VNIVERSIDAD NACIONAL
AVTÓNOMA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-691

SR. FELIPE DE LA ROSA MORENO
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. Carlos M. Valdés González y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

ANÁLISIS DE PATRONES SÍSMICOS ASOCIADOS A EXHALACIONES Y EXPLOSIONES DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL

	RESUMEN
	INTRODUCCIÓN
I	**VULCANISMO**
II	**EL VOLCÁN POPOCATÉPETL**
III	**RED DE MONITOREO INSTRUMENTAL**
IV	**HERRAMIENTAS NECESARIAS PARA EL ANÁLISIS ESPECTRAL**
V	**CLASIFICACIÓN DE EVENTOS SÍSMICO OBSERVADOS EN EL VOLCÁN POPOCATÉPTL**
VI	**INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES**
	BIBLIOGRAFÍA
	APÉNDICES
	GLOSARIO

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D. F., a 27 de mayo de 2002
EL DIRECTOR

ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR*gtg

Agradecimientos

A mis padres, primero, porque les debo la vida; la ayuda que siempre me han brindado es invaluable; el amor y la educación que me otorgaron son la clave de los éxitos que, paso a paso, voy cosechando y mi carácter de lucha por la superación lo aprendí de ellos.

A mi esposa y compañera, por vivir, por levantarme en los momentos más difíciles, por toda esa paciencia que siempre me ha mostrado, por ese amor que me ofrece día a día y sobre todo por darme un gran motivo para superarme siempre, mis dos hijos.

A mis hermanas Ely, Nancy y Mary, que me han brindado algo más que amor de hermanas y ha sido amistad y respeto. A mis sobrinos Héctor, Nayeli, Luis, Neftalí, Juan, Yoalli y Karen. También a mis cuñados Héctor y Juan que me han enseñado que en la lucha por la familia nunca se deben escatimar esfuerzos.

A mis Suegros y a mis cuñados Vero, Adrián y Sergio sobre todo por darme su confianza y permitirme entrar en su núcleo familiar como un integrante más.

Un agradecimiento muy especial para mis dos asesores, Dr. Carlos Valdés González y el M.C. Carlos Gutiérrez Martínez. por compartir conmigo sus conocimientos, por su dedicación y por todas sus enseñanzas, pero sobre todo, por la amistad que me han brindado.

Al Ing. Enrique del Valle, al Dr. Luis Quintanar, al Dr Martín Cardenas, al Dr Servando De la Cruz y a la Doctora Ana Lilian Martín del Pozzo, por sus atinados comentarios.

A la UNAM, y muy especialmente a la Facultad de Ingeniería por ayudarme a crecer profesionalmente.

Al Instituto de Ingeniería por el apoyo económico que me otorgó durante el desarrollo de este proyecto.

Al CENAPRED, por permitirme desarrollar este proyecto en sus instalaciones y por el apoyo otorgado a lo largo del mismo, en especial al área de Riesgo Volcánico, conformada por Alicia Martínez, Ángel Gómez, Gerardo Jiménez e Hidromiro Romero que me han dado su amistad y que me ayudaron con sus comentarios, además de aportar información de gran importancia para el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeros de cubículo y mis amigos César Honorio y M.I. Alonso Echavarría que me han soportado durante un buen rato, pero también han hecho amena mi estancia en el Cenapred.

Existen muchas personas que me han alentado, pero me sería imposible mencionar a cada una, por esta razón, hago un reconocimiento especial a cada una de ellas pues un consejo nunca está de más y al contrario nos permite ser mejores día con día.

Por último Gracias a "Don Goyo" (Popocatépetl) por permitirme conocer un poco de su complicada, pero interesante actividad.

Resumen

Existe un peligro latente para la población asentada en los límites del estado de México, y los estados de Morelos y Puebla, debido a la reactivación del volcán Popocatépetl a partir de diciembre de 1994. Para evitar daños mayores en las poblaciones cercanas al coloso (incluso para ciudades relativamente distantes del volcán, como el D.F. y la ciudad de Puebla, donde existe la posibilidad de afectación por caída de ceniza) y con el propósito de aminorar el riesgo asociado a la actividad volcánica, se evalúan aquellos parámetros mediante sistemas de monitoreo y observación de campo que permiten identificar los distintos niveles de actividad.

Se presenta un estudio de los eventos sísmicos detectados en la estación Canario componente vertical (PPPV) ubicada sobre la ladera norte del Popocatépetl a 4170m de altura, latitud N 19.0412 y longitud W 98.6280. Se reportan los resultados del análisis de la sismicidad asociada con algunas emisiones de ceniza de tamaño regular y con eventos explosivos de magnitud considerable.

El presente estudio tiene por objetivo lo siguiente:

1) Identificar y clasificar los diferentes tipos de eventos sísmicos del volcán Popocatépetl
2) Determinar si existe algún patrón o patrones de sismicidad que indiquen la proximidad relativa de explosiones o emisiones de ceniza importantes

La clasificación de estos eventos se basa en la forma de onda de cada señal registrada y su envolvente carácterística, con una amplitud mayor a 15 mm y se apoya del análisis espectral (espectro de amplitudes y el espectrograma) para definir el comportamiento de las señales en el dominio de las frecuencias; en un periodo de un mes (15 días antes de una emisión o explosión importante y quince días después de la misma) con la intención de pronosticar algún evento a corto plazo.

Se obtuvieron resultados importantes sobre ésta clasificación, que dejaron ver que existen cinco familias de eventos: Los eventos tipo A o vulcanotectónicos, las exhalaciones que a su vez contienen 7 tipos de señales diferentes (nombrados tipos 1 al 7), los derrumbes, las explosiones y los tremores. También se determinaron los patrones de ocurrencia de los eventos sísmicos para siete meses distintos; junio y diciembre de 1997, enero, noviembre y diciembre de 1998, diciembre del 2000 y enero del 2001 en los cuales el volcán presentó un incremento en su actividad, concluyendo ésta con una emisión de ceniza o explosión de dimensiones importantes.

En conclusión, de los 7 tipos de exhalaciones características identificadas, se observó que 3 de ellas, con menor ocurrencia relativa (tipo 5, tipo 6 y tipo 7) se muestran como precursoras, en ocasiones combinadas con el tremor armónico (T1) y siempre con eventos vulcanotectónicos Tipo A. Estas señales pueden correlacionarse entre sí, permitiendo identificar los patrones sísmicos precursores y por lo tanto la proximidad, con alta probabilidad, de un evento importante.

Introducción

Los terremotos no son las únicas manifestaciones de la actividad interna de la Tierra. Las erupciones volcánicas proporcionan la prueba más espectacular de que en el interior de nuestro planeta se alcanzan temperaturas tan altas que, por lo menos localmente, las rocas del manto pasan al estado fundido.

El vulcanismo es una de las manifestaciones más notables de la dinámica interna de la Tierra; es por eso que las causas que lo provocan han despertado enorme curiosidad científica pues, así como impresiona, también puede ser motivo de admiración o temor por la grandeza de sus fenómenos y de los desastres que ocasiona, ya que desgraciadamente son cuantiosas las pérdidas humanas y económicas que se llegan a derivar de las erupciones volcánicas.

"Las erupciones volcánicas se encuentran entre los desastres naturales más espectaculares y también entre los más temidos. Otras formas de violencia tales como las inundaciones los huracanes, los incendios, las tormentas y los sismos han sido responsables de grandes perdidas económicas y de vidas humanas, pero los volcanes se encuentran entre los más preocupantes debido a los efectos cataclísmicos y a varias erupciones muy notables ocurridas en el curso de la historia." [1]

México se encuentra situado en una región con importante actividad volcánica; de los casi 3000 volcanes que tiene el país, 22 son considerados activos, la mayoría ubicados a lo largo del paralelo 19°. Muchas poblaciones importantes están ubicadas a lo largo del eje volcánico y se han asentado ahí debido, entre otros factores, a la calidad de los suelos y el clima. Por eso, es necesario conocer ampliamente la historia de los volcanes y mantener una vigilancia instrumental constante.

---

1 Valdés C. et al. 1995, *Sismicidad del volcán Popocatépetl*, P 130

Un ejemplo real de riesgo lo representa el volcán Popocatépetl, cerca del cual se ubican numerosos asentamientos humanos e industriales. "Tres estados colindan con este volcán México, Morelos y Puebla; por lo que una erupción del Popocatépetl podría afectar, potencialmente, a unos 20 millones de personas, casi una cuarta parte de la población total del país, lo que provocaría un fuerte impacto económico."[2]

El proyecto que a continuación se desarrolla nace en el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) ante la problemática que resulta de la reactivación del volcán y con el propósito de prevenir a la población ante un incremento mayor en la actividad del coloso. Para tal fin se utilizan las tres funciones sustantivas con las que se cuenta en Cenapred, desde sus inicios que son la Investigación, la Capacitación y la Difusión.

Para ello la Dirección General de Protección Civil (DGPC), el CENAPRED y Protección Civil trabajan en conjunto con institutos de investigación de la UNAM, para capacitar y prevenir a la población ante un proceso eruptivo de grandes dimensiones.

Se debe hacer mención de que a lo largo de este trabajo se utiliza el término exhalación, el cual se aplica en artículos y varios reportes relativos al Popocatépetl a partir de 1994. Para una mejor comprensión se debe decir que la exhalación es una señal sísmica que se caracteriza por estar asociada a emisiones de gas o de ceniza. Analíticamente se caracteriza por tener un rango de frecuencias variable, aunque normalmente se mantiene en las bajas frecuencias en el intervalo de 1 a 5 Hz. (Servando De la Cruz comunicación Personal, octubre 2002). Otros autores utilizan el término erupción para este tipo de eventos, no obstante su reducida cantidad de energía liberada y sus emisiones con poca altura.

En el presente trabajo, se reportan los resultados del análisis de la sismicidad asociada con algunas exhalaciones de gran tamaño o con un evento explosivo de magnitud considerable.

Las erupciones seleccionados ocurrieron el 30 de junio y 24 de diciembre de 1997, 1° de enero, 23 de noviembre y 24 de diciembre de 1998, 18 de diciembre del 2000 y 22 de

[2] *Idem*

enero del 2001, se clasificaron y analizaron los eventos sísmicos ocurridos, quince días antes y quince días después de la erupción.

"A lo largo de su historia, el Popocatépetl ha mostrado un amplio espectro en formas de actividad eruptiva. En términos generales puede decirse que en el pasado, ese volcán ha producido numerosas erupciones de carácter menor y algunas mayores. De las categorías mayores persisten evidencias geológicas en forma de depósitos volcánicos, que permiten inferir muchos de los aspectos de la naturaleza del Popocatépetl y de sus erupciones."[3]

Planteamiento de la Hipótesis

Es necesario considerar que el incremento en la actividad de un volcán se ve reflejado con claridad en diversos parámetros, principalmente en la sismicidad, por lo que se considera que es el mejor indicador de los cambios ocurridos en el interior del mismo. En la actividad sísmica volcánica es común observar diferentes grupos de eventos que son semejantes tomando en cuenta sus formas de onda y el tipo de envolvente que presentan.

Por lo anterior, es posible plantear que un volcán tiene un patrón de ocurrencia en sus eventos sísmicos en intervalos de tiempo que aún no podemos precisar; que los eventos sísmicos pueden ser clasificados en familias donde las características de forma de onda (en el dominio del tiempo) y características espectrales (en el dominio de las frecuencias) sean semejantes y la existencia de una o varias familias de eventos sísmicos como precursoras de una actividad mayor.

[3] Macias et al, 1995 *Volcán Popocatépetl*

Objetivo del proyecto:

- Identificar y clasificar los diferentes tipos de eventos sísmicos del volcán Popocatépetl.
- Determinar si existe algún patrón o patrones de sismicidad que indiquen la proximidad relativa de explosiones o erupciones importantes, sobre todo aquellas que impliquen la emisión de volúmenes considerables de ceniza.

En el Capítulo I se presenta una breve introducción acerca de las causas que provocan el vulcanismo así como la clasificación de los volcanes en función de su morfología y de los tipos de erupción que pueden presentar.
El capítulo II es un breve resumen acerca de los volcanes activos en México así como la actividad eruptiva del Popocatépetl y los peligros que éste representa para las poblaciones que se asientan en sus alrededores e incluso en las ciudades que se encuentran a distancias mayores, pero susceptibles de sufrir algún daño debido a una erupción mayor.

En el Capítulo III se explican las diferencias entre riesgo y peligro (o amenaza). También se analiza la importancia del monitoreo de un volcán y procedimientos que hasta la fecha se utilizan para tener información precisa acerca de la actividad volcánica.

El Capítulo IV ubica al lector en el estudio que se debe hacer de una señal, desde que se obtiene la serie de tiempo en forma digital hasta el análisis en el dominio de las frecuencias. Otro punto de interés es acerca de los parámetros necesarios para acondicionar una señal, pues de lo contrario se puede caer en una mala interpretación de los eventos sísmicos.

El capítulo V trata, primeramente, los tipos de clasificaciones de eventos sísmicos observados en otros volcanes; después se explica, de manera detallada, una nueva clasificación, basada en la forma de onda característica, sobre todo hecha para eventos conocidos como exhalaciones o por otros autores explicados como eventos tipo B. Además, se consideran eventos tales como los vulcanotectónicos, las explosiones los derrumbes y los tremores. Se presentan los resultados del análisis espectral de grupos de señales ocurridas en los periodos de interés, donde se determinan los picos espectrales

característicos que cada familia presenta, es decir, la tendencia de cada familia hacia algunos picos preferenciales. Este estudio no sólo se basa en el espectro de la señal, sino también se basa en el espectro evolutivo de la misma, mejor conocido como espectrograma.

En el Capítulo VI se estudia la ocurrencia de las señales sísmicas en el tiempo, para un periodo de quince días previos, así como quince días posteriores a un evento importante. Con este análisis se busca determinar el patrón sísmico a corto plazo, que representa la actividad ocurrida en cada periodo estudiado, para posteriormente explicar la comparación entre los patrones sísmicos identificados.

Como antecedente existen algunos estudios, que consideran el análisis de los eventos de periodo largo (conocidos también como tipo B o exhalaciones) ocurridos en el volcán Popocatépetl, aunque se debe aclarar que cada uno recurre a diferentes esquemas de análisis, sin embargo todos ellos buscan caracterizar las etapas previas a eventos eruptivos importantes, a continuación se presenta una breve descripción de cada uno de ellos.

Un estudio basado en una red de 22 instrumentos de banda ancha y su análisis muestra la relación entre el tipo de erupción observada y la firma que caracteriza a las diferentes señales sísmicas Alejandra Arciniega (2002). Hace un análisis de señales de periodo largo y otras que en el estudio se nombraron de periodo muy largo, además del tremor, y busca una relación entre el posible mecanismo que las produce. Concluye que los eventos Lp y el tremor se caracterizan por tener un contenido de frecuencias similar y trata de encontrar una relación con los procesos eruptivos como emisiones de gases y cenizas.

Alejandro Huidobro (2000) centra su análisis en la erupción del 21 de diciembre de 1994. Tiene como objetivos principales monitorear y analizar los eventos tipo B (periodo largo) y los tremores volcánicos durante un año para observar los posibles cambios en amplitud y frecuencia dominante. Hace un análisis de la distribución espacial y temporal de los eventos tipo A y B antes, durante y después de la crisis de 1994. Posteriormente, analiza un cambio temporal en la atenuación de las ondas de coda; hace referencia a una clasificación

elaborada para los eventos tipo B, mismos que agrupa en tres tipos: Ba, Bm, Bb, que son de alta, media y baja frecuencia, respectivamente.

Miriam Ortiz (2001), hace un estudio de los eventos tipo B o de periodo largo que han precedido a fuertes explosiones y su objetivo principal es aprovechar la información que estos eventos Lp arrojan respecto de la prevención de periodos explosivos. El estudio consiste en hacer un análisis, del comportamiento de las frecuencias pico obtenidas de los eventos Lp's registrados en estaciones de periodo corto; este análisis se hace para el año de 1998 durante el cual ocurrieron siete explosiones importantes.

Capitulo I

I. Vulcanismo

I.1 Definición

La palabra *volcán*, deriva de Vulcano, antiguo Dios del Fuego sin embargo es preciso hacer referencia al uso polémico de los términos volcanismo - vulcanismo, vulcanología - volcanología etc., Ambas raíces *(vol y vul)* son idiomáticamente correctas.

"Un volcán es una grieta o abertura que comunica con el interior, a través de la cual hacen erupción en superficie flujos de *lava*, corrientes de material incandescente pulverizado o ráfagas explosivas de gases y cenizas volcánicas."[4] El origen del interés por los volcanes está seguramente en el temor reverencial ante la energía desatada en una *erupción*. La grandiosidad del fenómeno se acentúa por que frecuentemente se asocia con tormentas y rayos, pues la columna de volátiles y cenizas que se eleva del cráter y se recarga de electricidad, provocando luminosos relámpagos y fuertes descargas.

La *Vulcanología* surge como una necesidad del hombre de poder explicar los fenómenos físicos que se observan y actualmente es una rama de la Geofísica que se apoya en estudios de sismología, gravimetría, radiactividad, magnetismo y geoquímica mediante los cuales se conoce la naturaleza de la energía interna del planeta.

I.1.1 Tectónica de placas

La tectónica de placas, es la teoría más aceptada y que además ha revolucionado las ideas sobre la dinámica interna de la Tierra, a tal grado que podemos comprender de manera más clara los fenómenos geológicos como los sismos y volcanes.

De acuerdo con esta teoría, la superficie de la Tierra está formada por placas rígidas a manera de rompecabezas (figura. I.1) que "flotan" sobre un manto plástico y

[4] Arthur Holmes, *Geología Física*

caliente en constante movimiento. Estas placas rígidas tienen miles de km^2 de área y en promedio 100 Km de espesor. Debido a su constante movimiento, interaccionan en sus orillas y en ciertos puntos y pueden dar lugar a complejas distribuciones de presiones y tensiones entre placas vecinas. El modelo de la tectónica de placas asume que la *litosfera* se divide en dos tipos de placas, unas que tienen movimiento relativo y otras que son fijas; la velocidad de las placas es del orden de algunos centímetros por año. A lo largo de los límites de placa ocurren la gran mayoría de los sismos, las erupciones volcánicas y el crecimiento de montañas.

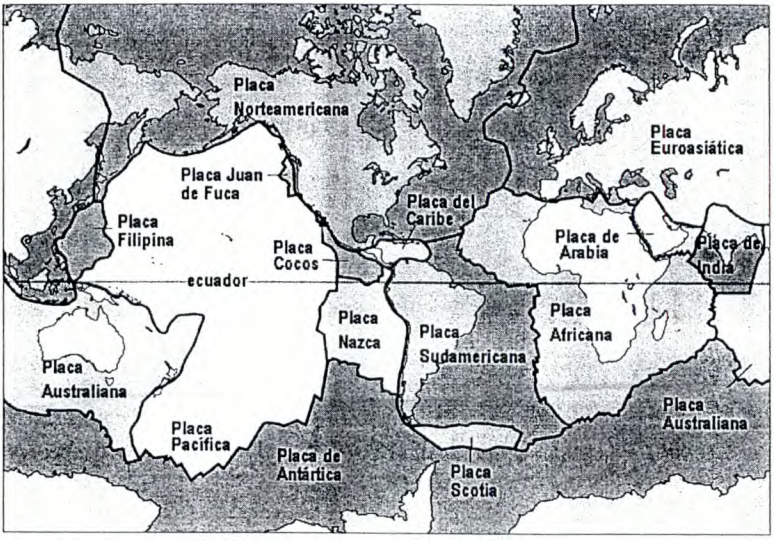


Figura I.1 *Se observa el total de las placas tectónicas que conforman el planeta tomada de la Web de Volcanes, (2001)*

Aunque las *placas* se mueven muy lentamente, a través de millones de años han llegado a presentar espectaculares consecuencias, como la formación de la Cordillera de los Andes, los Montes Himalayas, etcétera.

La litósfera, que es la capa más externa de la Tierra, es quebradiza. Por esto, al chocar, separarse, cambiar de dirección o rozarse una placa tectónica con otra, se deforma y rompe ocasionando los temblores.

En las *dorsales oceánicas* las placas divergen y constantemente se está formando piso oceánico (figura. I.2), de ahí las causas del crecimiento del cuerpo de las placas. Como el aumento de piso oceánico es constante, existe el efecto contrario en el lado opuesto donde la placa se está consumiendo en la zona llamada *Trinchera*, al efecto donde la superficie de la placa desciende debajo de otra en el interior de la Tierra se le llama proceso de *Subducción* (figura. I.3), por lo tanto en la *trinchera oceánica* es donde dos placas tectónicas convergen y una desciende debajo de la otra.

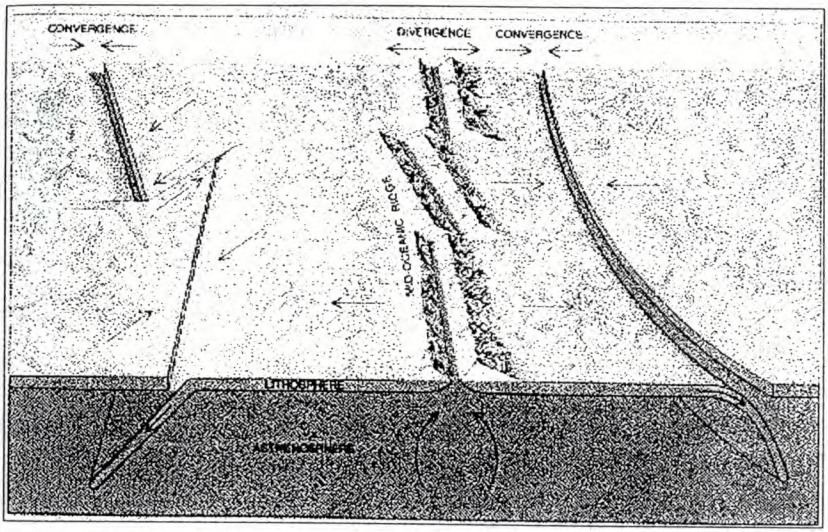


Figura. I.3 *Dorsales oceánicas, tomada de Selecciones de Cientific American*

Al moverse una *placa*, ésta se sumerge bajo la vecina, la acción produce un fuerte calentamiento en la zona de subducción y por ende puede producirse vulcanismo, además de que siempre que exista una zona débil en la corteza terrestre el magma tiende a salir, lo que provoca una erupción.

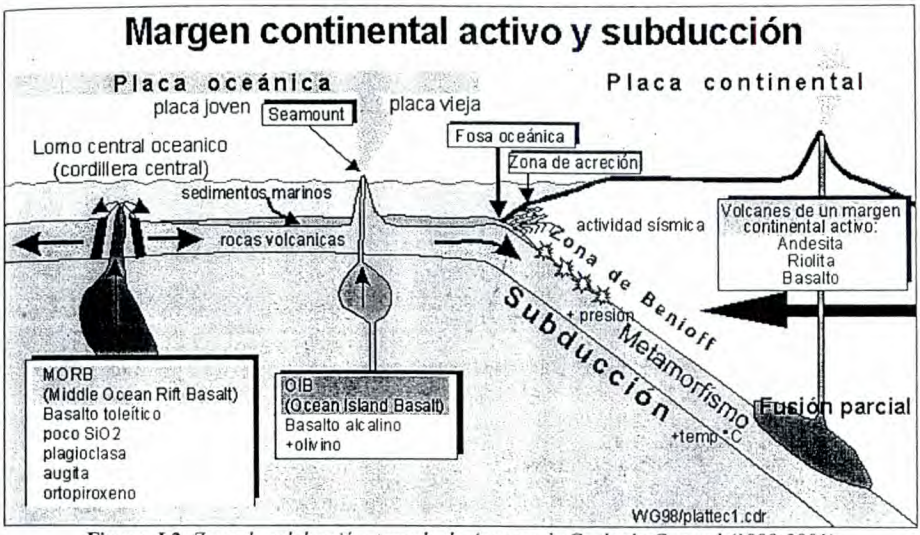


Figura. I.2 *Zona de subducción, tomada de Apuntes de Geología General (1999-2001)*

Es precisamente en el *límite entre las placas* tectónicas donde se produce la mayor parte del vulcanismo, es decir en las zonas de subducción. Así pues la litosfera fría se hunde dentro del manto. El magma se produce con rocas pertenecientes a la base de la corteza y el manto superior (figura. I.4), debido a esto en el planeta encontramos diversas zonas bien definidas donde existen franjas de volcanes. (Figura. I.5)

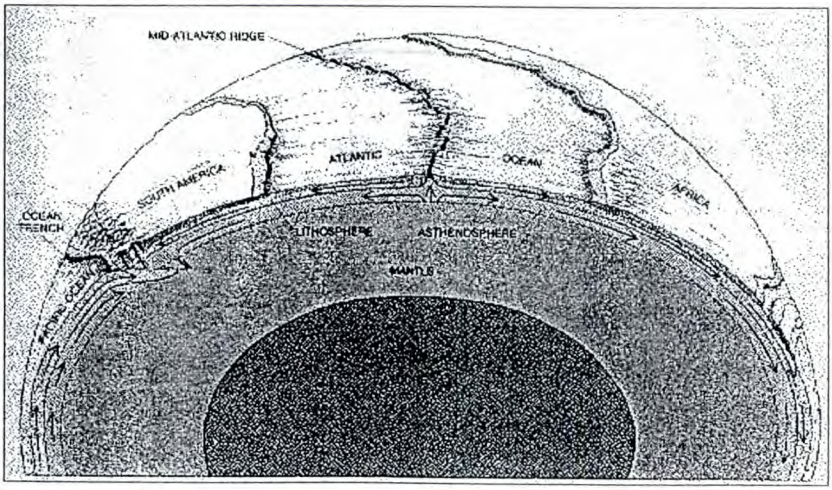


Figura. I.4 *Principales capas que componen el planeta, tomada de Selecciones deCientific Ameérican (1981)*

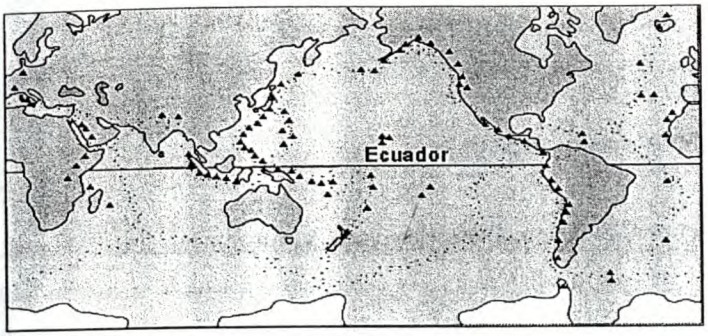


Figura I 5 *Mapa de zonas volcánicas, tomada de Tecnología (2001)*

I.1.2 Puntos calientes

Existe un tipo de vulcanismo que no se puede correlacionar directamente con la geometría de las celdas convectivas del manto. Tal es el caso de los denominados *"puntos calientes"* (*hot spots*) que son fuentes casi puntuales (en la escala del planeta) de magma, aparentemente fijos respecto al movimiento de las placas. (Se habla de puntos anómalamente calientes en diversas zonas del planeta)

En la actualidad y gracias al gran avance en la tecnología, es decir a estudios con satélites artificiales y fotografía de rayos infrarrojos, se ha logrado tener una visión más completa tanto de zonas de frotamiento y deslizamiento de las placas así como de los puntos calientes de toda la corteza terrestre. Debido a este gran avance, se tiene como dato que existen 122 puntos calientes en la corteza, 53 en fondos oceánicos y 69 en continentes.

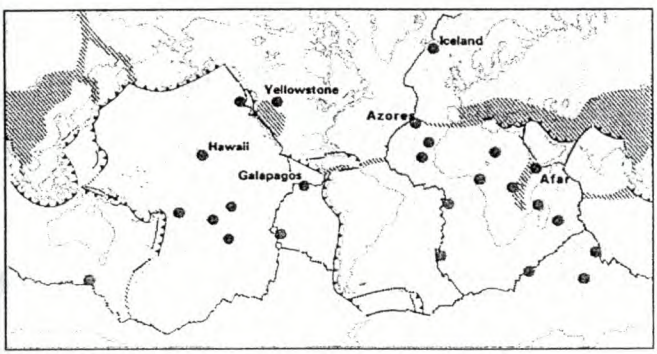


Figura. I.6 *Mapa donde se ubican algunos puntos calientes o Hotspots, tomada de USGS (1999)*

I.2 Clasificación de los volcanes

I.2.1 Morfología de los volcanes

Debido a su morfología los volcanes se pueden clasificar en:

1)Conos de Escoria

Este tipo de volcanes se forma por el apilamiento de escorias o cenizas durante las erupciones basálticas o andesíticas en las que predominan los materiales calientes solidificados en el aire y que caen en las proximidades del centro de emisión. Sus paredes no pueden tener pendientes muy altas y generalmente tienen ángulos comprendidos entre 30 y 40 grados; son de forma cónica, base circular y algunas veces exceden los 300 m. de altura. (Figura. I.7)

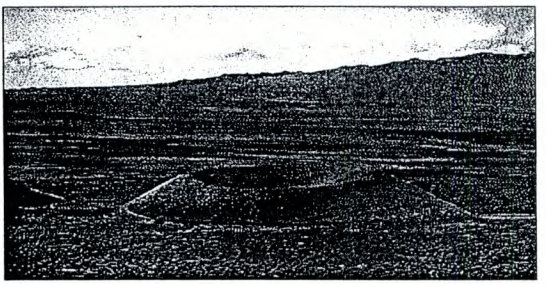


Figura. I.7 *Cono de Escoria, tomada de la Web de Volcanes, (2001)*

2)Volcanes en Escudo

Son aquellos que tienen un diámetro mucho mayor que su altura y se forman por acumulación sucesiva de corrientes de lava fluida por lo tanto son de poca altura y pendiente ligera, su topografía es suave y su cima forma una planicie ligeramente encorvada. Un ejemplo lo representa el volcán Teutli situado en México, Distrito Federal en los límites de las delegaciones Milpalta, Tlahuac y Xochimilco. (Figura. I.8)

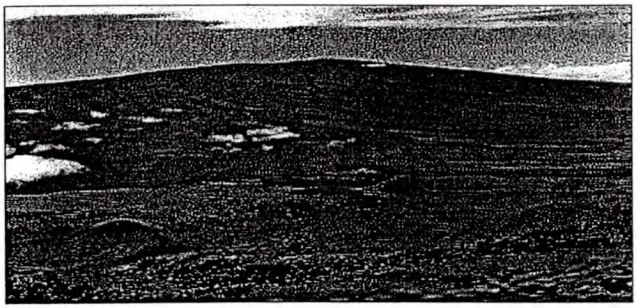


Figura. I. 8 *Volcán en Escudo, tomada de la Web de Volcanes, (2001)*

3) Volcanes Estratificados

Formados por capas de material fragmentario y corrientes de lava intercaladas lo que indica que surgieron en épocas de actividad explosiva seguidas de otras donde arrojaron corrientes de lava fluida. Como ejemplos en México se tienen el Popocatépetl, Citlaltepetl, Pico de Orizaba y el volcán de Fuego de Colima.

Las erupciones varían mucho de carácter e intensidad según la presión y cantidad de gas y la viscosidad de la lava que se libera. Las erupciones de fisura que descargan coladas de magma basáltico que fluyen tan libremente como el agua y que se enfría formando superficies casi horizontales, corresponden al tipo de menor contenido gaseoso y menor viscosidad. La erupción histórica que más se aproxima a este tipo fue la de Laki , Islandia, el verano de 1783, a veces este tipo de eventos se distingue como tipo *Islándico*. (Fig. I.9).



Figura I.9 *Volcán Estratificado, tomada de la Web de Volcanes, (2001)*

I.2.2 Volcanes tipo central

Este tipo de volcanes se caracteriza porque sus erupciones se producen a través de una chimenea vertical, el orificio se ensancha por explosión hacia el exterior y por deslizamientos hacia el interior y se convierte en un cráter de flancos en forma acampanada, por lo tanto los volcanes con estructura de cono y cráter se llaman de tipo central, pues la actividad está centralizada en torno a un conducto de tipo chimenea. (Figura I.10)

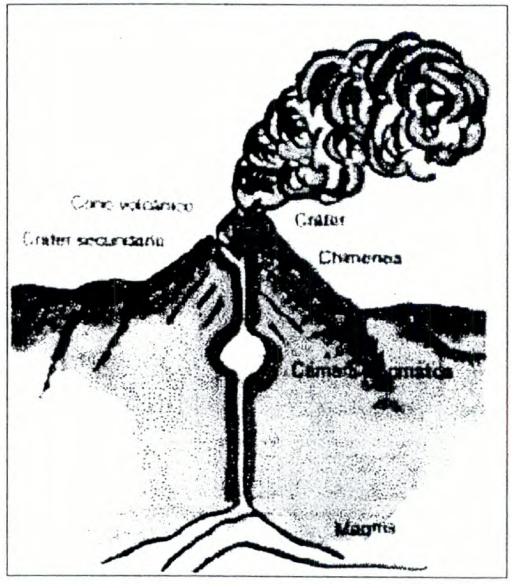


Figura I.10. *Volcán tipo central Tomada de la pagina web del Cenapred*

Las erupciones de volcanes centrales todavía dependen más de la actividad gaseosa, por ello se han identificado algunos tipos bien definidos y son los siguientes:

Tipo Hawaiano:

La lava es sumamente fluida que procede o bien de lagos de lava que ocupan cráteres en forma de hoyo o bien de fisuras, la liberación de gas es tranquila. Si los coágulos de lava fundida son llevados por un viento fuerte se deshacen formando hilos cristalinos largos conocidos como cabellos de *Pelé,* Diosa Hawaiana del fuego, el magma forma lagos de fuego en los cráteres y las lavas fundidas se extienden muy lejos. Este tipo de erupción es típica de los volcanes Hawaianos por ejemplo la erupción de Kilauea Iki en noviembre de 1959.

Tipo Estromboliano

Las lavas son menos fluidas que en el Hawaiano pero permanecen líquidas al contacto con la atmósfera. Cuando este tipo de lava menos móvil entra en contacto con el aire, los gases ocluidos se desprenden más espasmódicamente en explosiones moderadas que pueden ser rítmicas y casi continuas.

