



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA  
TIERRA**

**INSTITUTO DE GEOFÍSICA**

**Sistema de Identificación Sísmica  
para el volcán Popocatepetl**

**T E S I S**

**PARA OBTENER EL GRADO EL GRADO DE:  
MAESTRA EN CIENCIAS**

**PRESENTA:**

**ANA MARÍA ALARCÓN FERREIRA**

**DIRECTOR:**

**DR. CARLOS VALDÉS GONZÁLEZ**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**2008**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# *Dedicatoria*

*A mis Amados Padres*

*Antonio y María de los Ángeles*

*A mis Queridos hermanos*

*Antonio, Gerardo, Corina y  
Karen*

*A mis sobrinas*

*Samantha y Pamela*

## *Agradecimientos*

*A Dios por concederme la vida.*

*A mis padres por traerme al mundo y ser un ejemplo para mí.*

*A mis hermanos, mis cómplices leales en la aventura de la vida.*

*A mi asesor, Dr. Carlos Valdés González por compartirme sus conocimientos, por su apoyo y sus enseñanzas.*

*A mis revisores por sus sugerencias, comentarios y críticas: Dr. Servando de la Cruz Reyna, Dr. Raúl Quintanar Robles, Dr. Guillermo González Pomposo y la Dra. Alicia Martínez Bringas.*

*A mis amigos de siempre: Jaime y Geminiano.*

*A mi queridísima amiga Taty.*

*A mi maestro: Ignacio Mora González por darme la oportunidad de colaborar en el CCTUV*

*A mis compañeros del CCTUV, Paco y Amalia.*

*Al CENAPRED donde trabajo y me desarrolló.*

*Al Ingeniero Enrique Guevara Ortiz, Director de Instrumentación por permitirme iniciar la aventura del Posgrado.*

*A mis compañeros de Instrumentación del CENAPRED: Gilberto, César, Paulino, Lucio, Germán y Javier.*

*A mis compañeros y colegas actuales por su tolerancia y comprensión y de los cuales espero poder aprender de sus conocimientos y experiencias: Alicia, Ángel, Andrés y Teofilo.*

*A mis compañeros y amigos: Jazmín, Rolando, Javier y Lucrecia por su ayuda y apoyo en todo momento. Gracias.*

*A los amigos que hice en el Departamento de Sismología: Raúl, Paola, Beatriz y Daniel.*

*Al Sr. Marcos Galicia por su ejemplo y enseñanza para todos los que le conocemos.*

*A todas aquellas personas que de una u otra forma me ayudaron durante este tiempo y que por las circunstancias actuales no puedo recordar sus nombres, pido su comprensión. Gracias.*

## RESUMEN

El volcán Popocatepetl es un volcán activo, localizado a 60 km al sureste de la Ciudad de México y a 45 km al oeste de la Ciudad de Puebla; Su edificio cubre un área de 500 km<sup>2</sup> abarcando los estados de Puebla, México y Morelos.

La última etapa de actividad del volcán Popocatepetl fue de 1920 a 1927, generando el crecimiento de domos de lava dentro del cráter, así como explosiones y emisiones de ceniza (Waiz, 1921). La etapa de actividad contemporánea del volcán inició el 21 de diciembre de 1994 con una emisión de gases y cenizas, esta nueva etapa ha sido monitoreada y estudiada en diversas áreas: sismología, petrología, deformación, geoquímica, percepción remota, vulcanología física, magnetometría, visual, etc. En especial el monitoreo sísmico ha sido de gran ayuda para estudiar la actividad volcánica actual.

Existe un gran número de estudios relacionados con la actividad sísmica del volcán Popocatepetl, los temas que se han tratado son acerca de atenuación (Martínez, 1996), tremor (Arámbula, 2002), eventos LP's (De la rosa, 2002), difusión rectificada (Pérez, 2001), tomografía sísmica (González, 2004), eventos LP's (Arciniega, 2002), estado de esfuerzos (Arámbula, 2007), entre otros trabajos.

La sismicidad en el volcán ha sido clasificada en 5 familias principales: Eventos Volcanotectónicos, Eventos LP (Largo Periodo), Eventos Explosivos, Tremores y Derrumbes, cada familia está asociada a un fuente, por lo que cuando se registra un evento sísmico ya se conoce su significado, sin embargo la forma de onda de cada una de las familias no es suficiente para su diferenciación, por ello contar con una herramienta que permita una distinción es muy útil.

En este trabajo se presenta los resultados de un análisis hecho a estas familias, basado en las características espectrales de las señales. Para dicho análisis, se desarrolló una herramienta en plataforma Matlab. Empleando la FFT (Fast Fourier Transform) se obtienen los valores máximos de una secuencia de espectros, a partir de ahí se construye una curva, este método se aplicó a un grupo de señales de cada familia sísmica y se obtuvieron señales representativas a curvas se les denominó curvas-patrón.

En cada curva-patrón es posible identificar las características principales de las familias sísmicas, por lo que fue posible realizar una discriminación entre las familias sísmicas. Cabe mencionar que entre más señales se incorporen en el procesamiento mejorara la precisión de las curvas-patrón.

## Los últimos días de Pompeya

Edward Bulwer Lytton (1834)

--Vine a prevenirte-- Contestó la bruja con voz sepulcral.

--¿Prevenirme de qué peligro?

--Escúchame--contestó la vieja--. Un mal se cierne sobre esta ciudad; huye mientras estés a tiempo. Bien sabes que tengo mi vivienda en la montaña, donde, según la tradición, aún arden los fuegos del Flegetonte; en mi cueva hay un profundo abismo en el que, desde hace unos días, se ve correr un arroyo negruzco, que a veces desprende llamas y del que se oyen rumores extraños; lo que me atemorizó más fue el ver que anoche las llamas eran continuas; el zorro que me acompaña se asomó para ver, se agitó compulsivamente y, lanzando un feroz aullido, cayó muerto con el hocico lleno de espuma. Volví a mi cueva y durante toda la noche oí que las rocas temblaban, y a pesar de la calma de atmósfera, el viento silbaba por entre las rendijas, produciendo un ruido como el de las grandes ruedas moledoras.

Esta mañana fui de nuevo a observar el abismo: el arroyo llevaba grandes trozos de piedra y estaba más caudaloso y rojizo por los fuegos que la noche anterior. Entonces subí a la cumbre del picacho y descubrí una nueva hondonada de la que se desprendía una columna de humo que debe de ser mortal, pues después de haber respirado en aquél sitio durante algunos instantes hube de retirarme pues me sentía desfallecer. Volví a mi casa y recogí el oro y las drogas; he abandonado la vivienda en que pasé tantos años porque recordaba la profecía etrusca: “Cuando se abran las montañas, caerá la ciudad; cuando el humo corone la montaña de los campos asolados, los hijos del mar habrán de llorar de dolor y angustia”. Sabio maestro, antes de abandonar esta ciudad he considerado mi deber venir a prevenirte. Sé de modo tan cierto como que tú vives, que el terremoto que azotó a esta ciudad hace dieciséis años no fue sino el anuncio de un destino más trágico. Las paredes de Pompeya están construidas sobre los campos de los difuntos y los ríos del Infierno. Ya te he prevenido. ¡Huye!.

### Erupción del Vesubio

Los ojos de los espectadores siguieron la dirección que les indicaba la mano del egipcio y vieron, con indecible espanto, un humo denso que salía de la cumbre del Vesubio y que tenía la forma de un enorme pino; el tronco era completamente negro y las ramas, de fuego, de un fuego que cambiaba de tonalidades a cada momento y que ya se presentaba claro y brillante, ya tomaba un color rojo apagado.

En ese preciso instante sintieron temblar la tierra bajo sus pies; los muros del anfiteatro vacilaron y se oyó a la distancia el estrépito de los techos que caían: inmediatamente vieron que la nube se les acercaba, siniestra, rápida como un torrente, al mismo tiempo que la montaña comenzaba a vomitar una lluvia de ceniza mezclada con algunas piedras, que caían sobre los viñedos desolados, sobre las calles desiertas sobre el anfiteatro, por todas partes, en fin, hasta sobre el mismo mar que se cubría poco a poco, de una capa espesa.

La catástrofe que rompiendo las cadenas de la sociedad, había tratado lo mismo al libre que al esclavo o prisionero....

El volcán vomitaba ahora agua hirviendo, que, mezclada con las cenizas, formaba torrentes que corrían falda abajo e inundaban las calles. Uno de los más terribles, en el que se añadía la escoria volcánica al agua hirviendo y a las cenizas, penetró impetuoso en el recinto donde los sacerdotes intentarían, en vano, encender el fuego sagrado. Pronto cubrió los cuerpos de todos ellos.

### **La destrucción avanza**

La nube, que había producido tal oscuridad en pleno día, se fue convirtiendo en una masa densísima e impenetrable, y a medida que crecían las tinieblas, también aumentaban los relámpagos en intensidad y viveza.<sup>2</sup> Ningún arco iris pudo nunca igualar aquellas tonalidades de aquellas luces; a veces, azul tan intenso como el del mar Mediterráneo en un claro día de verano; otras, verde vivo como la piel de las serpientes; y en otras se tornaba rojo e iluminaba a toda la ciudad de extremo a extremo, o empalidecía en seguida hasta parecer como el fantasma del volcán que le daba vida.

Cuando se interrumpían las lluvias, se podían escuchar los ruidos que se producían debajo del piso y de las ondas que, furiosas, rugían en el mar; también se oían los murmullos de los vapores y gases que se desprendían por entre las hendiduras de la montaña. A veces la nube parecía desprenderse de la masa del volcán y entonces, iluminada por los siniestros relampagueos, asumía formas humanas o de horribles monstruos que se perseguían unos a otros; los atemorizados y supersticiosos pompeyanos veían en aquellas formas las imágenes de gigantescos enemigos que demostraban ser los agentes del terror de la tierra.

En muchos lugares las cenizas llegaban hasta la rodilla, y las aguas hirvientes que se desprendían del cráter del volcán caían en forma de lluvia, y sus fuertes y sofocantes vapores penetraban por todas las rendijas. En algunas partes tremendos trozos de rocas eruptivas caían sobre los techos de las casas y al rodar al suelo, llevaban consigo parte de las ruinas de los edificios que arrasaban, con lo que se iba cada vez haciendo más difícil el paso por las calles. A medida que avanzaba el día, el terremoto era más violento. Ya no era posible mantenerse en pie, y ni carruajes ni literas podían estar firmes, aunque se encontrasen en terreno llano.

A veces las piedras más grandes chocaban unas contra otras y al romperse en numerosos fragmentos despedían chispas que encendían todo lo inflamable que se hallase cerca. Por esta causa iba desapareciendo la oscuridad, pues varias casas y viñedos estaban en llamas que, a menudo, se elevaban muy altas en el oscuro cielo.

