencia y Eventos Tipo-A

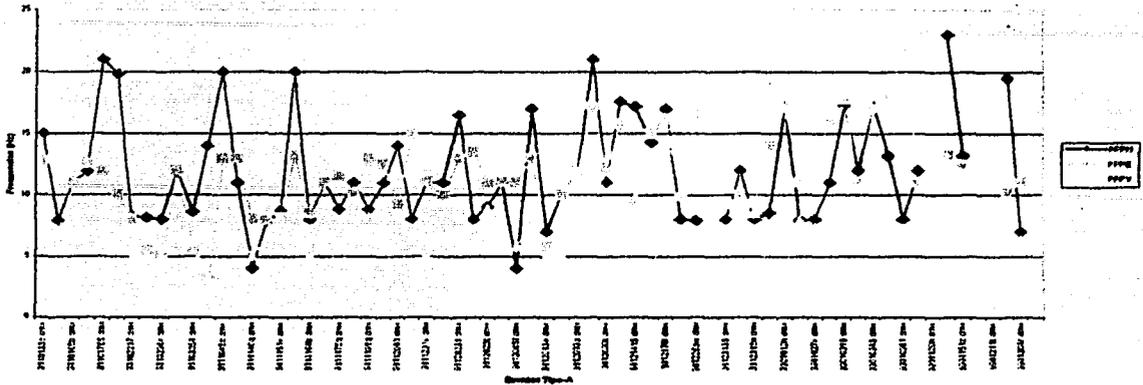


Figura 4.2 Valores puntuales de las frecuencias máximas (Hz), para todos los eventos tipo "A" registrados en el volcán durante el periodo de estudio para la estación PPP (ondas P).

Valores puntuales del Espectro de Frecuencia y Eventos Tipo-A

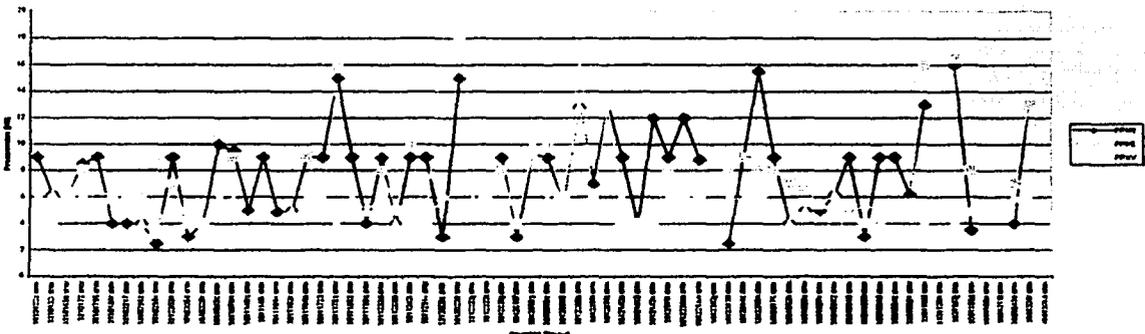


Figura 4.3. Valores puntuales de las frecuencias máximas (Hz), para todos los eventos tipo "A" registrados en el volcán para la estación PPX (ondas P).

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

En la Figura 4.4, se muestra la grafica de las frecuencias dominantes para los eventos seleccionados de la Estación PPP.

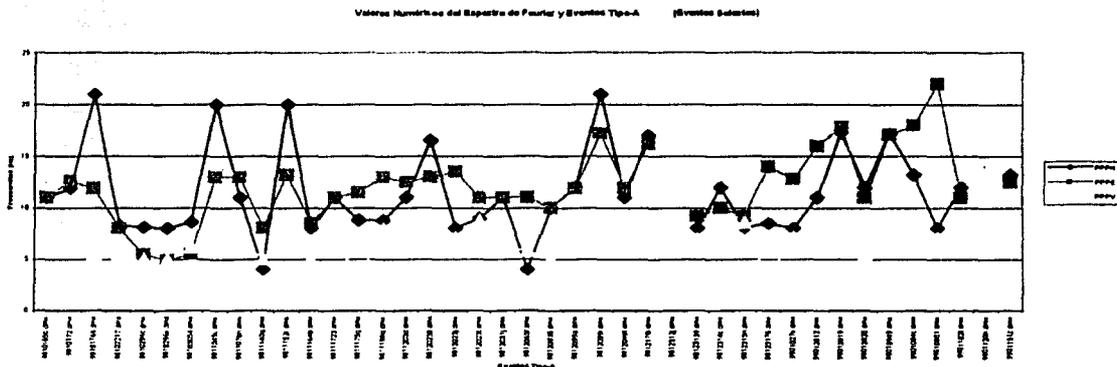
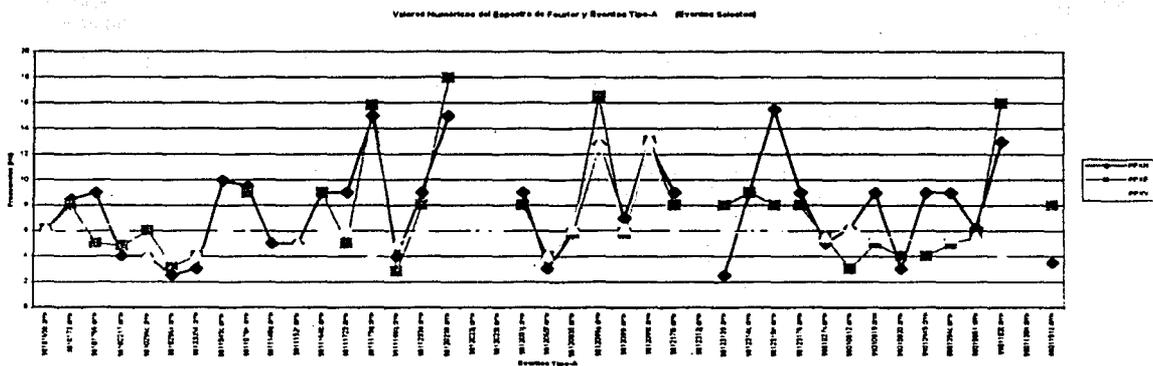


Figura 4.4. Valores puntuales de las frecuencias dominantes para cada uno de los eventos selectos (PPP).