Los coágulos de lava lanzados al aire forman bombas o masas de escoria; un volcán que presenta este tipo de erupción es el Estromboli, que se encuentra en una de las Islas Eolianas al norte de Sicilia. Otro ejemplo es el volcán Hekla, en Islandia, en la erupción del 30 de abril de 1947. (Fig. I.11)

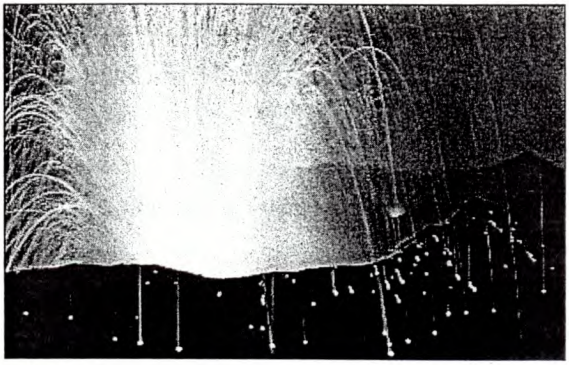


Figura I.11 *Volcán Stromboli, tomada de la Web de Volcanes, (2001)*

Tipo Vulcaniano

La lava es más viscosa y pastosa; la erupción se presenta con productos muy viscosos solidificándose con rapidez y en su superficie se forma una costra, bajo la corteza sólida los gases se acumulan y toman fuerza y explotan en intervalos más largos. Las nubes volcánicas están muy cargadas de ceniza y por ende son más oscuras a menudo negras y casi nunca se ven nubes incandescentes, ni siquiera de noche. (Figura. I.12)

Las grandes erupciones de muchos volcanes empiezan con una fase Vulcaniana siempre que necesitan primero limpiar una chimenea obstruida.



Figura I.12 *Erupción Vulcaniana en Nueva Guinea, tomada de Web de Volcanes, (2001)*

Tipo Vesubiano

Es una extensión paroxismal de los tipos Vulcaniano y Estromboliano y extremadamente violenta. Debido a la concentración de flujo de gas explosivo en el conducto mientras salen flujos piroclásticos por fisuras y aberturas de los flancos, el conducto se puede vaciar de magma y como la presión disminuye rápidamente en la parte alta, el magma puede salir en forma de material incandescente explosivo y se extiende sobre el cráter en nubes de tipo ''coliflor'' que de noche son muy luminosas. Estas nubes alcanzan gran altura y producen lluvias de ceniza que ocupan vastas extensiones. Este tipo de erupción fue observada en el volcán Vesubio el 26 de abril de 1872. (Figura. I.13)

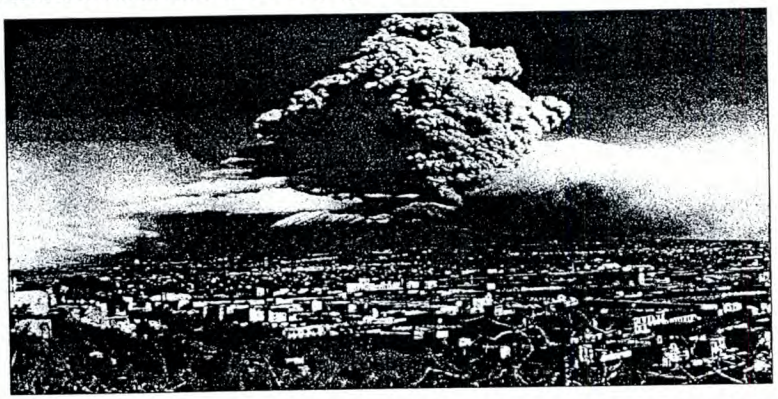


Figura I.13. *El Vesubio, en el sur de Italia es sin duda el volcán más peligroso de Europa la fotografía muestra una nube de polvo en forma de coliflor producida por una gran erupción en 1944. tomada de la Web de Volcanes, (2001)*

Tipo Pliniano

Las erupciones Vesubianas a veces culminan en magníficas ráfagas de gas y ceniza que se elevan hasta 30 kilómetros de altura y luego se desparraman en una nube expansiva formada por masas globulares de gas y vapor. (Figura. I.14)

El primer ejemplo registrado de este tipo lo observó Plinio el viejo durante la erupción del Vesubio en el año 79 de nuestra era.



Figura I.14 *Erupción Pliniana, tomada de la Web de Volcanes, (2001)*

Tipo Peleano

Es una combinación de alta viscosidad y explosividad más o menos retardada. Intermitentes masas de "espuma muy comprimida" (mezclas de piroclastos) rodeadas de una nube, se abren paso a través de puntos de debilidad próximos a la base de la cúpula y cada una de estas masas desciende cuesta abajo como si fuera un alud candente de piroclastos lubricada por gases y vapor en constante expansión. (Fig. I.15)



Figura I.15 *Fotografía que muestra la devastada ciudad de Saint Pierre de Martinica, después de la destrucción de la ciudad en 1902 por el volcán Mont Peleé que aparece al fondo, Tomada de Leet y Judson (1986)*

Uno de estos flujos piroclásticos rodantes es el que arrasó San Pedro de Martinica el 16 de diciembre de 1902 y suelen llamarse *"nubes ardientes"*

Perret define a las nubes ardientes como "Alud de una masa excesivamente densa de lava fragmentaria candente muy cargada de gases que emite constantemente, finamente desmenuzada, extraordinariamente móvil y con un rozamiento interno prácticamente nulo, ya que cada partícula está separada de sus adyacentes por una almohadilla amortiguadora de gas comprimido" [5]

En el Tabla I.1 se resumen los tipos de erupciones, la naturaleza de la actividad volcánica y las formas relacionadas a las erupciones mencionadas.

[5] Holmes, Arthur *Geología Física p. 227*

Tipo	Ejemplos	Tipo de Magma	Actividad Efusiva	Explosividad	Formas Generadas
Hawaiana e Islandica	Mauna Loa y Hekla	Caliente (más de 1200 °C), básico baja viscosidad.	Lavas extensas a partir de fisuras.	Baja	Volcanes en escudo planicies lávicas y erupciones fisurales
Stromboliana	Stromboli y Paricutín	Intermedio, mixto, moderada viscosidad.	Lavas escasas poco extensas	Variable	Conos de lavas y de cenizas abruptos
Vulcaniana y Vesubiana	Vesubio	(1100-850 °C), ácido-mesosilíceo viscoso	Escasas lavas, piroclástica abundante.	Moderada a Violenta	Estratovolcanes y calderas
Pliniana y Peleana	Mte. Pelee, Pinatubo y Sta. Helena	(menos de 900°C), ácido, muy viscoso	Piroclástica y domos.	Violenta	Calderas y planicies. piroclásticas.

Tabla I.1 tomada de la Ciencia Hoy (2000)

I.2.3 Volcanes Activos.

Activo, refiriéndose a un volcán, significa que, aún en ausencia de manifestaciones externas, el volcán mantiene el potencial de desarrollar alguna actividad eruptiva en un futuro indeterminado. Esta definición, un tanto ambigua, requiere precisarse algo más. El proceso volcánico, entendido como una de las formas de evolución del planeta Tierra, involucra un fenómeno que se manifiesta por eventos de actividad eruptiva separados por períodos de reposo.

Un volcán se puede considerar activo cuando existe algún registro de que en tiempos históricos hizo erupción. Cuando un volcán presenta una falta notable de evidencias de erosión que indiquen la existencia de una erupción en un de tiempo

geológico relativamente reciente se le considera en estado "latente o dormido" y con grandes posibilidades de renovar su actividad.

Ahora bien si un volcán muestra que en tiempos históricos hizo erupción y señales de avanzada erosión pero no presenta indicios de actividad como escapes de vapor y sismos locales se le puede considerar extinto.

Para hablar de volcanes activos se debe considerar una clasificación que divide a los edificios volcánicos en Monogenéticos y Poligenéticos.

Volcanes Monogenéticos.

Tienen lugar sobre un área considerable donde se desarrollan volcanes relativamente pequeños que nacen, mantienen su actividad que se extiende por algunos años y mueren. En vez de volver a hacer erupción, nace otro volcán del mismo tipo en el campo mismo que puede contener numerosos conos de esta clase y alcanzar varias decenas de kilómetros cuadrados como es el caso del campo monogenético de Michoacán-Guanajuato que se extiende sobre un área de 40 000 Km^2 y contiene más de 1000 conos que se han desarrollado en los últimos 40 000 años. (Haseonaka y Carmichael, 1985)

Esta actividad volcánica puede asociarse a cámaras magmáticas grandes y profundas en las que el magma busca varios caminos hacia la superficie sin tener uno preferencial, entre los más reciente volcanes de este tipo tenemos el Jorullo, nacido en 1759 y el Paricutín nacido en 1943.

Por lo tanto se puede decir que un volcán monogenético "es el resultado de una erupción o de una serie de erupciones que ocurrieron a lo largo de miles de años"[6]

Volcanes Poligenéticos.

El volcanismo poligenético se refiere a la actividad de centros volcánicos que producen numerosas erupciones a lo largo del tiempo en un mismo lugar o punto de la superficie

[6] Vicente Araña, *Volcanología*, p. VIII

terrestre. Debido a esto se tiende a producir el acumulamiento de los productos volcánicos de erupciones sucesivas en capas estratificadas las cuales llegan a constituir grandes edificios volcánicos. Es común asociar este tipo de actividad a cuerpos y cámaras magmáticas relativamente superficiales (10 Km. de profundidad o menos).

"Un volcán que ha tenido erupciones en los últimos 10^4-10^5 años no se puede considerar extinto en la actualidad y el calificativo 'durmiente' no deja de ser un eufemismo"[7].

Los volcanes monogenéticos cuya erupción no fue presenciada por el hombre puede considerarse extinta pero esto no impide que exista otra erupción en el mismo punto o muy próxima si se trata de una área eruptiva.

Resumiendo, los fenómenos fumarólicos son un síntoma de actividad pero pueden corresponder a dos tipos de fases, la primera una fase premonitoria y la segunda una fase final que se llega a prolongar cientos de años.

Lo relevante es que cualquiera que sea el tiempo de reposo a considerar como terminal, este es muy grande comparado con la experiencia humana, tanto individual como colectiva. Por ello, es probable que muchas de las ciudades cercanas a volcanes hayan sido fundadas ante la ausencia de evidencias de actividad eruptiva reciente y bajo la suposición de que esos volcanes se encontraban extintos. Pero existen otros factores principales por los cuales se han establecido asentamientos humanos en la cercanía de volcanes. En contraste con otros fenómenos naturales de carácter puramente destructivo, el vulcanismo es uno de los factores que han llevado a nuestro planeta a ser habitable.

Entre los efectos positivos de la actividad volcánica, puede decirse que ha sido fundamental para el inicio de la vida en nuestro planeta, al modificar la atmósfera y hacerla respirable para los seres con metabolismos basados en el carbono. Los productos volcánicos

[7] Araña, Vicente 1984. *Volcanología*, p IX

han sido también esenciales para formar grandes volúmenes de suelos fértiles sobre extensas regiones de la Tierra.

I.3 Origen de los volcanes Mexicanos

El relieve actual de nuestro planeta evoluciona de manera constante y a lo largo del tiempo ha dado como resultado la presencia de grandes cambios, desde que inició su formación.

Durante la edad Cenozoica de nuestro planeta principalmente en el Paleoceno y Eoceno es decir, hace unos 50 ó 60 millones de años y más tarde en el Plioceno y Pleistoceno, hace más de 5 millones de años encontramos a la Tierra en el auge de la actividad tectónica, es en esta época de grandes cataclismos que se inició una etapa de intenso volcanismo.

Posteriormente vino un periodo de enfriamiento atmosférico correspondiente a la época diluvial caracterizada por las glaciaciones que dieron origen a los desiertos de agua helada y enormes ventisqueros de las altas montañas y volcanes, mantos blancos de hielo que más tarde se fueron retirando lentamente hacia el norte, aunque dejando sus huellas imborrables en el periodo geológico actual.

México estuvo en plena intranquilidad durante algunas etapas del Terciario. Hubo grandes trastornos en la Sierra Madre Occidental, en la actual Sierra Volcánica Transversal y además en otras regiones que produjeron formidables cambios en el territorio.

Enormes corrientes ígneas salieron por las fracturas de origen tectónico; aumentó la elevación del terreno y se rellenaron en parte los sinclinales o depresiones.

A principios de la era Terciaria hubo grandes movimientos tectónicos en México, unos de NW a SE y otros de E a W lo que ocasionó una serie de fracturas por donde surgió la lava

que formó los volcanes, principalmente orientados de E a W y en menor proporción sobre fracturas de norte a sur en la Sierra Volcánica; y de NW a SE en la Sierra Madre Occidental.

Los volcanes del Plioceno como de la Sierra Nevada al oriente del valle de México, como el Nexpayantla, el Iztaccíhuatl, el Telapón y el Tláloc, aparecieron a lo largo de fracturas tensionales en dirección NW a SSE. Los volcanes del Pleistoceno surgieron y parece que continúan formándose saliendo por fracturas con dirección SW a NE como los de la región de Michoacán.

Al estudiar el mapa tectónico y el mapa geológico de la República Mexicana se deduce que la Sierra Volcánica del paralelo 19° es parte de un verdadero sistema volcánico transversal que abarca una extensa faja del centro del país y comienza al sur del paralelo de los 19° y termina más o menos a los 20° 30' hacia el lado norte.[8]

[8] Esperanza Yarza De la Torre, 1992 *Volcanes de México,* p.62

Capitulo II

II. El volcán Popocatépetl

II.1 Volcanes activos en México

México es un país que posee una gran cantidad de volcanes. Se han llegado a contar aproximadamente 3000 en el territorio nacional. La mayoría de estos volcanes ya no son activos y por lo tanto no representan peligro alguno. Los principales volcanes activos y que representan un riesgo latente para las personas que habitan en sus cercanías, se tienen bien identificados Tres Vírgenes en Baja California Sur, Bárcena y Everman en las islas Revillagigedo, Ceboruco y Sangangüey en Nayarit, La Primavera en Jalisco, el Volcán de Colima en la frontera de Jalisco y Colima, el Popocatépetl en los estados de México Morelos y Puebla, los Humeros y Pico de Orizaba en los estados de Puebla y Veracruz, San Martín Tuxtla en Veracruz y el Chichón y Tacaná en Chiapas, (además destacan el campo monogenético al que corresponden el Paricutín y Jorullo en Michoacán y el campo monogenético perteneciente a la sierra Chichinautzin (en el D.F.). No obstante, existen más volcanes de los cuales se conoce poco acerca de su nivel de actividad. (Figura. II.1)

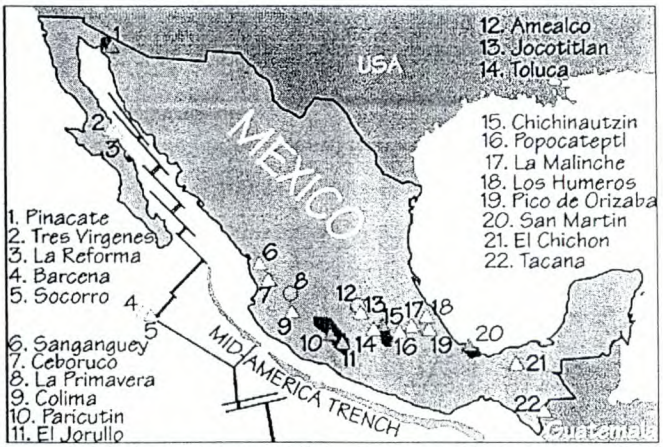


Figura. II.1 *Volcanes Activos en México, Tomada de México_volcanes (2000)*

II.2 Características del volcán Popocatépetl

La palabra *Popocatépetl* en Náhuatl significa "montaña que humea", por ese motivo nuestros antepasados asignaron este nombre a la montaña que ellos observaron constantemente emitía "humo". (Figura. II.2)



Figura II.2 *Volcan Popocatépetl Tomada de la Pagina Volcano Word (2000)*

El Popocatépetl es un estratovolcán Andesítico-Dacítico que se ubica a 50 km al sureste de la Ciudad de México, entre los límites del estado de México Morelos y Puebla. Su altitud máxima es de 5452 msnm, tiene forma cónica y un diámetro en su base de 25 Km tiene diámetro mayor del cráter de 900 m, una profundidad del cráter de 150 m (desde el labio inferior) su cima es el corte elíptico de un cono orientado de noreste a suroeste y el área del edificio volcánico abarca aproximadamente 500 km^2 (Figura II.3).

El volcán Popocatépetl es el segundo volcán más alto de nuestro país. A lo largo de su historia ha presentado importantes erupciones volcánicas con un alto grado de explosividad. En épocas históricas, el volcán ha tenido fases de intensa actividad que se han prolongado por décadas.

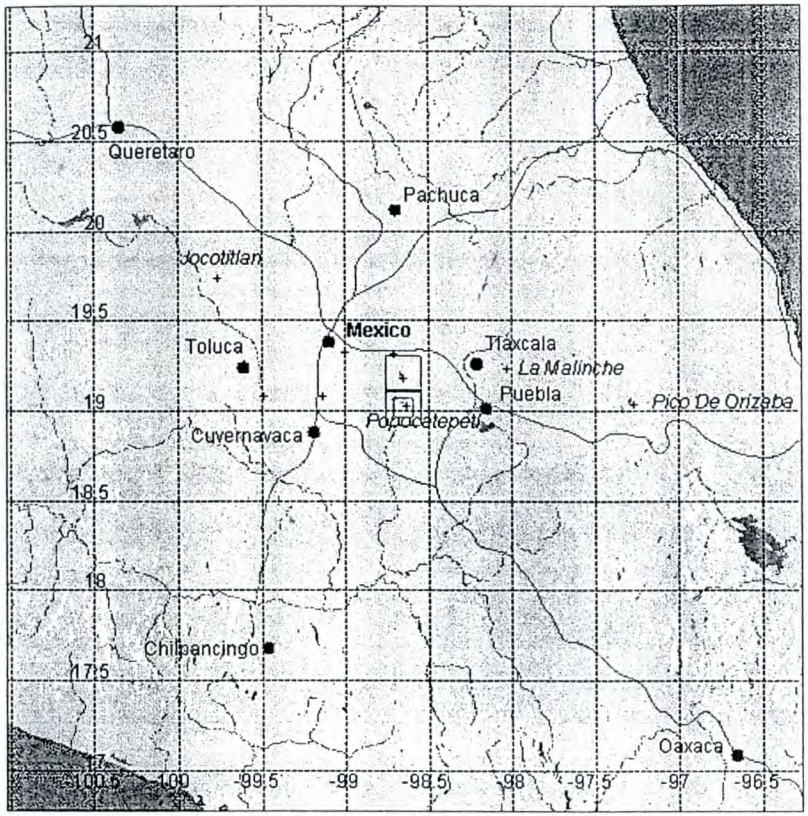


Figura II.3 *Localización del volcán Popocatépetl con respecto a las ciudades cercanas, tomada de Volcano Word (2000)*

II.3 Historia eruptiva del Volcán Popocatépetl

En recientes investigaciones se ha encontrado que el Popocatépetl posee una historia eruptiva muy variada. Ha presentado algunas erupciones pequeñas con mínimas consecuencias y otras, en menor proporción que han sido mayores en las que se manifestaron fenómenos de carácter destructivo tales como derrames de ceniza incandescente y grandes explosiones. Por ejemplo, hace 23 000 años la erupción fue de tal magnitud que se produjo el derrumbe parcial del edificio volcánico. A lo largo de su historia el volcán ha tenido eventos de diversos tipos lo cual indica que su actividad representa un peligro potencial de grandes consecuencias. En los últimos 400 años las erupciones han sido de bajo nivel pero de ninguna manera se puede decir que esto indique

en terminos absolutos la disminución de la actividad volcánica. A continuación se da una breve historia del volcán Popocatépetl. [9]

AÑO	TIPO DE EVENTO
23,000	Gran erupción tipo Sta. Helena destruye el edificio volcánico
14,000	Gran erupción Pliniana produce lluvias de ceniza y pómez sobre el Valle de México
14,000-5,000	Ocurren varias erupciones menores y al menos cuatro grandes erupciones
3,000	Erupción grande
200 a.C	Erupción grande
800 d.C	Erupción grande
800 d.C -	Después de la última erupción explosiva, la actividad del Popocatépetl ha sido moderada. A lo largo de los últimos 1200 años se han presentado numerosos episodios de actividad similar a la actual. Algunos de ellos están documentados
1354	Erupción menor
1363	Fumarolas
1512	Fumarolas
1519	Erupción moderada seguida de actividad fumarólica
1539-1549	Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez
1571	Emisiones de ceniza
1592	Fumarolas y emisiones de ceniza
1642	Fumarolas y emisiones de ceniza
1663	Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez
1664	Emisiones de ceniza
1665	Emisiones de ceniza
1697	Fumarolas
1720	Erupción leve y actividad fumarólica
1804	Fumarolas leves
1919-1927	Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez. Se forma un pequeño domo de lava en el fondo del cráter. Hubo algunas víctimas en el interior del cráter al realizar trabajos de explotación de azufre
1994-1997	Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez. Se forman domos consecutivos de lava en el fondo del cráter que alcanza el 20% de su capacidad. 5 personasperecieron cerca del borde del cráter durante una explosión ocurrida el 30 abril de 1996.

Tabla II.1 *Tomada de la página web de Cenapred*

II.4 Antecedentes de la actividad reciente del volcán Popocatépetl

Después de casi 70 años de quietud, el Popocatépetl comenzó un nuevo episodio de actividad a finales de 1993 con creciente actividad fumarólica y microsísmica que culminó el 21 de diciembre de 1994 con una emisión de ceniza.

[9] Pagina del Cenapred, http://www.cenapred.unam.mx

En 1993 se observó una fumarola con mayor emisión de gases y un ligero aumento en la actividad sísmica, esta actividad fue registrada en el único *sismógrafo* instalado en Tlamacas por el Instituto de Geofísica (I de G) de la UNAM en 1987. A la mitad de 1993, la actividad sísmica seguía siendo considerada de bajo nivel y consistía en 6 eventos sismicos diarios en promedio; posteriormente, en agosto del mismo año el promedio diario subió a 13 eventos.

En octubre de 1994, el Instituto de Ingeniería (I de I) de la UNAM instaló dos estaciones en el estado de México: Chipiquixtle (PPX) y Alzomoni (PPA) y durante este periodo se observaron alrededor de 30 eventos por día.

En noviembre de 1994 se observó un nuevo incremento de la actividad sísmica y en Atlixco, Puebla, se instaló la estación Colibrí (PPC).

En diciembre 21 entre las horas 1:31h y 1:48h (07:31, 07:48 GMT) ocurrieron cinco explosiones de naturaleza freática (por efecto de vapor de agua sobrecalentada), acompañadas por emisiones de ceniza y gas. La emisión producida provocó una lluvia de ceniza en Atlixco y el valle de Puebla. En esta crisis se manifestó un cambio significativo en el estado de actividad del volcán, pues arrojó cantidades importantes de ceniza. La posibilidad de que se desarrollara un escenario similar al ocurrido en el volcán Nevado del Ruiz, en Colombia donde en 1985 una erupción moderada produjo flujos de lodo que destruyeron varias poblaciones y causaron cerca de 25 000 víctimas, motivó la evacuación preventiva de algunas de las poblaciones más vulnerables ante una posible actividad similar en el Popocatépetl.

Durante 1995 la actividad persistió pero con una intensidad menor y se presentaron eventos de manera irregular, el volcán mantuvo un estado de equilibrio, sin variaciones significativas en los niveles de sismicidad y con niveles bajos de emisión de vapor de agua y gases.

Posteriormente, en marzo de 1996 se interrumpe la estabilidad y se registra una actividad importante en el volcán, pues mostró otro cambio significativo. El 5 de marzo el

Popocatépetl aumentó su estado activo con emisiones de ceniza que pueden ser comparables con las de diciembre de 1994. A fines del mismo mes se observó la aparición de un *domo de lava* en el fondo del cráter; durante el crecimiento del mismo se presentaron algunas explosiones importantes. Esto cambió la naturaleza de las exhalaciones (emisiones de gas y cenizas de corta duración) haciéndolas más explosivas; la más importante se presentó el 30 de abril de 1996. Durante esta crisis perdieron la vida 5 alpinistas que se encontraban en la periferia del cráter habiendo ignorado las advertencias de peligro.

A partir de ese momento, se inició en el Popocatépetl un proceso, común, en los volcanes similares, caracterizado por etapas sucesivas de crecimiento y destrucción del domo. En este proceso, la lava se acumula en el interior del cráter formando un domo o estructura en forma de cúpula, el cual tiende a seguir creciendo hasta que alcanza dimensiones tales que destruye todos los conductos que comunican con el exterior. Debido al constante incremento de presión en los conductos se pueden producir explosiones de moderadas a grandes que llegan a destruir parcialmente esos domos, posteriormente se reanuda el crecimiento del cuerpo de lava formando un nuevo domo sobre los restos del anterior.



Figura II.4

Después de septiembre de 1996, las emisiones de ceniza se hicieron menos frecuentes, pero en intensidad fueron mayores y con una tendencia importante a ser explosivas, actividad que continuó durante el resto del año y parte del siguiente.

El 30 de junio de 1997 ocurrió el evento que hasta entonces era el más grande desde el inicio de la actividad en 1994. Las características de la exhalaciones de este episodio fueron similares a las que, durante los tres años anteriores, imperaban en el volcán, sólo que de dimensiones considerablemente mayores.

La erupción del 30 de junio de 1997 fue precedida por varios sismos con *magnitudes* entre el rango de 2 a 2.7 y se presentaron a lo largo de un intervalo de 13 minutos. Posteriormente un tremor fue el anunció del inicio de la erupción que comenzó a las 23:11h (05:11 GMT). La erupción presentó dos pulsos principales el primero duró 135 minutos. El segundo, inició a las 01:26h (07:26 GMT) del primero de julio y duró aproximadamente 90 minutos.

Esta erupción generó un pluma de grandes dimensiones que en pocos minutos alcanzó 13 km. por encima del cráter. Desde varias aeronaves se informó de una columna de ceniza en forma de hongo de unos 13 000 m de altura snmm, y una extensión horizontal de casi 50 km. Durante las 2 o 3 horas siguientes se reportó caída de ceniza en muchos poblados alrededor del volcán incluyendo también la Ciudad de México, afortunadamente no se registraron víctimas ni daños debidos a la erupción. El aeropuerto de la Ciudad de México se tuvo que cerrar cerca de 12 horas mientras era removida la ceniza de las pistas de aterrizaje.

El 24 de diciembre de 1997 a las 19:30h (01:30 GMT), ocurrió un episodio eruptivo en el volcán el cual fue percibido en los poblados aledaños. La actividad inició con un evento explosivo con duración de 2 minutos, seguido de cerca de 15 eventos menores y una exhalación moderada; todo el episodio duró alrededor de 30 minutos, al cabo de los cuales la situación se normalizó completamente.

El 1 de enero de 1998 a las 14:03h y 14:13h (20:03 y 20:13 GMT) se registraron 2 microsismos y a las 18:27h (00:27 GMT) ocurrió un evento explosivo, similar al del 24 de diciembre. Se generó una columna de ceniza de 5 Km de altura por arriba de la cima, se

reportaron lluvias leves de ceniza sobre poblaciones del sector sureste del volcán, material incandescente fue arrojado sobre el flanco noreste del volcán, en dirección opuesta a la pluma de ceniza. La *fase* de máxima intensidad de esta emisión duró aproximadamente un minuto y medio. Después de unos 20 minutos a partir del evento, la situación del volcán se normalizó.

El 19 de noviembre de 1998 a las 17:53h (23:53 GMT) se presentó una exhalación de moderada intensidad seguida minutos después de 5 eventos más, de menor tamaño. En total la secuencia de eventos tuvo una duración de 7 minutos. Generó una columna vertical de ceniza que alcanzó una altura entre 2 y 3 Km. arriba de la cima, disipándose luego lentamente hacia el nor-noroeste (Fig. II.5) 15 minutos después del evento principal se confirmó una ligera precipitación de ceniza en el sector de Amecameca.

A las 20:19h (02:19 GMT) ocurrió otra exhalación, de menor *intensidad* que la de la tarde, con una duración de 9 minutos. Aunque no hubo visibilidad, este evento posiblemente produjo también alguna emisión con ceniza. Después de las exhalaciones el volcán regresó a su nivel anterior de actividad y se mantuvo estable.

A partir del día 23 de noviembre de 1998, la actividad sísmica y fumarólica del volcán se incrementó considerablemente con la presencia de eventos explosivos; así el resto de noviembre y casi todo diciembre la actividad se mantuvo en altos índices y para el mes de enero de 1999 los parámetros del volcán nuevamente regresaron a niveles menores de actividad.

La actividad del mes de diciembre del año 2000, tuvo las siguientes características; hasta fines de noviembre y la primera semana de diciembre se mantuvo la actividad baja, para el día 2 de diciembre la actividad de las exhalaciones sufrió un incremento, con una moderada pero larga exhalación con emisión. El día 6 de diciembre ocurrió un enjambre de 6 sismos vulcanotectónicos VT (M 1.7-2.4) seguida por eventos semejantes los días 8 y 9 de diciembre.

El 15 de diciembre se observaron episodios de tremor armónico de gran amplitud y baja frecuencia a las 14:04 el tremor alcanzó el nivel de saturación. El día 16 de diciembre el nivel de actividad decayó seguida por 16 h de tremor armónico.

Las lecturas del espectrómetro de correlación COSPEC para medir variaciones de bióxido de azufre entre el 13 y el 19 de diciembre fueron mayores a 50 000 ton/día. Para el día 19 el valor reportado fue de cerca de 100 000 ton/día en contraste con el promedio anual de 5000 ton/día.



Figura II.5 *Exhalación moderada, 19 de noviembre de 1998, tomada de la página web del Cenapred*

Actividad del 22 de enero del 2001; después de un periodo de actividad reducida de varias semanas, el día 22 de enero, por la tarde el volcán Popocatépetl nuevamente elevó sus niveles. A las 14:58 h se detectó un evento VT de magnitud 2.8 localizado al este del cráter y es posible que haya funcionado como un precursor de una exhalación grande que inició a las 16:15 h. generando una columna de ceniza de más de 18 kilómetros de altura. A las 16:23 h se observó una fase de mayor actividad explosiva; durante ésta fueron lanzados fragmentos alrededor del cráter y a los pocos minutos se generaron varios flujos piroclásticos que descendieron a distancias aproximadas de 4 a 6 kilómetros.

II.5 Peligros del volcán Popocatépetl

Ante la reactivación del Popocatépetl a finales de 1993 se inició la evaluación del peligro volcánico la cual se basa en el conocimiento de su vida eruptiva y estudios recopilados de la literatura.

Después de un análisis general de toda la información relativa, Macias et al 1995 lograron determinar 3 áreas de peligro. Identificadas con diferente coloración de acuerdo a eventos anteriormente ocurridos y al alcance que mostraron los mismos (rojo, anaranjado y amarillo) que corresponden a las áreas de peligro que existe por flujo de materiales volcánicos, materiales de caída, derrumbes gigantes y flujos de lodo de gran alcance. (Figura. 20)

Los principales peligros asociados al Popocatépetl son los siguientes:

II.5.1. Peligros por eventos que involucran el flujo de materiales volcánicos

A. Lavas:

a) Derrames de lava. Son flujos de material fundido que sigue la morfología del terreno y pocas veces representa un peligro para la vida humana a pesar de que sepultan, destruyen y queman todo a su paso.

Por lo anterior se considera que los derrames de lava son eventos que representan un riesgo relativamente pequeño pues la composición de las lavas es de tipo andesítico-dacítico lo que indica que, debido a una viscosidad relativamente alta, la velocidad de avance es reducida.

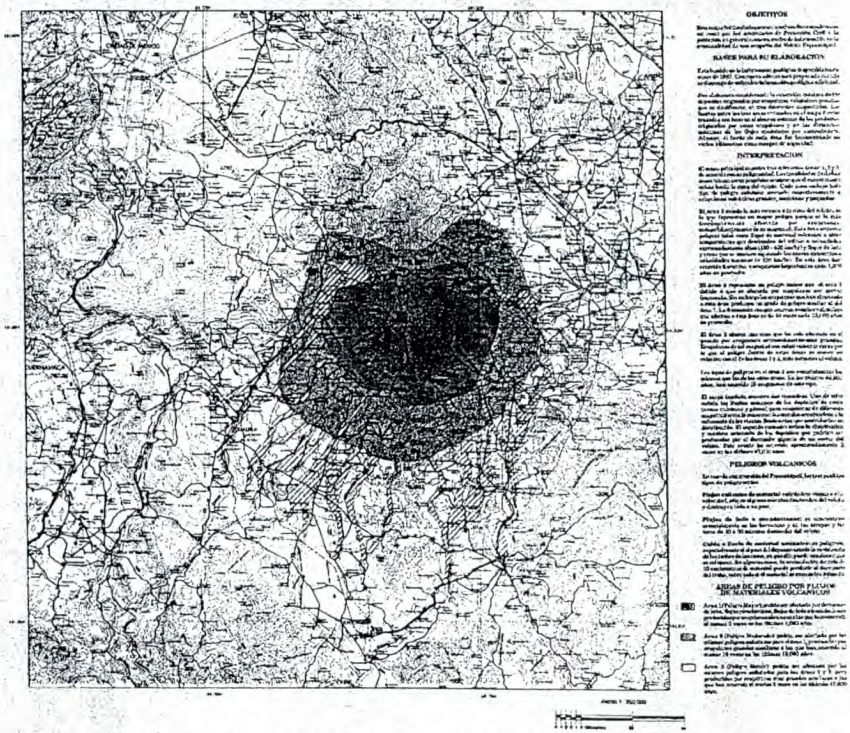


Figura II.6 *Mapa de peligros del volcán Popocatépetl tomada de la pagina web del Instituto de Geofisica(2002)*

b)Domos de lava. Se forman cuando la lava no es lo suficientemente fluida y se compone de material fragmentado y viscoso que rellena el cráter del edificio volcánico. Con el aporte de nuevo material lávico, las paredes del domo se tornan inestables y se da origen a pequeñas avalanchas que bajan a altas velocidades por los flancos del volcán aunque alcanzando cortas distancias.

B. Corrientes piroclásticas de densidad

Son flujos de materiales volcánicos generados por erupciones de tipo explosivo, los cuales están compuestos por gases tóxicos y fragmentos de roca pómez y escoria de dimensiones variables. Son flujos que viajan a altas velocidades por las laderas del volcán destruyendo y quemando todo a su paso debido a las altas temperaturas de emplazamiento.

C. Flujos de lodo (lahares)

Es una concentración de agua y grandes cantidades de partículas de tamaño variable que produce un flujo capaz de acarrear materiales de gran tamaño a lo largo grandes distancias. Este tipo de flujos pueden originarse durante o después de una erupción debido a la removilización de material volcánico suelto originado por lluvias torrenciales.

Los lahares tienden a canalizarse según la topografía preexistente por lo que las áreas de afectación siguen preferentemente las áreas de bajo nivel topográfico.

D. Derrumbes gigantes

El derrumbe de una parte del edificio volcánico, debida a la intrusión del magma debajo del aparato volcánico o a actividad sísmica intensa puede producir flujos de materiales que viajan a gran velocidad (aproximadamente 100 km/h) y son capaces de transportar mega bloques de varios cientos de metros de longitud. Un fenómeno de esta naturaleza destruiría todo a su paso en areas extensas.