Los lamentos de los agonizantes eran interrumpidos por gritos salvajes de mujeres aterrorizadas que, cuando se oían en la completa oscuridad, parecían más terribles, porque el que los escuchaba comprendía la inutilidad de cualquier esfuerzo y la existencia de otros peligros más adelante. Entre todos se distinguían claramente los ruidos de la montaña fatal: las explosiones, los vientos y los torrentes. Cuando el viento soplaba por la calles traía consigo un polvo abrasador y vapores sofocantes que dificultaban la respiración y hacía perder el conocimiento a los transeúntes; todas las arterias y venas parecían hincharse y la circulación de la sangre sufría tremendo desórdenes.



Pero, de pronto, las sombras cubrieron de nuevo la escena; el joven se dio vuelta instintivamente hacia la montaña y vio allí que una de las dos gigantescas moles en que estaba dividida la cumbre oscilaba y se precipitaba con gran estrépito, como un horripilante alud de fuego, por la falda del volcán. Al mismo tiempo una densa humareda, invadiendo la atmósfera cubrió tierra y mar.

Por los campos cercanos a las murallas corrían miles de personas sin saber por dónde escapar. El mar estaba muy retirado de la playa, y los que se habían acercado, prefirieron volver a tierra firme, pues las olas estaban agitadísimas, y los restos de animales marinos que habían quedado muertos en la playa, sumado al extraño ruido que producían las piedras volcánicas al caer en las profundas aguas, los amedrentaron en extremo. Por eso se encontraban aquellas dos corrientes humanas; los que huían hacia el mar, y los que de él volvían, sin saber qué hacer ni a dónde dirigirse.

Y en seguida se produjo el terremoto y luego las sombras volvieron a reinar sobre la tierra.

## **INDICE**

### **RESUMEN**

### **INTRODUCCIÓN**

<b>1.1 CONCEPTOS RELATIVOS A LOS VOLCANES.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 LAS ERUPCIONES VOLCÁNICAS.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 TIPOS DE VULCANISMO Y ERUPCIONES.....</b>	<b>3</b>
<b>1.4 PELIGROS VOLCÁNICOS.....</b>	<b>7</b>
<b>2. ANTECEDENTES.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 VOLCÁN POPOCATÉPETL.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 SISMICIDAD ASOCIADA CON LA ACTIVIDAD ERUPTIVA DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL.....</b>	<b>14</b>
<b>2.3 INSTRUMENTACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS.....</b>	<b>15</b>
<b>2.4 LOCALIZACIONES HIPOCENTRALES DE LOS EVENTOS SÍMICOS.....</b>	<b>15</b>
<b>2.5 IDENTIFICACIÓN DE DIFERENTES ETAPAS DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA.....</b>	<b>17</b>
<b>2.6 CLASIFICACIÓN DE EVENTOS SÍMICOS.....</b>	<b>20</b>
<b>2.6.1 PROCEDIMIENTOS DE CLASIFICACIÓN SÍSMICA.....</b>	<b>21</b>
<b>3. DESARROLLO DEL SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN DE SEÑALES SÍMICAS DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL (SISP).....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 RECONOCIMIENTO DE PATRONES.....</b>	<b>27</b>
<b>3.2 CONCEPTOS BÁSICOS PARA EL ANÁLISIS ESPECTRAL.....</b>	<b>28</b>
<b>3.2.1 SEÑALES.....</b>	<b>28</b>
<b>3.2.2 SEÑALES EN EL DOMINIO DE TIEMPO.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.3 SEÑALES EN EL DOMINIO DE LA AMPLITUD.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.5 ESPECTRO DE AMPLITUD.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.4 SEÑALES EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.6 RUIDO.....</b>	<b>30</b>
<b>3.2.7 TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER.....</b>	<b>30</b>
<b>3.2.8 LA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.9 RESOLUCIÓN DEL ANÁLISIS.....</b>	<b>32</b>
<b>3.2.10 FRECUENCIA DE NYQUIST.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2.11 INTERVALO DE RESOLUCIÓN.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2.12 ACONDICIONAMIENTO DE LAS VENTANAS PARA ANÁLISIS.....</b>	<b>33</b>

<b>3.3 DATOS.....</b>	<b>34</b>
<b>3.3.1 EARTHWORM.....</b>	<b>34</b>
<b>3.3.2 INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA EN EL VOLCÁN   POPOCATÉPETL.....</b>	<b>35</b>
<b>3.3.3 CARACTERÍSTICAS DE ARCHIVOS SÍSMICOS.....</b>	<b>36</b>
<b>3.4 PROCESAMIENTO.....</b>	<b>37</b>
<b>3.4.1 DESARROLLO (DOS ETAPAS).....</b>	<b>37</b>
<b>3.4.2 ESPECTROGRAMA.....</b>	<b>38</b>
<b>3.4.3 SEÑALES SÍSMICAS.....</b>	<b>39</b>
<b>3.4.4 MUESTREO.....</b>	<b>45</b>
<b>3.4.5 APLICACIÓN DE FFT PARA CADA UNO DE LOS   SEGMENTOS.....</b>	<b>45</b>
<b>3.4.6 REPRESENTACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LAS   ENVOLVENTES.....</b>	<b>45</b>
<b>3.4.7 VALOR MÁXIMO.....</b>	<b>50</b>
<b>3.4.8 DECAIMIENTO EXPONENCIAL.....</b>	<b>53</b>
<b>3.4.9   ESTADÍSTICA.....</b>	<b>54</b>
<b>3.4.10 RESULTADOS   ESTADÍSTICOS.....</b>	<b>57</b>
<b>4. APLICACIÓN Y RESULTADOS.....</b>	<b>60</b>
<b>4.1 APLICACIÓN.....</b>	<b>60</b>
<b>4.2 RESULTADOS.....</b>	<b>74</b>
<b>5. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>78</b>

## INTRODUCCION

El vulcanismo es una de las manifestaciones más notables de la dinámica interna más notable de la Tierra; es por eso que las causas que lo provocan han despertado enorme curiosidad científica pues, pues pueden ser motivo de admiración o temor por la grandeza de sus fenómenos y de los desastres que ocasionan, ya que desgraciadamente son cuantiosas las pérdidas humanas y económicas que se llegan a derivar de las erupciones volcánicas (De la Rosa, 2002).

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 a, entre otros factores, la calidad de los suelos y el clima (De la Rosa, 2002).

Un ejemplo real de riesgo lo representa el volcán Popocatepetl, que en Náhuatl significa "Montaña que humea" es un estratovolcán andesítico-dacítico localizado en las coordenadas 19.02° N, y 98.62° W en el Cinturón Volcánico Mexicana, tiene una altura de 5452 msnm y un cráter de 900 m de diámetro y aproximadamente 200 m de profundidad, cerca del cual se ubican numerosos asentamientos humanos e industriales.

Existe un peligro latente para la población asentada en los límites del estado de México, de Puebla y Morelos, debido a la reactivación del volcán Popocatepetl apartir de diciembre de 1994. Para ciudades relativamente distantes del volcán, como el D.F y la Cd de Puebla, existe la posibilidad de afectación por caída de ceniza. "Una erupción del Popocatepetl 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" (Valdés C. et al. 1995).

La mayoría de las erupciones, tal vez todas, vienen precedidas por cambios geofísicos y geoquímicos en el estado del volcán. Estos cambios que a veces son imperceptibles por los seres humanos, pueden ser detectados con instrumentos sofisticados instalados en las laderas o cerca de los volcanes. El término vigilancia volcánica (o monitoreo volcánico) se refiere a los estudios científicos que colectivamente observan, registran y analizan sistemáticamente los cambios visibles o invisibles, que ocurren en el volcán y en sus alrededores (Banks, 1989).

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 medidas pertinentes para minimizar el riesgo volcánico asociado a un proceso eruptivo. Entre los tipos de monitoreo y vigilancia que comúnmente se utilizan en un volcán están: la vigilancia visual, el monitoreo sísmico, el monitoreo geodésico y el geoquímico (De la Rosa, 2002).

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 (De la Rosa, 2002).

Después de un período de reposo, el volcán Popocatépetl inició una nueva fase de actividad con una emisión de gases y cenizas el 21 de diciembre de 1994. La última etapa de actividad fue de 1920 a 1927, generando el crecimiento de domos de lava dentro del cráter, así como explosiones y emisiones de ceniza (Waiz, 1921). La etapa de actividad contemporánea del volcán se caracteriza por crecimientos de domos dentro del cráter, así como explosiones de tipo vulcanianas con un máximo índice de explosividad de 3 (VEI, Newhall).

La nueva etapa ha sido bien monitoreada y estudiada en diversas áreas: sismología, petrología, deformación, geoquímica, percepción remota, vulcanología física, magnetometría, visual, etc. Especialmente el monitoreo sísmico ha sido de gran ayuda para estudiar la actividad volcánica actual. Existe un gran número de estudios relacionados con la actividad sísmica del volcán Popocatépetl, los temas que se han tratado son acerca de atenuación (Martínez, 1998), tremor (Arámbula, 2002), eventos LP's (De la rosa, 2002), difusión rectificada (Pérez, 2001), tomografía sísmica (González, 2004), eventos LP's (Arciniega, 2002), estado de esfuerzos (Arámbula, 2007).

El objetivo del presente trabajo es la caracterización de la sismicidad del volcán Popocatépetl, para ello se propuso la creación de un sistema de reconocimiento de señales sísmicas a partir de las características de los eventos sísmicos registrados, basado en la creación de patrones de reconocimiento a partir de la envolvente de las familias sísmicas, la precisión de los patrones puede mejorar al incorporar una mayor cantidad de sismos. Estos mismos patrones sirven para la creación de una base de datos confiable. Además se busca establecer una "memoria" al sistema que le permitirá clasificar la sismicidad del volcán. El contenido de este trabajo se distribuyó en cinco capítulos de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se presentan Conceptos relacionados con los volcanes, como la tipología y la clasificación, las erupciones volcánicas y los peligros asociados. También se incluye una breve descripción de la Faja Volcánica Transmexicana, dentro de la cual se localiza el volcán Popocatépetl.

En el capítulo 2 incluye una descripción del monitoreo sísmico del volcán Popocatépetl, se presenta la instrumentación sísmica, la distribución de las estaciones y el método de las localizaciones hipocentrales de los eventos volcanotectónicos. Se incluye una tabla-resumen de las diferentes etapas de la actividad volcánica comprendida entre diciembre de 1994 y diciembre 2003. Asimismo se muestran diferentes procedimientos de clasificación sísmica que se han desarrollado, demostrando el interés que existe por contar con sistema de clasificación sísmica, por observatorios volcánicos y especialistas del tema.

En el capítulo 3 se explican conceptos relacionados con el procesamiento de señales, utilizados en el desarrollo de un Sistema de Identificación de Señales Sísmicas del volcán Popocatépetl (SISP), que consiste en distinguir las características de cada una de las familias en que se encuentra dividida la

sismicidad del volcán Popocatépetl, considerando tres parámetros: las frecuencias de las señales, las amplitudes de las mismas y la duración de las señales, es decir, el tiempo, para crear patrones de reconocimiento, que se emplearán para la clasificación de los eventos sísmicos.