La Figura 4.5, muestra la grafica de las frecuencias dominantes para la estación PPX.



Las Figura 4.4 y la Figura 4.5, muestran que los valores de las frecuencias dominantes en las componentes verticales de las estaciones PPP y PPX se comportan de manera similar. La Estación PPP mantiene valores más altos de frecuencia para cada evento que la Estación PPX, mostrando, sin embargo, un comportamiento en tiempo similar.

La componente vertical de las dos estaciones sísmicas seleccionadas para el presente estudio, ubicadas en el volcán (PPP y PPX), conserva los valores propuestos por [Valdés, 2000], con frecuencias típicas de 5 Hz y las fases de las ondas P y S claramente definidas con tiempos de fase de 1.5 a 3.0 segundos. Aunado a ello, la duración de coda es menor a los 40 seg.

La tabla 4.1, muestra los valores de las frecuencias dominantes de los *eventos seleccionados* utilizadas para la elaboración de las gráficas anteriores para la estación PPP. La tabla 4.2, muestra los valores de las frecuencias dominantes para los mismos eventos, registrados en la estación PPX:

FRECUENCIAS DOMINANTES PARA LA ESTACIÓN PPP

EVENTOS SELECTOS	Frecuencias dominantes			(Para ondas P)
	PPPn	PPPE	PPPv	
9810165b.dmx	11	11	7	
9810172.dmx	11.9	12.6	7	
98101766.dmx	21	11.9	5.5	
98102217.dmx	8.3	8	4.9	
9810296c.dmx	8.1	5.5	4.9	
9810296x.dmx	8	4.9	4.9	
98103054.dmx	8.6	5.5	6.2	
9811045c.dmx	20	13	6.5	
9811078n.dmx	11	13	7	
9811140q.dmx	4	8	5	
9811152r.dmx	20	13.2	8	
9811164b.dmx	8	8.5	5	
98111723.dmx	11	11	7.2	
9811175q.dmx	8.8	11.5	3	
9811198q.dmx	8.8	13	8	
9811203d.dmx	11	12.5	6	
98120238.dmx	16.5	13	7.8	
9812023j.dmx	8	13.5	7.1	
9812023t.dmx	9	11	8.8	
9812031j.dmx	11	11	6.2	
9812065f.dmx	4	11	5.8	
98120935.dmx	10	10	5	
9812099a.dmx	12	11.9	8	
9812099i.dmx	21	17.2	7	
9812099t.dmx	11	11.9	6.4	
9812176l.dmx	17	16.2	8.8	
9812312j.dmx				
98123139.dmx	8	9.2	7	
9812314c.dmx	12	10	7	
9812315n.dmx	8	9.2	8.5	
98123176.dmx	8.5	14	3	
9901027x.dmx	8	12.8	7.2	
99010512.dmx	11	16	7	
99010919.dmx	17.3	17.8	6.3	
99010920.dmx	12	11	5.5	
99010949.dmx	17.2	17.1	6.3	
9901094c.dmx	13.2	18	8	
99010951.dmx	8	22	7.1	
9901102t.dmx	12	11	8	
9901120h.dmx				
9901151z.dmx	13.2	12.5	5.7	

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Tabla 4.1. Valores de frecuencia dominante estimados para la estación PPP.

FRECUENCIAS DOMINANTES PARA LA ESTACIÓN PPX

	Frecuencias dominantes			(Para ondas P)
	PPXN	PPXE	PPXV	
9810165b.dmx	6	6.1	6	
9810172.dmx	8.5	8	6.2	
98101766.dmx	9	5	6.5	
98102217.dmx	4	4.8	6.4	
9810296c.dmx	4	6	4	
9810296x.dmx	2.5	3.2	4	
98103054.dmx	3	4	4	
9811045c.dmx	10		6	
9811078n.dmx	9.5	9	5.8	
9811140q.dmx	5			
9811152r.dmx	5		5	
9811164b.dmx	9	9	6	
98111723.dmx	9	5	6	
9811175q.dmx	15	15.8	4	
9811198q.dmx	4	2.8	5	
9811203d.dmx	9	8	6.2	
98120238.dmx	15	18	5	
9812023j.dmx			5.8	
9812023t.dmx			6.2	
9812031j.dmx	9	8	4.8	
9812065f.dmx	3	4	4	
98120935.dmx	5.8	5.8	6.2	
9812099a.dmx	12.8	16.5	12.8	
9812099i.dmx	7	5.8	6.2	
9812099t.dmx	13	13	13	
9812176l.dmx	9	8	6	
9812312j.dmx				
98123139.dmx	2.5	8	6	
9812314c.dmx	9	9	5.8	
9812315n.dmx	15.5	8	6.4	
98123176.dmx	9	8	5.5	
9901027x.dmx	5	5.5	5.5	
99010512.dmx	6.2	3	6.2	
99010919.dmx	9	5	5.5	
99010920.dmx	3	4	5.5	
99010949.dmx	9	4	5	
9901094c.dmx	9	5	5.5	
99010951.dmx	6.2	5.5	5.5	
9901102t.dmx	13	16	4	
9901120h.dmx				
9901151z.dmx	3.5	8	5	

Tabla 4.2. Valores de las frecuencias dominantes estimados para la estación PPX

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

*"Se podría decir que el aquí del allá es la memoria;
el aquí del aquí es la visión;
y el aquí del futuro es la espera".*

Juan Carlos Gómez Rojas

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

DISCUSIÓN

El análisis espectral constituye una metodología para obtener información de manera indirecta y estudiar detalladamente las características del edificio de los volcanes, asociada con los demás estudios científicos: geomorfológicos, geológicos, GPS, entre otros, no menos importantes.