II.5.2. Caída de material piroclástico

Los materiales de caída libre son emitidos a través del cráter por erupciones de tipo explosivo ya sea de manera balística o verticalmente en la atmósfera para formar columnas de material volcánico (columnas Plinianas). Estas pueden alcanzar varios kilómetros de altura.

Los daños causados por materiales de caída varían desde impactos balísticos a personas, obstrucción de las vías de comunicación y reducción de la visibilidad en zonas cercanas al volcán.

Lluvia de cenizas

Las cenizas eyectadas a grandes alturas por la pluma eruptiva, son tomadas y transportadas por los vientos y depositadas a cientos e incluso miles de kilómetros de los volcanes. El impacto de la acumulación de cenizas se materializa tanto sobre los suelos como en la

biota, los cuerpos de agua, edificaciones y sistemas agropecuarios. En las erupciones explosivas, generalmente tiene lugar la formación de grandes columnas de materiales piroclásticos eyectados de los volcanes durante horas; estos materiales, de acuerdo con su tamaño, pueden alcanzar alturas de hasta 30km.

II.5.3. Emisión de gases tóxicos

Los gases emitidos por un volcán(en altas concentaciones) pueden ser letales, tanto por su impacto sobre los humanos como sobre el ganado y la calidad de los cuerpos de agua. La emisión de grandes volúmenes de gases pueden formar lluvias ácidas. El impacto de las mismas puede ser global o local y destacan entre otros productos, bióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), ácido clorhídrico (HCl), bióxido de azufre (SO_2), trióxido de azufre (SO_3), ácido tiociánico (CNSH), amoníaco (NH_3) arsénico (As), mercurio (Hg), azufre (S), sulfuro de hidrógeno (H_2S), muchos de los cuales son altamente tóxicos y otros directamente letales..

En resumen en caso de una erupción del Popocatépetl, los cuatro posibles tipos de peligro serían:

- Flujos calientes de material volcánico: viajan a alta velocidad, en algunos minutos descienden del volcán y destruyen todo a su paso.
- Flujos de lodo e inundaciones: se concentran esencialmente en las barrancas y en los arroyos y les puede tomar de 10 a 30 minutos descender del volcán hasta algunas poblaciones.
- Caída o lluvia de material volcánico: es peligrosa especialmente si el peso del deposito excede la resistencia de los techos de las casas, ya que ello puede ocasionar que se colapsen. En algunos casos, la acumulación de más de 10 centímetros de material puede producir el derrumbe del techo, sobre todo si el material se encuentra húmedo.

- También se debe mencionar la emision de gases contaminantes en las cercanías del edificio volcánico, aunque éstas son emitidas a grandes alturas (>5400 m.)y se mezclan con el aire.

Debido a que los peligros que representa el volcán Popocatépetl son de considerable importancia, puesto que una erupción de este podría afectar potencialmente, a unos 20-25 millones de personas, casi una cuarta parte de la población total del país, es indispensable tratar de minimizar los riesgos que una gran erupción puede causar a partir del conocimiento profundo de los parámetros de actividad del Popocatépetl y para ello es necesario conjuntar esfuerzos de todos los especialistas de esta gran área de trabajo, la Vulcanología.

En la tabla II.2 se resumen los peligros asociado a una erupción y las consecuencias que estos acarrean tanto a la población como a los animales, plantas e infraestructura.

Factor de peligro	Tipo de daño en personas	Tipo de daño en obras de infraestructura	Tipo de daños en animales y vegetación
Lluvia de cenizas	Peligroso. Oscurecimiento y contaminación del aire.	Contaminación de aguas, bloqueo de caminos, interrupción de ondas de radio y TV, corrosión y abrasión, colapso de estructuras.	Peligroso, con pérdidas de animales por decrecimiento de la cobertura vegetal.
Emisión de gases	Peligroso (depende de la distancia y la concentración)	Contaminación del aire.	Peligroso para animales y plantas
Flujos piroclásticos	Muy peligroso a letal.	Destrucción y rotura, endicamientos, aumentos de caudal de los cursos Fluviales.	Muy peligroso a letal
Coladas lávicas	Letal en la zona del flujo	Destrucción total en la zona del flujo.	Letal en la zona del flujo.

Tabla II.2

Capítulo III

III. Red de Monitoreo Instrumental

III.1 Introducción

Es necesario hacer una distinción entre los conceptos de riesgo y amenaza o peligro.
El riesgo está conformado por la relación entre la probabilidad de que un volcán tenga una erupción destructiva, designada como peligro o amenaza y la presencia de actividad humana que pueda ser afectada por la erupción. Por esta razón un mismo volcán representaría menor grado de riesgo si se encuentra en una zona lejana y despoblada que si se encuentra en una área de gran densidad de población.

En lo referente al peligro volcánico, las erupciones, sobre todo las explosivas, son uno de los fenómenos cuya ocurrencia hasta el momento es difícil predecir a largo plazo, aunque con una razonable vigilancia es posible obtener un pronóstico bastante confiable con un adecuado margen de advertencia; estos fenómenos se pueden identificar en los volcanes; por ejemplo en el volcán Santa Helena se identificaron los siguientes:

Explosión lateral dirigida
Coladas piroclásticas
Lahares
Domos
Explosiones freáticas
Caída de piroclástos

Esta diversidad de peligros y la violencia que se refleja, hacen que la peligrosidad sea el parámetro más difícil de cuantificar a la hora de evaluar el riesgo en términos económicos.

Normalmente el mayor riesgo volcánico lo representan los volcanes que en tiempos históricos muy largos han permanecido en calma, ya que la falta de actividad favorece la inconsistencia sobre el peligro que encierran. Un ejemplo característico lo representa el

ubio, que al despertar de un largo sueño, en el año 79, destruyó Herculano Pompeya y ɔia y posteriormente volvió a un estado de tranquilidad. Se pueden citar un gran ıero de volcanes que han representado un riesgo latente, tal es el caso del Etna en Italia, Cotopaxi en el Ecuador y además los mexicanos como el de Colima, Ceboruco, Pico de ızaba, San Martín, Tres vírgenes, Tacaná, Chichón y además el Volcán Popocatépetl ɪre muchos otros alrededor del mundo.

I.2 Importancia del Monitoreo Instrumental

léxico está situado en una región donde la actividad volcánica es de gran relevancia pues ıenta con un gran número de volcanes activos que representan un alto riesgo para las ɔnas urbanas que día a día crecen en sus alrededores. Se tienen experiencias recientes con olcanes activos, tal es el caso del Paricutín el cual hizo erupción en 1943, el Chichón en 982, el Tacaná que emitió gas en 1986 y el volcán de Colima que ha presentado episodios le gran actividad en los últimos años. La experiencia más reciente es la del Popocatépetl, ıue pasó de una fase de actividad moderada a una fase de gran actividad sísmica y fumarólica con abundante emisión de gases y ceniza.

La manera más útil para evaluar el estado de actividad de un volcán, es mediante la observación sistemática. Esto es posible realizarlo mediante diversos métodos visuales e instrumentales.

Si la metodología de observación es adecuada, se puede esperar un alto porcentaje de éxito al momento de evaluar la actividad volcánica cualitativa y cuantitativamente..
Lo que permite tomar las mediadas pertinentes para minimizar el riesgo volcánico, asociado a un proceso eruptivo.

III.3 Tipos de Monitoreo

La vigilancia de un volcán activo requiere de la observación continua de una gran variedad de fenómenos tales como: emisión de lavas, piroclastos y gases; terremotos volcánicos, deformaciones corticales, perturbaciones electromagnéticas, procesos geotérmicos, etc. Se requiere de instrumentación adecuada con el objetivo de detectar variaciones importantes en dicha actividad.

Entre los tipos de monitoreo y vigilancia más importantes que comúnmente se utilizan en un volcán están: la vigilancia visual, monitoreo sísmico, geodésico y geoquímico.

Vigilancia Visual.

Es la apreciación por medios visuales y mediante el registro frecuente de las condiciones físicas del volcán tales como emanación de gases y cenizas, deformaciones, derrumbes o deslaves, flujos de lodo, actividad magmática, ruidos o cualquier otra manifestación anómala que indique un cambio perceptible en su nivel de actividad. Este tipo de vigilancia se lleva a cabo, mediante observaciones a simple vista, con ayuda de binoculares, registros fotográficos y también mediante sistemas de monitoreo con cámaras de video y cámaras infrarrojas. (Figura III.1)

Monitoreo sísmico.

Se le llama así a la medición local o remota de la actividad microsísmica que permite localizar la fuente de energía e inferir la estructura interior del volcán. Para aplicar este monitoreo se instalan usualmente redes de 3 ó más sismógrafos sobre y alrededor del volcán. Se debe mencionar que existe una gran variedad de estos instrumentos, dependiendo de su tecnología, medios de registro y respuesta de sus sensores. Antes de la instalación permanente de una estación es conveniente emplear sismógrafos portátiles de papel ahumado o también digitales para medir los niveles de ruido y características de los sitios donde se pretende asentar la estación.

Para sitios definitivos, se utilizan diversos tipos de telemetría (transmisión de señales vía radio), tanto analógicas como digitales para registrar y monitorear la actividad en forma remota y segura desde un centro de observación y procesamiento. En cuanto a los sensores normalmente se usan sismómetros y geófonos de periodo corto verticales o en arreglos triaxiales, aunque también se utilizan otros con respuesta a señales de periodo largo o recientemente también de banda ancha. Existe otros instrumentos que se asocian a los anteriores y son *acelerógrafos, piezómetros y deformímetros.*

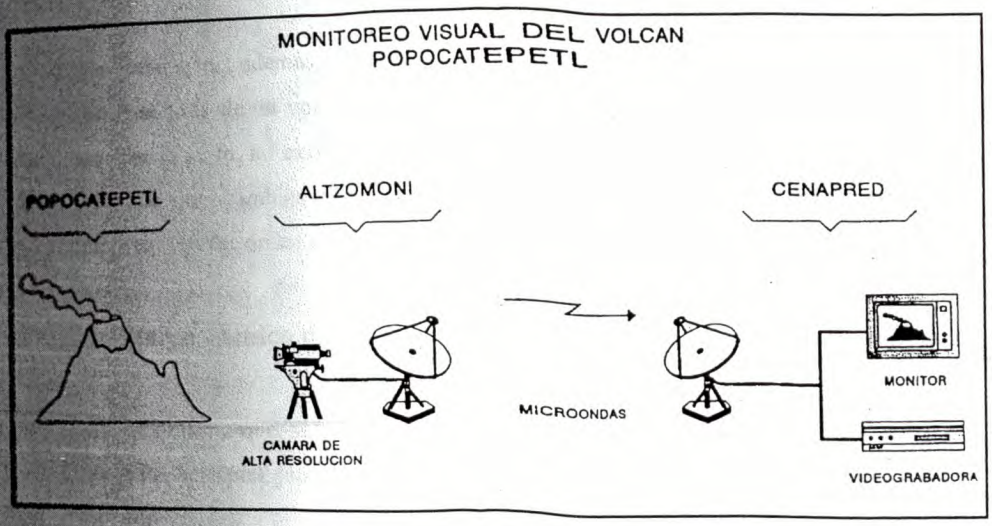


Figura III.1 *Monitoreo visual del volcán Popocatépetl. (Tomada de Quaas et al., 1995)*

Monitoreo Geodésico.

Es la medición de las deformaciones que sufre un edificio volcánico a consecuencia de los esfuerzos ejercidos desde el interior del volcán. Este monitoreo consiste en instalación de redes de estaciones monumentadas, puntos de observación e inclinómetros de diversos tipos. Las medidas pueden hacerse por métodos geodésicos convencionales (nivelación, triangulación, trilateración, inclinometría seca, etc.), por gravimetría y por otros métodos electrónicos como radiotelemetría y mediante sistemas de posicionamiemnto global, (GPS).

onitoreo Geoquímico.

e refiere al análisis químico de concentrados y elementos en gases de fumarolas, ıanantiales, composición de cenizas, lavas y otros productos del volcán que son una nanifestación de su actividad. Existen otras variables asociadas y que también son monitoreadas, como vientos, temperatura, precipitación, pH, y emanación de gas radón entre otras. Utilizar los equipos de espectrometría de correlación, COSPEC, es fundamental para medir la concentración de bioxido de azufre (SO_2) emitido.

Cabe mencionar que, además de las técnicas aquí descritas, se pueden utilizar algunas otras cuando se trata de un volcán en particular o cuando se desea vigilar algún aspecto específico. Por lo tanto, no existe una metodología única, sin embargo se destaca que la observación de los cambios en la sismicidad, las deformaciones y las emisiones geoquímicas son, en ese orden las técnicas más utilizadas en la actualidad.

III.4 Monitoreo sísmico del volcán Popocatépetl

Es importante destacar que, si bien en México existe un gran número de volcanes activos, solamente el Popocatépetl, junto con el Volcán de Fuego de Colima, cuentan con una buena red de monitoreo.

La primera estación de observación sísmica para el volcán fue Altzomoni (IIA) instalada en junio de 1987 por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, y se ubica en una estación repetidora de microondas de Televisa ubicada en el cerro Altzomoni, Estado de México, a 4 Km al norte de Paso de Cortés y cumple un doble propósito, registrar la sismicidad en la Sierra Nevada y ser repetidora de las señales de estaciones remotas localizadas en Tonanzintla y Ciudad Serdán Puebla.

La instrumentación de Alzomoni consiste de un sismómetro vertical de periodo corto con enlace de telemetría radiofónica analógica FM en VHF hacia CU.

Para septiembre de 1989 el departamento de Vulcanología del Instituto de Geofísica de la UNAM inicia la operación de una segunda estación (PPM) Tlamacas, Pue. y se incorpora posteriormente, como parte de la red sísmica del Servicio Sismológico Nacional. Su instrumentación consiste en un sismómetro triaxial de periodo corto (tres componentes ortogonales) una para el movimiento vertical y dos para el movimiento horizontal y equipo de telemetría analógica tipo FM con trasmisión en UHF directo hacia el centro de registro en el Instituto de Geofísica en CU.

Como surgieron evidencias claras del aumento en la actividad volcánica del Popocatépetl a principios de 1994 y gracias a un convenio realizado entre el Cenapred y el Instituto de Ingeniería (realizado en el mismo año) se pudieron instalar, en un plazo muy corto, dos estaciones sísmicas; la primera se instaló en octubre de 1994, en la estación denominada Chipiquixtle (PPX) ubicada en la ladera sureste en el Estado de México, a una altitud de 3980 msnm y la instrumentación consistió de un sismómetro vertical de 2 Hz y equipo de telemetría analógica tipo FM con enlace radiofónico VHF directamente al instituto de Ingeniería y dada la ubicación del CENAPRED en la misma dirección radial del Instituto se bajó también la señal en este centro.

La segunda estación con características similares en cuanto a su instrumentación fue la de Colibrí Puebla (PPC) en la ladera este y debido a su ubicación en la parte oculta del volcán visto desde el D.F. fue necesario establecer puntos de repetición de las señales de radio en las estaciones de Tonantzintla (IIT) y Altzomoni (IIA) ambas pertenecientes a la red sismex.

Para diciembre de 1994, 4 estaciones estaban instaladas y estas fueron las que registraron los eventos del día 21 de diciembre de 1994.

III.5 Ampliación de la red de Instrumentación

Ante la emergencia provocada por el volcán en diciembre de 1994 fue necesario tomar medidas inmediatas para reforzar y ampliar la red de monitoreo.

Después de iniciada la crisis de 1994 el Cascades Volcano Observatory, de U.S. Geological Survey, ofreció apoyo a México y envió un paquete completo de instrumentos de monitoreo sísmico y de deformación, junto con un grupo de especialistas en la materia. Este paquete consistió en dos estaciones portátiles de registro sísmico con telemetría, 3 estaciones inclinométricas, también con telemetría y un sistema centralizado de recepción procesamiento y análisis de datos. Los sitios para la instalación de esta nueva instrumentación ya habían sido propuestos con anterioridad y los criterios para seleccionar estos sitios fueron, cercanía al cráter, seguridad, tener línea de vista para hacer más fácil la transmisión por radio de los datos al Cenapred y además un fácil acceso con el propósito de facilitar el mantenimiento.

Un sismómetro vertical y un inclinómetro biaxial se colocaron en las estaciones contiguas de Canario, Pue. claves PPP y PIP, respectivamente, localizadas cerca del refugio alpino del mismo nombre con una altitud de 4170 msnm en la ladera norte del volcán.

Otra estación con inclinómetro biaxial, llamada Nexpayantla, clave, PIN, se instaló en una loma abajo del pico el Ventorrillo junto a la cañada de Nexpayantla, Pue., la tercera estación con un sismómetro vertical, se instaló en Bonsai, Pue. clave PPB en la ladera este a una altitud de 3080 msnm y el inclinómetro biaxial restante se instaló junto a la estación PPX al que se asignó la clave PIX.

Para reforzar el monitoreo del volcán con otros equipos adicionales se aprovechó la caseta en la estación Tlamacas (PPM) y se colocó en la misma base un sismómetro triaxial del Instituto de Ingeniería pero de periodo largo (5 segundos) y con equipo digital de telemetría, enlazado al Cenapred. Gracias a este instrumento se pudo tener un mejor registro

de la actividad sísmica en esa banda de frecuencia; la clave que se asigno a este instrumento fue PPM2.

Por su parte, en forma temporal y con fines de prueba el Cenapred instaló un sismómetro digital triaxial portátil de banda ancha con registro local en cinta magnética en la misma estación de Tlamacas; también en las estaciones del albergue en Tlamacas se colocó de forma temporal un acelerógrafo digital desarrollado en el Cenapred mismo que se acondicionó para registrar eventos sísmicos muy pequeños.

Por otro lado y de forma independiente, el Instituto de Geofísica UNAM instaló tres estaciones sismológicas digitales con telemetría y cuyas señales son enviadas al centro de registro en la UNAM; estas estaciones son Loma del Muerto, Méx., PPL, Techalotepec, Pue., PPS y Ayaqueme, Méx., PPY (ver figura III.2), cabe mencionar que estas estaciones no son registradas en Cenapred,.

Debido a la necesidad de tener un monitoreo, visual continuo para vigilar la actividad del volcán de manerasimultanea al monitoreo sísmico se instaló, con el apoyo de la dirección General de Protección Civil y por parte de RTC, una cámara de video de alta definición en la estación retrasmisora de Alzomoni y con un enlace de microondas especial enviado directamente al Cenapred.



Fig. III.2 *Mapa de localización de todas las estaciones de monitoreo del volcán.*

III.6 Instalación de equipos para la instrumentación

La red de instrumentación está formada por dos tipos de instrumentos que son sismómetros e inclinómetros. Para efectos del desarrollo de este trabajo únicamente se explicará la red de instrumentación formada por sismómetros ya que los inclinómetros no son utilizados en el análisis del mismo aunque no por eso son menos importantes.

Dependiendo del sitio del equipo y de la fecha de instalación, las estaciones sismológicas fueron colocadas y acondicionadas de dos maneras, éstas son una instalación permanente mediante una caseta especial de resguardo y una instalación temporal sobre el campo y de forma subterránea.

III.6.1 Instalación permanente

El tipo de instalación permanente se utiliza en las estaciones IIA, PPM, PPM2, PPC, PPS. y PPY, para las que se construyeron casetas de mampostería especial que protege los equipos contra bandalismo y el medio ambiente además de que sirve de protección y resguardo al personal que opera y mantiene la estación.

El sismómetro o trasductor que detecta la vibración del terreno se coloca sobre un pedestal rígido de concreto firmemente anclado a la roca en caso de existir ésta o ligado al suelo mediante zapatas. Esto es para evitar al máximo la trasmisión del ruido que la estructura, por la acción del viento, pueda inducir al sensor, el pedestal queda desligado físicamente de la cimentación de la caseta.

A un lado del pedestal se coloca el equipo de acondicionamiento de la señal, trasmisor y baterías de alimentación. Las celdas solares y una torre pequeña con antena de trasmisión quedan colocadas sobre el techo de la caseta. Ésta usualmente tiene una puerta metálica de acceso y pequeñas ventilas, algunas casetas además cuentan con una cerca de protección conformada por malla ciclónica ahulada para mantener alejado al ganado. (Figura III.3)

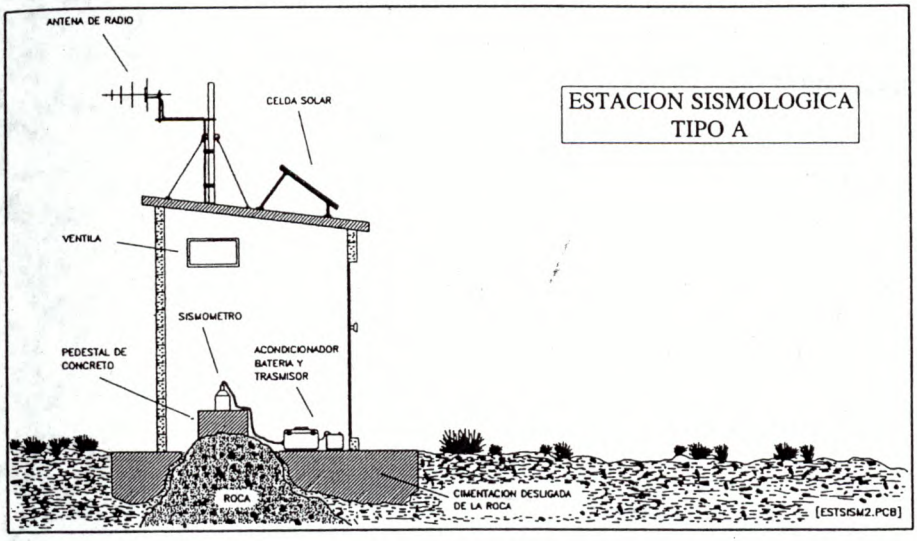


Figura. III.3 *Estación sismológica permanente. (Tomada de Quaas et al., 1995)*

III.6.2 Instalación temporal

Las estaciones del segundo tipo corresponden al tipo de estación temporal que se tuvieron que instalar durante la emergencia volcánica, el sismómetro al igual que el equipo acondicionado quedan sepultados a una profundidad de 1.5 metros, el sensor es completamente hermético a prueba de agua y fabricado con acero inoxidable.

Ahora el acondicionador trasmisor y batería se protegen dentro de una hielera de plástico y poliuretano. A un lado del contenedor se instala una pequeña torre tubular soportada mediante tres vientos o bien mediante una base de concreto a la cual se sujetan las celdas solares y la antena de radio; también se instala una varilla de cobre para proteger la estación contra descargas de electricidad atmosférica, los equipos quedan interconectados mediante cables subterráneos. (Figura III.4)

III.7 Funcionamiento de una estación sismológica con telemetría.

Con la ayuda del diagrama de bloques (figura III.5) es posible explicar el funcionamiento de una estación analógica de campo.

El movimiento del terreno se detecta por uno o varios sismómetros conocidos también como geófonos o trasductores de velocidad. Uno se utiliza para detectar el movimiento vertical y los otros dos para movimientos horizontales orientados generalmente Norte-Sur y Este-Oeste.

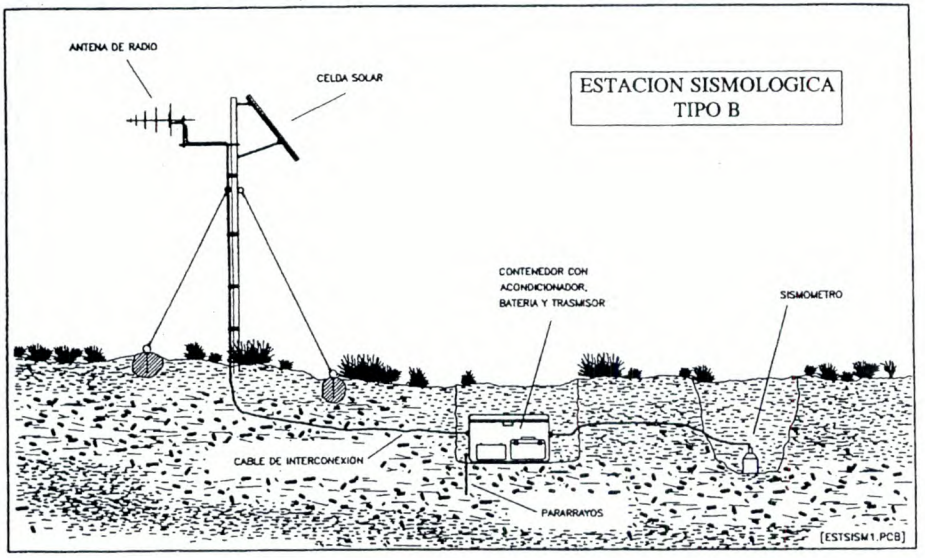


Figura III.4 *Estación sismológica temporal. (Tomada de Quaas et al., 1995)*

Los sensores generan una señal de voltaje, esta pequeña señal analógica se amplifica y filtra y luego es utilizada para modular en frecuencia una subportadora de audiofrecuencia mediante osciladores controlados por voltaje, de esta forma se producen las señales de FM. De esta manera el voltaje de cada sensor se convierte en una señal de banda audible, con una frecuencia proporcional a la velocidad del terreno dentro de una banda de 125 Hz.

Esta nueva señal que fue sumada con anterioridad, es la que se trasmite mediante el trasmisor Tx también de FM a la central. Gracias a esto, en una sola banda de voz (audio) se pueden codificar hasta 8 diferentes señales. Esta técnica recibe el nombre de "multiplexaje por división de frecuencia" y es comúnmente usada en sistemas de telemetría ya que al estar modulada en frecuencia es inherentemente inmune a ruido inducido por amplitud.

La alimentación de todas las estaciones es de 12 VCD mediante celdas solares y baterías automáticas en flotación, lo que garantiza una operación continua.

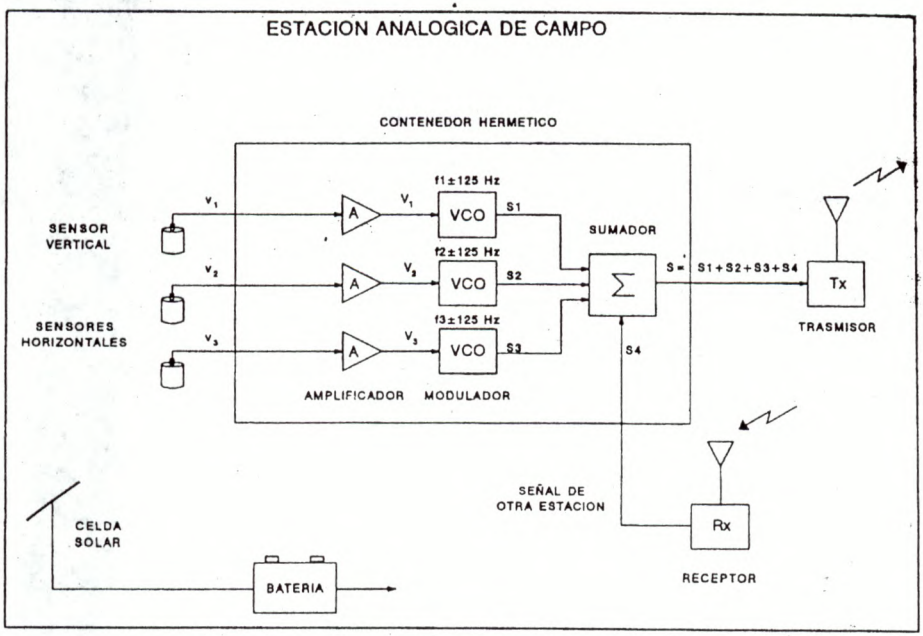


Figura III.5 *Diagrama de bloques que muestra la estación analógica de campo. (Tomada de Quaas et al., 1995)*

En la estación central receptora, (Figura. III.6) el proceso de recuperación de la señal es el inverso.

La señal multiplexada es detectada por un receptor, e introducida simultáneamente a un banco de filtros pasa banda, sintonizados cada uno a la frecuencia subportadora correspondiente, de esta manera se separan las señales individuales posteriormente el siguiente proceso es la detección o demodulación de las señales codificadas en FM mediante demoduladores. Después de filtrarse se obtienen nuevamente las señales de voltaje cuyo valor es proporcional al movimiento del terreno.

En el centro de recepción de Cenapred, las señales se registran en graficadores continuos de tambor sobre papel produciendo los sismogramas. Además de la traza de velocidad, también se registra el tiempo mediante la superposición de marcas de referencia cada minuto y cada hora las cuales son generadas por un reloj GPS. Esta técnica de " Registro centralizado del tiempo" es válido en un sistema de telemetría como el anteriormente descrito pues todas las señales son enviadas simultáneamente desde distintas estaciones y en tiempo real.

También estas señales analógicas de voltaje de cada canal son muestreadas y convertidas a palabras digitales que también son procesadas en tiempo real por una computadora que analiza y detecta los eventos sísmicos importantes que posteriormente quedan almacenados en archivos numéricos.

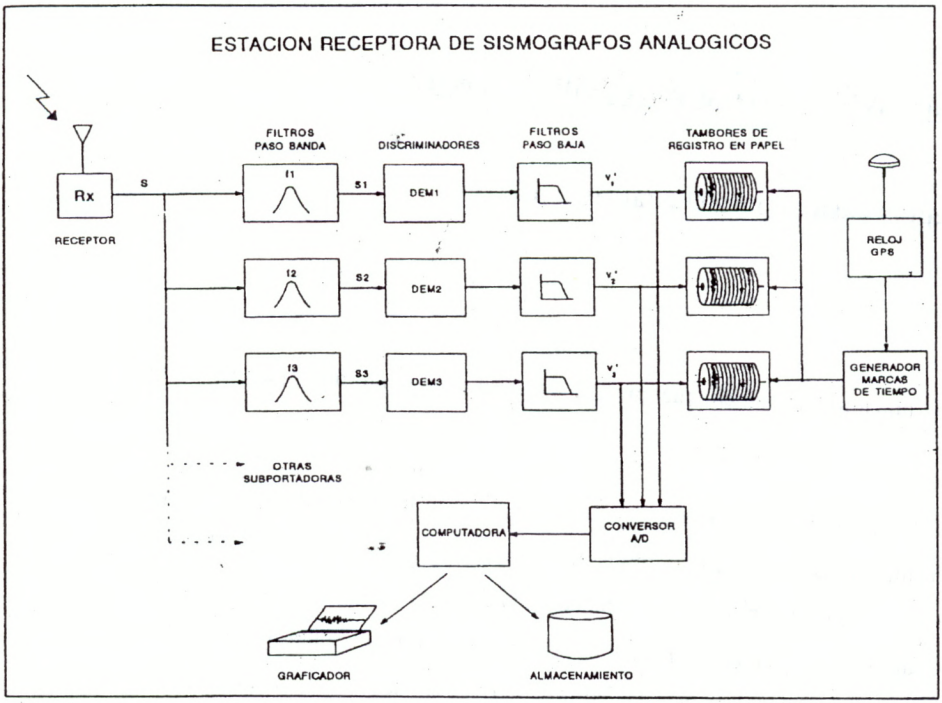


Figura III.6 *Estación central receptora. (Tomada de Quaas et al., 1995)*

Capítulo IV

IV Herramientas Necesarias para el análisis espectral

IV. 1 Conceptos básicos para el análisis espectral

IV.1.1 Señales

Señal.- Es una función matemática que toma un valor en cada punto del espacio en el que está definida.

El estudio de las señales no solamente se hace en el área de las telecomunicaciones pues también son utilizados en otros campos del conocimiento tales como Aeronáutica Astronáutica, Acústica, Sismología, etc. En cada una de estas áreas del conocimiento las señales utilizadas son de distinta naturaleza: en sismología se trata de señales mecánicas, es decir, movimientos producidos por la corteza terrestre, donde el fenómeno físico participante es la generación de un sismo el cual es un movimiento brusco de capas que conforman la corteza terrestre. Dicho movimiento tiene ciertas características, tales como intensidad y naturaleza ondulatoria. Como el movimiento de la superficie terrestre se traduce a una señal eléctrica por medio de detectores o geófonos, las características de la señal sísmica se preservan facilitando su análisis.

La dependencia del tiempo es una de las características más importantes de casi todas las señales, así se puede explicar de manera clara como la señal está en función del tiempo de la siguiente forma:

x,y u otra letra indican la amplitud de la señal
t representa el tiempo
x(t) o **y(t)** indica que y ó x son función del tiempo

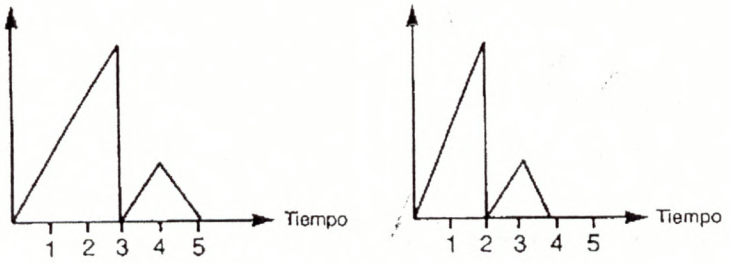


Figura IV.1 Dos señales con igual forma pero distinta relación temporal.

Señal continua.- Es una función continua de una o varias dimensiones.

Las señales pueden estudiarse en tres ámbitos diferentes " tiempo, amplitud y frecuencia":

Señales en el dominio del tiempo

El ámbito temporal es el dominio primario en el que se manejan y captan las señales, en general se representan con números complejos de la forma:

$$x(t)+jy(t)$$

Señales en el dominio de la amplitud

Representa la información en un sistema de amplitud-porcentaje de tiempo en el que se rebasa dicha amplitud o en el que toma los valores de un intervalo determinado.

Señales en el dominio de la frecuencia

La base del estudio en el dominio de la frecuencia reside en descomponer la señal en sus frecuencias constitutivas, representando las señales periódicas mediante su desarrollo en serie de Fourier y las señales no periódicas mediante la transformada de Fourier.

IV.1.2 El espectro de amplitud

Es la representación de la señal efectuada en el dominio de las frecuencias y al tipo de tratamiento se le llama análisis espectral.

Debido a la gran cantidad de señales que en una zona volcánica se producen, es necesario distinguir unas de otras y también caracterizarlas.

La primera observación de una señal se hace sobre los sistemas de registro continuo, lo cual puede hacerse sobre papel o en el ordenador. Para poder identificar las señales registradas, se debe tomar en cuenta que se observará la actividad principalmente en el campo muy próximo, con eventos sísmicos, donde la diferencia S- P no excede de unos pocos segundos y también el nivel de actividad puede cambiar rápidamente.

Es posible que el patrón sísmico sea simple y conocido donde los terremotos y eventos se repitan sistemáticamente; pero los principales problemas de identificación se pueden presentar a la hora de diferenciar visualmente un tremor y distinguirlo de un aumento de ruido de fondo o al diferenciar una exhalación de un evento tipo "A" (vulcanotectónico) de tal forma que se hace necesario usar otro tipo de herramienta, la mayoría localizada en el dominio de la frecuencia.