En el capítulo 4 se presenta una aplicación de **SISP** a los eventos que conforman las familias de Volcanotectónicos, Eventos de Largo Periodo (LP) y Explosiones. Para la familia de Volcanotectónicos se emplearon eventos localizados en distintos sectores del volcán, los datos utilizados en el análisis de los eventos de Largo Periodo (LP) se separaron en dos grupos, uno en el que se incluyeron eventos no asociados a ninguna etapa y el otro contiene eventos correspondientes al mes de febrero del 2003. Por último, las explosiones que se analizaron pertenecen a la Epata 9 (Fase muy explosiva) de la actividad del volcán Popocatépetl.

El en capítulo 5 se describen las conclusiones sobre la capacidad de SISP para obtener patrones de las familias sísmicas del volcán Popocatépetl. Además de su aplicación a la familia de los volcanotectónicos y a las explosiones del Etapa 9 del volcán.

## 1. CONCEPTOS RELATIVOS A LOS VOLCANES

La Tierra, es un sistema muy complejo que inició su evolución hace un poco mas de 4,500 millones de años, cuando la Tierra se condensó en una esfera, cuya superficie se enfriaba con relativa rapidez. Algunos miles de millones de años después y hasta la actualidad, la superficie ha alcanzado un grado de equilibrio que le permite sustentar la vida.

La Tierra presenta una estructura interna, en la cual se pueden distinguir tres regiones concéntricas: La primera es la **corteza**, que se constituye como una cáscara relativamente delgada comparada con el diámetro del planeta. La corteza incluye a los continentes y el fondo marino. La segunda llamada **manto terrestre**, es una gruesa capa de material rocoso y, la tercera es el **núcleo**, situado en el centro, está a su vez conformado por dos capas, una externa y fluida, y otra interna sólida.

El manto terrestre es una gran masa de material rocoso, con propiedades plásticas, muy densa, muy caliente y que fácilmente se funde en el caso de que se disminuya la presión a la que está sometido, o si se aumenta su temperatura un poco mas, dando por resultado el **magma**. El magma es una roca líquida que tiene una menor densidad que la sólida y por ello tiende a subir y se puede acumular en la corteza formando las llamadas "cámaras" magmáticas.

El magma acumulado en la corteza no siempre sale a la superficie. En algunos casos permanece inmóvil por largo tiempo en el subsuelo, hasta enfriarse y solidificarse y por lo general sólo aflora a la superficie cuando la porción de corteza que la cubre se erosiona. En otros casos el magma sale a la superficie, produciendo una **erupción volcánica**.

Un **volcán** se define como aquel sitio donde sale material magmático o sus derivados, formando una acumulación que por lo general toma una forma cónica alrededor del punto de salida. Generalmente los volcanes tienen en su cumbre o en sus costados, grandes cavidades denominadas **cráteres**.

Los volcanes que se forman por la acumulación de materiales emitidos por varias erupciones a lo largo del tiempo geológico se llaman **poligenéticos**, o **volcanes centrales**. Otro tipo de volcanes que nacen, desarrollan una erupción que puede durar algunos años y se extinguen sin volver a tener actividad se le denomina **monogenético**, en lugar de ocurrir otra erupción en ese volcán, puede nacer otro volcán similar en la misma región, son muy abundantes en el Cinturón Volcánico Mexicano.

Se dice que un volcán es **activo**, cuando existe magma fundido en su interior, o cuando existe la posibilidad de recibir nuevas aportaciones de magma y por tanto mantiene el potencial de producir erupciones. Por ello, aún volcanes que no muestran ninguna manifestación externa pueden ser clasificados como activos o peligrosos. En muchos casos es difícil decir si un volcán es activo o no. Por lo general se dice entonces que un volcán es activo si ha mostrado

alguna tipo de actividad eruptiva relativamente reciente. Esto significa que un volcán que haya presentado actividad durante los últimos diez mil años puede ser considerado "activo". Sin embargo, este número es convencional, ya que un volcán con once mil años de inactividad no necesariamente está muerto, ni un volcán que haya tenido su última erupción hace 8 o 9 mil años necesariamente volverá a hacer erupción.

Los volcanes activos no se encuentran dispersos arbitrariamente sobre la superficie de la Tierra, sino que se distribuyen por diferentes regiones definidas por los procesos tectónicos de escala global, como las interacciones de las placas tectónicas que conforman la corteza y las corrientes convectivas del manto terrestre que las mueven. En todo el mundo existen alrededor de 1300 volcanes continentales activos, de éstos 550 han tenido alguna erupción en tiempos históricos, a lo largo de la historia de la humanidad, poblaciones asentadas cerca de estos 550 volcanes en distintas partes del mundo han soportado los efectos de la actividad volcánica.

## 1.2 LAS ERUPCIONES VOLCÁNICAS

Las erupciones volcánicas resultan del ascenso del magma que se encuentra en la parte interna o debajo de un volcán activo. Cuando el magma se acerca o alcanza la superficie, pierde todos o parte de los gases que lleva en solución, formando gran cantidad de burbujas en su interior. Las erupciones son entonces emisiones de mezclas de magma (roca fundida rica en materiales volátiles), gases volcánicos que se separan de este (vapor de agua, bióxido de carbono, bióxido de azufre y otros) y fragmentos de rocas de la corteza. Estos materiales pueden ser arrojados con distintos grados de violencia, dependiendo de la presión de los gases provenientes del magma o de agua subterránea sobrecalentada por el mismo.

Cuando la presión dentro del magma se libera a una tasa similar a la que se acumula, es decir, cuando el magma puede liberar los gases en solución con facilidad, el magma puede salir a la superficie sin explotar y se tiene una **erupción efusiva**. Si el magma acumula más presión de la que puede liberar, las burbujas en su interior crecen hasta tocarse y el magma se fragmenta violentamente, produciendo una **erupción explosiva**.

Las erupciones explosivas pueden producir densas columnas de ceniza que ocasionalmente penetran la estratosfera y alcanzan alturas superiores a los 20 km, estas son las llamadas **columnas eruptivas**.

La tasa de erupción promedio en México durante los últimos 500 años ha sido de cerca de 15 erupciones de diversos tamaños por siglo. La mayoría de esas erupciones han sido de magnitudes con un Índice de explosividad volcánica de 0 a 1, sin embargo otras han sido destructivas con un Índice de explosividad volcánica cercana a 2, como las del Colima de 1576 y 1818, o las del San Martín Tuxtla de 1664 y 1793, ó en mayor grado con un Índice de explosividad volcánica entre, 3 y 4 como fue la erupción del volcán El Chichón en 1982, que causó numerosas víctimas, devastó 150 km<sup>2</sup> de áreas boscosas y de cultivo.



Otras erupciones, como el nacimiento del volcán monogenético Parícutín que produjo flujos de lava, provocando la destrucción de poblaciones y tierras cultivables, pero sin causar víctimas. Casos análogos de volcanes monogenéticos recientes son el Jorullo, que nació en Michoacán en 1759, y el Xitle, que nació en el valle de México, hace unos 1670 años.

### 1.3 TIPOS DE VULCANISMO Y ERUPCIONES

Es necesario identificar y clasificar los volcanes. Existen dos tipos de vulcanismo el monogenético y el poligenético:

**Vulcanismo monogenético:** es aquel en que la erupción ocurre durante una sola etapa, a través de una fisura o boca y construye un pequeño edificio en forma de maar, cono escoriáceo, domo o volcán escudo. Su duración varía de meses a aproximadamente 10 años y es predominantemente efusiva.

**Vulcanismo poligenético:** es aquel en el cual se forman edificios volcánicos por la acumulación de materiales emitidos por varias erupciones a lo largo del tiempo geológico. Se producen erupciones con un rango amplio de intensidades. Construye edificios tipo estratovolcán y grandes calderas.

Los volcanes pueden ser de diferentes tipos (figura 1.1), entre los que se encuentran las calderas, los conos cineríticos, maares, volcanes escudo, estratovolcanes y domos. Saber a qué tipo pertenece un volcán, proporciona mucha información acerca de la actividad que ha presentado en el pasado.

**Caldera:** Depresión circular o elíptica grande (1 a 100 km de diámetro), a veces reconocer su existencia a simple vista resulta difícil. Se forma cuando el magma se obtiene de un reservorio somero. En un año común, algún tipo de actividad se presenta en cerca de 18 calderas en el mundo.

**Cono Cinerítico:** Es una montaña con laderas muy inclinadas, que se forma debido a la acumulación de partículas y lava mezclada con gases. Es el volcán más simple de todos. En general son monogenéticos. Alcanzan alturas entre 30 y 450 m. Sus magmas son de baja viscosidad. Uno de los conos cineríticos más recientes, es el volcán Parícutín, que construyó un cono con una altura de 424 m y produjo un flujo de lava que cubrió 25 km cuadrados.

**Maar:** Son conos con cráteres muy grandes de bajo relieve, que corta el nivel freático, por lo que forma un lago en el fondo llamado "mare". Se forma por erupciones explosivas someras. Las explosiones son generalmente provocadas por el calentamiento del agua freática, cuando el magma invade estos niveles. También son conocidos como Axalapascos, que en Náhuatl significa "cuenco de tierra y arena con agua".

**Volcán Escudo:** Es un volcán amplio con pendientes suaves (menos de 10°) construidas por erupciones de lava basáltica fluida. El nombre proviene del

parecido con los escudos de los guerreros. Los volcanes más grandes del mundo son volcanes escudo.

**Estratovolcán:** Son volcanes con formas cónicas y pendientes pronunciadas, construidos por la erupción de flujos de lava viscosa, flujos piroclásticos y tefra. Se desarrollan, generalmente, en periodos de cientos o miles de años. Estos volcanes pueden producir una variedad de tipos de magma, incluyendo basalto, andesita, dacita y riolita. Todos estos magmas, con excepción del basalto, generan erupciones explosivas. De los 1511 volcanes que han hecho erupción en el mundo en los últimos 10,000 años, 699 son estratovolcanes.

**Domos:** Los domos están formados por masas de lava relativamente pequeñas. Esta lava es demasiado viscosa para fluir a grandes distancias, por lo que se apila sobre y alrededor de su centro emisor. Presentan pendientes fuertes que tienden a derrumbarse y formar flujos de bloques y cenizas. Ocurren típicamente en las cimas de algunos volcanes. Los domos son acompañados por actividad explosiva. Llegan a medir hasta 200 m de diámetro y 500 m de altura.