De acuerdo con las gráficas de relación entre las frecuencias dominantes y tiempo, las componentes horizontales de ambas estaciones sísmicas (PPP y PPX) resultan mucho menos sensibles a la variación de frecuencias máximas en periodos de fuertes explosiones en el volcán, que la componente vertical. Podemos decir entonces, que para estudios de sismicidad en volcanes activos, es recomendable el manejo de estaciones sísmicas triaxiales de banda ancha, prestando una mayor atención al comportamiento de las componentes verticales.

La componente vertical de las dos estaciones sísmicas seleccionadas para el presente estudio ubicadas en las laderas del volcán (PPP y PPX), coinciden con los valores propuestos por Valdés [1994], con frecuencias típicas de 5 Hz. También las fases de las ondas P y S son claramente observadas con tiempos S-P de 1.5 a 3.0 segundos. Aunado a ello, la duración de coda es menor a los 40 seg. Como se ha mencionado con anterioridad, el origen de estos eventos podría estar asociado a la apertura del conducto principal del volcán [Barboza y Melson, 1990], o a la expulsión de los productos volcánicos, tales como ceniza, gases, material piroclástico, etc. durante la crisis [Sawada, 1994].

En algunos de los casos no fue posible estimar el valor de la frecuencia máxima, debido a que la señal estaba saturada y sólo para algunas componentes fue posible estimar su espectro. De cualquier manera, eso fue tomado en cuenta al momento de promediar los valores de frecuencia dominante de los eventos selectos para caracterizar el periodo de actividad del volcán considerada en el presente estudio en tres fases respecto a la crisis: *a priori*, durante, y *a posteriori*. Los meses que se consideraron como crisis corresponden a noviembre y diciembre de 1998. Es recomendable realizar en trabajos de investigación posteriores, periodos prolongados en cuanto a sismicidad se refiere, ya que nos permite conocer más sobre el comportamiento sísmico relacionado con la actividad explosiva en el volcán. También sería interesante, estimar los espectros de Fourier para las ondas S de cada componente, y estudiar su comportamiento con respecto a la actividad explosiva, para entender más sobre el movimiento de la partícula con ondas S. El presente estudio nos permitió conocer el comportamiento de los valores de las frecuencias dominantes para dos estaciones (PPP y PPX) durante un periodo muy corto (octubre, noviembre y diciembre, 1998; enero, 1999), y relacionarlo con la destrucción del domo que se había formado en el cráter. Sin embargo, sería importante ampliar el periodo de análisis con la finalidad de obtener mayores datos y poder inferir conclusiones más generales en cuanto a la relación existente entre la sismicidad y la actividad explosiva que presentó el volcán Popocatepetl.

El efecto de sitio para las estaciones PPX y PPP no fue estimado en valores numéricos de frecuencia, sin embargo, la diferencia de formas de onda y frecuencias dominantes puede deberse a efectos de trayectoria (ubicación diferencial de las estaciones) o fuente, a pesar de haber sido analizados sólo los eventos seleccionados (localizados dentro del área de diagnóstico). Es importante mencionar que dicha estimación en valores de frecuencia para los efectos de sitio son de suma importancia para la realización de trabajos futuros, ya que ésta influye tanto en la forma espectral como en las frecuencias dominantes.

CONCLUSIONES

El presente estudio toma en cuenta la actividad sísmica registrada en el volcán Popocatepetl, durante la crisis de noviembre y diciembre de 1998, y los meses de octubre (1998) y enero (1999), es decir, un mes antes y un mes después de la crisis (noviembre-diciembre, 1998). Las conclusiones de este trabajo de investigación son las siguientes:

1). Los eventos volcano-tectónicos registrados por las estaciones PPP y PPX para el periodo que considera el presente análisis, conservan los valores propuestos por Valdés (1994), con frecuencias dominantes típicas de 5 Hz y las fases de las ondas P y S claramente identificables con tiempos de fase S-P de 1.5 a 3.0 segundos.

2) Observado *a priori* la crisis: El valor puntual de las frecuencias dominantes mostró un incremento conforme se presentaban los meses de crisis (noviembre-diciembre de 1998). La estación Canario en su componente vertical, PPV, presentó el valor promedio más bajo, 5.7 Hz., con respecto a las otras dos componentes restantes. Para la Estación PPX, se presentaron valores promedio de frecuencias dominantes muy semejantes para sus tres componentes (PPXN = 5.2 Hz; PPXE = 5.3 Hz; PPXV=5.3 Hz). Esto contrasta con los valores estimados para la misma estación pero durante el periodo de crisis. Es necesario decir, que el día 5 de octubre se produjo una explosión en el volcán. El día 17 del mismo mes, se registró una explosión moderadamente grande. Finalmente, el 24 de octubre se presentó una explosión similar a la del 17, pero con un fase intensa de un minuto. El Popocatepetl presentó una actividad muy baja el resto del mes.

3) Observado durante la crisis: El valor de las frecuencias promedio dominantes aumentó considerablemente. La componente PPV mostró un valor promedio de 6.6 Hz, mientras que la PPE fue de 11.8 Hz, y la PPN de 11.2. Para la estación PPX, al igual que para la estación PPP durante la crisis, el valor más bajo estimado de frecuencia promedio dominante fue para la componente vertical (PPXV=6.2). El valor para PPXE fue de 8.9 Hz y para PPXN fue de 8.8 Hz. El día 9 de noviembre se presentó una explosión. Posteriormente, el 19 del mismo mes se registró otra explosión de moderada intensidad, seguida por cinco más de menor tamaño. Estos eventos produjeron una impresionante columna de ceniza de hasta 3 Km de altura. A partir del día 22, a las 13:02 (Hora local), el volcán mostró un incremento en su actividad (Fase de crisis). Fueron detectadas varias explosiones continuas, traduciéndose en un incremento gradual de actividad para el día 23. Esto indicó la existencia de un volumen considerable y activo de lava en el interior del. Sin embargo, estos períodos de actividad estuvieron intercalados con períodos de calma. El día 25 a las 08:10 se presentó una de las mayores explosiones en el volcán desde inicios de su actividad actual. El día 27 se presentaron dos explosiones por la mañana y una por la tarde. EL día 28, la actividad continuó, con explosiones a las 02:42 y a las 10:21 (Hora local). El día 30 del mismo mes ocurrieron 3 explosiones con características similares.