IV.1.3 El concepto de sistema

Sistemas.- Es un conjunto de componentes o dispositivos del mundo físico que interactúan entre sí, que aceptan señales como entradas, transforman y generan otras señales a su salida. Es por medio de un sistema como se procesan las señales.

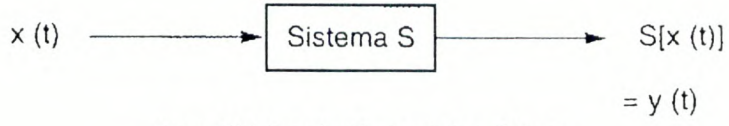


Figura IV.2. Entrada x(t), sistema S y salida y (t).

IV.1.5 Ancho de banda

Ancho de banda es el rango de frecuencias contenidas en una señal.

IV.1.6 Ruido

Es aquello que molesta, perturba o que impide realizar algunas tareas, es decir, es todo aquello que modifica el contenido de información de una señal. También puede afirmarse que el ruido es una distorsión.

Hasta el momento no es posible tener un sistema que no tenga ruido, pero afortunadamente los distintos procesos han sido modelados matemáticamente de manera que el efecto del ruido pueda ser eliminado.

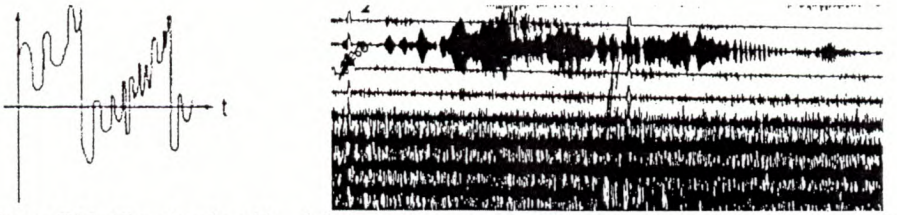


Figura IV.3. Ejemplos de ruido, el de la izquierda corresponde a ruido instrumental, y a la derecha se observan dos tipos diferentes de ruido detectados en la estación Canario (PPP), el día 1° de abril de 1996 el que se encuentra en la parte superior corresponde al producido por un helicóptero y el de la parte inferior es ruido producido por un arroyo.

IV.2 La transformada discreta de Fourier

El análisis de Fourier surgió a partir del intento de su autor (hecho establecido en 1822 por el matemático J. Fourier, 1768-1830) por hallar la solución a un problema práctico de conducción de calor en un anillo de hierro. Desde el punto de vista matemático, se obtiene una función discontinua a partir de la combinación de funciones continuas. Esta fue la atrevida tesis defendida por Fourier ante la Academia Francesa, que motivó severas objeciones de los matemáticos más importantes de su época como Lagrange, Laplace, etc.

El teorema de Fourier enuncia: " Un movimiento ondulatorio periódico puede expresarse como una superposición de movimientos ondulatorios armónicos de frecuencias múltiplo de una frecuencia fundamental."

La transformada de Fourier es la principal herramienta con que se cuenta para transformar una señal en el dominio del tiempo a una señal en el dominio de la frecuencia y por lo tanto es una operación que se usa de forma común.

La diferencia que existe entre señales depende en gran medida del contenido espectral (en frecuencia).

Una señal sísmica en el dominio del tiempo se puede describir de forma casi perfecta como una suma de señales sinusoidales, cada una con una amplitud frecuencia y fase determinada.

La transformada de Fourier de una señal temporal U(t) se define como:

$$\mathbf{U(w)= \int U(t)\, e^{-i\omega t}\, dt}$$

ω.- Frecuencia angular.

Como la Transformada de Fourier es una función reversible entonces, si tenemos U(w), es posible encontrar U(t) mediante:

$$U(t)= \int U(w)\, e^{-i\omega t}\, dw$$

Lo anterior expresa que la transformada de Fourier es la descomposición de una señal continua en una serie de señales armónicas elementales.

La transformada de Fourier es una función compleja que posee una parte real y otra parte imaginaria.

La parte real se ve representada por:

$$U_r(w)=\int U(t) \cos(\omega t)\, dt$$

Mientras que la parte imaginaria está representada por:

$$U_i(w)=\int U(t) \operatorname{sen}(\omega t)\, dt$$

De tal forma que:

$$U(w)= U_r(w)+ iU_i(w)$$

Sin embargo, resulta más práctico trabajar con la forma polar del resultado anterior, es decir con el módulo y la fase donde el módulo viene dado por:

$$A(w)= [U_r^2(w)+ iU_i^2(w)]^{1/2}$$

y la fase por:

$$\phi(w)= \text{arctang } [U_i(w)+ U_r(w)]$$

La principal ventaja que lleva esta transformación es que existen operaciones que en el dominio del tiempo son muy complejas y se simplifican en el dominio de la frecuencia.

En el caso de una señal sísmica estamos tratando con señales discretas en lugar de continuas, por lo que las expresiones anteriores basadas en integrales deberán ser transformadas en sumatorias. Por lo tanto la señal en el dominio del tiempo U(t) se puede expresar de la forma siguiente

$$U(t)=\Sigma\, Uj\delta\,(t-j\Delta t)$$

y si la sustituimos en la expresión de la transformada de Fourier obtenemos:

$$U(w)=\Sigma^{N}\, Uje^{-i\omega j\Delta t}$$

Se podría pensar que ahora sólo bastaría realizar una serie de algoritmos para determinar el contenido espectral de la señal y después interpretar resultados, sin embargo es el tiempo de cálculo necesario para su realización uno de los principales problemas que aparecen a la hora de hacer un diseño de éstos algoritmos.

IV.3 Transformada rápida de Fourier

Como se expuso anteriormente al hacer el diseño del algoritmo de la transformada discreta de Fourier se utiliza mucho tiempo. Por lo que para solucionar este problema surgió el diseño de la transformada rápida de Fourier, la cual no es en sí una nueva transformada sino un algoritmo para la rápida evaluación numérica de integrales de Fourier.

Evidentemente este algoritmo es utilizado en los programas que obtienen rápidamente el espectro de una señal temporal de entrada.

La diferencia de velocidad de cálculo entre la tradicional transformada discreta y la transformada rápida aumenta, según aumenta el número de muestras a analizar, lo que se puede apreciar en la gráfica, ya que mientras una aumenta el número de operaciones

necesarias para la resolución de forma exponencial, la otra lo hace prácticamente de forma lineal (ver fig IV.4.)

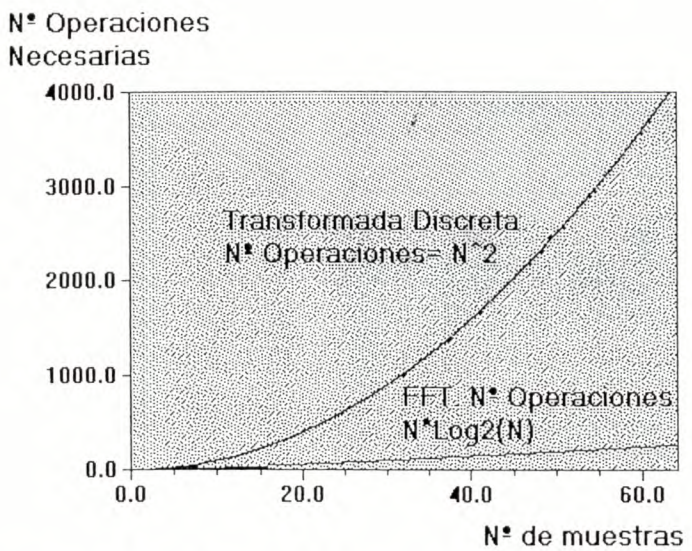


Figura IV.4 Gráfico comparativo del cálculo de la transformada discreta de Fourier y la transformada rápida

La aparición en 1965 del algoritmo de la transformada rápida de Fourier, debido a Cooley y Tuckey, cambió radicalmente el panorama, de tal forma que hoy en día se puede decir que no existe aplicación de procesamiento digital de señales que no la emplee.

Un examen del algoritmo de la transformada discreta de Fourier (citada comúnmente como DFT) permite comprobar que se precisarán N multiplicaciones complejas y N sumas por cada una de las rayas espectrales que permitan la representación en el dominio de la frecuencia, siendo N el número de muestras. Como hay N/2 componentes distintas, contando sólo las frecuencias positivas del espectro, el número total de multiplicaciones es N^2.

La necesidad de precisión y el aumento de la banda de análisis conlleva el aumento de las frecuencias de muestreo y por tanto del número de muestras, multiplicaciones y sumas a realizar, lo cual retrasa la presentación en tiempo real de la señal.

Sin embargo, muchos de los coeficientes de los complejos son redundantes y se pueden reducir del cálculo.

Para comprobar esto, se realizará el cálculo de una DFT de un muestreo de duración 8, con el cual se podrá comprobar que hay tan sólo 8 coeficientes distintos.

Partiendo de la fórmula de la DFT es:

$$X'(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)\ e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \left[\cos\frac{2\pi nk}{N} - j\,\mathrm{sen}\frac{2\pi nk}{N} \right]$$

donde se hace N = 8.

Así por ejemplo

k = 0 y n = 0 es: cos 0 - j sen 0 = 1

$$k = 1 \quad \text{y} \quad n = 1 \quad \text{es} \quad \cos\left(\frac{2\pi}{8}\right) - j\,sen\left(\frac{2\pi}{8}\right) = \cos\frac{\pi}{4} - j\,sen\frac{\pi}{4} = \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right) - j\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right) = \frac{1-j}{\sqrt{2}}$$

Calculando los valores posibles del coeficiente en los 64 productos que se forman mediante la sumatoria, se obtiene la siguiente tabla:

n	0	1	2	3	4	5	6	7
0	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	[(1-j)/√2]	-j	-[(1+j)/√2]	-1	-[(1-j)/√2]	j	[(1+j)/√2]
2	1	-j	-1	j	1	-j	-1	j
3	1	[(1+j)/√2]	j	[(1-j)/√2]	-1	[(1+j)/√2]	-j	-[(1-j)/√2]
4	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
5	1	-[(1-j)/√2]	-j	[(1+j)/√2]	-1	[(1-j)/√2]	j	-[(1+j)/√2]
6	1	j	-1	-j	1	j	-1	-j
7	1	[(1+j)/√2]	j	-[(1-j)/√2]	-1	-[(1+j)/√2]	-j	[(1-j)/√2]

en la que puede apreciarse que los únicos coeficientes distintos son:

$$1, -1, j, -j, \left[\frac{1-j}{\sqrt{2}}\right], -\left[\frac{1-j}{\sqrt{2}}\right], \left[\frac{1+j}{\sqrt{2}}\right], -\left[\frac{1+j}{\sqrt{2}}\right]$$

La transformada rápida de Fourier (citada comúnmente como FFT) reconoce esta redundancia de coeficientes y utiliza un proceso de decimalización para reducir los cálculos, realizando en total **NLog2N** multiplicaciones en lugar de las $\mathbf{N^2}$ que necesita la DFT, siendo N el número de muestras. Por ejemplo, para 8 muestras la FFT realiza 24 productos complejos, mientras que la DFT realiza 64.

De esta manera, se demuestra como la transformada rápida de Fourier es una herramienta absolutamente necesaria para el cálculo de espectros pues reduce de manera considerable los cálculos necesarios y por tanto también el tiempo de cálculo.

IV.4 Resolución del análisis

Otro de los problemas relevantes para el cálculo del espectro de Fourier es el margen de resolución de análisis, es decir cuál es la frecuencia máxima y mínima que se va a obtener en el estudio y cuál es el intervalo en frecuencias de que se dispone.

Cuando se analiza una señal sísmica, ésta se ha digitalizado usando una serie de intervalos de muestreo constantes que según el tipo de instrumento y el estudio, variará de manera significativa. En forma general se estará hablando de intervalos de muestreo Δt que bien pueden variar entre las 80 y las 200 muestras por segundo (mps). Debido a este intervalo de muestreo el rango de frecuencias del análisis también se ve limitado.

Así dado un Δt, la máxima frecuencia que puede ser obtenida es $\frac{1}{2}\Delta t$, conocida como la frecuencia de Niquist. Se puede pensar que ésta es la mayor frecuencia a la que se puede acceder pero realmente la máxima frecuencia a que se tiene acceso es justo a la mitad de ella debido a que en la mayoría de los instrumentos a esta frecuencia se suelen colocar los denominados filtros antialiasing; por lo que de manera general se puede decir que dado un Δt como intervalo de muestreo la máxima frecuencia a la que se podrá acceder con suficiente fiabilidad será $1/4\Delta t$.

Otro factor a considerar es el intervalo de resolución, en el que se obtendrá la señal en el dominio de la frecuencia Δf, mismo que está condicionado por la longitud de la ventana temporal seleccionada para el análisis. Si se llama ΔT a la longitud temporal de la ventana (medida en segundos), el valor de Δf será $1/\Delta T$ además este valor también será la frecuencia mínima a la que se puede acceder.

Puesto que en la práctica se suele usar el algoritmo de la FFT para este estudio la longitud temporal de la ventana en muestras debe ser un número exponente de 2, esto es 128, 256, 512, etc. puntos que también limitarán la resolución espectral. Por ejemplo si se tiene una señal muestreada a 100 mps, la frecuencia de Niquist se encuentra en 50 Hz donde los filtros antialiasing estarán situados por regla general alrededor de 25 Hz y si se selecciona una ventana temporal de 1024 puntos (10.24 segundos), el intervalo de frecuencias será aproximadamente 0.098 Hz siendo esta la frecuencia mínima a la que se puede acceder.

No se debe olvidar que las señales analizadas provienen de una serie de instrumentos con una respuesta en frecuencia, es decir con sus propias frecuencias máximas y mínimas, por lo que además de realizar los cálculos anteriores, hay que verificar también cuales son los parámetros que caracterizan los instrumentos.

IV.5 Acondicionamiento de las ventanas para su análisis

Cuando se desea hacer un análisis espectral existe un factor importante que no se debe pasar por alto y es el tipo de ventana de selección que se utiliza para elegir la muestra que se va a analizar. Esto se refiere al hecho de tomar una porción de señal directamente, sin tener ningún tipo especial de atención, este fenómeno se da con mayor importancia cuando lo que se está analizando son señales que han sido seleccionadas de una muestra en las que no hay ni un comienzo definido ni un fin, como es el caso del tremor volcánico.

Cuando se selecciona una señal se está sumando a la señal en si otra, que tiene forma de caja, a la que también se le hará la transformada y se le sumará a la transformada de la

señal seleccionada. Este hecho puede implicar que se introduzca una señal que no corresponde a la señal duxada o bien, que se pierda resolución o ambas cosas.

Para minimizar este problema existen mecanismos de suavizado como ventanas coseno, de Hanning, de Hamming, entre otras cuyo uso se condiciona ya sea para aumentar resolución o para minimizar los efectos de los lóbulos laterales.

En general, cuando se trabaja con eventos puramente volcánicos se trabaja en escala doble lineal, pues se ha visto que su contenido espectral se limita en muchos casos a una estrecha banda centrada en uno o varios picos. Por tanto, resulta más conveniente usar la escala doble lineal que permite identificar los picos espectrales, analizar su anchura, etc.

El tener una señal sísmica en el dominio de la frecuencia facilita otro tipo de estudios como por ejemplo:

- Convoluciones
- Estudio de efectos de sitio
- Estudios de atenuación sísmica
- Cálculo de la energía sísmica
- Estudios de mecanismos de fuente
- Obtención de espectros de respuesta
- Discriminación entre eventos similares (por ejemplo explosiones y terremotos superficiales.)

IV.6 Espectrogramas

En una señal de origen volcánico es muy probable que el contenido espectral no se mantenga estable a lo largo del tiempo. En este caso la realización de un espectro del total de la señal nos suministrará información del total del contenido espectral, pero no de su evolución y puede que se pueda enmascarar algún pico espectral de amplitud menor.

En este caso la aplicación de espectros sucesivos a lo largo de la señal revelarán mejor estas variaciones espectrales. Por ello puede decirse que un espectrograma no es más que la representación, a lo largo del tiempo, de la evolución espectral de la señal mediante la superposición en el tiempo de sucesivos espectros de amplitud temporal menor que la señal total.

Capítulo V

V. Clasificación de eventos sísmicos observados en el volcán Popocatépetl

V.1 Sismicidad volcánica

Las características de distribución espacial, temporal y energética de la actividad sísmica son las que definen el grado y el tipo de sismicidad de una zona en particular. Por ello, el conjunto de parámetros tales como tiempo de ocurrencia, contenido de frecuencias localización hipocentral, magnitud, momento sísmico, caída de esfuerzos, mecanismos focales, dimensiones de la fuente, interdependencia de eventos, etc., son necesarios para evaluar adecuadamente la sismicidad.

La sismicidad volcánica es aquella que tiene lugar en una zona volcánica activa. Un terremoto se puede considerar volcánico cuando en su origen intervienen procesos magmáticos tales como la inyección y circulación de magma, la expansión de gas y los ocasionados por fracturamiento en la zona volcánica.

"La actividad sísmica de los volcanes presenta mucha variedad en amplitud, forma de onda y mecanismo focal, siendo uno de los mejores parámetros para estimar cuantitativamente la actividad volcánica. Esta actividad sísmica es provocada por la acumulación de energía mecánica y térmica, así como por movimientos del magma y gases." [10]

El estudio de la sismología volcánica incluye el monitoreo sistemático del estado de un volcán; resulta útil para pronosticar erupciones, estimar su tamaño y ayuda a la comprensión del proceso físico que se desarrolla en el interior del sistema volcánico.

[10] Joan Martí y Vicente Araña, ***La vulcanología actual,*** p 449

V.2 Clasificación de sismos volcánicos según Minakami

"El estudio detallado de los sismogramas relacionados con un proceso volcánico concreto, pone de manifiesto la existencia de varias familias de sismos que se presenta siempre con la misma forma, lo que ha llevado a clasificar los eventos en grupos, clasificación que sólo en líneas muy generales es posible traspasar de un volcán a otro y que depende en gran manera de la finura de la instrumentación utilizada." [11]

Debido a que en cada volcán se pueden presentar clasificaciones distintas en sus eventos sísmicos, es difícil tener una sola agrupación que envuelva a todos los volcanes, aun así existen clasificaciones tales como la de Schick (1981) (ver Fig.V.1) o la de Minakami (1974) que son las más extendidas.

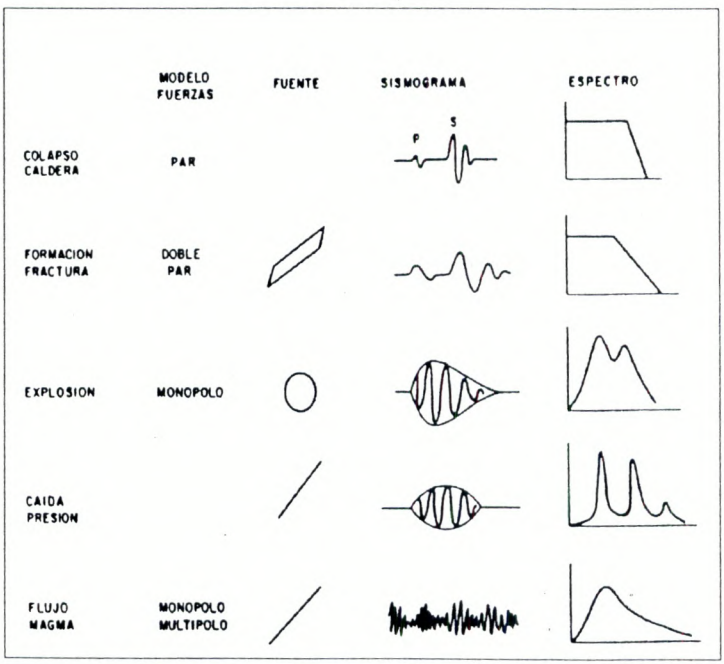


Figura. V.1 *Clasificación debida a Schick (1981), basada en el contenido espectral incluyendo el modelo del sistema de fuerzas y la extensión de la fuente puntual, superficial, esférica o lineal*

[11] Vicente Araña et al, ***Volcanología***, P 270

Minakami considera los siguientes criterios: Posiciones epicentrales e hipocentrales y la naturaleza de las ondas sísmicas. De estos criterios derivan los siguientes tipos de evento sísmicos:

Sismos tipo A Con rasgos muy similares a los denominados "sismos tectónicos", con claras llegadas de ondas P y S, dominan las altas frecuencias y sus profundidades hipocentrales varían entre 1 y 10 Km

Sismos tipo B Tienen una clara llegada de la fase P y una gran pobreza o a veces hasta carencia de la fase S, dominan las ondas de baja frecuencia y tienen profundidades hipocentrales inferiores a 1 Km bajo los cráteres.

Sismos de explosión Estos sismos vienen acompañados de explosiones, tienen fuentes generalmente someras y predominan las ondas superficiales. Las ondas que son registradas debidas a detonaciones explosivas se registran como ondas de gran amplitud y largo periodo.

Temblores volcánicos También conocidos como *tremores volcánicos,* constituyen trenes de ondas sísmicas continuas o aisladas de vibración, es una característica de la actividad sísmica de algunos volcanes, es una presencia de formas más o menos continuas, con contenido espectral estable y su origen está asociado con inyecciones de magma o a vibraciones sonoras de los conductos de emisión.

Es necesario mencionar que cualquier definición o clasificación de un fenómeno debe ser susceptible a cambiar conforme se reúnan nuevos conocimientos del mismo. Por ello, la clasificación de Minakami fue modificada en el momento en que se determinó la profundidad de los hipocentros de los eventos tipo B, por ello, se debe mencionar que efectivamente los eventos tipo B no son siempre someros y por ello en la definición no se debe hablar de profundidades hipocentrales, aun así la clasificación de Minakami es la guía básica para las observaciones de sismicidad volcánica.

V.3 Factores que determinan las distintas formas de onda

Existen cuatro factores que pueden hacer que la forma de onda varíe en cada estación sísmica, estos factores son:

1) Efecto se sitio
2) Efecto de fuente
3) Efecto de trayectoria
4) Tipo de instrumento

En el presente estudio se ha tomado una sola estación base, por lo que estos cuatro efectos son constantes, partiendo de la idea de que cada familia que se reconozca está compuesta por eventos originados en la misma zona y tienen la misma fuente o se producen a partir de fuentes muy cercanas, al asumir que las fuentes donde se inician las diferentes familias se encuentran próximas los efectos 1 y 4 no causan problema alguno, por ello se puede afirmar que cada evento clasificado dentro de las diferentes familias está capturado bajo las mismas condiciones y bajo los mismos efectos.

Con base en el análisis comparativo de un evento sísmico detectado en tres estaciones diferentes (Lermo et al., 1996) se observa que en cada estación la forma de onda de dicho evento es diferente (ver Figura V.2), este cambio se atribuye al efecto de trayectoria (Sawada 1994).

Sin embargo, existen otros efectos que también pueden modificar la forma de onda y el contenido espectral de las señales por lo que es necesario definir una estación referencial que en este caso será la estación Canario (PPPV), componente vertical que fue seleccionada fundamentalmente por las siguientes razones:

1) Es una estación alejada de fuentes de ruido
2) Tiene una posición cercana a las fuentes de eventos sísmicos (4200 m de elevación y a 2.5 Km del cráter)

3) Las diferencias entre los eventos se distinguen con claridad

4) Se ubica en un macizo rocoso, mismo que hace que las alteraciones por efecto de sitio sean mínimas.

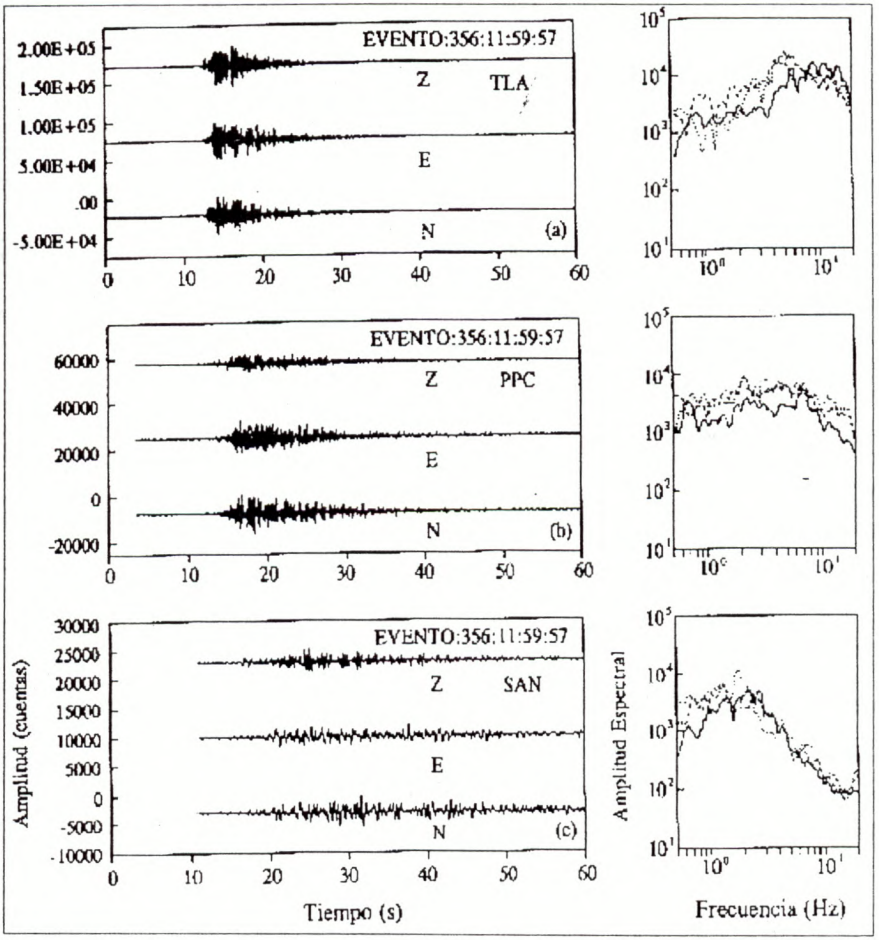


Figura V.2 *Trazas de un mismo evento registrado en TLA, PPC y SAN, con sus espectros de Fourier para cada una de las componentes: Z(linea continua), E (linea discontinua) y N (linea punteada)*

V.4 Clasificación de eventos sísmicos observados en el volcán Popocatépetl

Tomando como base las consideraciones anteriores, fue posible hacer una comparación y evaluación de los eventos ocurridos en el volcán Popocatépetl y de esta forma se realizó una clasificación de sus eventos sísmicos considerando el criterio de la forma de onda característica.

En esta nueva clasificación es posible observar los eventos tipo A (vulcanotectónicos), 7 tipos de eventos tipo B o exhalaciones, los eventos explosivos, los derrumbes y tremores. Por ello se puede decir que las variantes que se presentan en esta clasificación se observan en los eventos tipo B o exhalaciones pues a partir de que se reactivó el Popocatépetl, se han observado exhalaciones con diferentes formas de onda mismas que pueden proporcionar una información mayor sobre lo ocurrido en el Popocatépetl y sobre todo se pretende buscar un patrón a cortoplazo de la ocurrencia de estas señales antes de una manifestación eruptiva de alcances mayores.

Los eventos sísmicos asociados con una erupción volcánica tienen características especiales. "En una misma estación se pueden observar eventos con formas de onda y contenidos de frecuencia muy diferentes."[12] Esto puede deberse a cambios en profundidad y/o carácter de la fuente, de ahí la importancia de describir los tipos de eventos observados en el área del Popocatépetl.

El análisis espectral de los eventos característicos de cada familia permiten conocer la distribución en frecuencia y amplitud de una determinada señal. Además, se calcula el espectro evolutivo (espectrograma) de cada señal, mismo que ayuda a comparar la distribución de la amplitud y frecuencia de las señales en función del tiempo, entre cada miembro de la familia estudiada, de tal forma que en la clasificación presente en el dominio del tiempo, se encuentra una relación importante entre señales, llamada forma de onda.

[12] Minakami, 1974; Malone et al; 1981

Además se pretende encontrar si es que existe una relación en el dominio de las frecuencias y para ello es necesario hacer el siguiente análisis respecto a la frecuencia dominante presente en cada una de las siguientes familias.

V.4.1 Eventos tipo "A"

Son señales con llegadas de ondas P y S bien definidas y que contienen un amplio rango de frecuencias similar al de un sismo tectónico ordinario; a estos eventos se les denomina vulcano-tectónicos (VT) para diferenciarlos de aquellos eventos que son puramente tectónicos, los cuales tienen lugar fuera de las regiones volcánicas y son distinguibles por su forma de onda y contenido espectral.

Este tipo de eventos en otros volcanes ocurren generalmente a profundidades de 1 a 20 Km. debajo del volcán, y presentan una magnitud que normalmente es menor a 3. En algunas ocasiones como es el caso del Popocatépetl, rebasan este valor, de acuerdo con estadísticas mundiales pero normalmente son menores que 5 y a veces se presentan en forma de enjambre. Los sismogramas muestran ondas impulsivas P y S, En la figura V.3 se presenta un ejemplo de evento tipo "A".

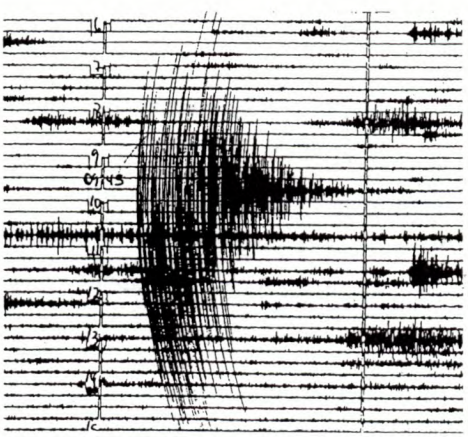


Figura V.3. *Evento Tipo A ocurrido el día 10 de julio de1997 a las 9:45 h. Con una magnitud de 2.5 y localizado a 4.7 Km. bajo el cráter*

Para realizar el análisis espectral se eligieron 9 eventos característicos, cada uno con una ventana de 20 s donde se tomó únicamente la fase intensa de la señal y mediante la transformada de Fourier se determinó el espectro de amplitud. Posteriormente, empleando la técnica del espectro evolutivo se obtuvo un espectrograma, (ejemplos en gráfica 1) el cual detalla la evolución de la señal en el tiempo. De este análisis se obtuvieron datos que sirven para observar las tendencias generales que presenta cada familia.

Para evaluar la distribución de los máximos espectrales, se elaboraron 9 ventanas con intervalos espectrales como se observa en la tabla V.1. Para los eventos VT de los 9 ejemplos seleccionados, se obtuvieron 32 picos máximos relativos y se observó que el 50% de eventos contienen dos frecuencias importantes que son **F8(5.1 a 5.8 Hz)** y **F9 (de 6.6 a 7.5 Hz.)** identificadas como las frecuencias características de los eventos tipo A.

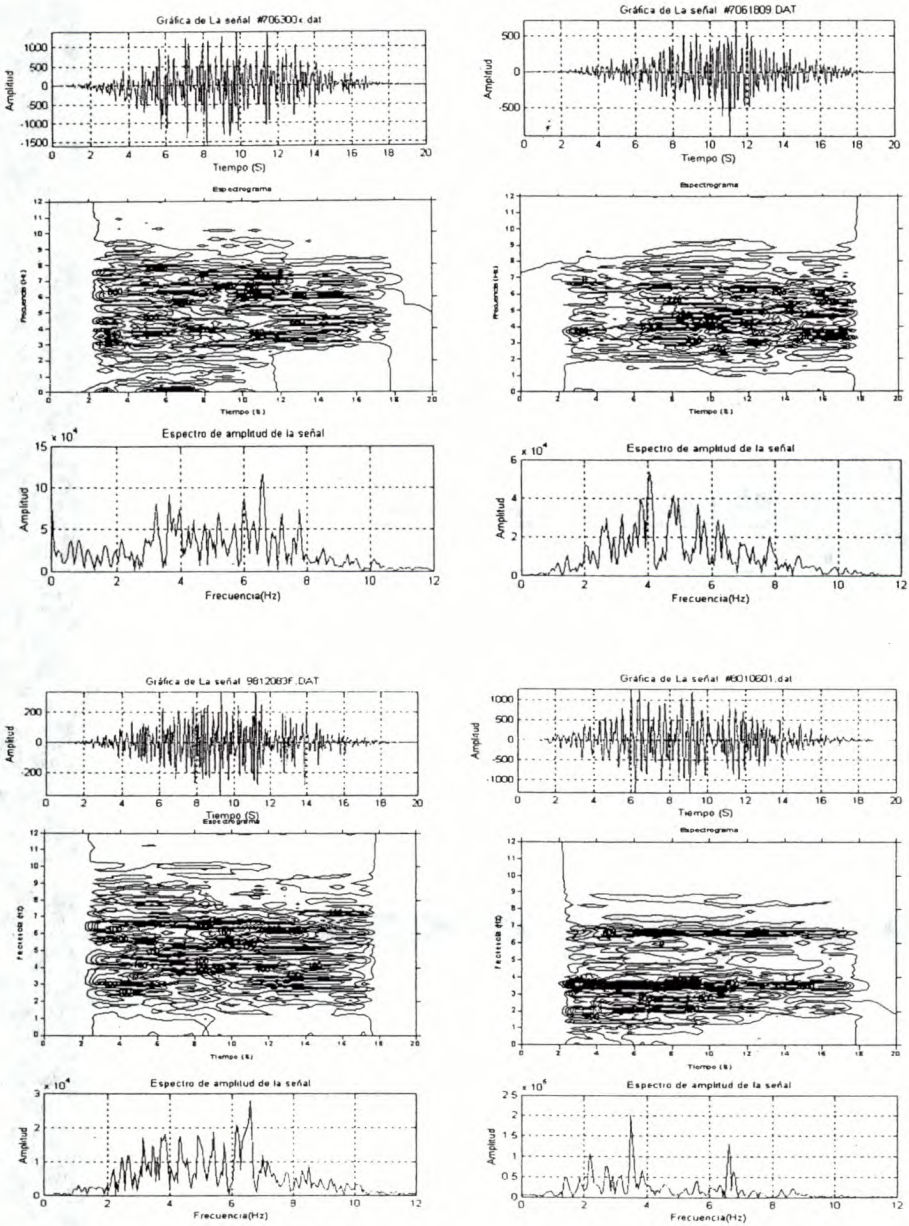
Tipo A					
HZ	Pico 4	Pico 3	Pico 2	Pico 1	32 Frec. dom
F1(1.0-1.9)					
F2(2.0-2.7)		2			
F3(2.8.3.0)		1			
F4(3.1-3.3)	1	1			
F5(3.4-3.6)		1	1	1	
F6(3.7-3.9)		1	2	1	
F7(4.0-5.0)	1			3	
F8(5.1-6.5)		2	4	2	25%
F9(6.6-7.5)	3	1	2	2	25%

Tabla V.1

Para realizar el análisis en el calculo de espectros de amplitud fue preciso realizar un programa en matlab, en este programa a la señal seleccionada se le toma únicamente la fase intensa con una ventana de 20 segundos y este segmento de señal, se suaviza en sus lóbulos laterales con una ventana de Hanning; Por este motivo los gráficos que se presentan durante todo el desarrollo muestran únicamente la fase intensa de la señal en una ventana de 20 segundos y además suavizada en sus extremos.