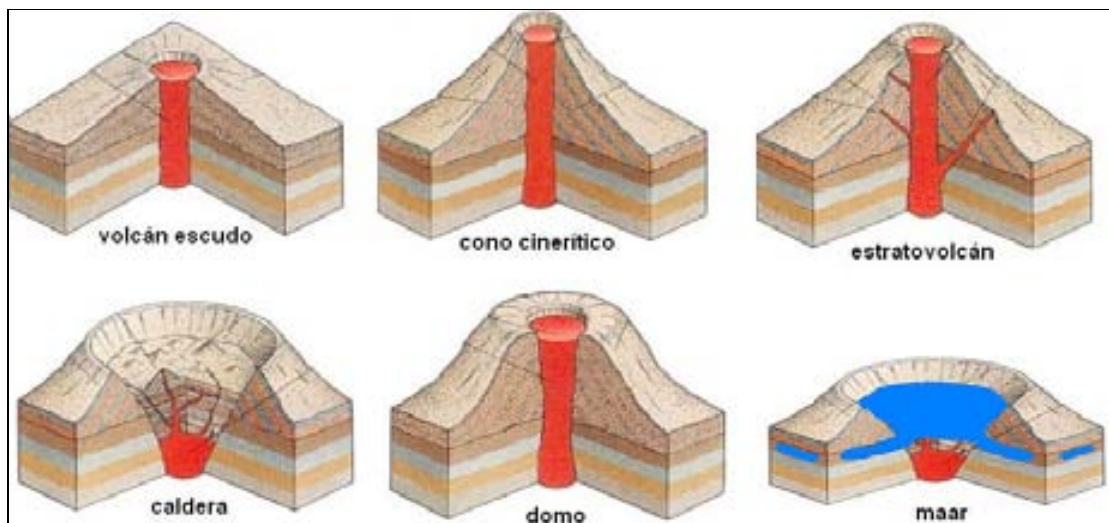


Figura 1.1 Tipos de volcanes

Los **tipos de erupciones** más conocidos son:

**Erupción efusiva o Hawaiana:** Es una erupción dominada por la salida continua de lava de baja viscosidad que puede formar flujos o ríos de lava. El gas se libera fácilmente. La extrusión puede durar minutos o días. Son típicas de volcanes escudo. La erupción histórica más larga, ocurrió en Islandia en 1783, y produjo 15 km<sup>3</sup> cúbicos de material en 8 meses.

**Erupción Estromboliana:** Las erupciones estrombolianas están caracterizadas por una intermitente explosión o fuente de lava basáltica de viscosidad mayor a la Hawaiana, proviene de un solo cráter o fisura. Cada episodio de ésta obedece a la liberación de gases volcánicos, lo que ocurre,

típicamente, cada varios minutos, algunas veces en forma rítmica y otras en forma irregular. Origena columnas eruptivas de hasta 10,000 m de altura.

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

**Erupción Pliniana y Peleana:** Las erupciones plinianas son grandes eventos explosivos que forman enormes columnas de tefra y gas que se elevan hasta la estratósfera (entre 20 y 45 km). Las emisiones son continuas y de magma viscoso. Algunas de estas erupciones han provocado que cantidades de aerosoles (pequeñas gotas de líquidos) queden en la estratósfera, provocando que la temperatura en la superficie de la Tierra, baje un poco. Por ejemplo la erupción del Chichón en 1982. En la figura 1.2 se muestran de forma esquemática la forma de los distintos tipos de erupciones.

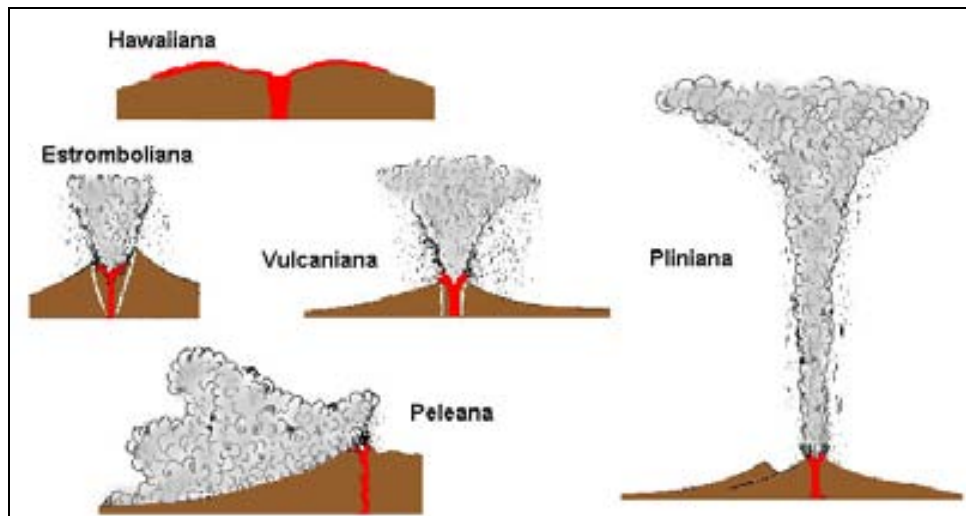


Figura 1.2 Tipos de erupciones

En la tabla 1.1 se mencionan los tipos de erupciones, el tipo de volcán, algunas otras características y ejemplos de volcanes del mundo que lo han presentado.

Tabla 1.1 Tipos de erupciones y naturaleza de la actividad volcánica

Tipo de erupción	Ejemplos	Magma	Actividad efusiva	Explosividad	Tipo de volcanes
Hawaiiana	Mauna Loa	Caliente (más de 1200°C) baja viscosidad	Lavas extensas a partir de fisuras	Baja	Volcanes escudo, planicies lávicas y erupciones fisurales

Estromboliana	Stromboli y Parícutín	Intermedio, mixto, viscosidad moderada	Lavas escasas, poco extensas	Variable	Conos de lavas y cenizas abruptos
Vulcaniana	Vesubio	Frío (menos de 900°C), viscoso	Lavas escasas, piroclastos abundantes	Moderada a violenta	Estratovolcanes y calderas
Pliniana Y Peleana	Pinatubo y St. Helen	Frío (menos de 900°C), muy viscoso	Piroclastos y domos	Muy violenta	Estratovolcanes y calderas

Elaboración de Mapas de Peligros Volcánicos, CENAPRED

Actualmente, una de las formas más aceptadas de cuantificar las erupciones explosivas (forma que no es válida para las erupciones efusivas) es la escala del *Índice de Explosividad Volcánica* (VEI, por sus siglas en inglés). Se trata de una escala compuesta (VEI, Newhall y Self, 1982), en la que se toman en cuenta diversas características de una erupción como son: el volumen de magma emitido, la energía térmica liberada, el alcance de los productos fragmentados, el grado de destrucción causada, la altura de la columna eruptiva, la duración de la erupción, etc. La tabla 1.2 presenta la escala VEI en términos de algunos de los parámetros eruptivos relevantes.

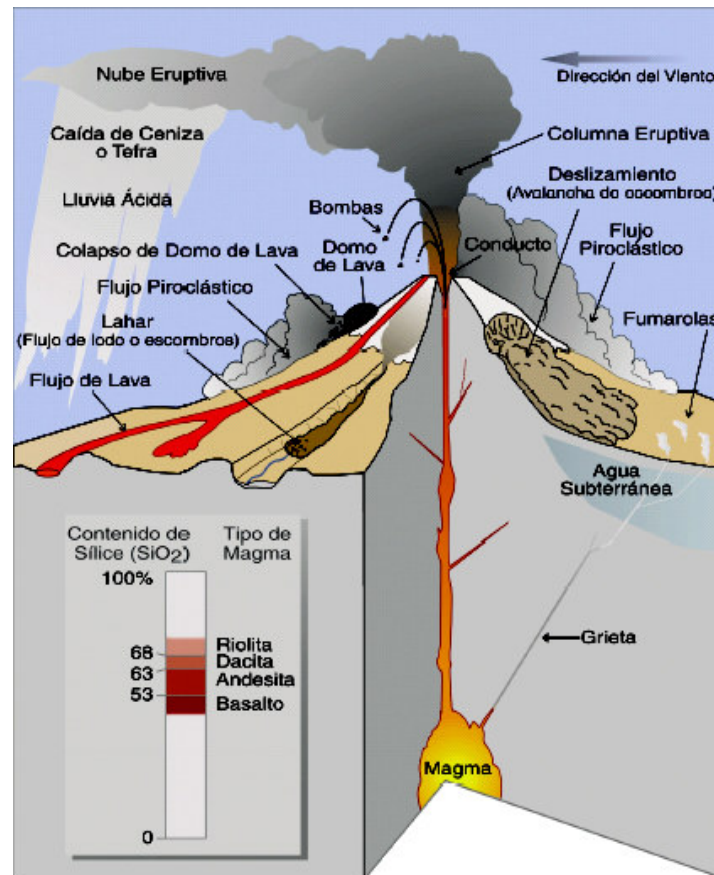
**Tabla 1.2 Índice de Explosividad Volcánica (VEI, por sus siglas en inglés)**

VEI	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Descripción	No explosiva	Pequeña	Moderada	Moderada a grande	Grande	Muy grande	--	--	--
Volumen emitido (m <sup>3</sup> )	< 10,000	10,000 – 1,000,000	Uno a diez millones	Diez a cien millones	Cien a mil millones	Uno a diez km <sup>3</sup>	Diez a cien km <sup>3</sup>	Cien a mil km <sup>3</sup>	Más de 1000 km <sup>3</sup>
Altura de la columna (km)	0,1	0,1 – 1	1 - 5	3 - 15	10 - 25	Más de 25	--	--	--
Duración en horas	-1	-1	1 - 6	1 - 6	1 - 12	6 - 12	Más de 12	--	--
Inyección a la troposfera	Mínima	Leve	Moderada	Sustancial	Grande	--	--	--	--
Inyección a la estratosfera	Nula	Nula	Nula	Posible	Definida	Significativa	Grande	--	--

Adaptado de: Newhall y Self (1982).

## 1.4 PELIGROS VOLCÁNICOS

Muchos de los procesos geológicos que tienen su origen en los volcanes son potencialmente peligrosos (figura 1.3).



**Figura. 1.3** Los peligros volcánicos. Este dibujo simplificado muestra un volcán del tipo al que pertenecen la mayoría de los volcanes más grandes y peligrosos del mundo. (Tomado del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Reduciendo el riesgo de los peligros volcánicos)

A continuación se describirán los peligros indicados en la figura 1.3.

### Cenizas volcánicas y efectos

Las cenizas volcánicas son lava que ha sido molida y convertida en polvo o arena por erupciones volcánicas. Durante una explosión, los fragmentos más gruesos caen rápidamente en las cercanías del volcán, sólo la ceniza más fina es arrastrada por el viento a grandes distancias que van de cientos hasta miles de kilómetros, y puede afectar áreas muy extensas y a un gran número de personas (Elaboración de Mapas de Peligros Volcánicos, GENAPRED).

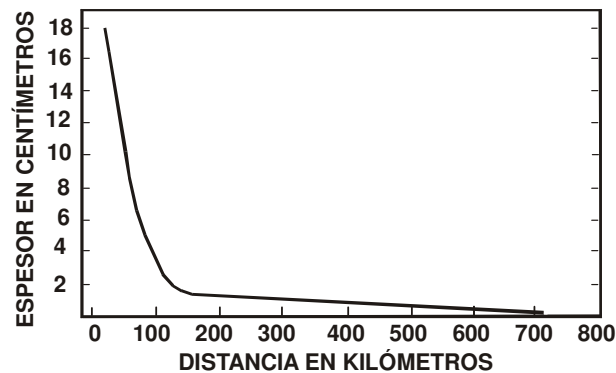
La caída de cenizas puede provocar alguno de los siguientes efectos: el incremento de enfermedades pulmonares, trastornos gastrointestinales por la

ingestión de agua y alimentos contaminados con flúor y posiblemente con metales pesados (arsénico, mercurio, etc.); daños oculares como conjuntivitis y abrasiones en la córnea (Elaboración de Mapas de Peligros Volcánicos, CENAPRED).