El 1 de diciembre se presentaron 4 exhalaciones con cantidades regulares de ceniza. El 2 de diciembre sólo se presentaron 3 exhalaciones moderadas. Los días 3 y 4 del mismo mes, la actividad del volcán fue baja, presentando solo dos explosiones. El día 5 de diciembre, se presentaron 5 exhalaciones con carácter explosivo, que produjeron columnas de ceniza de hasta 3 Km de altura. El día 6 se produjo una explosión. El 7 de diciembre se presentaron tres explosiones moderadas y dos pequeñas. El día 8 de diciembre, se produjeron 5 explosiones pequeñas que producen fumarolas de ceniza. El 9 se generaron otras dos explosiones. El 10 de diciembre continúa la actividad explosiones fuertes y moderadas. Los días 11 al 16 del mismo mes, la actividad se mantuvo con pocas explosiones. El día 17, se presentó una explosión poderosa, que lanzó fragmentos

incandescentes en la cara norte del volcán. Del 18 al 21 de diciembre, la actividad del volcán fue relativamente baja.

4) Observado *a posteriori*: La componente vertical de la estación Canario presentó un valor promedio de frecuencia dominante de 6.7 Hz, una décima más con su respectivo valor estimado durante la crisis. La componente PPN presentó un valor de 12.4 Hz, y la PPE presentó el valor de 15.3 Hz. Para la estación PPX, se detectó un incremento en el valor promedio de las frecuencias dominantes una vez pasada la crisis en el volcán. De hecho, el valor promedio estimado para PPXV fue el mismo que el registrado *a priori* la crisis (5.3 Hz). Mientras que los valores para las otras dos componentes también experimentaron un decremento (PPPXE = 6.2 Hz; PPPXN = 7.1), con respecto al periodo de crisis. La actividad en el volcán continuó en bajos niveles, aunque presentando pequeñas y moderadas exhalaciones. Los eventos Tipo "A" registrados variaron sus magnitudes entre los 2.0 y 3.0.

EPÍLOGO

¿Por qué el volcán Popocatépetl?

¿Necesidad de huir de las extravagantes y complejas estructuras teóricas del pensamiento geográfico? ¿Problema teórico mal vislumbrado y mejor aún, confundido y transtornado hasta la poca o nula comprensión, tal vez por ignorancia, inocencia o rebelión? ¿Solución *pragmática* a las interminables horas de discusión y debates filosófico y epistemológico de lo que ahora contemplo y gozoso lo deleito en mi cerebro, en mis entrañas y en mis ojos, llamado así, *su pensamiento geográfico*? Estas y muchas otras preguntas podrían ser dirigidas a desenmascarar la esencia del interés científico por desentrañar los misterios de la naturaleza que envuelve el comportamiento de un volcán vivo, activo, vigilante y alerta. Pero todas giran alrededor de un mismo centro: la falaz y denigrante distinción hasta la demencia y el caos de lo *físico* y lo *humano*. Esta concesión, en sumo funesta y oscuramente tentadora, no puede ser considerada como *pensamiento*, sino como aberración. Sin embargo, para fortuna de los seres pensantes, existen diversos *argumentos* y que al parecer, todos tratan de encontrar la verdad mas haya de nuestra voluntad de razonamiento, de creación y de existencia. Nietzsche, trató vehementemente durante los últimos años de su vida de encontrarlo y estrecharlo entre las virtudes de la inteligencia y la razón.

Hablar del volcán Popocatépetl es hablar de una pasión incontrolable, impredecible; la sublimación más noble y racional de la pasiones. Describirlo no sería ni en lo mas mínimo, suficiente ni extenuante. Entenderlo sería tanto como difamar nuestros esfuerzos y lúcida y sensiblemente engañar nuestras pretensiones.

Pero este pensamiento geográfico al cual sucintamente me refiero en estas líneas, es ahora también *mío*. En este momento, más bien, debería yo decir, *nuestro* pensamiento geográfico, y omitir el egoísta y egocéntrico, *tu* pensamiento geográfico. A decir verdad, y debo confesarlo, me gusta mucho la Geografía, tan de diversos pensamientos, divergentes y convergentes hasta la arrogancia, hasta la saciedad más seductora y la discordia más atroz, más visceral, más pura y más bella y expresamente humana.

La aún inevitable incompreensión de la complejidad fenomenológica involucrada en la actividad volcánica, solo por mencionar un problema físico contemporáneo, es una muestra más de nuestros limitados conocimientos sobre el comportamiento de la naturaleza, aunados a nuestras propias e intrínsecas limitaciones. Es por ello que no resulta casual, y en muchos de los casos, prontamente necesario, que tanto filósofos y físicos de todo el mundo hayan escrito tanto sobre la llamada *teoría de incertidumbre*.

Los fenómenos sísmicos y volcánicos, representan ejemplos elocuentes de la dialéctica de la naturaleza. A manera de connotación del materialismo-dialéctico, no es fatuo recordar ahora, que si bien es cierto, Boltzmann dijo alguna vez, con referencia a las ecuaciones electromagnéticas de Maxwell (ecuaciones que explican el comportamiento de un campo electromagnético), "*¿No habrá trazado Dios estos signos?*". V. I. Lenin, 1948, logró conceptualizarlo en las siguientes palabras: "*Tiene el mismo origen que el conocimiento de las cosas existen fuera de nuestra conciencia e independientemente de ella, a saber: el desarrollo de nuestros conocimientos, que demuestra millones de veces a cada hombre que la ignorancia deja sitio al saber cuando el objeto obra sobre nuestros órganos de los sentidos, y al contrario, el conocimiento se convierte en ignorancia cuando descarta la posibilidad de dicha acción*".