En el apéndice 1 (Grafico A2) se muestra un análisis comparativo entre algunos espectros de amplitud pertenecientes a una familia, este análisis fue realizado en cada una de las familias estudiadas pero únicamente se proporciona un ejemplo.

Eventos Tipo A



Gráfica 1: *Se muestran 4 ejemplos de eventos tipo A en ventanas de tiempo de 20 s, de toda la señal se obtuvo la fase intensa y ésta se corrigió primero aplicando una ventana de Hanning para suavizar el inicio y fin de la misma por ésta razón no es posible ver la señal completa.*

V.4.2 Exhalaciones

Las exhalaciones, se agruparon en 7 tipos tomando en cuenta su forma de onda característica. Estos eventos se distinguen por tener una fase emergente, carecen de fase S y predominan en las frecuencias de 1 a 5 Hz; Chouet, (1996) define a estos eventos como LP (periodo largo) A continuación se describe cada uno de los tipos identificados y se presenta también un ejemplo de serie de tiempo correspondiente además de los espectros y espectrogramas correspondientes.

Eventos tipo 1. Este tipo de evento es uno de los más comúnmente observados en el registro analógico y se caracterizan por tener un arribo emergente y la coda disminuye también de forma gradual, normalmente su duración en tiempo no excede el minuto (ver figura V.4)

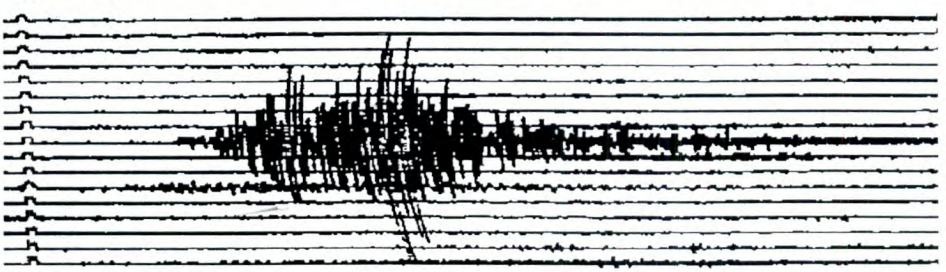


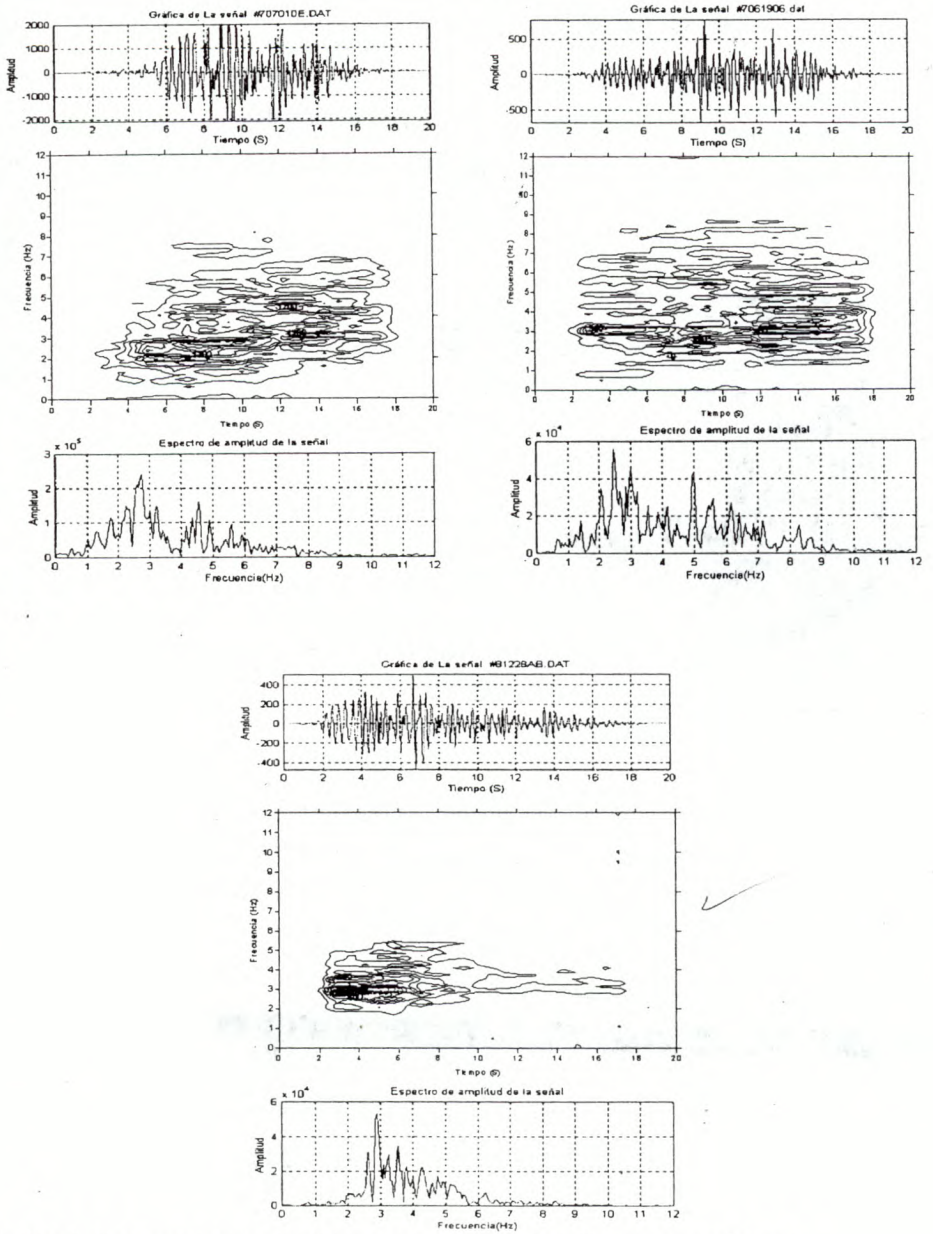
Figura V.4 *Evento Tipo 1 ocurrido el 15 de diciembre de 1997*

Se tomaron siete eventos característicos de esta familia y con el análisis espectral realizado se obtuvieron 21 picos máximos relativos. La distribución de las frecuencias indican que la **F3(2.8-3.0)** es la frecuencia característica para este tipo de eventos seguida por la **F5(3.4-3.6),** Los eventos F3 representan el 28% de todos los picos y los de la F5, representan el 23% (ver ejemplos en Tabla V.2 y en la gráfica 2).

Tipo 1					
HZ	Pico 4	Pico 3	Pico 2	Pico 1	21 frec. dom.
F1(1.0-1.9)					
F2(2.0-2.7)		3		1	
F3(2.8.3.0)		1	1	4	28%
F4(3.1-3.3)			1	1	
F5(3.4-3.6)			4	1	23%
F6(3.7-3.9)					
F7(4.0-5.0)		2	1		
F8(5.1-6.5)	1				
F9(6.6-7.5)					

Tabla V.2

Eventos Tipo 1



Gráfica 2: *Se presentan 3 ejemplos de los eventos Tipo 1; cada gráfica nos muestra las tres representaciones más importantes que se analizaron (forma de onda, espectrograma y espectro de amplitudes)*

El eventos tipo 2. Se caracteriza por tener una gran semejanza con los tipo "A", solo que éstos, en lugar de presentar una onda impulsiva, manifiestan un pequeño arribo antes de la llegada de dicha onda (conocida como nariz), la cual es de escasa amplitud pero claramente distinguible. detalle. (ver figura V.5)

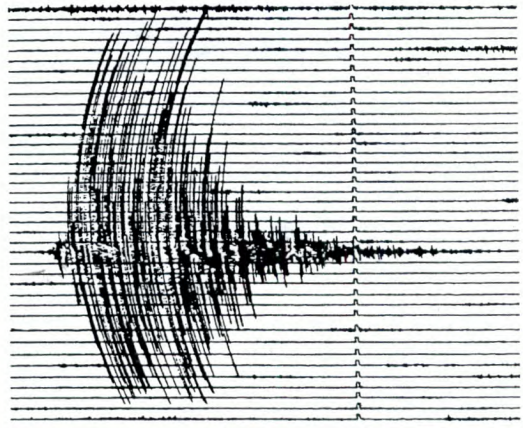


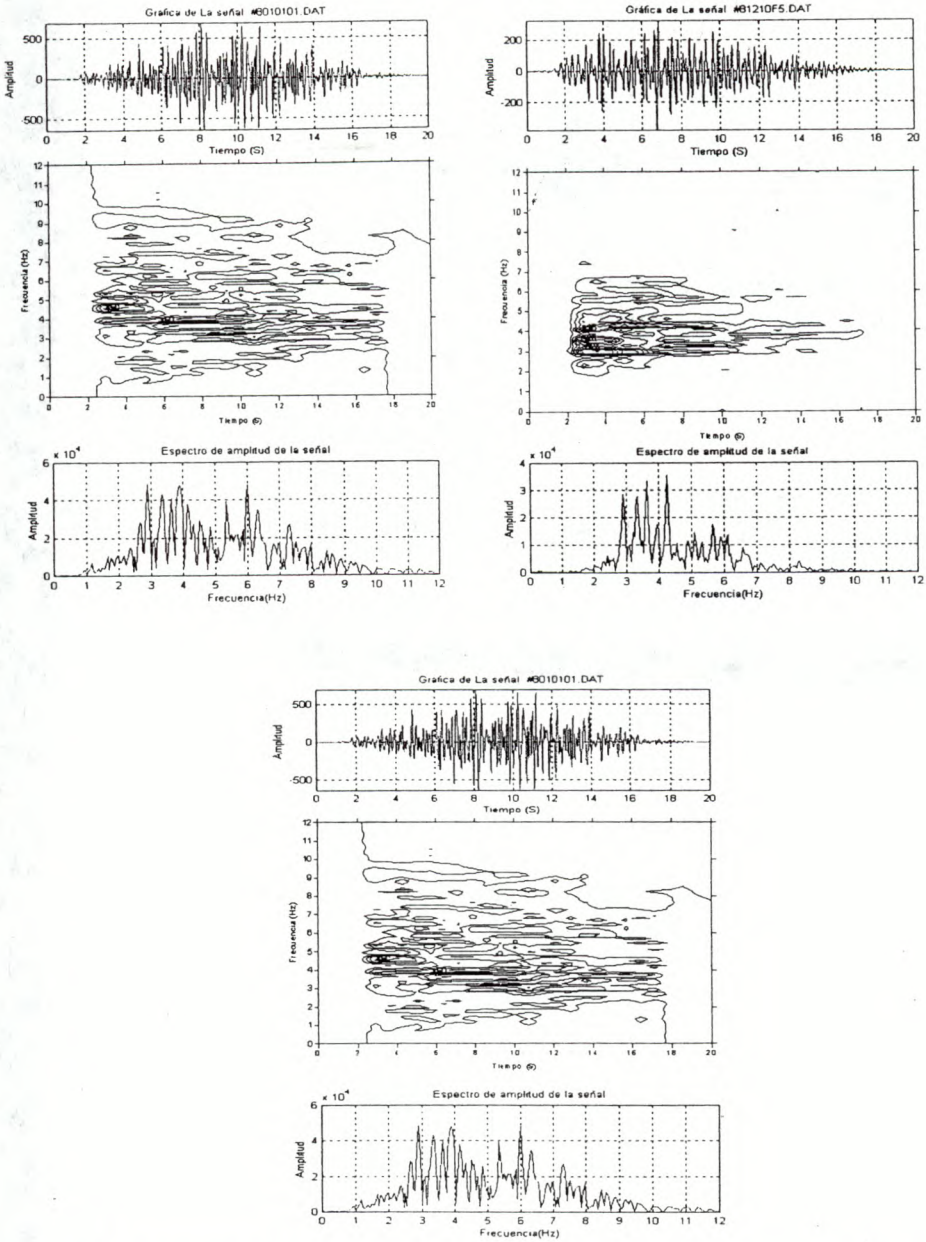
Figura V.5 *Evento Tipo 2 ocurrido el día 5 de noviembre de 1998 a las 16:52 h.*

Se tomaron 8 eventos representativos de esta familia y el análisis espectral muestra los siguientes resultados: se obtuvieron 14 picos máximos relativos de donde se observó que las frecuencias características para esta familia son **F7(4 a 5 Hz)** con el 28% seguida de la **F3(2.8 a 3.0 Hz)** y **F4(3.1 a 3.3 Hz)** con 21% cada una, la tendencia en especial para esta familia no es muy clara. (ejemplos en la tabla V.3 y en la gráfica 3)

Tipo 2					
Hz	Pico 4	Pico 3	Pico 2	Pico 1	14 Frec. dom.
F1(1.0-1.9)					
F2(2.0-2.7)				1	
F3(2.8.3.0)		1		2	21%
F4(3.1-3.3)			1	2	21%
F5(3.4-3.6)			1	1	
F6(3.7-3.9)				1	
F7(4.0-5.0)			3	1	28%
F8(5.1-6.5)					
F9(6.6-7.5)					

Tabla V.3

Eventos Tipo 2



Gráfica 3*: Se presentan 3 ejemplos de los eventos tipo 2, se observan las 3 representaciones utilizadas para el análisis hecho a ésta familia.*

Eventos tipo 3. A diferencia de los tipo 2, tienen una nariz más larga (entre 15 y 20 segundos) antes de la llegada del arribo de mayor amplitud; por ejemplo Figura V.6.

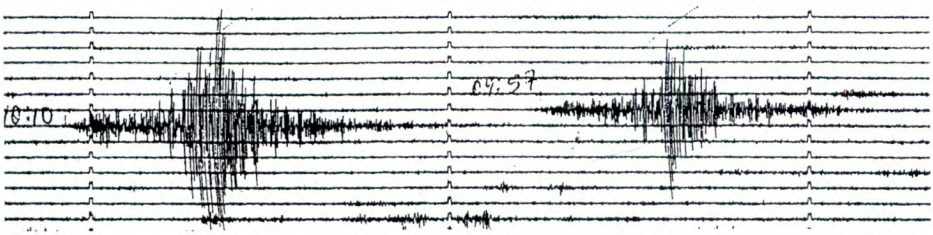


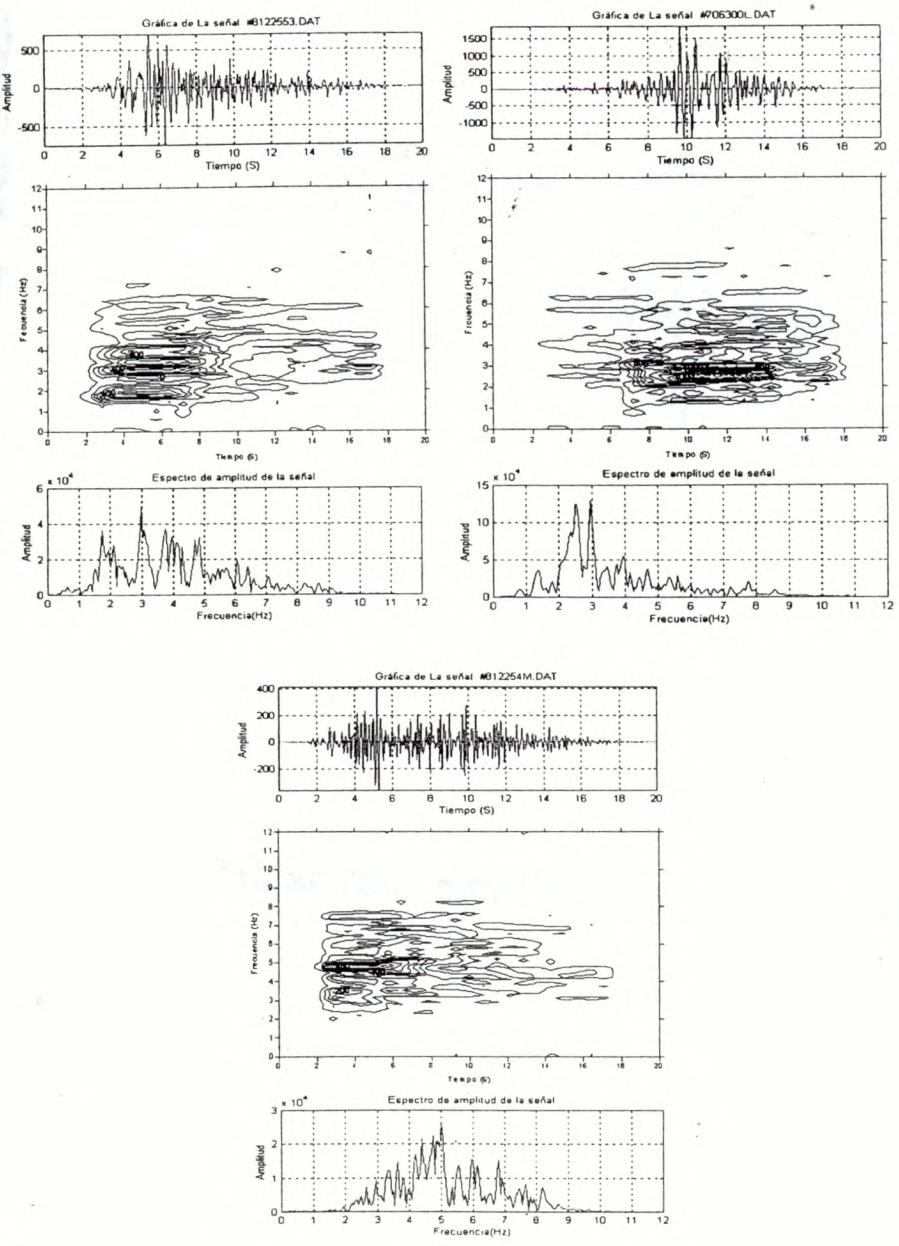
Figura V.6 *Ejemplos de eventos Tipo 3 ocurridos el día 16 de diciembre de 1997 a las 9:57h y a las 10:10 h*

Se consideraron 8 eventos representativos para esta familia donde el análisis espectral arrojo 21 picos máximos relativos y se observa que la frecuencia característica corresponde a **F2(2.0 a 2.7 Hz)** con ocurrencia del 23%, seguida por la **F4 (3.1 a 3.3 Hz.)** con el 19% ejemplos Tabla V.4 y gráfica 4

Tipo 3					
Hz	Pico 4	Pico 3	Pico 2	Pico 1	21 frec. Dom.
F1(1.0-1.9)		1			
F2(2.0-2.7)	2	3			23%
F3(2.8.3.0)	3				
F4(3.1-3.3)	2	1	1		19%
F5(3.4-3.6)		2			
F6(3.7-3.9)			2		
F7(4.0-5.0)	1	1	1		
F8(5.1-6.5)				1	
F9(6.6-7.5)					

Tabla V.4

Eventos Tipo 3



Gráfica 4: *se observan 3 ejemplos de eventos tipo 3*

Eventos tipo 4. Se caracterizan porque a simple vista se observa un paquete de ondascon baja amplitud seguido de una nariz que puede ser larga o corta y posteriormente un paquete con amplitudes mayores. (Figura V.7)



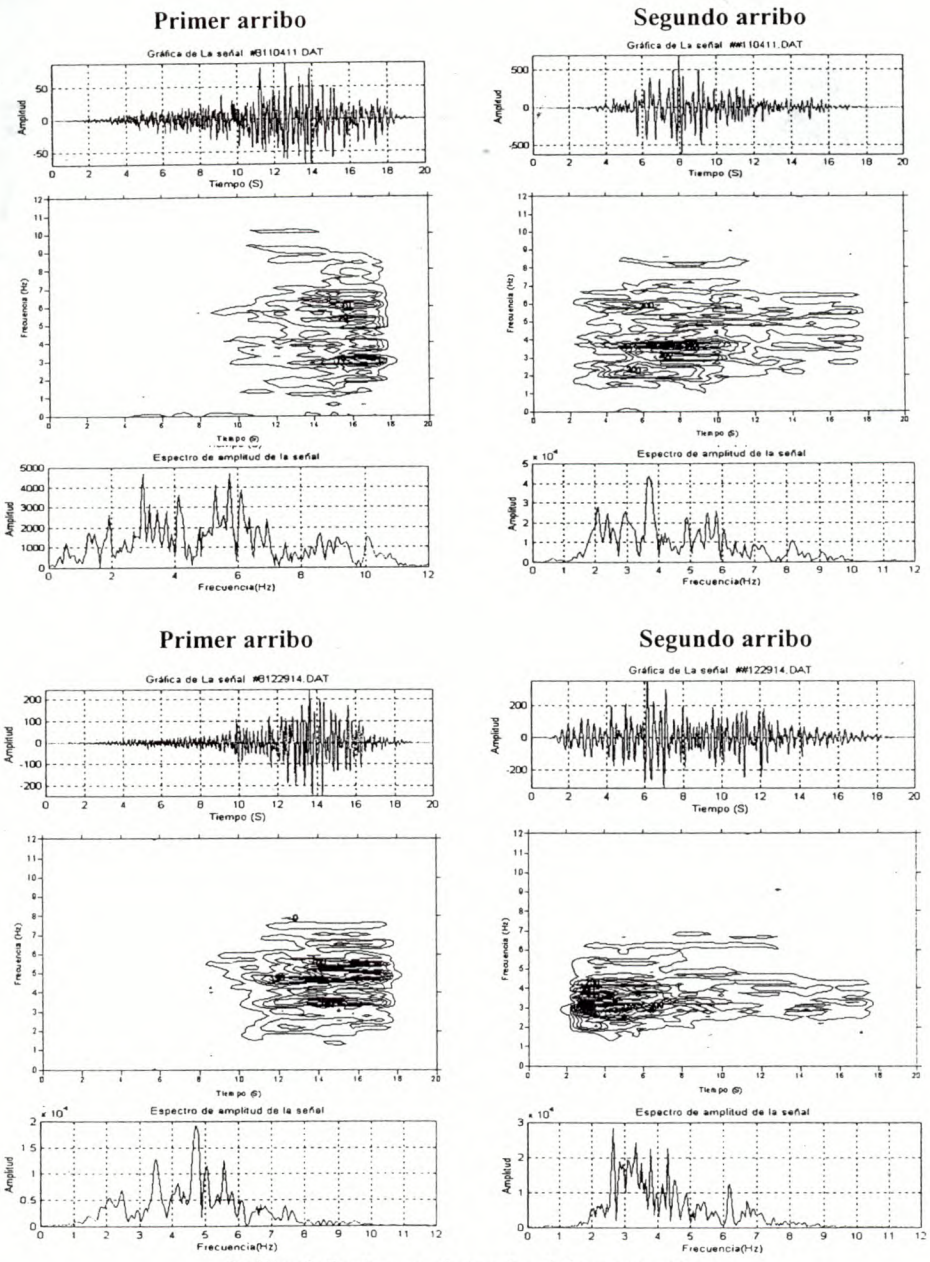
Figura V.7 *Evento Tipo 4*

Se consideraron 4 eventos (dobles) debido a la naturaleza de la señal, ésta presenta 2 arribos claramente distinguibles pero que de ninguna manera representan el arribo P y el arribo S, por lo tanto podemos decir que cada evento debe contener sus respectivos arribos inicial y secundario. De estos eventos se obtuvieron 24 picos máximos relativos de los cuales 7 corresponden a la **F3 (2.8-3.0Hz)** con 29%, 5 a la **F8(5.1-6.5Hz)** con 20%, 3 a la **F4(3.1-3.3Hz)** y **F5(3.4-3.6Hz)** con 12%, Ver tabla V.5 y gráfica 5.

Tipo 4					
Hz	Pico 4	Pico 3	Pico 2	Pico 1	24 frec dom.
F1(1.0-1.9)					
F2(2.0-2.7)			1		
F3(2.8.3.0)		1	2	4	29%
F4(3.1-3.3)			1	1	12%
F5(3.4-3.6)		1	2		12%
F6(3.7-3.9)		1	1	1	
F7(4.0-5.0)	2			1	
F8(5.1-6.5)		3	1	1	20%
F9(6.6-7.5)					

Tabla V.5

Eventos Tipo 4



Gráfica 5 *Se observan 2 ejemplos de los eventos tipo 4.*

Eventos tipo 5. Presentan un arribo emergente, su duración en tiempo normalmente es menor a un minuto (Figura V.8)

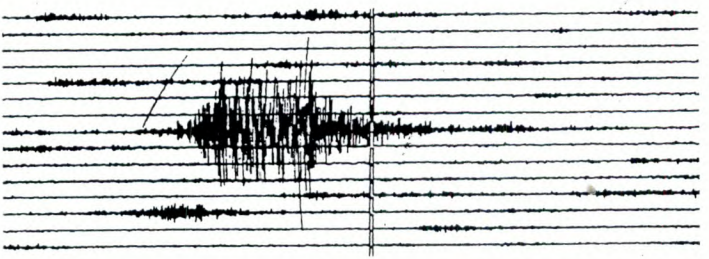


Figura V.8 *Evento Tipo 5 ocurrido el día 8 de julio de 1997 a las 5:23 h*

Este tipo de eventos ocurren en contadas ocasiones y no ha sido posible hacer el análisis de frecuencias características debido a que son muy pocos los ejemplos claros de la ocurrencia de estos eventos; aún así es necesario mencionarlos ya que en algunos volcanes de composición andesítica y dacítica como el volcán Asama, en japón, se consideran como eventos precursores de una erupción y son conocidos como eventos tipo N, (Ahoyama et al., 2000) aunque también existe la contraparte (Sawada, 1998) que piensa lo contrario acerca de estos eventos.

Es muy difícil obtener alta calidad en la forma de onda para estos eventos pues su magnitud es muy pequeña y tienen baja frecuencia, estos sismos son caracterizados por la coda que decae muy lentamente y tienen una frecuencia estacionaria; la primera investigación de estos eventos fue hecha por Hamada et al., en (1976).

Kagiyama et al., (1985) dicen que los eventos tipo B son seguidos por los eventos tipo N y a su vez estos son precursores de una actividad eruptiva.

Cabe aclarar que no todos los eventos Tipo N preceden a la actividad eruptiva (Shimozoru et al 1982). En el volcán Popocatépetl también aparecen, estos eventos y en este trabajo han sido clasificados como tipo 5.

Eventos tipo 6. Aunque ocurren en pocas ocasiones lo hace de manera singular, pues tiene una apariencia semejante a dos eventos juntos. La amplitud de los dos paquetes principales eventos suele ser similar y su duración típica se mantiene entre dos minutos. (Figura V.9)

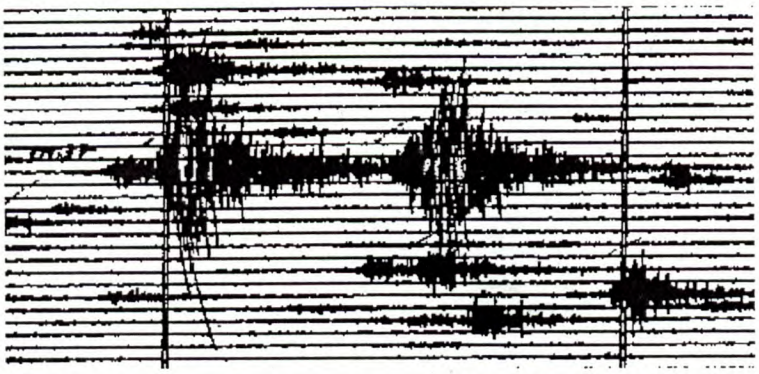


Figura V.9 *Evento Tipo 6 ocurrido el día 27 de junio de 1997 a las 9:37 h*

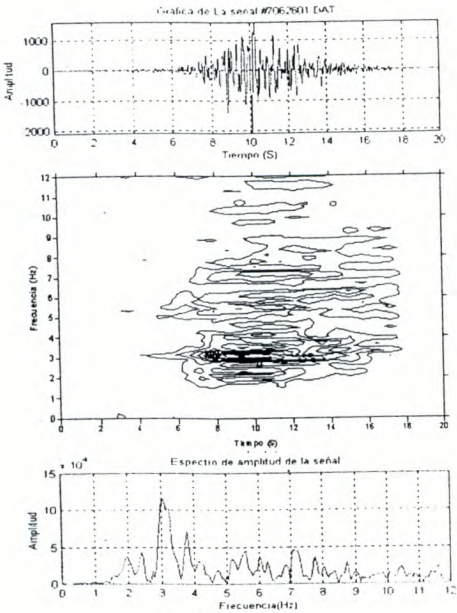
Se consideraron 6 eventos dobles representativos y se obtuvieron 27 picos máximos relativos donde se observa que la **F2(2.0 y 2.7 Hz)** es la frecuencia característica para esta familia con el 22% y es seguida por la **F5(de 3.4 a 3.6 Hz)** con el 18%. Estos eventos se distinguen de los tipo 4 porque presentan dos arribos con amplitud muy semejantes. Además, en estos arribos los dos espectros de cada evento contienen picos espectrales máximos similares. (ver Tabla V.6 y también gráfica 6)

Tipo 6					
Hz	Pico 4	Pico 3	Pico 2	Pico 1	27 frec.dom
F1(1.0-1.9)					
F2(2.0-2.7)			2	4	22%
F3(2.8.3.0)		2		2	
F4(3.1-3.3)			1	1	
F5(3.4-3.6)			3	2	18%
F6(3.7-3.9)			1		
F7(4.0-5.0)			2	2	
F8(5.1-6.5)		1	2	1	
F9(6.6-7.5)		1			

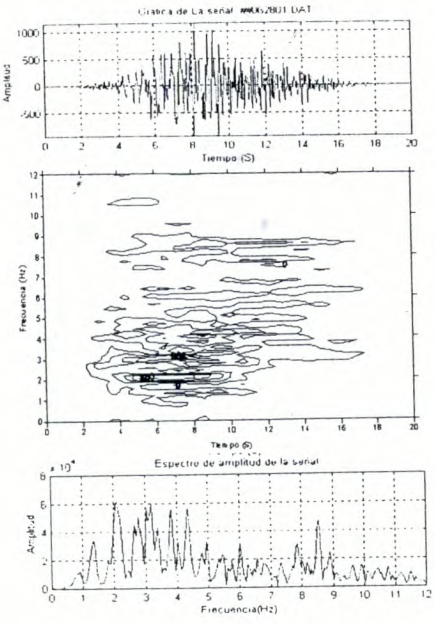
Tabla V.6

Eventos Tipo 6

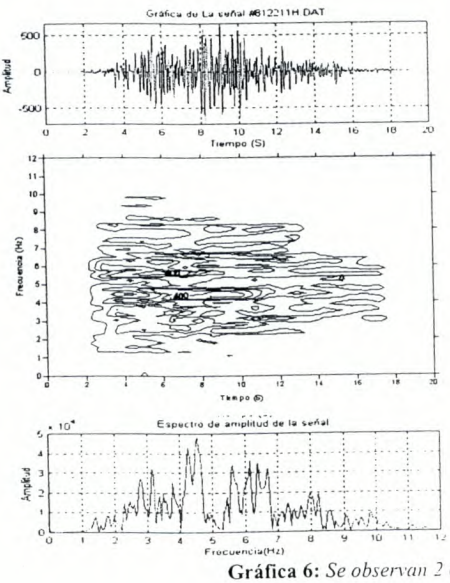
Primer arribo



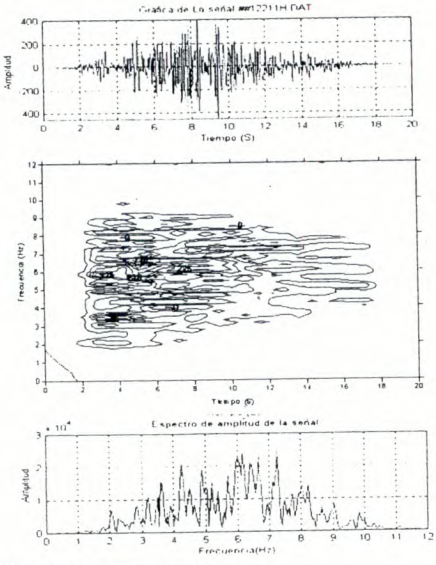
Segundo arribo



Primer arribo



Segundo arribo



Gráfica 6: *Se observan 2 ejemplos de los eventos tipo 6.*

Eventos tipo 7

Otro ejemplo representativo de exhalación son las llamadas exhalaciones largas, que en esta clasificación corresponden a los eventos tipo 7. Se distinguen por la presencia de un arribo emergente corto, seguido de una coda muy larga que llega a durar varios minutos A veces estas exhalaciones van seguidas de tremores que pueden ser armónicos o espasmódicos; se presenta un ejemplo en la Figura V.10