Las cenizas obstruyen las corrientes de agua, presas, alcantarillas, plantas de aguas residuales y todo tipo de maquinaria. Las cenizas se amontonan en carreteras, vías férreas y senderos y además puede ser resbalosa (Elaboración de Mapas de Peligros Volcánicos, CENAPRED).

Capas de cenizas de 2 a 3 cm de espesor pueden causar el colapso de techos con pendientes menores a 20°, así como en estructuras de mala calidad. Las cenizas secas tienen un peso de 400-700 kg/m<sup>3</sup>, la lluvia puede incrementarlo de un 50 a un 100%. Una capa de cenizas de 10 cm de espesor representará una carga extra de 40-70 kg/m<sup>2</sup> si está seca, y de 100-125 kg/m<sup>2</sup> si está húmeda (Elaboración de Mapas de Peligros Volcánicos, CENAPRED).

Una densa caída de cenizas altera el suministro de energía. La repentina demanda multitudinaria de luz puede hacer que el servicio eléctrico se agote o falle. Los equipos electrónicos pueden sufrir importantes daños, cortocircuitos e interferencias de radio y televisión (Elaboración de Mapas de Peligros Volcánicos, CENAPRED).



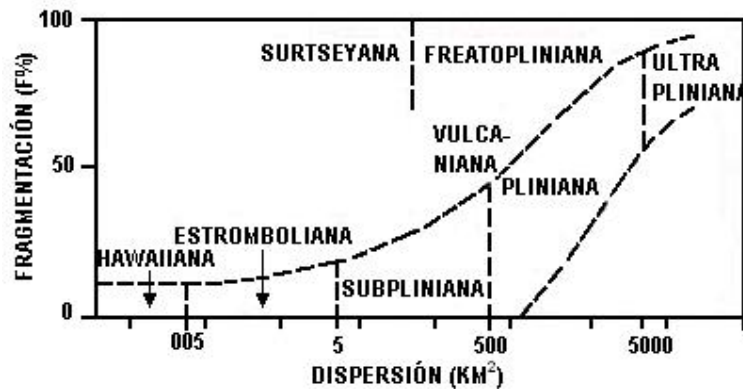
**Figura 1.4** Distribución de espesores de cenizas alcanzados en erupciones recientes de tipo pliniano.

Los efectos sobre la agricultura dependen del tipo de cultivo, de su grado de desarrollo y evidentemente del espesor de la capa de cenizas caída. Sin embargo en climas cálidos la vegetación se recupera en muy poco tiempo. Pueden ocasionar accidentes de automóviles (debido a que las carreteras se tornan resbaladizas y disminuye la visibilidad). Finalmente, las cenizas lanzadas en una erupción afecta el tráfico aéreo, ya que al atravesar las nubes de vapor y cenizas, los motores de los aviones pueden pararse. (Elaboración de Mapas de Peligros Volcánicos, CENAPRED).

De las mediciones de la acumulación de cenizas producidas por erupciones recientes de tipo pliniano, se han obtenido en promedio los siguientes espesores: hasta una decena de metros en la zona cercana al cráter (menos de 12 km), de 20 a 50 cm a distancias de entre 12 y 35 km y de 5 a 10 cm

hasta distancias de 85 km (figura 1.4). Para la determinación del impacto de las cenizas en una región determinada, se requiere información adicional de patrones de viento locales. (Elaboración de Mapas de Peligros Volcánicos, CENAPRED)

El viento y el tipo de erupción son los dos factores principales que controlan la dispersión de la ceniza de un volcán que entra en erupción. El tipo de erupción determinará el volumen y el tamaño de la ceniza (Figura 1.5), así como la variedad de altitudes a la cual la ceniza es propulsada o elevada. (Elaboración de Mapas de Peligros Volcánicos, CENAPRED).



*Figura. 1.5 Distancia alcanzada por la ceniza desde el centro de emisión de acuerdo al porcentaje de fragmentación y tipo de erupción.*

### Flujos piroclásticos

Los flujos piroclásticos son uno de los fenómenos más destructivos que se pueden presentar en un volcán en actividad. Los flujos piroclásticos son mezclas calientes de gases, cenizas y fragmentos de roca, que descienden por los flancos del volcán a velocidades de hasta más de 100 km por hora, con temperaturas por lo general arriba de 100 °C. La parte inferior y más densa del flujo se arrastra por el fondo de las barrancas y los valles, mientras que la parte superior, menos densa, puede sobrepasar los valles y alcanzar alturas importantes sobre el fondo de los valles e inclusive sobrepasar relieves topográficos importantes (Elaboración de Mapas de Peligros Volcánicos, CENAPRED).

Durante la generación de un flujo piroclástico, es prácticamente imposible que cualquier cosa que se encuentre a su paso se salve ya sean construcciones o seres vivos. El flujo es capaz de arrasar con construcciones bien edificadas y hasta con bosques enteros, sin dejar nada de pie, y puede llegar a viajar distancias que van del orden de metros a centenas de metros. (Elaboración de Mapas de Peligros Volcánicos, CENAPRED).

### **Lahar o flujos de lodo**

Los lahares comprenden una mezcla de materiales volcánicos (rocas, cenizas, pómez, escoria), mayoritariamente cenizas, movilizadas por el agua proveniente de la fusión del casquete glaciar, de un lago cratérico o por fuertes lluvias. El agua se mezcla con el material volcánico suelto que se encuentra en su camino y se transforma rápidamente en un flujo muy móvil con características similares al concreto utilizado en la industria de la construcción. (Elaboración de Mapas de Peligros Volcánicos, CENAPRED).

Dada la densidad de esta mezcla, estos flujos pueden transportar grandes bloques de roca (de hasta varios metros de diámetro) y otros objetos como puentes, casas, árboles y vehículos. Son fenómenos muy destructivos, que pueden recorrer distancias muy grandes, pudiendo superar fácilmente los 100 km, se han observado velocidades de 40 a 100 km/h en lahares históricos. El principal peligro para la vida humana es el enterramiento o el impacto de bloques y otros escombros. Las edificaciones y otros bienes que estén en el camino del flujo son destrozados, enterrados o arrasados. Se debe evacuar, aunque en ocasiones basta subir unos cuantos metros para estar a salvo. (Elaboración de Mapas de Peligros Volcánicos, CENAPRED).

### **Ondas de presión o de choque**

Se originan durante las erupciones explosivas debido al rápido movimiento del material, su energía disminuye con la distancia desde su centro de emisión, pero pueden llegar a tener la energía suficiente para causar daños a estructuras distantes. Erupciones moderadas pueden producir pequeños daños a distancias mayores de 10 km del volcán, especialmente rotura de cristales y heridas al proyectarse éstos. En la erupción del Volcán Tambora en Indonesia, en 1815, se reportó una onda de choque que produjo la ruptura de vidrios de ventanales ubicados a 400 km de distancia. (Elaboración de Mapas de Peligros Volcánicos, CENAPRED).

### **Derrumbe del edificio volcánico y avalanchas de escombros**

Las avalanchas de escombros son grandes deslizamientos que pueden ocurrir en un volcán, producidos por la inestabilidad de los flancos del mismo. Este tipo de fenómeno puede producirse por una intrusión de magma en el edificio volcánico (Santa Elena, 1982), por un sismo de magnitud mayor a 7 o por el debilitamiento de la estructura del volcán, produciéndose la destrucción parcial del mismo. (Elaboración de Mapas de Peligros Volcánicos, CENAPRED).

Las avalanchas de escombros son muy móviles. La mayor parte de los estratovolcanes han sufrido al menos un evento de este tipo durante su historia geológica. Las avalanchas pueden alcanzar grandes dimensiones que provocan la destrucción total de lo que encuentra a su paso. El alcance es de pocas decenas de kilómetros, aunque en ocasiones, debido a la acción de la gravedad, el material puede llegar a recorrer distancias de hasta 100 km y



cubrir varios cientos de kilómetros. (Elaboración de Mapas de Peligros Volcánicos, CENAPRED).

### **Flujos o coladas de lava y domos**

Es la manifestación volcánica más conocida, y presentan poco peligro para las personas. Los flujos de lava son derrames de roca fundida, originados en un cráter o en fracturas de los flancos del volcán, que descienden por los flancos y las barrancas del mismo. La lava avanza a una velocidad cercana a un kilómetro por día, como se observó durante la erupción del volcán Parícutín (1943), que disminuye conforme se va enfriando hasta solo unos pocos metros por día. Estos flujos generan daño parcial o la destrucción total a las construcciones, por enterramiento, trituración o incendio. Los domos de lava actúan en ocasiones como "tapones" que dificultan la liberación de gases desde el interior del volcán, dando lugar a explosiones que pueden producir flujos piroclásticos. (Elaboración de Mapas de Peligros Volcánicos, CENAPRED).

### **Sismos volcánicos**

Los sismos volcánicos generalmente son de magnitudes menores o iguales a 4 y raras veces ocurren en sitios alejados del volcán. Cuando un sismo es de origen volcánico, el movimiento de la tierra es rápido. Los daños producidos por ellos no son perceptibles, pero es importante destacar que muchas zonas volcánicas también son zonas sísmicas. Los efectos dañinos de los sismos volcánicos generalmente se detectan en las áreas aledañas, cerca de 10 km del cráter. Sin embargo, éstos pueden tener como consecuencia eventos tales como avalanchas de escombros, o contribuir en eventos como el colapso estructural del volcán mismo. (Elaboración de Mapas de Peligros Volcánicos, CENAPRED).

### **Gases volcánicos**

Los volcanes emiten gases durante las erupciones, incluso si el volcán no está en erupción, las grietas del subsuelo facilitan el movimiento de los gases hacia la superficie a través de pequeñas aberturas por medio de las llamadas fumarolas. En ocasiones, la liberación de los gases se produce en grandes cantidades. Más del 90% de todo el gas emitido por los volcanes es vapor de agua, la cual en su gran mayoría es agua subterránea proveniente de lluvias y ríos. (Elaboración de Mapas de Peligros Volcánicos, CENAPRED).

Otros gases volcánicos comunes son el bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), bióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), y varios otros compuestos de cloro (Cl), flúor (F), monóxido de carbono (CO), y nitrógeno (N). El gas bióxido de azufre puede reaccionar con las gotas de agua de la atmósfera y producir lluvia ácida, lo cual ocasiona corrosión y daños a la vegetación. El bióxido de carbono es más pesado que el aire, por lo que puede asentarse o mantenerse en áreas bajas en concentraciones letales para los seres vivos. (Elaboración de Mapas de Peligros Volcánicos, CENAPRED).