No obstante, los esfuerzos realizados por un amplio y nutrido contingente de especialistas de todo el mundo por comprender cada vez mejor el comportamiento espacial y temporal de los fenómenos asociados a la actividad volcánica y sísmica, son cada vez mayores. Nietzsche, sin ser geógrafo, ni geofísico, ni geólogo, y ni tan siquiera pretenderlo, por lo tanto, sería entonces el *capricho más funesto, la peor regresión imaginable, una concesión que puede ser fatal a los fantasmas, terribles pero oscuramente tentadores, del caos y la demencia* [Savater, 1993].

Malcom Lowry, escribió sobre *su* volcán, el Popocatepetl, como si se tratara de su creación con sentimientos, con alma, piel, y uñas, y dedos, y entrañas, con ojos que le permiten ver el mundo, palparlo y *medirlo*, tal vez no con reglas, escuadras, o rayos láser, ni espectros de Fourier, sino con el aliento mismo de su espíritu. Gonzalo Celorio describe en su novela corta, *El velorio de mi casa*, como un verídico orfebre del lenguaje, las intrínsecas pasiones que despierta el estupor volcánico, en Lowry, y en Gonzalo, su nostalgia impregnada de un limón de un limonero que acompaña su tequila la tarde que es sometido al rigor del exilio.

Por su parte, cuarenta y cuatro años antes, Langevin, 1949, respecto a los problemas filosóficos de la Ciencia y de manera muy particular, de la Mecánica Cuántica, ya se refería de la siguiente manera: *“Si la naturaleza no responde con exactitud a nuestras preguntas acerca de un electrón, al cual le atribuimos las características de una partícula de la mecánica clásica, ¿no será demasiada presunción inferir, sin más, que la naturaleza no conoce el determinismo? ¿No sería más justo decir que el planteamiento mismo de la cuestión es desacertado y que, en general, el electrón no puede ser considerado una partícula de la mecánica clásica? Por esta razón, la cuestión no estriba en acusar a la naturaleza, sino en modificar su planteamiento mismo, lo cual, si bien es indudablemente mucho más difícil, en cambio, es mucho más fecundo”*.

El que sabe considerar la historia del hombre en su conjunto como su historia, siente, en una enorme generalización, toda la aflicción del enfermo que sueña con la salud, del viejo que sueña con su juventud, del enamorado privado de su bienamada, del mártir cuyo ideal está destruido, del héroe la noche de una batalla cuya suerte ha estado indecisa y de la cual conserva las heridas y el pesar por la muerte de un amigo. Pero llevar esta suma enorme de miseria de toda especie, poder llevarla y ser, al mismo tiempo, el héroe que saluda, en el segundo día de la batalla, la venida de la aurora, la llegada de la felicidad, puesto que es el hombre que tiene delante y detrás de sí un horizonte de mil años, siendo el heredero de toda nobleza, de todo espíritu del pasado, heredero obligado, el más noble entre todas las antiguas noblezas, y, al mismo tiempo, el primero de una nobleza nueva, de la cual no se ha visto cosa semejante en ningún tiempo; tomar todo esto sobre su alma, lo más antiguo y lo más nuevo, las pérdidas, las esperanzas, las conquistas, las victorias de la humanidad y reunir, por fin, todo esto en una sola alma, resumirlo en un solo sentimiento, esto, ciertamente, debería tener por resultado una dicha que el hombre no ha gozado nunca hasta hoy; la dicha de un dios, pleno de poderío y de amor, de lágrimas y de risas; una dicha que semejante al sol de la tarde, hará don incesante de su riqueza inagotable para verterla en el mar y que, como el sol, no se sentirá plenamente rico sino cuando el mas pobre pescador reme con remos de oro. Esa dicha divina se llamaría entonces humanidad (Nietzsche).

Es claro que poco debo aspirar a una objetividad o a la renuncia absoluta de un apasionamiento, pues como bien dijera Fernando Savater, *pues eso destruiría el mensaje nietzscheano con mayor certeza que cualquier deformación fruto de mi incompetencia o mi arrebato... aquí sólo la subjetividad reúne suficientes garantías de acierto.*

REFERENCIAS

REFERENCIAS

- Arciniega, M., 1997. *Análisis e interpretación del tremor generado por el volcán Popocatepetl a partir de la crisis de diciembre de 1994*. Tesis de Maestría en Geofísica, Instituto de Geofísica, UNAM., México.
- Artyushkov, E., 1979. *Geodinamika*. Ed. Nauka, Moscú.
- Atl, Dr., 1939. *Volcanes de México, La actividad del Popocatépetl*, Ed. Polis, V. 1. México, D. F.
- Auboin, J., et al., 1988. *Précis de Géologie, Tectonique, Tectonophysique, Morphologie*. De. Bordas, Paris.
- Baish, S., 2001. *Seismic waveform attributes before and after the Loma Prieta earthquake: Scattering change near the earthquake and temporal recovery*. Journal of Geophysical Research. Vol. 106. No. B8. pp. 16323-16337.
- Banks, N., 1989. *Apuntes para un curso breve de peligros volcánicos*. IAVCEI.
- Boundal, C., Robin, C., 1989. *Volcán Popocatepetl: Recent eruptive history and potential hazards risk in future eruptions*. IAVCEI Proceedings in Volcanology 1. J.H. Latter (Ed); Volcanic Hazards, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 110-128.
- Brune, J. 1976. *The physics of earthquakes strong motions*. Seismic Risk and Engineering Decisions. Lomnitz, C. y Rosenblueth, E., Elsevier Scientific Publ. Co., Países Bajos, pp. 141-177.
- Burbach, et al., 1984. *Seismicity and tectonics of the subducted Cocos plate*, J. Geophys. Res., 89, 7719-7735.
- Camacho, H., 1925. *Apuntes acerca de la actividad actual del Popocatépetl en relación con la sismología*. An. Inst. Geol. UNAM., México., 2(1-3): 38-60.
- Carrasco, G., 1986. *Geología y Paleomagnetismo del Popocatépetl*. Serie de Investigación, no. 33. Instituto de Geofísica, UNAM.
- Demant, A., et al., 1975. *Las fases del vulcanismo en México: una síntesis en relación con la evolución geodinámica desde el Cretácico*, Rev. Inst. Geol., UNAM, 75, 70-82.