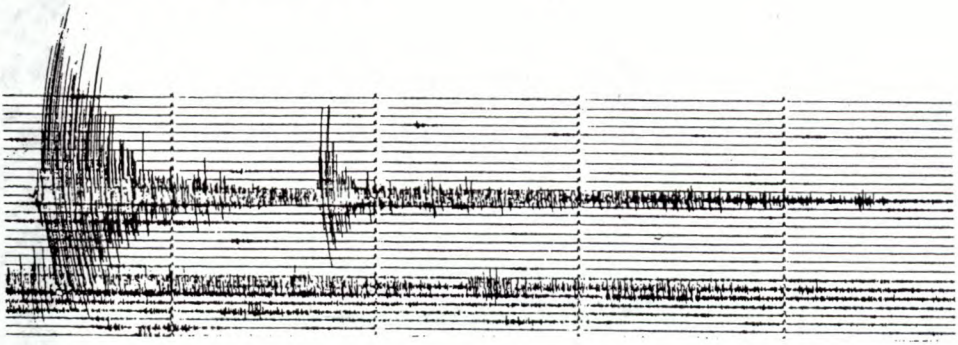


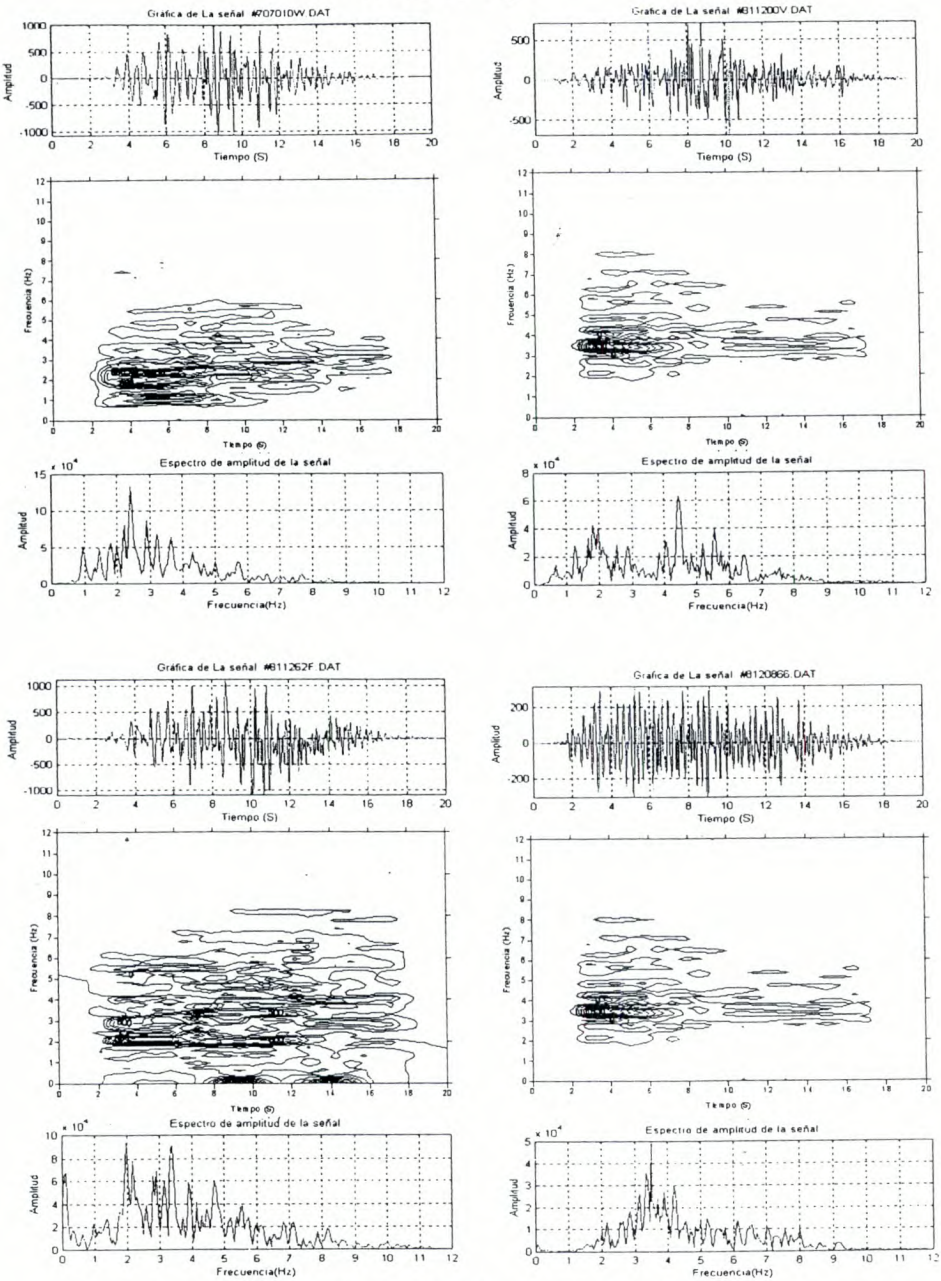
Figura V.10 *Evento Tipo 7 (Exhalación larga) ocurrido el dia 19 de noviembre de 1998 a las 22:53 h*

Se consideraron 5 eventos representativos de esta familia, mismos que aportaron un total de 11 picos máximos, 3 de estos picos se encuentran en la frecuencia característica **F2(2 a 2.7 Hz)** con un 27% y dos más en la **F6(3.7 a 3.9 Hz)** con una ocurrencia de 18% (Ejemplos Tabla V.7 y en la gráfica 7)

Tipo 7					
Hz	Pico 4	Pico 3	Pico 2	Pico 1	
F1(1.0-1.9)			1		
F2(2.0-2.7)			1	2	27%
F3(2.8.3.0)		1			
F4(3.1-3.3)			1		
F5(3.4-3.6)				1	
F6(3.7-3.9)			1	1	18%
F7(4.0-5.0)		1			
F8(5.1-6.5)					
F9(6.6-7.5)	1				
11 frec.dom	9.00%	18%	36%	36%	

Tabla V.7

Eventos Tipo 7



Gráfica 7: *Ejemplos de señales tipo 7 exhalaciones largas*

V.4.3 Derrumbes

Además de las exhalaciones, también se tienen identificados los eventos denominados **derrumbes**, estos eventos se producen sobre las laderas del volcán, pero se mencionan en ésta clasificación debido a que se observan con frecuencia en el registro analógico, se distinguen por no presentar paquetes de ondas bien diferenciadas, sin embargo pueden reconocerse, a simple vista. (Figura V.11)

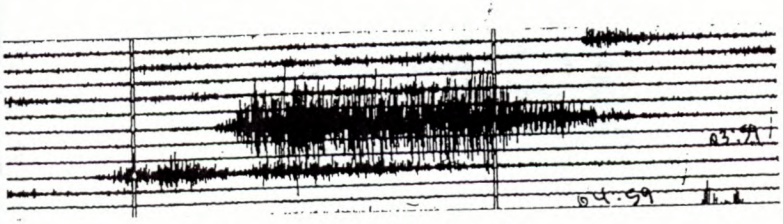


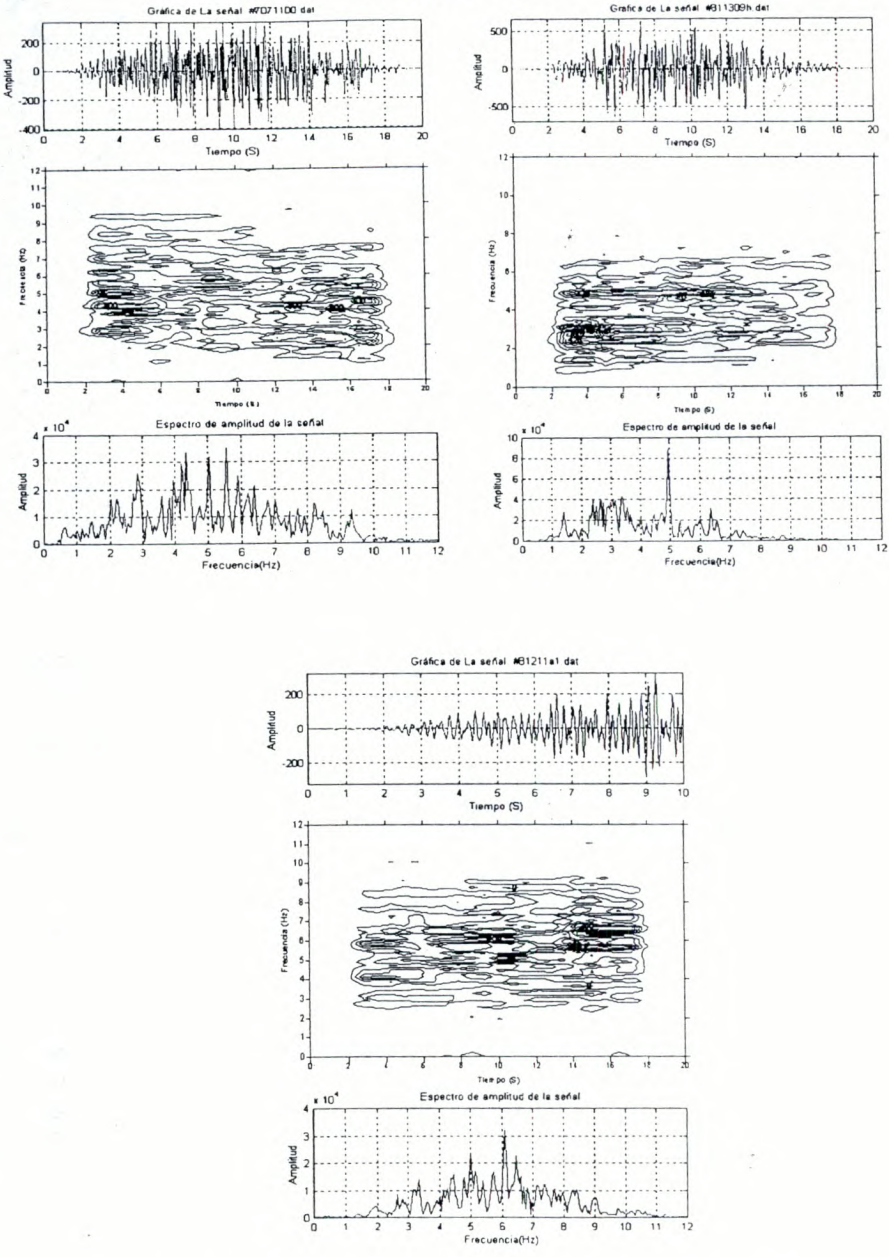
Figura V.11 *Evento tipo 8 Derrumbe*

Para esta familia se consideraron 5 eventos representativos mismos que aportaron las siguientes características se obtuvieron 10 picos máximos y se observa que 3 de ellos pertenecen al intervalo de frecuencia **F7 (4 a 5 Hz)** con 30% y otras tres que pertenecen a la frecuencia **F8 (5.1 a 6.5 Hz)** y también 30%, (ver Tabla V.8) es decir pertenecen a los intervalos de altas frecuencias. (Ejemplos gráfica 8)

Tipo 8 Hz	Pico 4	Pico 3	Pico 2	Pico 1	10 frec.dom.
F1(1.0-1.9)					
F2(2.0-2.7)		1			
F3(2.8.3.0)			1		
F4(3.1-3.3)				1	
F5(3.4-3.6)					
F6(3.7-3.9)					
F7(4.0-5.0)			1	2	30%
F8(5.1-6.5)		1	1	1	30%
F9(6.6-7.5)		1			

Tabla V.8

Eventos Tipo 8



Gráfica 8: *Ejemplos de eventos tipo 8, también conocidos como derrumbes*

V.4.4 Explosiones

Los **eventos tipo 9** corresponden a las explosiones; estas manifestaciones se han registrado desde que se reactivó el Popocatépetl y se presentaron con mayor frecuencia en noviembre de 1998. Su duración a menudo rebasa, en su fase intensa, el minuto, un ejemplo característico es el siguiente. (Fig. V.12)

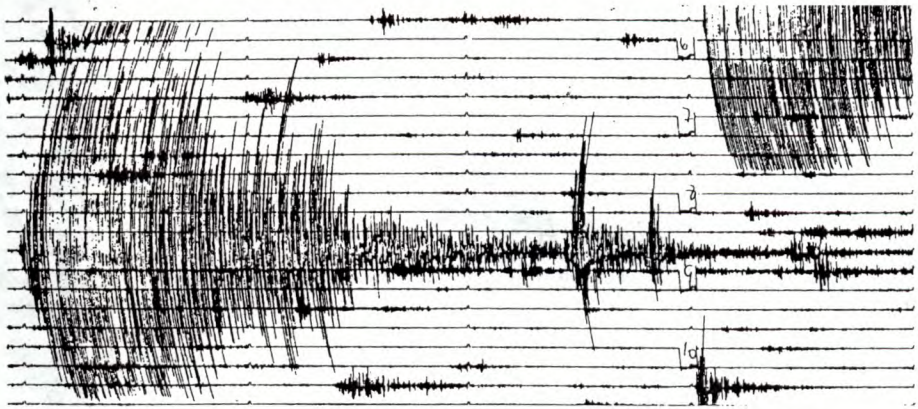


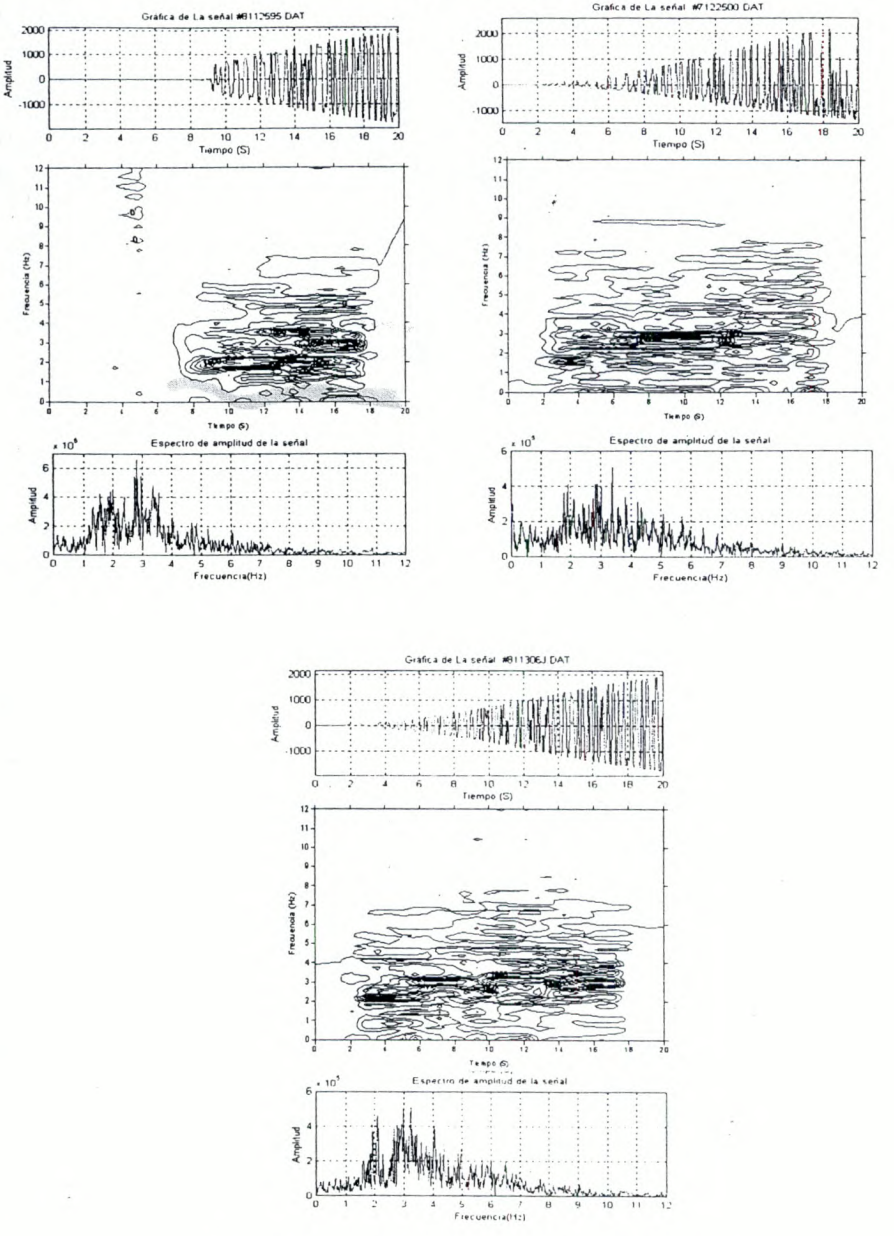
Figura V.12 *Evento tipo 9 explosión ocurrida el día 27 de noviembre de 1998*

Para esta familia se tomaron 5 ejemplos representativos mismos que arrojaron las siguientes frecuencias características; 3 de ellas pertenecen al intervalo **F4 (3.1 a 3.3 Hz)** con un 23% y otras tres pertenecen a las frecuencias **F5 (3.4 a 3.6 Hz)** con un 23% ver Tabla V.9 (Ejemplos gráfica 9)

Tipo 9					
Hz	Pico 4	Pico 3	Pico 2	Pico 1	13 frec.dom
F1(1.0-1.9)		1			
F2(2.0-2.7)			1		
F3(2.8.3.0)		1	1		
F4(3.1-3.3)			2	1	23%
F5(3.4-3.6)			1	2	23%
F6(3.7-3.9)				1	
F7(4.0-5.0)		1			
F8(5.1-6.5)					
F9(6.6-7.5)					

Tabla V.9

Eventos Tipo 9 (explosiones)



Gráfica 9: Eventos tipo 9 también conocidos como explosiones

V.4.5 Tremores

El tremor se caracteriza por mantener amplitudes y frecuencias más o menos constantes por periodos del orden de minutos horas o hasta días y se considera un claro indicador de movimiento de fluidos por los conductos del volcán. McNutt, (1996) afirma que estos eventos son causados por fenómenos de presurización de fluidos en conductos del volcán que ocurren a una profundidad muy somera del cráter y puede ser armónico (T1) o espasmódico (T2)

El tremor T1 corresponde al tremor armónico (ver figura V.13) y para su análisis se consideraron 4 eventos mismos que arrojaron los siguientes resultados, se obtuvieron 12 picos máximos, la distribución de los mismos se ve marcada en tres bandas importantes, la primera banda se encuentra en el intervalo de **F1(1.0 a 1.9 Hz)** con 25%, la segunda banda se encuentra en el intervalo de **F3 (2.8 a 3.0 Hz)** con 25% y la tercera banda se encuentra marcada en el intervalo de **F7 (4.0 a 5.0 Hz)** con 25% (ver Tabla V.10) Varios de estos ejemplos tienen una característica muy similar y es que son monocromáticos pero también conservan la presencia de algunos otros contenidos de frecuencia con amplitudes pequeñas. (Ejemplos gráfica 10).

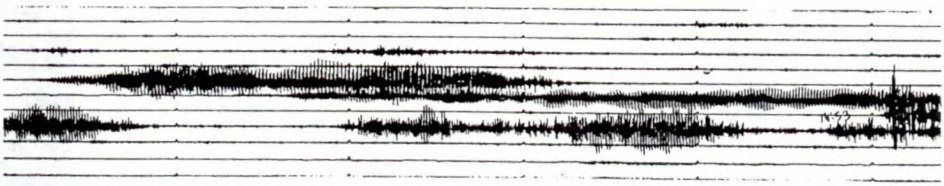
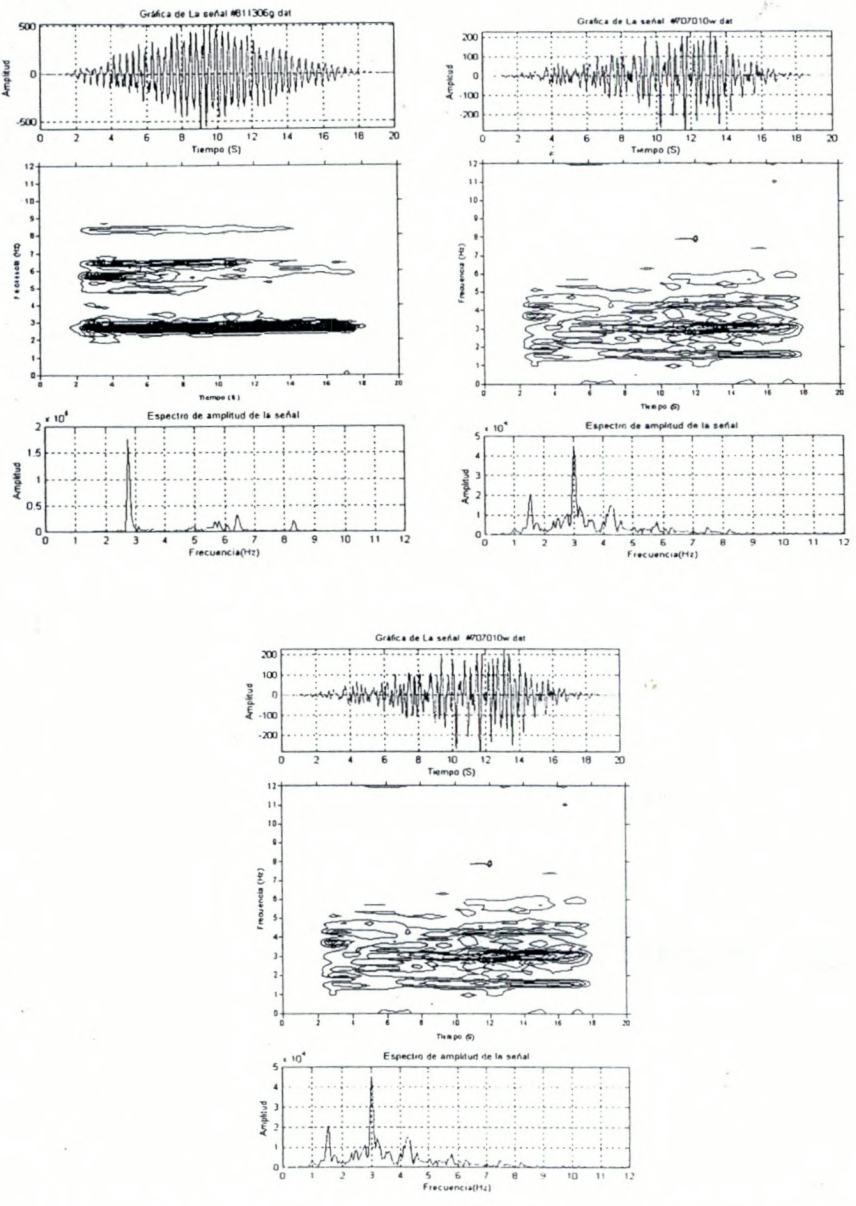


Figura V.13 *Tremor armónico ocurrido el 29 de noviembre de 1998.*

Tremor T1					
Hz	Pico 4	Pico 3	Pico 2	Pico 1	12 Frec.dom
F1(1.0-1.9)		1	1	1	25%
F2(2.0-2.7)					
F3(2.8.3.0)	1			2	25%
F4(3.1-3.3)				1	
F5(3.4-3.6)					
F6(3.7-3.9)					
F7(4.0-5.0)		1	2		25%
F8(5.1-6.5)		1	1		
F9(6.6-7.5)					

Tabla V.10

Tremores T1



Gráfica 10: *Ejemplos de tremor armónico donde se puede distinguir claramente la frecuencia característica*

El **Tremor T2** (ver figura V.14) presenta variaciones en frecuencias y amplitudes y se puede observar después de una explosión o exhalación o bién, debido a un flujo de lodo; para este análisis se obtuvieron los siguientes resultados, considerando 3 eventos característicos se observa que sobresale una banda de frecuencias que pertenece al intervalo **F4 (3.1 a 3.3 Hz)** con 37%, existen otras frecuencias que son visibles como lo es la **F2 (2.0 a 2.7 Hz)** con 25% ver tabla V.11. Este tipo de eventos contienen un número mayor de frecuencias pero estas no son tan notables debido a que se contienen amplitudes muy pequeñas. (Ejemplos gráfica 11)

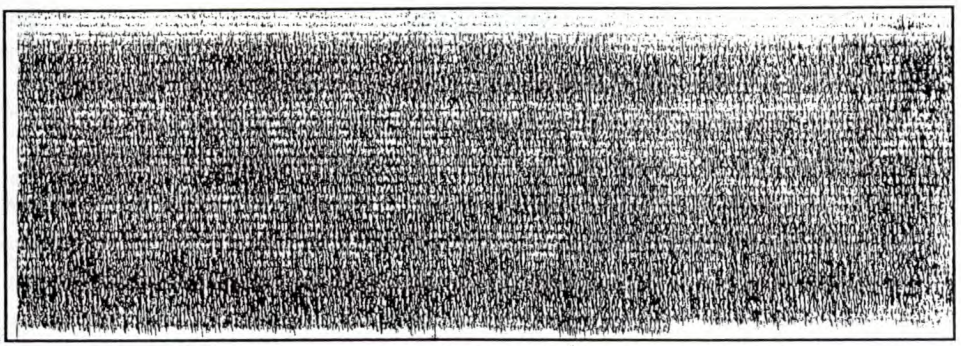
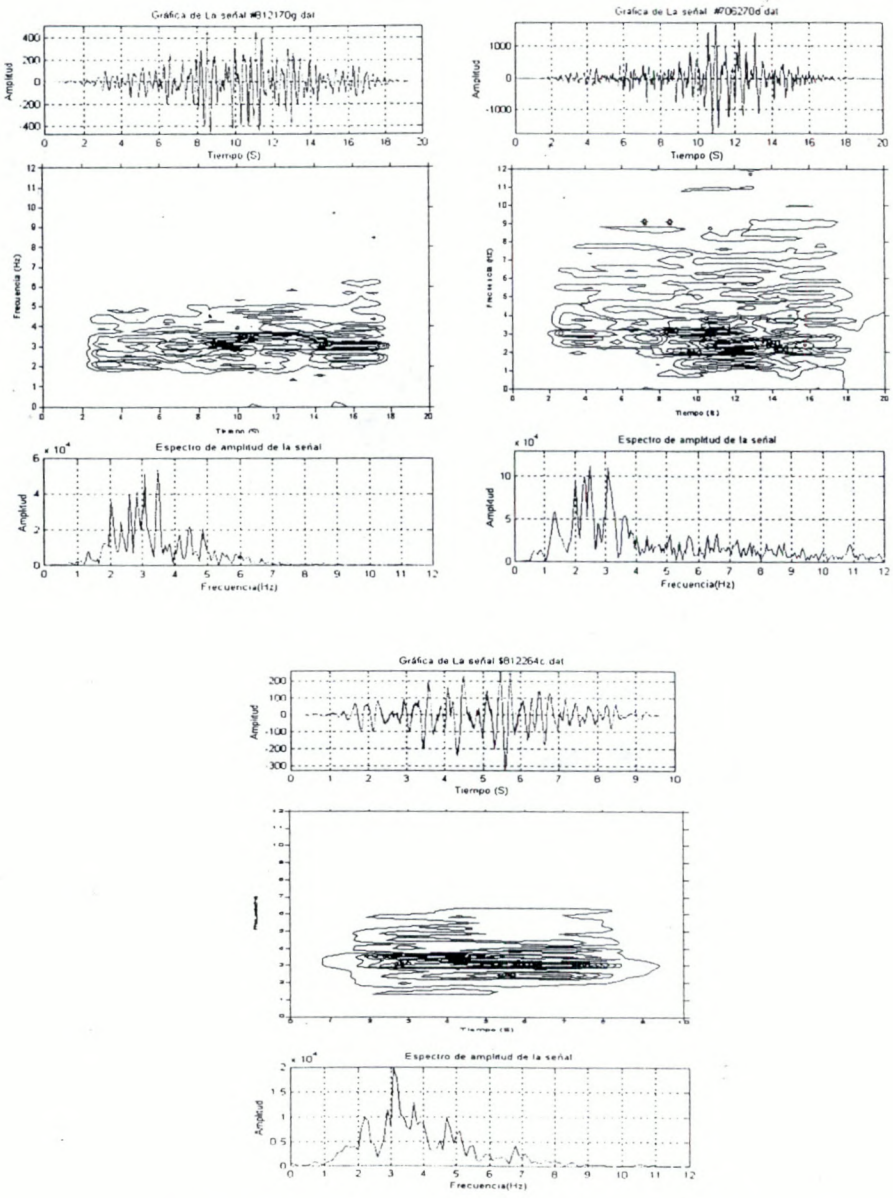


Figura V.14 *Tremor espasmódico ocurrido el dia 7 de marzo de 1996*

Tremor T2					
Hz	Pico 4	Pico 3	Pico 2	Pico 1	8 frec.dom
F1(1.0-1.9)					
F2(2.0-2.7)	1		1		25%
F3(2.8.3.0)			1		
F4(3.1-3.3)		1	1	1	37%
F5(3.4-3.6)				1	
F6(3.7-3.9)					
F7(4.0-5.0)				1	
F8(5.1-6.5)					
F9(6.6-7.5)					

Tabla V.11

Tremor T2



Gráfica 11: *Tremor T2 también conocido como tremor espasmódico*

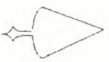
V.5 Tablas resumen de la clasificación

De acuerdo con el análisis realizado en este trabajo con las señales sísmicas del volcán Popocatépetl en los intervalos de tiempo de junio a julio y diciembre de 1997, enero, noviembre y diciembre de 1998, septiembre a diciembre del 2000 y enero a septiembre del 2001 se identificaron 5 familias de eventos sísmicos y se clasificaron 931 eventos. Las características de estas familias son las siguientes:

Familia de eventos Tipo A o vulcanotectónicos (VT) con altas frecuencias y formas de onda impulsivas. En su mayoría presentan una forma de onda muy característica y presenta arribos claros e impulsivos para las ondas P y S con frecuencias arriba de 5 Hz..

Eventos	Frecuencia característica 1	Frecuencia caracteristica 2	Frecuencia característica 3	Total de Eventos 931	Envolvente
Tipo A	F8(5.1-6.5)	F9(6.6-7.5)		**77 del total**	

Familia de Exhalaciones. Dentro de esta se obtuvieron 7 envolventes distintas y algunas pequeñas variaciones en las frecuencias características de cada evento. La siguiente tabla resume las características principales de cada miembro identificado.

Eventos	Frecuencia característica 1	Frecuencia caracteristica 2	Frecuencia característica 3	Total de Eventos 931	Envolvente
Tipo 1	F3(2.8-3.0)	F5(3.4-3.6)		**268 del total**	
Tipo 2	F7(4.0-5.0)	F3(2.8-3.0)	F4(3.1-3.3)	**205 del total**	
Tipo 3	F2(2.0-2.7)	F4(3.1-3.3)		**109 del total**	
Tipo 4	F3(2.8-3.0)	F8(5.1-6.5)	F4(3.1-3.3) F5(3.4-3.6)	**54 del total**	
Tipo 5				**23 del total**	
Tipo 6	F2(2.0-2.7)	F5(3.4-3.6)		**37 del total**	
Tipo 7	F2(2.0-2.7)	F6(3.7-3.9)		**53 del total**	----- 0 -----

Familia de Derrumbes. En este estudio son nombrados como eventos tipo 8 que contienen altas frecuencias y algo importante es que no tienen una envolente bien definida, sin embargo, son muy fáciles de reconocer debido a su carácter.

Eventos	Frecuencia característica 1	Frecuencia caracteristica 2	Frecuencia característica 3	Total de Eventos 931	Envolvente
Tipo 8	F7(4.0-5.0) F8(5.1-6.5)			28 del total	----- 0 -----

Familia de Explosiones. Nombradas como eventos tipo 9; se caracterizan por su arribo impulsivo En la mayoría de las estaciones la señal aparece saturada y su fase intensa normalmente tiene una duración muy cercana a un minuto o a veces mayor.

Eventos	Frecuencia característica 1	Frecuencia caracteristica 2	Frecuencia característica 3	Total de Eventos 931	Envolvente
Tipo 9	F4(3.1-3.3)	F5(3.4-3.6)		**15 del total**	----- 0 -----

Familia de Tremores Para éste estudio no se hizo una clasificación variada de los tremores debido a que se trata de un tema muy extenso y amerita un estudio más detallado, pero para los fines buscados se dividieron en dos familias: una el tremor armónico T1, que se reconoce a simple vista por lo modulado de la señal, y la otra el tremor espasmódico T2, que presenta una señal no modulada y con amplitudes muy variables.

Eventos	Frecuencia característica 1	Frecuencia característica 2	Frecuencia característica 3	Total de Eventos 931	Envolvente
Tremor T1	F1(1.0-1.9) F3(2.8-3.0) F7(4.0-5.0)			**25 del total**	----- 0 -----
Tremor T2	F4(3.1-3.3)	F2(2.0-2.7)		**37 del total**	----- 0 -----

Capítulo VI

V. Interpretación de resultados y conclusiones

VI.1 Antecedentes

En este trabajo se presenta el análisis de datos sísmicos, observados en periodos que incluyen siete fechas importantes en las cuales el volcán Popocatépetl mostró un incremento notable en su actividad. Para ello fue preciso definir un intervalo de tiempo de observación en el que de manera general se mostrará un cambio evidente en la actividad. Se determinó que quince días antes de una fase importante, son un punto de partida razonable para buscar la existencia de un patrón sísmico de ocurrencia a corto plazo.

El análisis de eventos para cada fecha seleccionada implicó la clasificación de las envolventes (capítulo V}). Cabe mencionar que no fueron consideradas las señales sísmicas con amplitudes muy pequeñas (menores de 15 mm en registros analógicos) debido a que a esa escala es difícil distinguir claramente las envolventes características y además el registro digital para los eventos de junio y diciembre de 1997 no era continuo (este registro se inicia a partir de febrero de 1998), por ello sólo se registraban las señales de mayor amplitud.

VI.2 Análisis de eventos explosivos importantes

VI.2.1 Junio 30 de 1997

El primer periodo de actividad analizado corresponde a la explosión del 30 de junio de 1997, considerada la primera etapa de actividad intensa desde que el volcán inició su reactivación en 1994. como consecuencia de ese evento se reportó caída de ceniza en poblados cercanos al volcán y también en el D.F. Este evento fue el primero que se revisó, ante la posibilidad de encontrar algún patrón de ocurrencia de cada uno de los eventos

clasificados con anterioridad. Para realizar el trabajo se elaboraron gráficas de ocurrencia de los eventos observados. La gráfica que contiene esta representación se muestra en el apéndice 2 (gráfica 1). Dicha gráfica engloba 30 días de observación (del día 14 de junio al 14 de julio de 1997) y muestra los tipos de eventos sucedidos por fecha y hora de ocurrencia, lo que hace posible darnos una idea de la actividad sísmica en esa etapa.

Durante este periodo de actividad hay un incremento en número de sismos tipo "A". Este aumento paulatino se hace más evidente cuando los sismos actúan como precursores de la erupción el día 30 de junio, pues aparecen 7 eventos un poco antes de la gran explosión y posteriormente siguen ocurriendo de manera regular y las variaciones observadas en cuanto a número de eventos posterior a la explosión no tienen mayor relevancia.

En cuanto a los eventos de baja frecuencia como son el tipo 1, aumentan de manera considerable, sobre todo a partir del día 27 de junio, es decir 3 días antes de la erupción con una ocurrencia máxima relativa de 10 eventos para el mismo día.

Los eventos tipo 2 incrementan sus parámetros a partir del día 20 de junio, que es cuando alcanzan un máximo con nueve eventos, aunque en días posteriores su ocurrencia se observa sin variaciones considerables.

Los eventos tipo 3 se observan con un ligero incremento de 6 eventos el día 29 de junio y en los días anteriores y posteriores al día 30 de junio su presencia se observó sin grandes variaciones y para el día 8 de julio se vuelve a observar un incremento en 7 unidades.

En cuanto a los eventos tipo 4 para el día 24 de junio, es decir 6 días antes de la erupción, ocurre un máximo de 6 eventos, mismos que desaparecen entre los días 25 a 28 y el día 29 de junio aparecen nuevamente.

El tipo 5 sólo ocurre el día 30 de junio un poco antes de la exhalación más fuerte y posteriormente después del día 8 de julio aparecen algunos otros eventos de este tipo.

También puede observarse que los eventos tipo 6 aparecen sólo 7 días, antes y de manera similar ocurren otros eventos los días 27, 28 y 30 de junio así como el día 4 de julio. Respecto a los eventos tipo 7 se presentan 4 eventos en diversas fechas anteriores a la del 30 de junio y posterior a la misma también ocurrieron 2 más.