## **Tsunamis**

La mayoría de los tsunamis se originan por terremotos en el fondo del mar; sin embargo, decenas de tsunamis históricos de origen volcánico han causado numerosas muertes y grandes daños a las propiedades a lo largo de las playas marinas y lacustres, aún a grandes distancias de las erupciones. Algunos volcanes en el mundo han producido olas de hasta 35 metros de altura, causando grandes pérdidas materiales y humanas (Volcán Krakatoa, Indonesia, 1883). Se conocen algunos mecanismos que pueden producir dichos tsunamis volcánicos como son los sismos volcánicos, explosiones, colapsos o hundimientos, deslizamientos, lahares o flujos piroclásticos que entran en contactos con aguas y ondas de choque atmosféricas que se acoplan al mar. (Elaboración de Mapas de Peligros Volcánicos, GENAPRED).

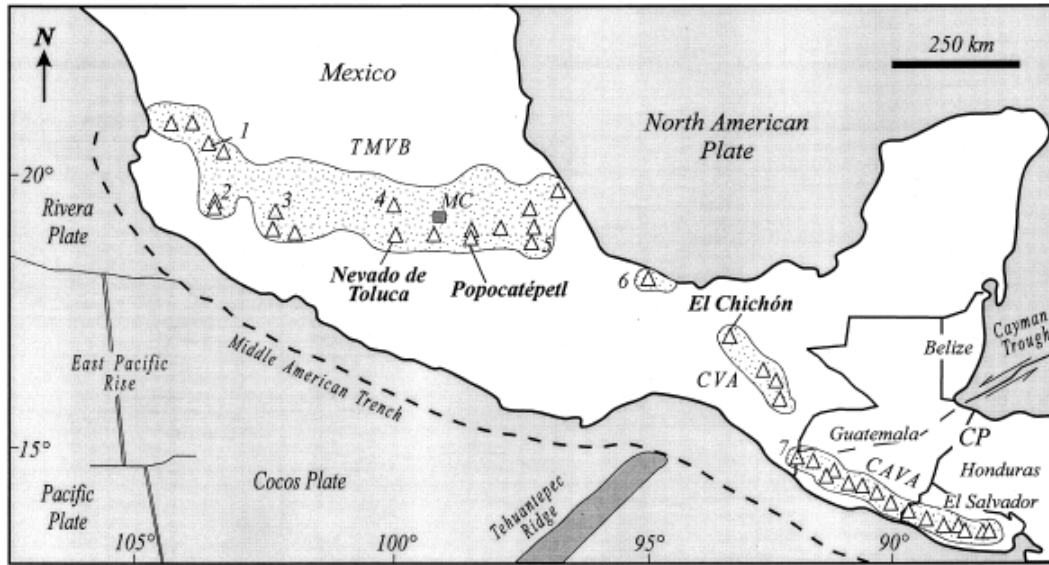
## **Faja Volcánica Transmexicana**

En México gran parte del vulcanismo está relacionado con la zona de subducción formada por las placas de Rivera y Cocos con la gran placa Norteamericana, y tiene su expresión volcánica en la Faja Volcánica Mexicana (FVM). Esta Faja es una elevación volcánica con orientación Este-Oeste, que se extiende más de 1,200 km y su ancho varía de 20 a 150 Km.

La FVM, ubicada sobre el paralelo 19°, alberga a los principales volcanes activos del país. Su vulcanismo es extremadamente variado, desde actividad efusiva cuyos productos más importantes son los derrames de lava, hasta erupciones altamente explosivas con predominio de depósitos piroclásticos tanto de flujo como de caída.

La FVM se caracteriza por la diversidad de volcanes, desde grandes estratovolcanes hasta extensos campos de pequeños conos de cenizas y volcanes escudo. Sin embargo existen otros centros eruptivos en el país que no pertenecen a la FVM, como son los volcanes del estado de Chiapas, el volcán Tres Vírgenes en Baja California Norte, cuyo mecanismo de formación es de otro origen, etc.

En México hay más de 2,000 volcanes, de los cuales alrededor de 15 se consideran activos o peligrosos. En la figura 1.6 se muestran las zonas volcánicas de México, así como la ubicación de algunos de los volcanes considerados como de alta peligrosidad.



**Figura 1.6 Zonas volcánicas de México (TMVB), algunos volcanes considerados como peligrosos están indicados con triángulos y nombre, los números corresponden a: 1. Ceboruco, 2. Colima, 3. Jorullo, 4. Jocotitlán, 5. Citlaltépetl, 6. San Martín Tuxtla, 7. Tacaná. (Tomado de USGS/CVO, 2003).**

De acuerdo con el catálogo de Volcanes de México del Smithsonian Institution (Siebert et al, 2003), existen en México 68 volcanes y campos volcánicos clasificados como Cuaternarios o geológicamente recientes (volcanes formados durante la era en que aparece el Hombre, y que comprende los últimos 1.8 millones de años). De especial importancia son los volcanes que han mostrado actividad en los últimos 10,000 años, periodo al que se denomina "holoceno".

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Volcán Popocatepetl

El Popocatepetl, es un estratovolcán andesítico-dacítico, localizado a 60 km al sureste de la Ciudad de México y a 45 km al oeste de la Ciudad de Puebla. Tiene una altura de 5452 msnm y un cráter de 900 m de diámetro y aprox. 200 m de profundidad. Su edificio cubre un área de 500 km<sup>2</sup> abarcando los estados de Puebla, México y Morelos.

Después de un período de reposo, inició una nueva fase de actividad con una emisión de gases y cenizas el 21 de diciembre de 1994. La última etapa de actividad fue de 1920 a 1927, generando el crecimiento de domos de lava dentro del cráter, así como explosiones y emisiones de ceniza (Waiz, 1921). La etapa de actividad contemporánea del volcán se caracteriza por crecimientos de domos dentro del cráter, así como explosiones de tipo vulcanianas con un máximo índice de explosividad de 3 (VEI, Newhall).

La nueva etapa ha sido bien monitoreada y estudiada en diversas áreas: sismología, petrología, deformación, geoquímica, percepción remota, vulcanología física, magnetometría, visual, etc. Especialmente el monitoreo sísmico ha sido de gran ayuda para estudiar la actividad volcánica actual. Existe un gran número de estudios relacionados con la actividad sísmica del volcán Popocatepetl, los temas que se han tratado son acerca de atenuación (Martínez, 1998), temblor (Arámbula, 2002), eventos LP's (De la rosa, 2002), difusión rectificada (Pérez, 2001), tomografía sísmica (González, 2004), eventos LP's (Arciniaga, 2002), estado de esfuerzos (Arámbula, 2007). En la Tabla 2.1 se presenta la historia eruptiva del volcán.

Tabla 2.1 Tipos de erupciones y naturaleza de la actividad volcánica (Fuente: [www.cenapred.unam.mx](http://www.cenapred.unam.mx)).

Años	Tiempo transcurrido entre erupciones (en años)	Descripción de la actividad
24,000		Gran erupción tipo Sta. Elena, destruye edificio volcánico previo
14,000	9,000	Gran erupción Pliniana, lluvia de cenizas y pómez en la Cd. de México
14,000-5,000	9,000	Varias erupciones grandes, al menos 4
3,000a.C.	2,000	Erupción grande
200 a.C.	2,800	Erupción grande
800	1,000	Erupción grande
1354-1363	554	Erupción menor y fumarolas
1512-1530	149	Erupción moderada y fumarolas
1539-1549	9	Erupción moderada con cenizas y pómez
1571	22	Emisión de cenizas
1592	21	Fumarolas y emisión de cenizas
1642	50	Fumarolas y emisión de cenizas
1663-1665	11	Erupción moderada y emisión de cenizas
1697	32	Fumarolas
1720	23	Erupción leve y actividad fumarólica
1804	84	Fumarolas leves
1919-1927	115	Moderada. Emisión de cenizas y pómez
1994-?	67	Moderada?

Promedio	47 años	Tomando desde 1512 y quitando el dato mayor y menor
----------	---------	---

## 2.2 Sismicidad asociada con la actividad eruptiva del volcán Popocatepetl

### Falta colocar el año en la referencia de Tilling

El monitoreo sísmico es una herramienta comúnmente utilizada para evaluar la actividad volcánica, con el fin de predecir erupciones volcánicas a corto plazo y determinar el tipo y grado de actividad de los volcanes (Tilling, 1993). La intrusión y movimiento del magma o flujos volcánicos produce generalmente señales sísmicas que preceden a periodos eruptivos. La comprensión de estas señales puede ser crucial para determinar el peligro volcánico. Al sur del volcán se han identificado por lo menos tres depósitos de avalancha de escombros, que indican su actividad anterior. (Siebe et al., 1996), sugiere que estos depósitos de erupciones importantes ocurrieron entre 24,000 y 19,000 años a.C. Mayores erupciones han sido fechadas recientemente por Siebe (1996), entre ellas, las que corresponden a los periodos de 3195 a 2830 a.C.; de 800 a 215 a.C. y de 675 a 1095 d.C. El último periodo eruptivo histórico ocurrió entre 1920 y 1927, cuando apareció un domo dacítico (Waitz, 1921).

En 1993, después de 70 años de reposo, se observó un repentino aumento en la sismicidad del volcán Popocatepetl (Valdés-González y González-Pomposo, 1994). El 21 de diciembre de 1994, el Popocatepetl entró en una fase de actividad volcánica, caracterizada por una gran actividad fumarólica y de emisiones de ceniza. Desde entonces se han registrado varios tipos de sismicidad, incluyendo miles de eventos de periodo largo (LP), más de 2 mil eventos volcanotectónicos (VT), así como temblor volcánico, emisiones constantes de ceniza, pequeñas explosiones frecuentes, grandes explosiones esporádicas y la formación de al menos 20 domos de lava. La actividad eruptiva del volcán ha presentado episodios vulcanianos, strombolianos y subplinianos, que probablemente corresponden a la gran actividad eruptiva 1667.