- Díaz del Castillo, B. 1532. *Historia verdadera de la conquista de la Nueva España*, Sepan Cuántos, México.
- Fung, Y., 1965. *Foundations of Solid Mechanics*. Prentice Hall Inc., New Jersey.
- Gastil, et al., 1973. *Evidence for strike-slip displacement beneath the Trans-Mexican volcanic belt*, Stanford Univ. Publ. Geol. Sci., 13, 171-180.
- Gómez, A., 1998., *Análisis geomorfológico del volcán Popocatepetl Escala 1:20 000*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.
- Gutenberg, B., 1951. *Internal Constitution of the Earth*. Dover Publ. Inc., USA.
- Hsu, Hwei P., 1973 *Análisis de Fourier*. Fondo Educativo Interamericano, S. A., USA.
- Husseini, M., et al., 1975. *The fracture energy of earthquakes*. Geophysics J. R. Astr. Soc., Vol. 43, pp. 367-385.
- Jain, V., 1980. *Osnovi Geotektoniki*, Ed. Nauka, Moscú.
- Jonson, et al., 1989. *Tectonics and volcanism in central Mexico: a Landsat Thematic Mapper perspective*, Remote Sens. Envir., 28, 273-286.
- Kanamori, H., et al., 1975. *Theoretical basis of some empirical relations in seismology*. Bull. Seis. Soc. Amer., Vol. 65. pp. 1073-1095.
- Kanamori, H., 1981. *The nature of seismicity patterns before large earthquakes*. Earthquakes Prediction –An international Review, Simpson, D. y Richards P. Maurice Ewing Series 4. American Geophysical Union; pp k1-k19.
- Kosigin, Y., 1983. *Tektonika*. Ed. Niedra. Moscú.
- Landau, L., 1969., *Teoría de la Elasticidad*. Ed. Reverté, México.
- Landau, L., 1979. *Física Kniga I y II*. Nauka, Moscú.
- Langevin, P., 1949. *Obras Escogidas*. Moscú.
- Lapedes, D., Editor 1976. *Dictionary of Scientific and Technical Terms*. McGraw-Hill, USA.
- Lermo, J., et al., 1995. *Características espectrales de temblores Tipo-A, Tipo-B y tremores asociados a la erupción del volcán Popocatepetl, México, en diciembre de 1994*. CENAPRED, México, D. F.

- Lomnitz, C., 1994. *Fundamentals of Earthquake Predictions*. Wiley, John & Sons, Incorporated
- Lenin, V. I., 1948. *Materialismo y empoiriocriticismo*. Lenguas Extranjeras.
- Love, A., et al., 1994. *A treatise on the Mathematical Theory of Elasticity*. Cuarta Edición, Cambridge University Press, Dover Publications, New York.
- Lugo, J., 1984. *Geomorfología del Sur de la Cuenca de México*. Serie Varia, UNAM, México.
- Malone, S., 1982. *Earthquakes: Observation, theory and interpretation*. H. Kanamori, E. Bochi. Editores.
- Mammerickx, et al., 1982. *Northern East Pacific Rise: Evolution from 25 m. y B. P. to the present*, J. Geophys. Res., 87, 6751-6759.
- Martínez B. A., 1998. *Atenuación de ondas coda en el volcán Popocatepetl*. Tesis de Maestría en Geofísica, Instituto de Geofísica, UNAM., México.
- Molnar, P., et al., 1969. *Tectonics of the Caribbean and Middle American region from focal mechanism and seismicity*, Geol. Soc. Am. Bull. 80, 1639-1684.
- Mooser, F., 1972. *The Mexican volcanic belt: structure and tectonics*, Geofis. Int., 12, 55-70.
- Mooser, F., et al., 1996. *Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla. Estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos*. Comisión Federal de Electricidad (1939-1996), México.
- Nikonov, A., 1982. *Zemletriasenia*. Ed. Nauka. Moscú.
- Nixon, G. T., 1982. *The relationship between Quaternary volcanism in central México and the seismicity and structure of subducted oceanic lithosphere*, Geol. Soc. Am. Bull., 93, 514-523.
- Palacios, D., 1996. *Recent geomorphologic evolution of a glaciovolcanic active stratovolcano: Popocatepetl (Mexico)*. Geomorphology, 16 p. 319-335.
- Pardo, M., 1993. *Características sismotectónicas de la subducción de las placas de Rivera y Cocos en el sur de México*. Ph. D. Thesis, Instituto de Geofísica, UNAM.
- Pardo, M., Suárez, G., 1993. *Shape subduction geometry of the Rivera plate beneath the Jalisco block in western México*. Geophys. Res. Lett., 20: 21, 2391-2394.