En cuanto a los derrumbes sólo se identificaron en fechas posteriores al 30 de junio lo cuál nos sugiere que son el resultado del evento ocurrido el día 30 de junio.

En el tremor se observa que sí existieron algunas secuencias de éste, pero el tipo T1 ocurrió sólo un día antes del día 30 de junio. Respecto al tremor T2 se pueden observar algunas secuencias desde el 15 de junio, aunque de manera irregular y sin un incremento importante.

Resumiendo, la actividad observada del día 30 de junio de 1997 obedeció al siguiente patrón de ocurrencia observado en la figura VI.1.

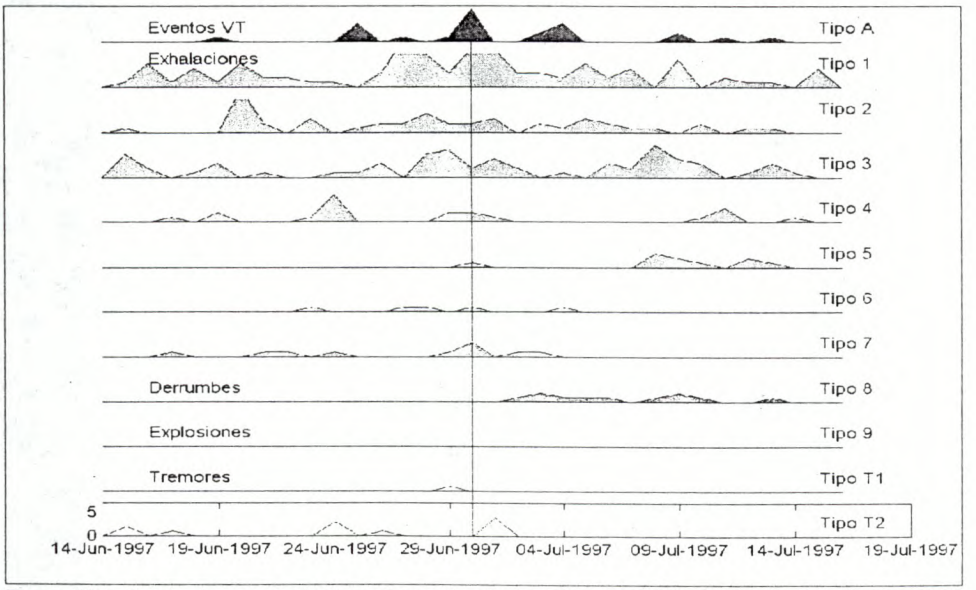


Figura VI.1 *Patrón de eventos sísmicos observados durante junio y julio de 1997, en la escala vertical el máximo número de eventos graficados es 7 por ello los eventos tipo1 en sus picos máximos se ven cortados y por el contrario los eventos tipo T1 debido al número de eventos son muy poco perceptibles.*

VI.2.2 diciembre 24 de 1997

Se presentó un evento explosivo con una duración aproximada de 2 minutos seguido de 15 eventos volcanotectónicos menores y varias exhalaciones moderadas ocurridas el 24 de diciembre de1997, observándose la expulsión de material incandescente. El episodio completo duró aproximadamente 30 minutos, al cabo de los cuales todos los parámetros regresaron a la normalidad. (Ver apéndice 2 gráfica 2 donde se engloba el total de la actividad sísmica para éste periodo)

En las observaciones hechas a la gráfica VI.2 es muy notorio que antes del día 24 de diciembre, que fue cuando ocurrió la mayor erupción, y a partir del día 15 de junio, comenzaron a ocurrir eventos de tipo A mismos que continuaron hasta un día antes del 24 de diciembre y posteriormente el día 30 se presentan aunque en cantidades menores.

Los eventos tipo 1 incrementan su número antes de la erupción, pero en el momento de la misma disminuyen de forma considerable hasta el cero, el día 24 y el día 26.

Respecto a los eventos tipo 2, se tiene que éstos aumentaron en número de forma considerable, aunque los valores días antes(más de quince días) eran mayores. Debido a esto se puede pensar en estos eventos como precursores y que posiblemente tengan periodos de ocurrencia mayores a los quince días que en este trabajo se consideraron.

Los eventos tipo 3 son eventos que aparecen antes y después de la erupción en porcentajes similares, lo mismo ocurre con los eventos tipo 4 que muestran una ocurrencia parecida.

Los eventos tipo 5 se presentan de forma regular a partir del 15 de diciembre sugiriendo una alta probabilidad de que se trate de eventos precursores al menos para esta fecha.

El evento tipo 6 es el evento que hasta ahora se ha notado que con más claridad ocurre un poco antes de la erupción fuerte para esta fecha se nota antes de la erupción y después de ella también se encuentra pero en menor número.

Se observa la presencia de algunos eventos tipo 7, pero fuera del intervalo de los quince días antes, lo cual nos refleja que no siempre ocurren o funcionan como precursores.

El patrón de ocurrencia encontrado para este periodo de actividad queda representado en la figura VI.2.

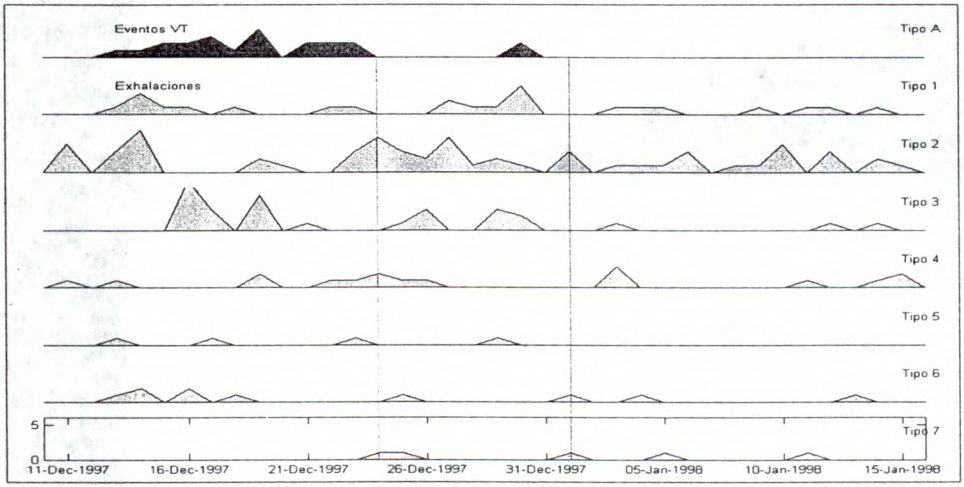


Figura VI.2 *Eventos sísmicos observados para el mes de diciembre de 1997 y enero de 1998, durante esta crisis no se identificaron derrumbes, explosiones ni tremores.*

VI.2.3 Enero 1° de 1998

El 1° de enero, se produce otra explosión que genera una columna de ceniza de hasta 5 Km por encima del cráter (ver figura VI.3) y el incendio de algunos pastizales, producido por el material incandescente arrojado.

Se recomienda ver la gráfica 2 del Apéndice 2 donde se tiene un registro completo de todos los sismos presentes durante ésta crisis. Esta gráfica comprende dos periodos de crisis, la del 24 de diciembre de 1997 y la del 1° de enero de 1998.



Figura VI.3 *1° de enero de 1998, tomada de la página Web de Cenapred*

Durante el periodo del 2 al 20 de enero, prevalecen condiciones normales con continuas emisiones de gas y vapor, pequeñas exhalaciones y ocasionales eventos tipo A de baja a moderada intensidad.

El día 6 de enero una erupción moderada produjo resplandor y fue seguida por una secuencia de eventos tectónicos moderados. Antes de esto, se observaron tremores de baja amplitud durante ocho minutos; esta actividad sísmica fue asociada con movimiento de lava en el domo.

El día 30 de diciembre ocurren dos eventos tipo A y posterior a la exhalación larga no se observa ningún otro evento de este tipo.

Los eventos del tipo 1 el día 30 alcanzan un máximo relativo. Posteriormente la actividad decrece y sólo se distingue que la ocurrencia oscila entre cero y un evento por día durante los quince días restantes.

Los eventos tipo 2 no proporcionan mucha información, debido a que la actividad permanece en términos generales en índices altos, pero el día 27 de diciembre se alcanza un máximo relativo con 6 eventos.

Los eventos tipo 3 aparecen antes y después del día 1°, sólo que en fechas anteriores ocurren 3 eventos, en los días 26 y 29. Después del día 1° regresan a cero y se presenta la exhalación fuerte. Más tarde este tipo de eventos siguió apareciendo aunque en menor cantidad.

Los eventos tipo 4 continuaron apareciendo después de la exhalación del día 24 de diciembre y el día 27 dejaron de verse, apareciendo nuevamente el día 3 de enero y también los días 10 y 14.

Respecto a los eventos tipo 5, el día 29 de diciembre aparece uno, es decir dos días antes de la exhalación, después de esta en los quince días posteriores no vuelven a aparecer este tipo de eventos.

Los eventos tipo 6 tienen una menor ocurrencia pero el día 25 aparece uno; posteriormente el día 1° ocurre otro un poco antes de la exhalación fuerte, después de la misma ocurren 2 eventos más uno el día 4 y el otro el 12 de enero.

En las exhalaciones fuertes tenemos una ocurrencia el día 24 otra el día 25 y la que sigue es la del 1° de enero y en fechas posteriores ocurren dos eventos más los días 5 y 10 de enero.

Es peculiar observar que al igual que las otras fases eruptivas, los eventos que demuestran mayor importancia son aquellos que menos se presentan, tal es el caso de los tipo 5 al tipo 7, en esta fecha el tremor no fue observado ni tampoco los derrumbes.

VI.2.4 Noviembre 22 de 1998

A partir del día 22 de noviembre, a las 13:02 (Hora local), el volcán mostró un incremento sustancial en su actividad. Se detectaron exhalaciones continuas así como episodios de tremor e incandescencia en la boca del cráter. Para el 23 de noviembre, el nivel de actividad sísmica era mayor que el día anterior. Episodios de tremor armónico el día 24 por la mañana, indicaban, junto con el aumento de la actividad, la probable formación de un nuevo domo. Estos períodos de actividad estuvieron intercalados con episodios de calma. El día 25 a las 08:10 ocurrió la primera explosión que marcó el inicio de una etapa explosiva.

En esta actividad eruptiva hay que resaltar la relativa calma que se observa, los parámetros que se elevaron en las fechas anteriores ahora permanecen estables en niveles bajos.(ver apéndice 2 gráfica 3)

Para este periodo de noviembre lo común es ver en los registros analógicos una calma relativa durante los quince días revisados antes de la exhalación fuerte y es observable la presencia de algunos eventos tipo A, antes, es decir los días 6, 14, 15 y 19 y posteriormente vuelvan a aparecer estos eventos después del día 23.

Respecto a las exhalaciones tipo 1 ocurren una el 3, el 12 y el 20 y después del 23 surgen algunas otras.

Las exhalaciones tipo 2 aparecen del 4 al 8 y vuelven a aparecer después del 21 cuando alcanzan máximos relativos.

La presencia de los eventos tipo 3 es muy escasa y solo se observan algunos eventos el día 5 y el día 19 y después del día 25.

Antes del día 23 aparecen 2 eventos tipo 4, uno el día 3 y otro el día 14 de noviembre y después del día 23 aparecen algunos eventos más.

Los eventos tipo 5 solamente se observaron uno el día 28 y es posterior a la actividad del día 23.

La ocurrencia de los eventos tipo 6 es muy rara pero para esta fecha de crisis es aún más acentuada pues sólo ocurrieron 2 eventos el día 25 y son posteriores a la fecha de crisis.
Los eventos tipo 7 funcionan como un identificador pobre debido a que solamente ocurren uno el día 8 y el siguiente se presenta el día 19.

En cuanto a los derrumbes éstos se presentaron con poca frecuencia, uno el 4 de y otro el 24 de noviembre.

Las explosiones son un dato muy importante pues durante este periodo el volcán inicia una nuevo etapa de actividad la cual se ve representada por un gran número de explosiones, en ella se inicia un episodio donde se destruye parcialmente el domo formado en el mes de enero del mismo año y es el día 25 cuando se presenta la primera explosión de muchas que siguieron apareciendo aún en diciembre.

El tremor armónico T1 aparece el día 24 y el tremor espasmódico T2 aparece 7 días antes del día 23 y también un día antes de la exhalación larga ocurrida este el mismo día 23.

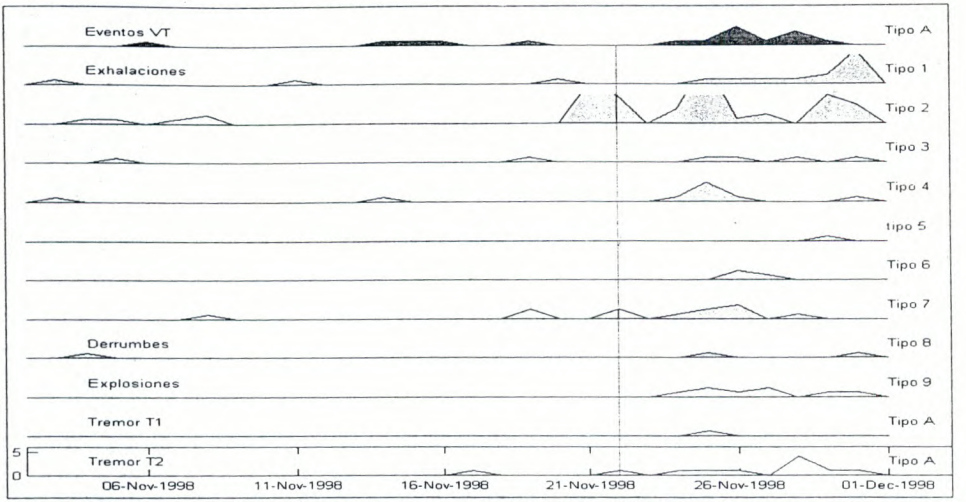


Figura VI.4 *Eventos ocurridos durante el mes de noviembre del año 1998, la escala vertical tiene como máximo número de eventos 6, por ello es que los eventos tipo 2 se encuentran cortados.*

VI.2.5 Diciembre 22 y 24 1998

El 22 y el 24 de diciembre ocurrieron emisiones de ceniza importantes; el resto del mes, el volcán redujo su actividad explosiva y sólo se registraron emisiones esporádicas de ceniza y pequeñas explosiones. Para cerrar el año, el volcán generó un sismo volcano-tectónico de magnitud 3.5. El proceso observado a finales de noviembre y diciembre, es un proceso de destrucción del domo que se formó en el interior del cráter (ver el total de la actividad sísmica para este periodo en el apéndice 2 gráfica 4).

Durante este periodo, los eventos A aparecen en muy contadas ocasiones y el último de éstos eventos se presentó el día 14 Posteriormente hubo un periodo de calma relativa hasta el día 30 de diciembre cuando volvió a ocurrir otro evento.

Los eventos tipo 1 aparecen de manera regular en casi todas las fechas. Un dato importante es que en la fecha en que ocurre la exhalación mayor la ocurrencia de estos eventos tiende a cero, posterior a la exhalación durante los días siguientes vuelven a aparecer de manera regular.

Los eventos tipo 2 permanecen de manera regular y aumentan el día 17 pero para el día 22 presentan una ocurrencia de cero, y posterior a la exhalación en días siguientes vuelven a aparecer.

Los eventos tipo 3 se registran de manera aislada antes y después de la exhalación mayor, los parámetros nuevamente están en cero, después de la exhalación aparecen de manera regular.

Los eventos tipo 4 al igual que los 3 aparecen en fechas anteriores y posteriores a la exhalación larga pero en cantidades menores y la ocurrencia en la fecha de exhalación grande es nula.

No se encontró ni un solo evento tipo 5 en este periodo de actividad.

Los eventos tipo 6 se presentan antes de la exhalación fuerte del día 22. Un evento ocurre el día 20, es decir 2 días antes de la exhalación, y se puede observar que posterior a la exhalación no ocurre ningún otro evento de este tipo.

Los eventos tipo 7 aparecen, 9, 6 y 1 días antes de la exhalación del día 22.

Los derrumbes, al contrario de lo visto en fechas anteriores, aparecen antes de la exhalación fuerte del día 22 y seguramente se encuentran asociados con la actividad que se presentó en noviembre del mismo año.

El tremor de baja frecuencia T1 apareció los días 9 y 12 de diciembre y después de las exhalaciones del día 22 y 24 del mismo mes; mientras que el Tremor T2 apareció desde el día 9 y el día 22 decreció el número de eventos hasta llegar a cero, posterior a esta fecha se registró más tremor.

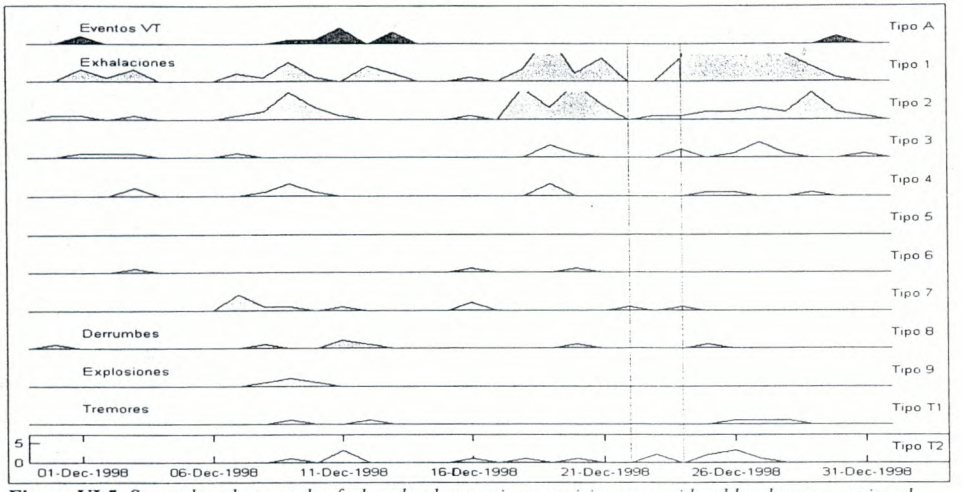


Figura VI.5 *Se pueden observar dos fechas donde ocurrieron emisiones considerables de gas y ceniza el número máximo de eventos en la escala vertical es de 7.*

Como se ha visto en las fases de actividad, estudiadas con anterioridad, es evidente que las exhalaciones de tipo 1 a tipo 4, aumentan en número antes de un evento importante pero las exhalaciones tipos 5, 6 y 7 así como el tremor T1, aparecen en muy contadas ocasiones y normalmente antes de una actividad eruptiva de consideración. Este hecho indica que la atención mayor se debe centrar en estas familias; para este fin se ha hecho un nuevo análisis de fases de actividad para el año 2000 de septiembre a diciembre y para el año 2001 de enero a septiembre, todo esto con la finalidad de observar si las exhalaciones tipo 5, tipo 6 y tipo 7 así como el tremor T1, tienen una ocurrencia aleatoria o tienen una ocurrencia ordenada, tal que muestren la presencia de un patrón sísmico.

VI.2.6 1° de septiembre 31 de diciembre del 2000

El estudio de esta actividad se inicia en el mes de septiembre (ver figura VI.6) durante este periodo los eventos tipo A muestran un bajo porcentaje de ocurrencia, con uno o dos eventos máximo, durante los días en que son observados, pero para el día 16 de octubre se registran cuatro eventos el mismo día y para fechas posteriores la ocurrencia de estos

eventos se hace más evidente y en algunas ocasiones se alcanzan máximos de hasta 6 eventos por día como es el caso del 5 de diciembre.

Los eventos tipo 5 se observan los días 1° y 8 de diciembre es decir 16 y 8 días antes de la crisis del día 18 diciembre.

Los eventos tipo 6 se observaron varios días antes de la crisis del día 18 de diciembre, los días 10, 11, 23 y 29 de octubre, el 9 de noviembre, el 1° y el 11 de diciembre.

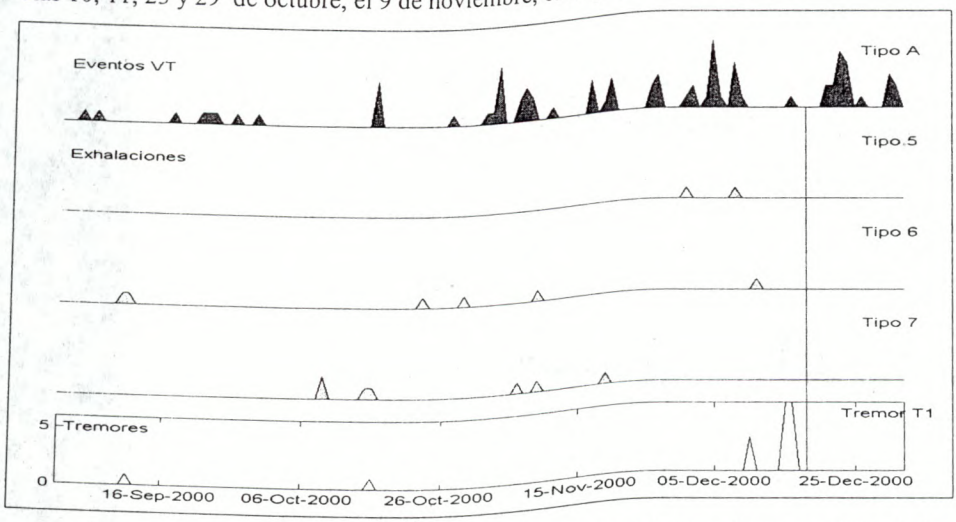


Figura VI.6 *Crisis perteneciente al día 18 de diciembre del 2000, la escala vertical tiene un máximo de 6 eventos por día.*

Los eventos tipo 7 se encontraron en varias fechas para este periodo, pero no se encuentran cercanas a la crisis pues se tienen registradas estas exhalaciones los días 9, 15, 16, 23 y 29 de octubre y para el mes de noviembre los días 6, 9 y 19, es decir que la ultima exhalación de la que se tiene registro antes de la crisis, es la del día 19 de noviembre casi un mes antes.

Referente al tremor T1, se observa en muy contadas ocasiones los días 11 de septiembre, el dia 16 de octubre y el día 10 de diciembre; para esta última fecha se registra 8 días antes de la crisis. Eventos extraordinarios de tremor con amplitudes muy grandes y duración de

cerca de 36 horas se presentaron los días 15 y 16 de diciembre, es decir 3 y 2 días antes de la actividad eruptiva.

VI.2.7 1° de Enero a septiembre 30 del 2001

Durante este periodo se identificaron diversas fechas en las cuales ocurrieron eventos explosivos de alcances considerables, es decir periodos en los cuales se observó un incremento en la sismicidad y posterior a ello la presencia de un evento explosivo fuerte, el primer evento identificado durante este periodo corresponde a la fecha del 22 de enero.

La crisis del 22 de enero del 2001 ha sido hasta la fecha la más grande ocurrida desde que el volcán se reactivó hace casi 8 años. Esta actividad eruptiva fue catalogada como de VEI 3-4 y produjo flujos piroclásticos, que bajaron por las laderas del sector nor-noreste del volcán y se formó una columna de ceniza de más de 14 Km de altura.

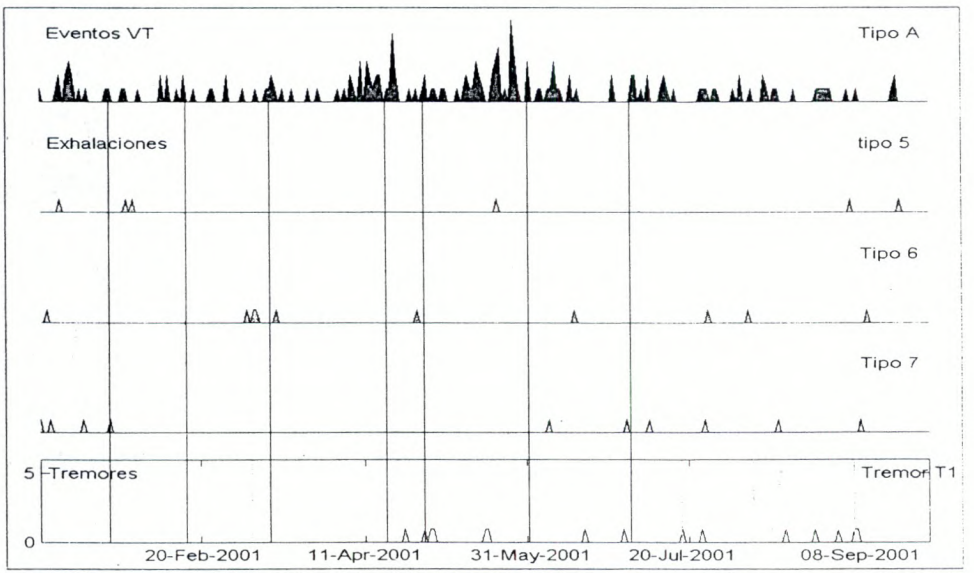


Figura VI.7 *Actividad observada en el volcán Popocatépetl durante el periodo de enero a septiembre del 2001 con las líneas continuas largas se identifican las fechas en que existieron eventos explosivos considerables, con la línea continua corta se identifican las fechas en las cuales se notó un incremento en la sismicidad de las exhalaciones.*

En la tabla VI.1 se resume la forma en que fueron aumentando las exhalaciones y ocurriendo los eventos explosivos para el periodo de análisis de enero a septiembre del 2001 también se dan las fechas de sobrevuelo cuando se identificó un nuevo domo así como los diámetros de los domos observados.

Incremento en los eventos	**Número de Exhalaciones**	**Días antes dela explosión**	**Fechas de Sobrevuelo**	**Diámetro del domo (m)**
22 enero	aumento			
6 marzo	aumento	7 días	13 marzo	150
19 julio	160 por día	27 días	15 agosto	190
10 agosto	160 por día	5 días	15 Agosto	190
10 sept	66 por día	14 días	24 sept, 25 oct, 21 nov	Menor a 130
10 y 12 dic 2001	aumento	2 días	11 dic	190

Tabla VI.1

Hasta las fechas registradas en este estudio se sabe que la actividad consistió en creación y destrucción de domos pero para el año 2002 específicamente el 14 de mayo, el 23 de julio, el 15 y 20 de agosto se presentaron episodios intensos de eventos conocidos como LP o exhalaciones pero ahora estas actividades se presentan sin formación de Domos (C Valdés 2002).

Por tanto se puede decir que la actividad del volcán ha cambiado de un mecanismo en el cual el material de ascenso formaba domos y producía efectos sísmicos claros, a un mecanismo que indica que el emplazamiento del material magmático está ocurriendo a mayor profundidad y produciendo efectos sísmicos pero no la formación de domos (C. Valdés 2002).

Conclusiones

Considerando los tipos de eventos diferentes observados en el Popocatépetl y los reportados en otros casos, por ejemplo para el Chichón o los reportados por Minakami, se puede afirmar que es razonable esperar que exista una cierta diversidad de eventos para cada volcán.

De acuerdo con el análisis realizado en este trabajo con las señales sísmicas del Popocatépetl en los intervalos de tiempo de junio a julio y diciembre de 1997, enero, noviembre y diciembre de 1998, septiembre a diciembre del 2000 y enero a septiembre del 2001 se identificaron 5 familias de eventos sísmicos a partir de la clasificación de 931 eventos.

Cuando los niveles de actividad tienden a aumentar y se incrementan las exhalaciones tipos 5, 6 y 7, combinadas con eventos, tipo A y/o tremor armónico puede considerarse la probabilidad de que ocurra un evento mayor. El incremento en el número de de exhalaciones de otros tipos no señalan la posible ocurrencia de una emisión de ceniza considerable o una explosión.

Los instrumentos de periodo corto utilizados para este análisis permitieron identificar diferencias significativas en patrones de actividad. Sin embargo, no puede descartarse que el uso de instrumentos de banda ancha abra la posibilidad de encontrar, a través del análisis espectral, rasgos precursores importantes.

Este trabajo se sustenta en dos tipos de análisis, uno cualitativo y otro cuantitativo; su característica más sobresaliente respecto de estudios similares, es que se analizaron diversos periodos eruptivos, además de un gran número de señales sísmicas.

Tomando en cuenta las contribuciones de otros estudios recientes relativos a patrones de actividad en el Popocatépetl se observa que en un buen número de casos es posible identificar un nivel aceptable de certeza con relación a la proximidad de un evento importante.

Por lo anterior, se considera que para definir un procedimiento que garantice el pronóstico de un evento importante se requiere incluir otras variables en el análisis, ya sea en el contexto sismológico o bien a partir de otros parámetros de monitoreo volcánico.

Apéndice 1

```
% ************************************
% ************************************
% **                                **
% **    De la Rosa Moreno Felipe    **
% **                                **
% ** Programa que calcula el espectro **
% **     de amplitud de una señal   **
% **                                **
% ************************************
% ************************************
clf
clear all

 load $707010E.dat;

x1=dlmread('$707010E.dat', '\t');
 p=mean(x1);
  x=x1-p;

a=max(x);
 b=min(x);

N=length(x);
 dt=.01;
  df=1/(N*dt);

t=[0: 0.01:(((N)*0.01)-0.01)];

W =hanning(N);
 T = x.*W;

c=max(T);
d=min(T);


X=fft(T);
 h=max(abs(X));
  X1=X.*X;
   y=max(abs(X1));

f=[0: df: (df*(N)-df)];
fN=1/(2*(dt));

figure(1)

 subplot(3, 1, 1)
  plot(t, T, 'r');
   axis([0 10 d c])
    title('Gráfica de La señal  $707010E.dat')
     xlabel('Tiempo (S)')
      ylabel('Amplitud')
       grid

subplot(3, 1, 2)
 plot(f,abs(X))
  axis([0 12 0 300000])
   title ('Espectro de amplitud de la señal')
    xlabel('Frecuencia(Hz)')
     ylabel('Amplitud')
      grid
```

Programa realizado en matlab que grafica la señal en el dominio del tiempo y calcula el espectro de amplitud de la misma.