### 2.3 Instrumentación y Adquisición de datos.

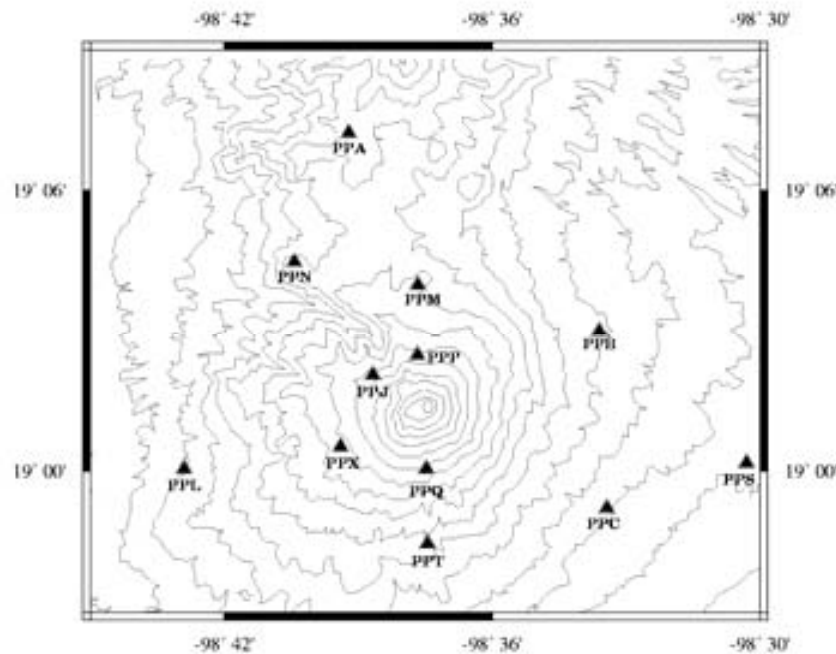
Al inicio de la actividad volcánica del Popocatepetl el 21 de diciembre de 1994, se encontraban instaladas cuatro estaciones sísmicas telemétricas de periodo corto. Ahora, la red sísmica del volcán cuenta con siete estaciones, tres de ellas con sismómetros de periodo corto triaxiales y tres sitios se encuentran instrumentados con estaciones de Banda Ancha. Además se cuenta con instrumentos que miden otros parámetros como la deformación y los flujos que pueden generar en el volcán. Los datos son enviados de forma telemétrica a la Ciudad de México, a 60 km del cráter; la información se concentra en el Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED (Quaas et al., 1995), las señales sísmicas, de deformación y flujos son adquiridas por el sistema denominado EARTHWORM.

### 2.4 Localizaciones hipocentrales de los eventos sísmicos.

La distribución sísmica de las estaciones se muestra en la Figura 2.1. Las siete estaciones sísmicas en el edificio volcánico están localizadas entre 2500 y 4300 msnm, y con un radio de 2.5 a 10 kilómetros respecto a la cumbre. La máxima brecha azimutal entre las estaciones sísmicas es de 70°.

Las localizaciones hipocentrales de los eventos VT se analizan usando el programa HYPOCENTER (Lienert et al., 1986a). Este programa permite una corrección por la elevación de la estación, tomando como límite superior a la estación con mayor altura y determinando ésta como el techo de la primera capa en el modelo de velocidades. Este programa centra y escala para mejorar la matriz de condicionamiento. Utiliza un modelo sísmico de velocidades de capas planas.

Típicamente, los volcanes no presentan una estructura de capas planas horizontales; constan de capas cónicas formadas por ceniza, materiales piroclásticos y lava. Este modelo permite considerar que los rayos sísmicos emanan del interior del volcán y viajan en forma casi perpendicular a las capas cónicas antes de llegar a las estaciones sísmicas. Por otra parte, el material que forma el edificio volcánico tiene intercalaciones de lava y ceniza, que se pueden considerar como capas heterogéneas, pero con velocidades sísmicas constantes. Así, el error del tiempo de viaje producido por el uso de un modelo sísmico de velocidades de capas planas es pequeño. Pese a la existencia de ese pequeño margen de error, se han utilizado modelos sísmicos similares en otros volcanes, como son Chichón, México (Havskov et al., 1983), Redoubt, Alaska (Lahr, 1994), Etna, Italia (Gasperini et al., 1992).



**Figura 2.1** Red sísmica de periodo corto y banda ancha: los triángulos negros representan las estaciones y las líneas, las curvas de nivel cada 200 metros.

El modelo de capas se muestra en Tabla 2.2 éste consiste en una capa con velocidad sísmica baja, que representa sedimentos volcánicos intercalados con flujos de ceniza compactados, la segunda capa corresponde a rocas volcánicas con menor fracturamiento, la tercera capa corresponde a la roca caliza que

también encontramos bajo el valle de la Ciudad de México, finalmente, la cuarta capa corresponde al basamento.

**Tabla 2.2 Modelo de Capas final**

<b>Velocidad onda P.</b>	<b>Profundidad de la capa</b>
3.5 km/s	0.0 km
4.5 km/s	5.5 km
5.0 km/s	6.0 km
6.0 km/s	12.0 km

## 2.5 Identificación de diferentes etapas de la actividad volcánica.

Durante el periodo reciente de la actividad reciente del volcán Popocatepetl, comprendida entre diciembre de 1994 y diciembre 2003, se han identificado cinco tipos de señales sísmicas asociadas a su actividad: volcanotectónica (VT); de periodo largo (LP); híbridos (H), Tremor y Explosiones. Las variaciones espaciales y temporales de estos eventos y su relación con la actividad del volcán permitió clasificarlas en 14 diferentes etapas (González, 2004). Dentro de las etapas se consideraron parámetros tales como: el número de sismos VT, LP y Tremor; magnitud, profundidad, frecuencia, distribución espacial y temporal, presencia o ausencia de domos y actividad fumarólica. Estas etapas son:

**Tabla 2.3 Etapas de actividad del volcán Popocatepetl**

<b>ETAPA</b>	<b>PERÍODO</b>	<b>DENOMINACIÓN</b>
1	1 DE ENERO DE 1992 AL 22 DE OCTUBRE DE 1994	FASE ESTABLE
2	23 DE OCTUBRE AL 21 DE DICIEMBRE DE 1994	FASE PREMONITORA
3	21 DE DICIEMBRE DE 1994 AL 1 DE ABRIL DE 1995	FASE ERUPTIVA
4	2 DE ABRIL DE 1995 AL 3 DE MARZO DE 1996	FASE DE LIMPIEZA DE LOS CONDUCTOS Y FUMARÓLICA
5	4 DE MARZO 1996 A SEPTIEMBRE DE 1996	FASE DEL PRIMER DOMO DE LAVA
6	OCTUBRE DE 1996 AL 18 DE AGOSTO DE 1997	FASE DE ACTIVIDAD DE PULSOS CASI-CÍCLICOS
7	19 DE AGOSTO DE 1997 AL 24 DE DICIEMBRE 1997	FASE DE FORMACIÓN DE UN GRAN DOMO

8	25 DE DICIEMBRE DE 1997 AL 22 DE NOVIEMBRE DE 1998	FASE EXPLOSIVA Y DE ACUMULACIÓN DE ENERGÍA
9	23 DE NOVIEMBRE DE 1998 AL 3 DE ENERO DE 1999	FASE MUY EXPLOSIVA
10	4 DE ENERO DE 1999 AL 3 DE SEPTIEMBRE DE 1999	FASE POSTERUPTIVA Y DE RELAJACIÓN
11	4 DE SEPTIEMBRE DE 1999 AL 15 DE SEPTIEMBRE DE 2000	FASE FALLIDA DE RECARGA
12	16 DE SEPTIEMBRE DE 2000 AL 10 DE DICIEMBRE DE 2000	FASE DE RECARGA
13	11 DE DICIEMBRE DE 2000 AL 23 DE ENERO DE 2001	CRECIMIENTO RÁPIDO DEL DOMO Y FASE ERUPTIVA INTENSA
14	24 DE ENERO DE 2001 AL 31 DE DICIEMBRE DE 2002	FASE POSTERUPTIVA Y FORMACIÓN FRECUENTE DE PEQUEÑOS DOMOS DE LAVA
*15	1 DE JUNIO DEL 2002 A DICIEMBRE DEL 2003	FASE EXPLOSIVA MODERADA Y RETORNO A UN PERÍODO DE RELAJACIÓN

\* Arámbula, 2007



Figura 2.2 Imágenes de la actividad del volcán Popocatepetl correspondientes a la etapa 13.



Con base en el análisis de la actividad sísmica durante el periodo de estudio (González, 2004) propuso el siguiente modelo sísmico para el volcán Popocatepetl:

- a)** Inicialmente los conductos volcánicos se encontraban obstruidos, durante el periodo de 1928 a 1992, el volcán se encontraba en una fase de reposo con mínima actividad fumarólica.
- b)** Probablemente en el periodo de 1992 a 1993 se produjo un ascenso de material magmático, que provocó un incremento de la presión interna, un calentamiento del material superficial y la apertura de los conductos del volcán, lo que ocasionó un aumento de la actividad fumarólica, compuesta básicamente por vapor de agua.
- c)** En diciembre de 1994, la presión interna alcanzó niveles que excedieron la presión litostática interna del volcán, lo que produjo la apertura de los conductos el día 21 de diciembre, con una serie de eventos tipo VT, acompañados de explosiones y grandes emisiones de gas y ceniza. Esta actividad marcó el inicio de un nuevo periodo eruptivo en el Popocatepetl.
- d)** El continuo flujo de gas dentro de los conductos permitió su apertura y limpieza, lo que facilitó el avance en el ascenso del material magmático hasta la superficie, formando el primer domo de lava dentro del cráter interno 14 meses después de la reactivación del volcán.
- e)** Después de la formación del primer domo de lava, el volcán ha seguido con un patrón de formación y destrucción parcial o total de los siguientes; esta actividad se asocia generalmente con explosiones y emisiones fumarólicas de gas y ceniza. Los cambios temporales de sismicidad se encuentran vinculados a la ascensión de magma, que provoca posteriormente la aparición y crecimiento de domos en el fondo del cráter. Los eventos VT grandes y profundos se relacionan con la ascensión del material magmático, que inicia a 10 o más kilómetros de profundidad bajo el cráter. La actividad somera de los eventos VT se encuentra asociada al paso lento del material magmático y la presurización que genera en su ascensión.

Una vez que el magma se localiza a profundidades de 2 a 3 kilómetros bajo el cráter, aparece un incremento del número de eventos LP, previo a eventos explosivos, que indica la destrucción parcial o total del domo. En algunas ocasiones la presión interna no es bastante grande como para romper los domos antiguos, produciéndose una acumulación de material bajo los domos anteriores, que en algunas ocasiones dio lugar a periodos recarga más largos (etapa 12), que finalizaron con explosiones más fuertes y emisiones importantes de ceniza.

La actividad del volcán no ha aportado ningún indicio de haber retornado a una fase de reposo hasta junio de 2003, pues ha continuado con la formación y destrucción de pequeños domos. El evento que finalizó la actividad eruptiva del Popocatepetl en los años veinte del siglo pasado probablemente fue una gran explosión que destruyó el domo interno, dando lugar a la formación de un lago

dentro del cráter interno, que permaneció hasta diciembre de 1994. Esto lleva a proponer tres diferentes escenarios posibles de la actividad futura del volcán Popocatepetl:

Que el proceso actual finalice con una liberación lenta y continua de la energía. Que el volcán continúe generando etapas de actividad explosiva, semejantes a las etapas 6, 8, 9 y 10, capaces de lanzar fragmentos incandescentes a distancias de 4 a 6 kilómetros del cráter, acompañadas de grandes emisiones de ceniza.

Que por medio de una formación y destrucción masiva del domo se generen flujos piroclásticos similares o mayores a los observados el 22 de enero de 2001, y que con esto el volcán inicie un periodo de inactividad temporal.