- Press, W. H., 1986. *Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press.
- Quass, R., et al., 1997. *El monitoreo y la vigilancia del volcán Popocatepetl*. CENAPRED, México, D.F.
- Robin, C., et al., 1987. *A gigant bezymianny-type event at the beginning of modern volcan Popocatepetl*. Journal of Volcanology and Geothermal Research. No. 31. Netherlands.
- Sabater, F., 1993. *Nietzsche*. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.
- Siebe, Claus., et al., 1996. *Repeated volcanic disasters in Prehispanic time at Popocatepetl, central Mexico: Past key to the future?* Geology, May 1996; v. 24; no. 5; p. 399-402.
- Sing, et al., 1991. *Source time functions of large Mexican subduction earthquakes, morphology of the Benioff zone, age of the plate, and their tectonic implications*, J. Geophys. Res., 96, 21497-21502.
- Singh, S. K. and M. Pardo., 1993. *Geometry of the Benioff zone and state of stress in the overriding plate in Central Mexico*, Geophys. Res. Lett., 20, 1483-1486.
- Soler, A., Martin Del Pozzo A., 1989. *Vulcanology of Popocatepetl volcano, México*. New Mexico Institute of Mining & Technology. Bulletin 131, 249.
- Steysi, F., 1972. *Fizika Zemli*. Ed. Mir. Moscú.
- Suárez, et al., 1986. *Tectonic interpretation of the Trans-Mexican Volcanic Belt-Discussion*. Tectonophys., 127, 155-160.
- Shurbet, et al., 1973. *Tectonic interpretation of the Trans-Mexican volcanic belt*, Tectonophys., 101, 159-165.
- Urquizú Mercè., Correig, Antoni M., 1999. *On the spectral peaks of volcanic tremor at Stromboli*. Phys. Earth Planet. Inter., 110 (1999) 247-261.
- Valdés, C., González G., 1994. *Sismicidad del volcán Popocatepetl, noviembre 1993 a marzo 1994.*, Reporte Interno 94-2. Instituto de Geofísica, UNAM, México, D. F.
- Valdés, C., et al., 1995. *Sismicidad del volcán Popocatepetl a partir del 21 de diciembre de 1994 al 30 de marzo de 1995*. CENAPRED, México D. F.
- Vlodavets, V. 1979. *Vulkani Zemli*. Ed. Nauka. Moscú.

SITIOS WEB

www.igeofcu.unam.mx

Instituto de Geofísica, UNAM.

www.ssn.unam.mx

Servicio Sismológico Nacional, UNAM.

www.cenapred.unam.mx

Centro Nacional de Prevención de Desastres

www.usgs.gov

United States Geological Survey

www.ied.msu.ru

Universidad Estatal de Lomonosov

www.ugm.org.mx

Unión Geofísica Mexicana

www.iris.edu

Incorporated Research Institutions for Seismology

phys-geophys.colorado.edu/geophysics.html

University of Colorado, Boulder

www.ac.msk.ru

Academia Rusa de Ciencias

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS

Debo dejar constancia y hacer patente mis más sinceros agradecimientos y reconocimientos a las siguientes personas e instituciones varias que sin su apoyo hubiera sido imposible la realización y culminación de este proyecto:

Al Dr. Cinna Lomnitz, asesor de mi tesis de Licenciatura, por su apoyo académico incondicional, y su sincera amistad desde hace algún tiempo; por sus pláticas siempre amenas, divertidas y enriquecedoras y por despertar en mí, una infinita admiración por la sismología y por usted.

A todo el personal del Departamento de Sismología, por su apoyo, estudiantes e investigadores, así como a Patricia Medina y Adriana López por sus asesorías certeras y su siempre solícito apoyo secretarial. Al Dr. David Novelo por su amistad y sus siempre críticos comentarios a mi trabajo de investigación. Al Dr. Carlos Valdés por sus comentarios y críticas. Al Dr. Sri Krishna Sing, Jefe del Departamento de Sismología del IGF de la UNAM; al Dr. Raúl Valenzuela Wong; al Dr. Takeshi Mikumo; al Dr. Carlos Mortera Gutiérrez; al Dr. Jaime Yamamoto; al Dr. Javier Pacheco Alvarado, Jefe del Servicio Sismológico Nacional; a la Dra. Wallis Huton; y a todos los estudiantes del Posgrado que me auxiliaron y me brindaron su apoyo: Dr. Miguel Santoyo; Mtro. Arturo Iglesias; Ing. Sarita Franco; Mtro. Luis Terán; Mtro. Víctor Manuel Cruz; Mtro. David Escobedo e Ing. Caridad Cárdenas.

Al personal del Servicio Sismológico Nacional, en especial a su flamante Jefe de Sistemas, Ing. Jesús Pérez Santana por su apoyo de siempre y sus pertinentes y acertados consejos. Al los ingenieros Tan Yi Lee, Jorge Estrada, Arturo Cárdenas, José Antonio Santiago, Casiano Jiménez, por su apoyo, amistad y confianza. Así

mismo, al personal del CENAPRED, en especial a la Mtra. Alicia Martínez Bringas por su apoyo.

Quiero agradecer infinitamente al Dr. Ambrosio Velasco Gómez, Director de la Facultad de Filosofía y Letras, por su apoyo sincero, amable e incondicional en la realización de mis inquietudes académicas y su amistad de siempre. Al Dr. Miguel Soto Estrada, Secretario General de la Facultad de Filosofía y Letras, por su amistad, su apoyo, y su contagioso interés, hasta la temeridad, por la historia e historiografía de México. Al Lic. Samuel Hernández, Secretario Administrativo, por todas las facilidades brindadas durante mi carrera universitaria y su amistad. Gracias a todo el personal de la Dirección y de la Secretaría General de la Facultad de Filosofía y Letras, secretarial y administrativo, por su dedicación, entereza y apoyo solícito en todas mis tareas dentro y fuera del H. Consejo Técnico de la Facultad. Al Lic. Eduardo Pérez Torres, Coordinador de la Licenciatura en Geografía, quien me brindó su apoyo en todo momento por medio de su amistad sincera durante los cinco años de mi carrera universitaria.

De igual forma, agradezco sinceramente, todo el apoyo brindado de manera atenta y fina, del Dr. José Narro Robles, Coordinador General de la Reforma Universitaria, ahora flamante Director de la Facultad de Medicina de la UNAM. Mis más sinceros agradecimientos, Dr. Narro.