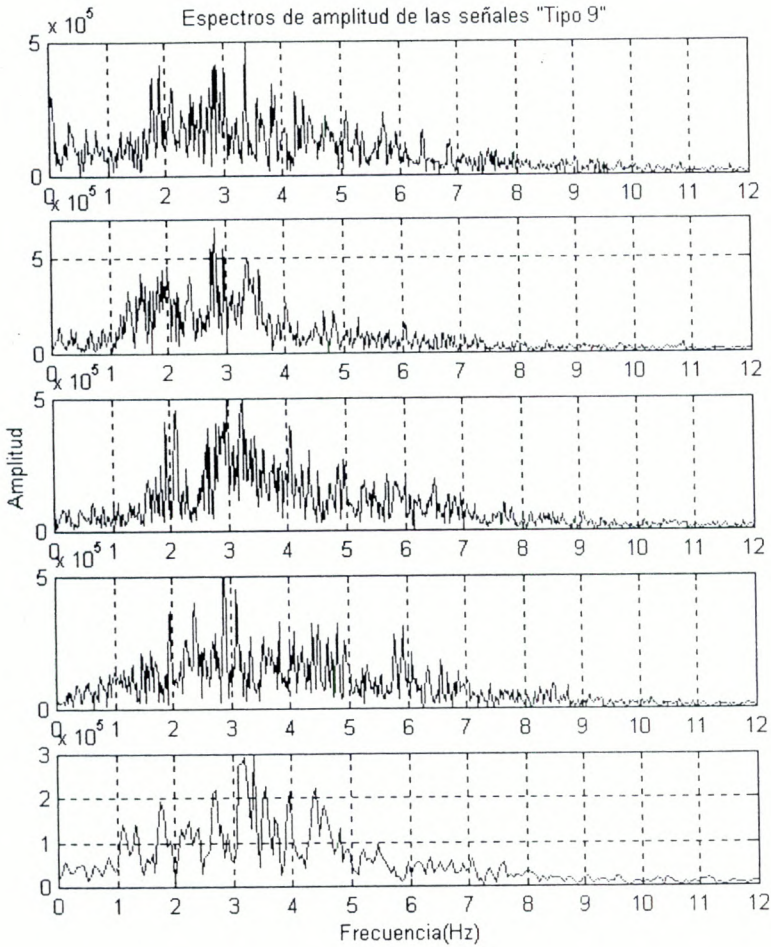
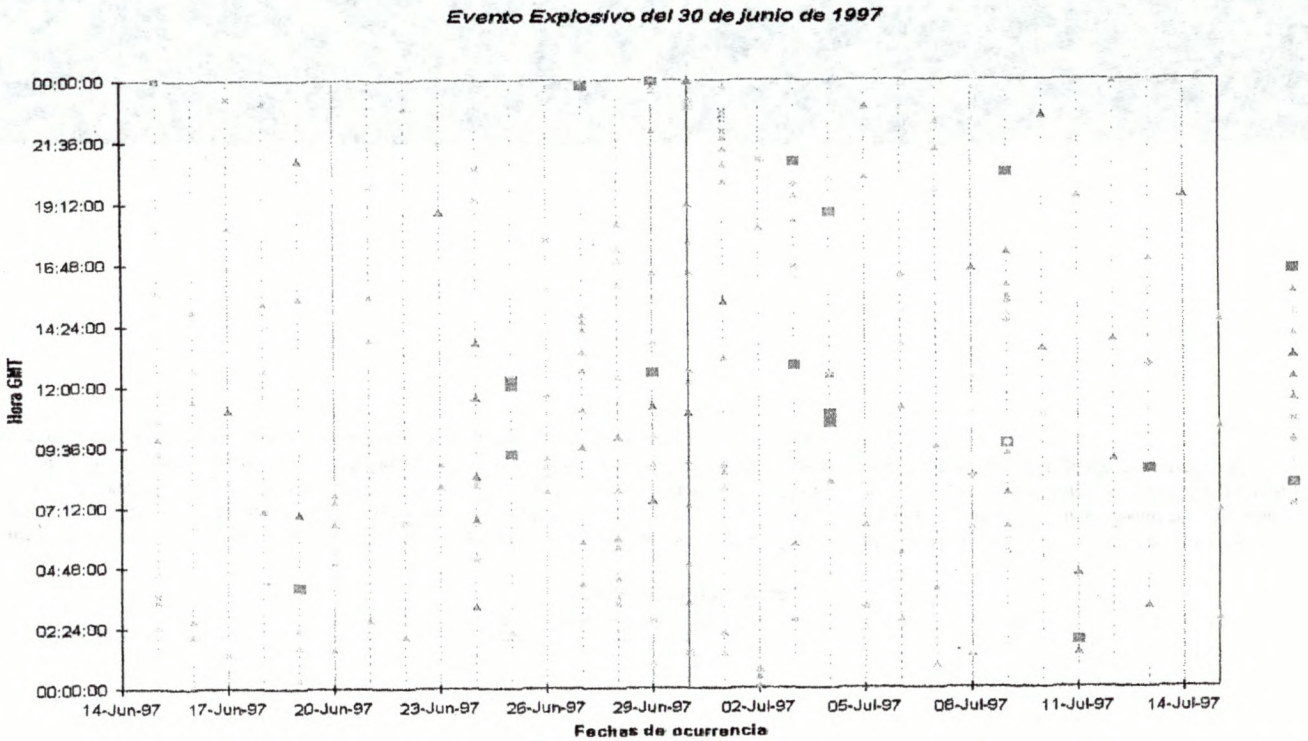
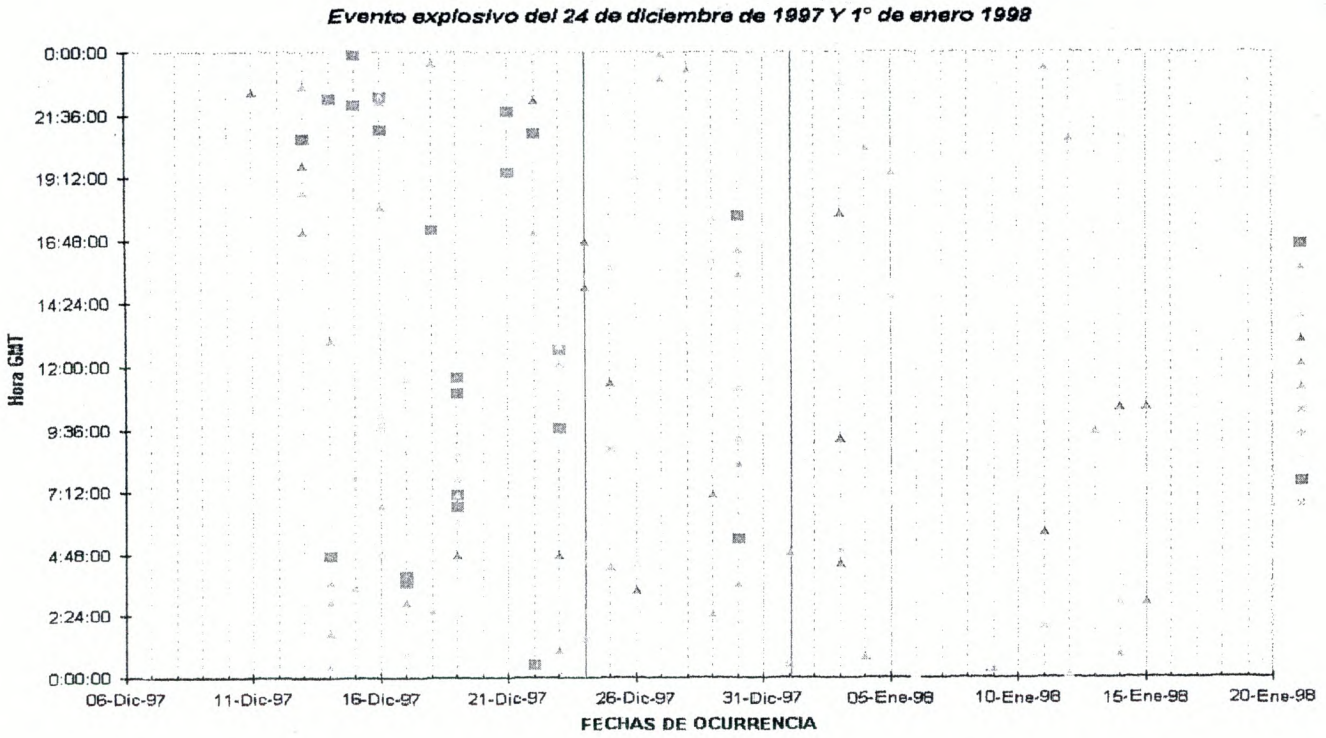


Gráfico 12: ***Comparativo entre eventos pertenecientes a una misma familia, en este caso la familia representada corresponde a los eventos explosivos(Tipo 9) y se distingue claramente la similitud entre espectros de amplitud.***

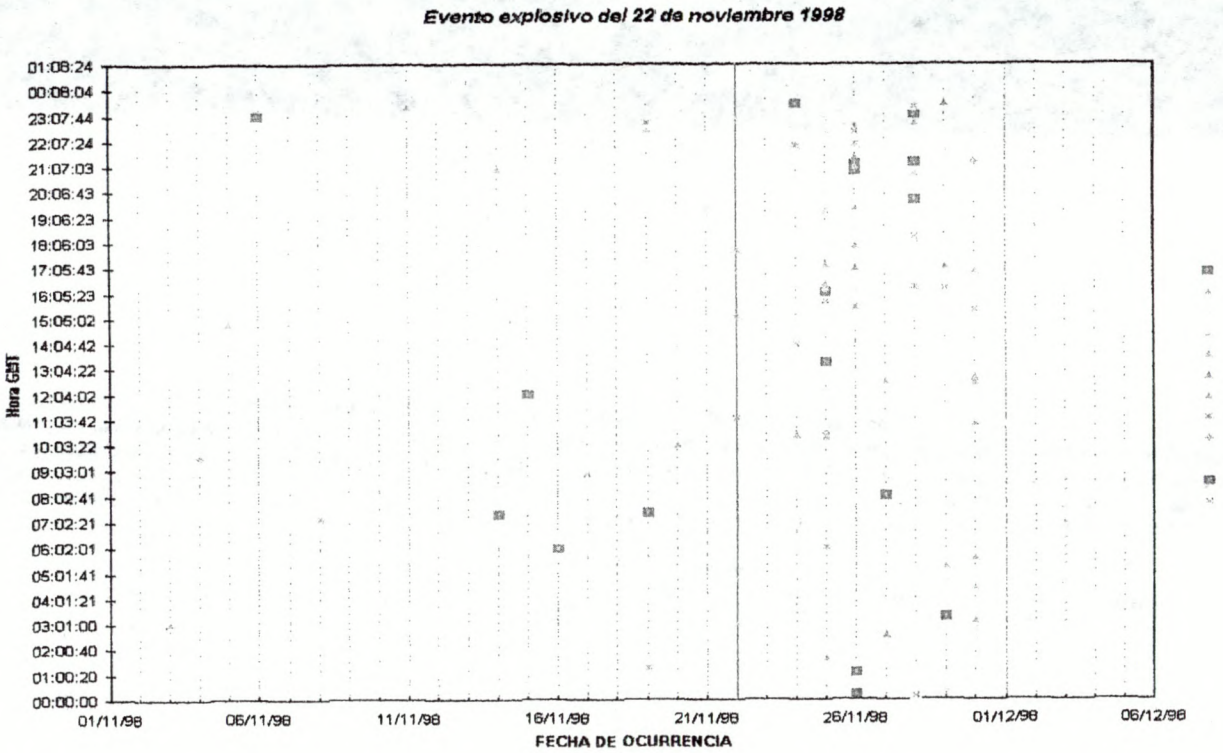
Apéndice 2



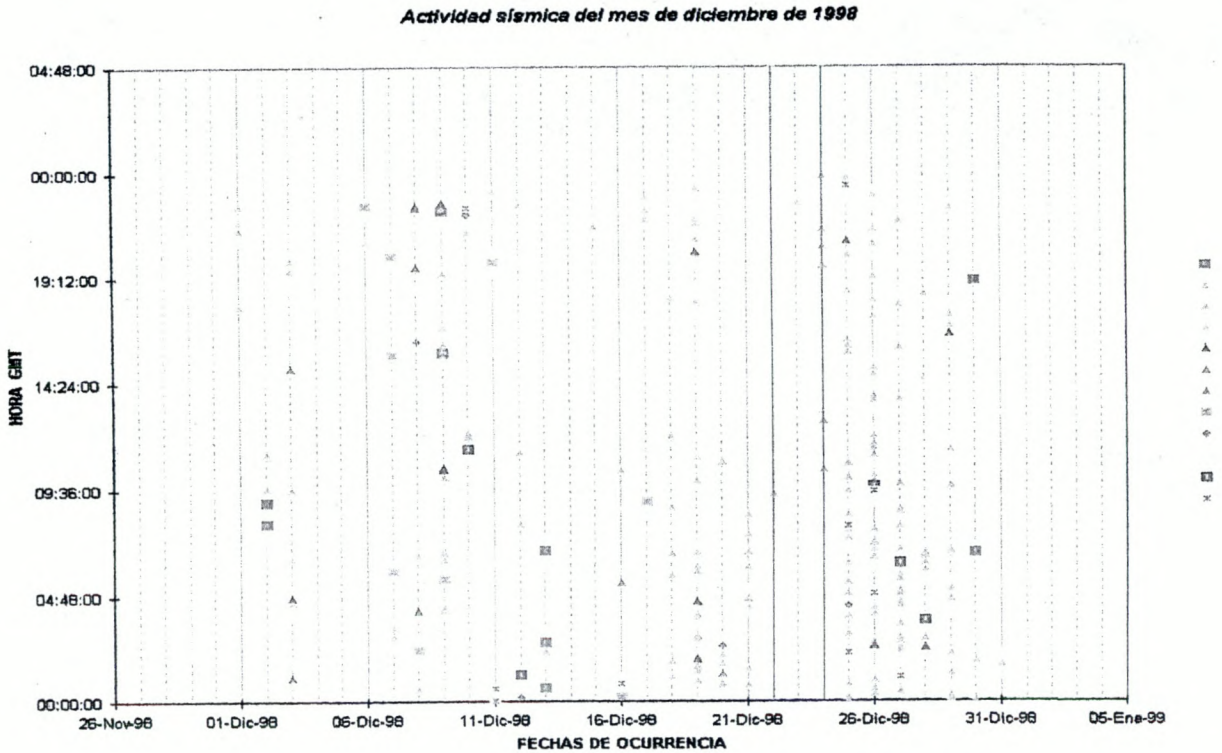
Gráfica 1. *Se muestra la actividad sísmica observada durante el periodo del 14 de junio al 14 de julio de 1997. En la leyenda que se observa a la derecha de la gráfica se tienen representados todos los eventos clasificados, siguiendo la secuencia de arriba hacia abajo el primer evento representado, de color rojo corresponde a los eventos Tipo A; los siguientes 6 triángulos corresponden a las exhalaciones tipo 1 al tipo 6; el evento tipo 7 exhalación larga, se representó por medio de un cuadro color verde; enseguida vemos 2 rombos que corresponden, el primero a los derrumbes y el segundo a las explosiones; por último se tienen dos cuadros que corresponden al tremor, el primero al armónico y el segundo al espasmódico.*



Gráfica 2. *Se muestra la actividad sísmica observada durante el periodo del 6 de diciembre de 1997 al 20 de enero de 1998. En la leyenda que se observa a la derecha de la gráfica se tienen representados todos los eventos clasificados, siguiendo la secuencia de arriba hacia abajo el primer evento representado, de color rojo corresponde a los eventos Tipo A; los siguientes 6 triángulos corresponden a las exhalaciones tipo 1 al tipo 6; el evento tipo 7 exhalación larga, se representó por medio de un cuadro color verde; enseguida vemos 2 rombos que corresponden, el primero a los derrumbes y el segundo a las explosiones; por último se tienen dos cuadros que corresponden al tremor, el primero al armónico y el segundo al espasmódico.*



Gráfica 3. *Se muestra la actividad sísmica observada durante el periodo del 1° de noviembre al 6 de diciembre de 1998. En la leyenda que se observa a la derecha de la gráfica se tienen representados todos los eventos clasificados, siguiendo la secuencia de arriba hacia abajo, el primer evento representado, de color rojo corresponde a los eventos Tipo A; los siguientes 6 triángulos corresponden a las exhalaciones tipo 1 al tipo 6; el evento tipo 7 exhalación larga, se representó por medio de un cuadro color verde claro; enseguida vemos 2 rombos que corresponden, el primero a los derrumbes y el segundo a las explosiones; por último se tienen dos cuadros que corresponden al tremor, el primero al armónico y el segundo al espasmódico.*



Gráfica 4. *Se muestra la actividad sísmica observada durante el periodo del 26 de noviembre de 1998 al 5 de enero de 1999. En la leyenda que se observa a la derecha de la gráfica se tienen representados todos los eventos clasificados, siguiendo la secuencia de arriba hacia abajo el primer evento representado, de color rojo corresponde a los eventos Tipo A; los siguientes 6 triángulos corresponden a las exhalaciones tipo 1 al tipo 6; el evento tipo 7 exhalación larga, se representó por medio de un cuadro color verde; enseguida vemos 2 rombos que corresponden, el primero a los derrumbes y el segundo a las explosiones; por último se tienen dos cuadros que corresponden al tremor, el primero al armónico y el segundo al espasmódico.*

Glosario general

- ***Amplitud*** Es la máxima altura de la cresta de una onda sísmica.
- ***Cámara Magmática*** Zona donde se acumula el magma antes de emerger en una erupción bajo el volcán a profundidades de unos cuantos kilómetros.
- ***Conos de Escoria*** Volcanes que se forman por el apilamiento de escorias o cenizas durante las erupciones basálticas en las que predominan los materiales calientes solidificados.
- ***Corteza terrestre*** Es la zona exterior de la tierra compuesta de roca sólida y que tiene 32 a 48 kilómetros de espesor. Descansa sobre el manto y puede estar cubierta de sedimentos.
- ***Cráter*** Cavidad de forma aproximadamente circular que los volcanes tienen en su cumbre o en sus costados generados por erupciones anteriores.
- ***Deriva Continental*** Teoría expuesta por Alfred Wegener en la que se decía que los continentes de la Tierra eran originalmente una masa de tierra que se fue separando y emigrando para formar los continentes.
- ***Discontinuidad de Mohorovicic (el Moho)*** Es la superficie de frontera o la pronunciada discontinuidad de la velocidad sísmica, que separa la corteza terrestre del manto superior. Esta discontinuidad fue descubierta por el sismólogo Andrija Mohorovicic, de origen Croata.
- ***Dorsales oceánicas*** Es una extensa región donde dos placas están siendo apartadas una de la otra. Nueva corteza se forma conforme la roca fundida se levanta hacia arriba en la abertura dejada por las placas que se apartan. Ejemplos de esto incluyen la región atlántica y al este de África.
- ***Enjambre sísmico*** Es una secuencia de eventos agrupados en el tiempo o una serie de temblores menores, que no han sido identificados como temblores importantes y que ocurren en determinado momento y lugar.
- ***Epicentro*** Es el punto exacto en la superficie que se localiza sobre el hipocentro de un sismo.
- ***Erupción volcánica*** Emisión explosiva o quieta, de material piroclástico y gases magmáticos a alta temperatura, usualmente por un volcán y rara vez por fisuras.
- ***Erupción Magmática*** Cuando ésta es el resultado directo de la acción de magma o de gases magmáticos.
- ***Erupción freática*** Erupción creada por sobrecalentamiento del agua, efecto de calentamiento de cuerpos de agua por magma o gases magmáticos.
- ***Estación sismográfica*** Es un sitio en donde uno o más sismógrafos son monitoreados.
- ***Fase*** Es el comienzo de un desplazamiento u oscilación en un sismograma indicando la llegada de un tipo diferente de onda.
- ***Foco*** El punto dentro de la Tierra en donde se origina el primer movimiento de un terremoto y sus ondas elásticas
- ***GMT*** Ver U.T.C.

- ***Hipocentro*** El sitio calculado donde se localiza el foco de un sismo dentro de la tierra.
- ***Hotspots*** Ver puntos calientes
- ***Intensidad*** Es la medida de los efectos de un terremoto en un lugar determinado, en la población humana, estructuras y (o) la propia tierra. La intensidad en un punto no solo depende de la magnitud del terremoto, sino también de la distancia del terremoto al punto y la geología local de ese punto
- ***Latitud*** Es la localización de un punto al norte o al sur del Ecuador. La latitud se muestra en un mapa o globo como líneas con dirección Este-Oeste y paralelas al Ecuador.
- ***Lava*** Magma que se ha escurrido sobre la superficie terrestre, o roca que se ha solidificado a partir del material original que es el magma.
- ***Límite de placa*** Es el lugar donde dos o más placas se encuentran en la corteza terrestre.
- ***Llegada o arribo*** La aparición de la energía sísmica en una estación sísmica.
- ***Longitud*** Es la localización de un punto al este o al oeste según el meridiano de Greenwich. La longitud es mostrada en un mapa como líneas con dirección Norte-Sur .
- ***Magma*** Roca fundida que se encuentra en la parte interna del volcán, silicatos fundidos que se presentan en forma natural, que pueden tener cristales de silicatos en suspensión o gases disueltos, o ambos. Estas condiciones se pueden encontrar en general en una mezcla que contenga hasta 15 % de cristales, pero no más de 11% de gases disueltos.
- ***Magnitud*** Es la medida de potencia de un terremoto o extracción de energía liberada por este, y determinada por la observación sismográfica. Este es un valor logarítmico determinado por la escala de Richter (1935). Un incremento de una unidad de magnitud (por ejemplo desde 4.6 a 5.6) representa un incremento de 10 en la amplitud de onda en un sismograma, o aproximadamente un incremento de 30 en la energía acumulada. En otras palabras, un terremoto de magnitud 6.7 alcanza 900 veces (30 veces 30) la energía de un terremoto de 4.7, o toma 900 terremotos de magnitud 4.7 para igualar la energía que alcanza uno de 6.7. Esta escala no tiene inicio ni límite. Sin embargo, la mecánica de rocas parece evitar temblores menores de un grado o tan grandes como de 9.5. Un sismo de magnitud -1 libera cerca de 900 veces menos energía que un sismo de magnitud 1. Con excepción de circunstancias especiales, los sismos con magnitud menor que 2.5 no son sentidos por los humanos.
- ***Manto*** Es la capa de roca que se encuentra entre la corteza y el núcleo exterior de la tierra. Tiene aproximadamente 2900 kilómetros de espesor y es la capa más grande de la tierra
- ***Microradián.*** un microradián es el ángulo que formaría una viga rígida de 30 metros de largo, que es alzada en un extremo, un tercio del diámetro de un cabello humano
- ***Núcleo*** Las capa más profunda de la Tierra. El núcleo interno es sólido y tiene un radio de aproximadamente 1300 kilómetros. El núcleo exterior es fluido y es de aproximadamente 2300 kilómetros de espesor. Las ondas S no pueden viajar a través del núcleo exterior. El radio de la Tierra es cerca de 6371 kilómetros.

- ***Ondas de cuerpo*** Se le llama así a la onda que se propaga a través del interior de la tierra. Por ejemplo: las ondas P y S.
- ***Onda de Love*** La mayoría de ondas superficiales que tienen un movimiento horizontal y que son transversales o de corte a la dirección de propagación. A.E.H. Love fue un matemático inglés que descubrió estas ondas.
- ***Ondas P*** Es la onda primaria, longitudinal, que no gira sobre sí misma, que empuja, presiona, se dilata, compresiona, es una onda que jala y empuja. Las ondas P son rápidas y llegan a las estaciones antes que las ondas S, u ondas secundarias. Estas ondas traen energía a través de la Tierra en forma longitudinal, moviendo partículas en una misma dirección.
- ***Ondas S*** Son ondas secundarias, rotacionales, tangenciales, distorsiónales o de corte. Viajan en forma transversal a la dirección de movimiento. Estas ondas llevan la energía a través de la tierra con un patrón complejo de ondas transversales; van viajando mas despacio que las ondas P, normalmente en un terremoto tienen mayor amplitud que las ondas P. No viajan por fluidos, aire, agua o rocas fundidas, por lo tanto no pueden viajar por el núcleo exterior, que es líquido.
- ***Ondas Raleigh*** Es un tipo de onda superficial que se mueve en forma retrógrada y elíptica similares a las causadas por una piedra que cae en una poza de agua. Son ondas con velocidad muy baja, pero una de las mas sísmico destructivas. Son ondas muy destructivas y se sienten como un movimiento ondulado o rodante. Son llamadas así en memoria de Lord Raleigh, un físico inglés que predijo su existencia.
- ***Ondas superficiales*** Son las ondas que se mueven sobre la superficie de la Tierra (por ejemplo, la ondas Love y Raleigh).
- ***Período*** Es el tiempo que transcurre entre dos crestas sucesivas de ondas sísmicas.
- ***Piroclastos*** Son materiales magmáticos fragmentados emitidos por una erupción, lanzados en forma sólida o líquida.
- ***Placa*** Es una enorme sesión que forma la corteza terrestre. Las placas están en continuo movimiento.
- ***Placas tectónicas*** Es la teoría que dice que la capa terrestre y el manto superior (litosfera) se dividen en segmentos o placas un poco rígidas, pero que se mueven constantemente.
- ***Primera llegada*** La primera señal registrada que se atribuye a una onda sísmica que viaja desde la fuente sísmica.
- ***Puntos calientes*** También conocidos como Hotspots (puntos anómalamente calientes), no existe un consenso acerca de la naturaleza de los puntos calientes, independientemente de la profundidad de su origen, el transporte magmático hacia la superficie de este proceso debe ser muy rápido, comparado con la velocidad de la convección
- ***Sísmico*** Todo lo que tenga que ver con terremoto.
- ***Sismicidad*** Es la actividad de un terremoto o la actividad sísmica.

- ***Sismicidad volcánica.*** Se entiende por sismicidad de una región al conjunto de caracteres que poseen la globalidad de los focos sísmicos de la misma.
- ***Sismograma:*** Grabación escrita de un terremoto que se hace en un sismógrafo.
- ***Sismógrafo*** Es un instrumento que grava los movimientos de la tierra en especial durante los terremotos.
- ***Sismólogo*** Es un científico que estudia los terremotos.
- ***Sismometría*** Es la parte instrumental de la sismología.
- ***Sismos*** Es el movimiento de la tierra, ocasionado por el movimiento súbito de las rocas que se encuentran bajo la superficie de la Tierra.
- ***Subducción*** Es el proceso por medio del cual una capa de la litosfera colisiona con otra y es forzada a descender debajo de la otra hacia el manto terrestre.
- ***Superficie terrestre*** Es el valor dado a la profundidad debajo la superficie de una media esferoidal. La media esferoidal es una especie de aproximación uniforme a la verdadera forma de la tierra. La profundidad no está hecha con un ajuste exacto entre el esferoide y la profundidad real de la tierra. Por ejemplo la profundidad mínima que se ha dado es de cero kilómetros, pero debajo del monte Everest (8848 mts) puede llegar a los -6 kilómetros de profundidad y todavía quedan dos kilómetros debajo del suelo. En otro caso, una profundidad de 10 kilómetros será 1 kilómetro mas arriba de la depresión debajo del piso oceánico (depresión de Challenger) la cual tiene 11033 metros y que se encuentra en las Fosa de las Marianas en el Océano Pacífico.
- ***Terremoto*** Es el movimiento de la tierra, ocasionado por el movimiento súbito de las rocas que se encuentran bajo la superficie de esta.
- ***Trinchera*** Es la zona donde dos placas tectónicas "convergen" y una desciende debajo de la otra.
- **U.T.C. o GMT** Tiempo universal coordinado. Es la escala del tiempo basado en el segundo atómico corregido en forma continua para guardar una aproximación casi exacta con la rotación terrestre. Es el sistema más común de la medida del tiempo. También se denomina GMT.

  Volcán Grieta o abertura que comunica con el interior, a través de la cual hacen erupción en superficie flujos de lava, corrientes de material incandescente pulverizado o ráfagas explosivas de gases y cenizas volcánicas.
- ***Volcán Central*** Se caracteriza porque sus erupciones se producen a través de una chimenea vertical,
- ***Volcán tipo Escudo*** Son aquellos volcanes que tienen un diámetro mucho mayor que su altura y se forman por acumulación sucesiva de corrientes de lava fluida por lo tanto son de poca altura y pendiente ligera, su topografía es suave y su cima forma una planicie ligeramente encorvada
- ***Volcán Estratificado*** Formado por capas de material fragmentario y corrientes de lava intercaladas lo que indica que surgieron en épocas de actividad explosiva seguidas de otras donde arrojaron corrientes de lava fluida

  Volcanes Monogenéticos Son el resultado de una sola erupción o de una serie de erupciones que ocurrieron a lo largo de miles de años.

Volcanes Poligenéticos Volcanes que ha tenido erupciones en los últimos 10^4-10^5 años y no se pueden considerar extintos en la actualidad.

- ***Vulcanología*** Rama de la Geofísica que se apoya en estudios de sismología, gravimetría, radiactividad, magnetismo y geoquímica mediante los cuales se conoce la naturaleza de la energía interna del planeta.

Bibliografía

Ahoyama H, Takeo M, *Wave Properties and Focal Mechanism of N-type earthquakes at Asama Volcano*, Journal of Volcanology and geothermal research, may 105(2001) pp162-182,2000

Análisis de Fourier, 13 de junio del 2001
http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/fourier/Fourier.html

Apéndice A: Teorema de Fourier 13 de junio del 2001
http://www.biopsychology.org/tesis_esteve/apendices/fourier/tfour.htm

Apuntes de Geología general (1999-2001) Universidad de Atacama Chile.
http://plata.uda.cl/minas/apuntes/Geologia/geologiageneral/ggcap07a.html

Arámbula Mendoza Raúl, *Interpretación de tremor armónico registrado en el volcán Popocatépetl durante la crisis eruptiva de diciembre del 2000,* Tesis para obtener el grado de Ingeniero Geofísico, México D.F. Ciudad Universitaria, septiembre 127 pp 2002.

Araña Saavedra Vicente y Ortíz Ramis Ramón, *Volcanología,* Consejo Superior de investigaciones científicas, Editorial Rueda; Madrid, 510 pp, 1984.

Arciniega Ceballos María Alejandra, *Análisis de datos sísmicos de banda ancha registrados en el volcán Popocatépetl, México.* Tésis para obtener el grado de Doctor en Ciencias, Ciudad Universitaria Marzo, 161 pp 2002.

Brigham E. Oran, *The fast Fourier Transform*, Prentice Hall, Inc. New Jersey, 271 pp.

Bullen K.E, *An introduction to the theory of Seismology*, Third Edition, Cambridge University Press, Reprinted 1980.

Cedillo Flores Yolanda, *Algunos Aspectos del volcanismo reciente en México*, Tesis para obtener el título de licenciado en Geografía, UNAM; México D.F. 1997.

Chouet Bernard A, *Long-Period volcano seismicity, its source and use in eruption forecasting.. March.* vol. 380 pp 309-316, 1996.

Cristhopher H. Armstead, *Energía Geotérmica,* edit Limusa, Primera edición México D.F. pp 67-92, 1989

Claude Robin and Cristian Boundal, *Volcán Popocatépetl* (1): An evolution influenced by gigantic bezmianny -tipe event; Université Clermont France.

Contacto sonar, 13 de junio del 2001
http://www.navegalia.com/hosting/00005/lcandelas/sonar/tema03.htm

De la Cruz Reyna Servando (Compilador); *Ciencias de la tierra hoy*, Primera edición 1994, Fondo de Cultura Económica y UNAM, México, pp 78, 1994.

De la Cruz Dr. Servando y el Ing, Roberto Quaas, *Cronología de la actividad del volcán Popocatépetl, Diciembre de 1994 - septiembre de 1998.* Boletines elaborados por el con la sanción del Dr. Roberto Meli

Eco Humberto, *Como se hace una tésis,* edit Gedisa 13ª reimpresión en México, 159 pp. 1991

El Volcán Chichonal, Ponencias presentadas en el simposio sobre el volcán Chichonal durante la VI convención geológica nacional de la Sociedad Geológica Mexicana. UNAM, México D.F. 1983

Elliot T. Endo and Murray Tomy, *Real-time seismic amplitude measurement (RSAM) a volcano monitoring and prediction tool*, Bulletin of vulcanology, february, Vol. 53:533-545, 1991.

Elliot T. Endo et al, *The 1980 eruptions of mount St. Helens, Washington, Location, magnitudes, and statics of the march 20- may 18 eartquake sequence,* The 1980 eruptión of mount St Helens, Washington pp 93-104

Espíndola Castro Juan Manuel; *La actividad volcánica;* Cuaderno 12 del instituto de Geofísica; instituto de Geofísica UNAM, México D.F, pp 25-30, septiembre de 1999

Estimación espectral de la señal Transformada de Fourier-FFT; 13 de junio del 2001 http://www.arrakis.es/~ppriego/fourier/fourier.htm

Gasparini P; R, Scarpa, K. Aki, *Volcanic Seismology,* Printed in Germany, 572 pp, Berlin 1992

Global volcanism program, Volcanic activity Report Popocatépetl, Reports for january 1996-february 1998, Smithsonian National Museum of Natural History. 12 de Julio del 2002 http;//www.volcano.si.edu/gvp/volcano/region14/mexico/popo/var_02.html

Global volcanism program, *Volcanic activity Report Popocatépetl*, Reports for may 1998-current, Smithsonian National Museum of Natural History. 29 de Julio del 2002 http;//www.volcano.si.edu/gvp/volcano/region14/mexico/popo/var_03.html

González Adolfo Alejandro Huidobro, *Análisis de la actividad sísmica relacionada con la erupción del volcán Popocatépetl, en diciembre de 1994*, Tésis de Licenciatura, Facultad de ingeniería UNAM, México, 80 pp. 2000

Holmes Arthur; *Geología Física*, Editorial Omega, Barcelona, 226 pp. 1980

Ibáñez Godoy Jesús M, *Apuntes de sismología volcánica*, Curso internacional de volcanología y geofísica volcánica Lanzarote, instituto Andaluz de Geofísica Universidad de Granada, , pp 6-20, 58-71,72-89. 1997

Ibáñez Godoy Jesús, *Sismología Volcánica,* Universidad de Granada; Curso internacional de Vulcanología; Ed. CSIC.

Joan Martí y Vicente Araña, *La volcanología actual,* nuevas tendencias Consejo Superior de Investigaciones Científicas C.S.I.C; impreso en España, 578 pp, Madrid 1983.

Kulhánek Ota, *Anatomy of sismograms*, Sismological Section, Univrersity of Uppsala, Uppsala Sweden. Elsevier Science Publishers B.V. 1990; 178 pp, printed in the Netherlands. 1997

La Ciencia Hoy, volumen 10 numero 60,diciembre 2000/enero 2001 http:// www.cienciahoy.org/hoy60/volcane1.html

La Vida en el planeta Tierra, *La Corteza Terrestre,* Edit Montaner y Simon, S.A. editores, 20 tomos, Barcelona 1978.

Lay Thorne and Wallace Terry C, *Modern Global Seismology*, Academic Press, Printed in the United States of American,1995

Leet y Judson, *Fundamentos de Geologia Fisica,* edit limusa, octava reimpresión, México, 450 pp 1986.

Lermo, J Cuenca et al, *Caracteristicas espectrales de temblores tipo-A, Tipo-B y tremores asociados a la erupción del volcán Popocatepetl México*, Estudios realizados durante la crisis de 1994-1995, pp 139-166 diciembre de 1994.

Lermo Javier et al *Análisis de la actividad sísmica asociada con la erupción del volcán Popocatépetl en diciembre de 1994 y monitoreo durante un año de eventos tipo B y tremores volcánicos usando una sola estación sísmica*, instituto de ingeniería UNAM, 28 pp, diciembre 1996

Lipman Peter W. and Mullineaux De, *The 1980 Eruptions of Mount St Helens, Washington,* Donald Geological survey Profesional peper 1250

López Martínez Cesar Honorio, *Sismicidad en la región del volcán Tacaná, Chiapas, durante septiembre de 1997 y su evaluación en el riesgo volcánico,* Tesis para obtener el grado de ingeniero Geofísico, México D.F. Ciudad Universitaria, septiembre, 87 pp 2002.

Martín Del Pozzo Ana Lilian et al, *Volcanomagnétic Signals during the recent Popocatépetl (México) eruptions and their relation to eruptive activity,* en Journal of volcanology and geothermal research 113(2002) pp 415-428, 2002.

México_Volcanes, junio del 2000
http://volcano.und.nodak.edu/vwdocs/volc_tour/mex/mex.html

Munehisa Sawada, *The source Mechanism of B-type and explosion Eartquakes and the origin of N-type Eartquakes observed at Asama Volcano,* Bulletin of the eartquake research institute university of Tokio, vol. 73 part 2, Central Japan. 1998

Nutt S.R. Mc, *Seismic Monitoring and eruption Forecasting of Volcanoes*, A review of the state-of-art and case histories. In Monitoring and Mitigatión of Volcano Hazards, R. Scarpa, R.I. Tilling, Edit Springer, pp 99-145, 1996.

Ortíz Osornio Miryam, *Comportamiento de frecuencias pico de eventos LP (periodo largo) registrados durante 1998 en el volcán Popocatépetl,* Tesis de Licenciatura, Ciudad Universitaria, octubre 52 pp 2001

Schmidt Robert G, *Atlas vulcanológico*, Departamento del interior de Estados Unidos de América; Instituto panamericano de Geografía e historia

Selecciones de Scientific American, *Deriva continental y tectónica de placas*, 2ª edición Revisada y aumentada, Segunda reimpresión, España. 271 p, 1981

Señales sistemas y sus características; 18 de junio del 2001
http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/149/htm/sec_5.htm

Tazieff H and J.C. Sabroux, *Forecasting Volcanic events,* printed in Netherlands,1988

Tecnología, 20 de abril de 2001
http://www.enespanol.com/enterate/marzo.abril99/volcanes.html

Transformada Fourier, La (TF), 13 de junio del 2001
http://bucanero.ugr.es/wwwcurso/ccordoba/node16.html

Transformada de Fourier Unidimensional; 13 de junio del 2001
http://www-etsi2.ugr.es/depar/ccia/robotica/tema3/node3.html

Turcotte Donald L and Gerald Schubert *Geodnamics Aplications continuum physics to Geological Problems,* edit. John Wiley & Sons; United States of America 1982.

Tuzo J. Wilson, *Continents adrift and continents aground,* W.H. Freeman and Company, by cientific American, United States of American 1976.

U.S. Geological Survey, May 1999
http://pubs.usgs.gov/publications//text/world_map.html

Valdés C. et al, *Sismicidad del volcán Popocatepetl a partir del 21 de diciembre de 1994 al 30 de marzo de 1995*. En estudios realizados durante la cisis de 1994-1995 edición especial, secretaría de Gobernación pp 129-138, 1995.

Valdés C. et al, *Actividad reciente del volcán Popocatépetl desde el 21 de enero del 2001 y sus implicaciones futuras*, en Geos,Unión Geofísica Mexicana (resúmenes); III reunion Nacional de Ciencias de la Tierra, vol 22, No. 2 noviembre, pp 390-391, 2002.

Volcán Popocatepetl, *Estudios realizados durante la crisis de 1994-1995*, Editorial Comité Científico asesor CENAPRED-UNAM, México 1995

Volcano Word,(2000)
http://volcano.und.nodak.edu/vwdocs/volc_images/north_america/mexico/popocatepetl.htm

Web de Volcanes, junio del 2001
http://espanol.geocities.com/roro82cl/

Yarza De La Torre Esperanza, *Volcanes de México*, Universidad Nacional Autónoma de México, edición corregida y aumentada pp 32-33, 40-44, 62-66, 1992