Al Mtro. Gonzalo Celorio Blasco, por haber pasado juntos horas *interminables* de aprendizaje literario y de política universitaria, durante nuestras sesiones de trabajo en el seno del Consejo Técnico de la Facultad de Filosofía y Letras, ora Informes de la Dirección, ora Comisiones Dictaminadoras, ora Asuntos Generales, y en general, muchas gracias a todos los funcionarios de la Facultad, Consejeros Técnicos, alumnos y académicos que me hicieron enamorarme más y más de las letras, las artes y las humanidades.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

A mis sinodales y revisores de tesis, amigos entrañables, Dr. Juan Carlos Gómez Rojas, por enseñarme que la Geografía Cultural es esencial en nuestras vidas, por su amistad incondicional y apoyo de siempre; Dr. José Lugo Hubp, por haberme iniciado en las apasionantes ciencias de la Geomorfología, y por haberme motivado en la venturosa experiencia del idioma ruso; Dr. José Juan Zamorano Orozco, por enseñarme siempre que la cartografía es también, además de una flamante y rigurosa ciencia, un arte maravilloso; y Dr. Lorenzo Vázquez Sélem, por mostrarme que la dedicación y la plena convicción en las Ciencias de la Tierra, es la cantera de muchos éxitos y satisfacciones. Y aunque sin ser asesora o sinodal de este trabajo, pero sin lugar a dudas, una mujer muy especial, agradezco a la Dra. Irasema Alcántara Ayala, por brindarme la oportunidad de conocer, por medio de la literatura, de la poesía, de la razón y sin razón, los mecanismos físicos virtuosamente apasionantes, de generación lineal y no lineal, de los procesos gravitacionales que tanto le gustan, y su relación tácita con las señales sísmicas que estos generan al darse vida inminente sobre una ladera inestable.

Al Ing. Carlos Slim Helú, Presidente Honorario Vitalicio de Grupo Carso, por su gran ejemplo de dedicación y trabajo arduo. Por enseñarme que el arte y la pasión por ella es parte esencial de nuestra vida. A su esposa, QEPD, Soumaya Domit de Slim, por mostrarme que la vida es única y debe vivirse con alegría, fe, esperanza y amor. Agradezco profundamente los dignos y flamantes apoyos de la Fundación TELMEX.

Al Dr. Diego Valadés Ríos, Director del Instituto de Investigaciones Jurídicas, por sus amables invitaciones a los diversos eventos sobre materia legislativa y de Derecho, con quien tuve el placer de compartirlos.

Al la Mtra. Martha Enriquez, Coordinadora de Programas Estudiantiles de la Dirección General de Divulgación de la Ciencia, *Programa Jóvenes hacia la Investigación*, por sus apoyos desde inicios de mi carrera universitaria, en las tareas de difusión de la ciencia y mi activa participación en el programa. A la Mtra. Isabel Noni Lastra, la Lic. Miriam y la Srita. Rosi, por su amistad de varios años atrás y apoyo fraterno.

Y en general, a toda la comunidad de la Facultad de Filosofía y Letras, al Departamento de Sismología y del Servicio Sismológico Nacional, adscrito al Instituto de Geofísica de la UNAM, por ser mi segundo hogar, tanto de conocimientos, conciencia, amor, fe y ciencia. Al Mtro. Mario Esquivel Mota, quien me ha enseñado el valor de la vida y el ejemplo del esfuerzo y la dedicación.

Gracias Coromoto, que con tu cariño me has considerado una persona especial en la vida. A toda la comunidad española en México y a mi familia Canaria, que aunque estemos lejos, Tenerife de México, México de Tenerife, los llevo siempre en mis entrañas y en mis pensamientos.

A mis amigos geógrafos de siempre, Lorena, Carlos, Miriam, Carlitos, Thamara, Álvaro, Humberto, Raúl, Octavio, Zaire, Enrique, Valeria, Manolo, Marilú... todos, todos mis grandes amigos que se dedican, día con día, al estudio de nuestra disciplina.

Gracias mamá-Mtra. Estela, por tus ejemplos, por tu dedicación al trabajo, por ser como eres, y por haberme dado la vida. Gracias abuela Mtra. Pilar, por ser la guía espiritual de mi vida y por mostrarme el camino del trabajo arduo, lleno de pasión, dedicación y fortaleza. Eres mi ejemplo. Gracias Dr. Rabindranath, por compartir conmigo sueños, desvelos, alegrías, lágrimas, tristezas y esperanzas; eres mi hermano del alma. Gracias, Rafael, por ser parte sustancial y medular de nuestra pequeña familia; eres mi hermano del corazón. Gracias papá, dondequiera que estés...

Finalmente, quiero agradecer a ultranza y sin escisión alguna, a nuestra Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme ser parte de su sangre. Por permitirme crecer y ser parte de un sólo espíritu universitario fundamentado en el amor y el servicio a la Patria.

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Yahir G. García López

Yahir G. García López
Instituto de Geofísica, Departamento de Sismología, UNAM.
Consejero Técnico, Facultad de Filosofía y Letras
Tribunal Universitario, UNAM.

Tfno: (+52) 622 41 34

ICQ No. 98078832

Cel: 044 55 26 95 98 22

E-mail: yahir@tonatiuh.igeofcu.unam.mx

yahir@geofisica.unam.mx

Me dueles.

Mansamente, insoportablemente, me dueles.

Toma mi cabeza, córtame el cuello.

Nada queda de mí después de este amor.

*Entre los escombros de mi alma búscame,
escúchame.*

*En algún sitio mi voz, sobreviviente, llama,
pide tu asombro,
tu iluminado silencio.*

*Atravesando muros, atmósferas, edades,
tu rostro (tu rostro que parece que fuera cierto)
viene desde la muerte, desde antes
del primer día que despertara al mundo.*

*¡Qué claridad tu rostro, qué ternura
de luz ensimismada,
qué dibujo de miel sobre hojas de agua!*

*Amo tus ojos, amo, amo tus ojos.
Soy como el hijo de tus ojos,
como una gota de tus ojos soy.
Levántame. De entre tus pies levántame, recógeme,
del suelo, de la sombra que pisas,
del rincón de tu cuarto que nunca ves en sueños.
Levántame. Porque he caído de tus manos
y quiero vivir, vivir, vivir.*

Jaime Sabines

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