## 2.6 Clasificación de eventos sísmicos

La actividad sísmica generada por los volcanes es variada y corresponde esencialmente a mecanismos de fuente diferentes, así como atenuación en las ondas sísmicas por el trayecto y en algunos casos por el efecto de sitio en donde se encuentra ubicada la estación. En el volcán Popocatepetl se han generado diversos sismos con formas de onda y características espectrales bien definidas. La variación en el tiempo de estos sismos nos indica un cambio en los mecanismos que los generan y nos pueden prevenir acerca de una actividad eruptiva diferente ó más intensa.

*Tabla 2.4 Terminología de sismicidad volcánica tomada de (McNutt, 1996)*

	MINAKAMI <sup>B</sup>	LATTER <sup>C</sup>	AVO <sup>D</sup>	OTROS NOMBRES
ALTA-FRECUENCIA	TIPO A	TECTÓNICO, VOLCANOTECTÓNICO	VULCANO-TECTÓNICO VT	SISMO DE PERIODO CORTO
BAJA-FRECUENCIA	TIPO B	SISMO VOLCÁNICO	PERIODO LARGO LP	EVENTO DE CODA LARGO, TORNILLO <sup>E</sup>
FRECUENCIAS MEZCLADAS	-	FRECUENCIA MEDIA	HÍBRIDO	FRECUENCIA MEDIA
SISMO DE EXPLOSIÓN	SISMO DE EXPLOSIÓN	EXPLOSIÓN VOLCÁNICA	EXPLOSIÓN	-
TREMOR VOLCÁNICO	TREMOR VOLCÁNICO	TREMOR VOLCÁNICO	TREMOR VOLCÁNICO	TREMOR VOLCÁNICO, TREMOR ESPASMÓDICO

<sup>a</sup> McNutt (1996)

<sup>b</sup> Minakami(1974)

<sup>c</sup> Latter(1979); sólo una porción de la clasificación de Latter es mostrada.

<sup>d</sup> Alaska Volcano Observatory (1993); ver Power et al., (1994).

<sup>e</sup> Tornillo es el nombre dado para el volcán Galeras en Colombia.

También el número de ellos y la magnitud nos indican cuanta energía se ha ido liberando y poder conocer el nivel de actividad del volcán. Son diversas las clasificaciones que se han desarrollado para definir a los eventos sísmicos asociados a procesos eruptivos, la más conocida es la desarrollada por Minakami (1974), en donde da una clasificación basada en los volcanes japoneses (Tabla 2.4).

## 2.6.1 Procedimientos de clasificación sísmica

### 2.6.1.1 Universidad de Granada, España.

Benítez, et al, 2006 del Departamento de Teoría de señales, Redes y Comunicaciones de la Universidad de Granada, en colaboración con Ibáñez, et al, 2006, del Instituto Andaluz de Geofísica de la Universidad de Granada, España, desarrollaron un sistema reconocimiento automático de señales sísmicas en base a la sismicidad observada durante tres campañas llevadas a cabo en el volcán de la isla de Decepción (Antártida).

El sistema se basa en un Modelo Oculto de Markov (Hidden Markov Model, HMM) aplicadas con éxito a otros panoramas. HMM es un proceso estocástico que consta de un proceso de Markov no observado (oculto)  $q = \{q_t\}_{t \in \mathbb{N}}$  y un proceso observado  $O = \{o_t\}_{t \in \mathbb{N}}$ , cuyos estados son dependientes estocásticamente de los estados ocultos, es decir, es un proceso bivariado  $(q, O)$ . Los HMMs se pueden considerar también como sistemas generativos estocásticos, los cuales se emplean en la modelación de series de tiempo. Por ejemplo, la secuencia resultante de lanzar una moneda  $k$  veces es un proceso estocástico. Los estados del sistema son dos: cara y sello. Estos a su vez conforman el espacio muestral pues son el conjunto de todos los estados posibles de nuestro experimento.

Ejemplo 1.

Supongamos que los resultados de lanzar una moneda 10 veces son los siguientes:

CCSCCSCSCS

Si hacemos que el número de lanzamientos  $k$  creciera hasta el infinito, podemos aproximarnos a la probabilidad de que ocurra el evento cara o sello de la siguiente forma:

$$P(\text{cara}) = \text{veces que aparece cara} / k$$

Se aplicó a una base de datos que contenía sismos volcanotectónicos (VT), eventos de largo-período (LP) y eventos híbridos registrados durante las campañas de monitoreo sísmico de 1994-1995 y 1995-1996.

El sistema opera en tiempo real y su exactitud está cerca del 90%. Cuando el sistema fue probado con diversos eventos sísmicos principalmente con los de largo-período (LP) registrados durante varios enjambres sísmicos durante la campaña del 2001-2002 el campo, más del 95% de los eventos fueron marcados correctamente por el sistema del reconocimiento.

### **2.6.1.2 Observatorio volcánico en Montserrat**

Langer, H. *et al*, 2003, propuso la aplicación de Redes Neuronales para la clasificación sísmica del volcán Soufrière. La energía sísmica en el volcán de la Soufrière, en Montserrat, está compuesta por los varios tipos de señales sísmicas, que son distinguidas por el observatorio del volcán de Montserrat (MVO) en diversas clases con respecto a sus características y/o origen. Hay cinco clases fundamentales, es decir, eventos volcanotectónicos, eventos regionales, eventos del Largo-Período (LP), eventos híbridos y derrumbes. La Identificación y clasificación de estos eventos han sido llevadas a cabo hasta ahora manualmente por miembros del personal, esta información es importante en cuanto al estado que guarda el sistema volcánico. En el marco del proyecto de MULTIMO (Multi-Disciplinary Monitoring, Modelling and Forecasting of Volcanic Hazard) que utiliza un enfoque interdisciplinario que combina la experiencia de geólogos, geoquímicos, geofísicos, mineralogistas, matemáticos y estadísticos, así como de los expertos en gestión de riesgos, se propuso el uso de las Redes Neuronales Artificiales (ANN) para la clasificación de estos datos pudiendo manejar grandes cantidades de eventos, y alcanzar los resultados óptimos, emulando el análisis del experto.

Usando la clasificación rutinaria manual como información base, obtuvieron un funcionamiento justo de un proceso casi automático, con el 70% de las clasificaciones automáticas que eran acordes con las originales, el error en el resto se debió a que la clasificación original de la base era incorrecta. Se estableció una revisión manual de la clasificación original para la base de datos. De acuerdo con un stock de 6000 eventos sísmicos, realizaron un re-análisis de los sismos registrados en diversas estaciones sísmicas, lo anterior para entrenar y probar el ANN, obteniendo una clasificación acertada de 80% en las identificaciones. Particularmente, la clasificación automática era excelente para los derrumbes y los eventos volcanotectónicos. Entre los errores del sistema se observa la atribución errónea de eventos del Largo-Período (LP) e híbridos a derrumbes. Esto se puede explicar en parte por el hecho de que las señales tratadas como los derrumbes contienen frecuencias dispersas. La falta de clasificación entre algunos tipos de eventos se debe a una confusión del sistema entre las distintas fuentes de las que provienen las señales. Concluyen que la clasificación automática con ANN es una herramienta de gran alcance para manejar grandes volúmenes de datos y la consistencia en la clasificación sísmica.

### **2.6.1.3 Laboratorio nacional de Los Álamos en Nuevo México**

(Charlotte Rowe, 2005) Laboratorio Nacional de Los Álamos realizó una clasificación sísmica de eventos híbridos y VT's, apartir de la forma de onda de la señal para realizar una detección automática de ocurrencia y además, para mejorar la localización de eventos volcánicos para el volcán Soufrière, este

trabajo fue presentado en TEN YEARS ON SCIENTIFIC CONFERENCE. MONSERRAT. Se presenta un análisis detallado de una docena de enjambres de eventos híbridos asociados a extrusiones de domo en el volcán Soufrière en 1995-1996, así como un enjambre de VT's registrado antes de los enjambres de híbridos. Para ello emplearon métodos de la correlación cruzada con la forma de onda se utilizaron tanto para identificar los enjambres sísmicos grandes como para ajustar la identificación de las fases para mejorar localizaciones de los eventos.

Las relocalizaciones de eventos híbridos se concentraron en un área comprendida de ~50-100 m y entre 1.3 y 1.6 kilómetros de profundidad debajo del cráter. Para el desarrollo de este trabajo se emplearon herramientas alternativas de clasificación de eventos basados en la Correlación Cruzada (Cross-Correlation). Se probaron una variedad de esquemas de enjambres sísmicos así como la realizada por la clasificación de la Red Neuronal Artificial (ANN). Los métodos más eficaces identificados en esta comparación fue la combinación de ambos métodos que determinan una herramienta robusta para la clasificación y la identificación de la actividad sísmica volcánica en tiempo casi real.

#### **2.6.1.4 HMM en los volcanes Stromboli y Etna, Italia**

El sistema de clasificación sísmica implementado para estos volcanes está basado en el método de modelos ocultos de Markov (Gutiérrez et al., 2006), (Ibáñez et al, 2006). El HMM (Hidden Markov Model) se ha empleado para discriminar eventos sísmicos. Se creó una base de datos representativa con distintos eventos sísmicos, incluyendo explosiones, registrados durante periodos activos en los volcanes Stromboli y Etna, entre 1997 y 1999. El método consiste en comparar lo eventos sísmicos versus eventos que ya fueron caracterizados previamente. Si una señal está presente, el método detecta la ocurrencia y produce una clasificación. El reconocimiento y el sistema de clasificación basado en HMM es eficaz. Su aplicación sobre los datos, demostró que para tener un resultado confiable, se debe realizar un proceso cuidadoso y adecuado de la clasificación de los eventos sísmicos.

#### **2.6.1.5 Espectrogramas con WAVELETS**

La transformada continua de ondículas (wavelet) (CWT) puede utilizarse para realizar representaciones tiempo-frecuencia de una serie temporal de datos, en particular de datos sísmicos. Existen otros métodos que trabajan a escalas temporales más grandes, como SSAM (Seismic Spectral Amplitude Measurement), Stephens, 1995, pero con técnicas de análisis de funciones de ondículas se consigue analizar los datos a una escala fina. La principal ventaja práctica de la Transformada Continua de Ondículas es que se puede resolverse con ayuda de algoritmos tradicionales de Fourier.

Una vez conseguido el espectrograma se tiene la herramienta adecuada para analizar la variación espectral de las señales. Gracias a esta técnica se ha observado, cómo los espectrogramas de las señales volcánicas presentan

grandes diferencias que permiten distinguir la ocurrencia de unos tipos u otros de eventos.

Este tipo de análisis se empleó para el volcán Popocatépetl (Peña J., 2001). Los espectrogramas resultantes sirven para detectar patrones de comportamiento en la variación del espectro, de manera que las señales puedan agruparse según esos cambios, identificando cada tipo de evento en un volcán en particular.

#### **2.6.1.6 HMM en el volcán Merapi, Java, Indonesia**

Un sistema de detección sísmica automática en tiempo casi-real, es capaz de caracterizar la actual actividad sísmica, basado en la comparación con patrones creados previamente. La creación de patrones está basada en el método HMM (Hidden Markov Model), ya empleado por instituciones en España e Italia. El periodo de análisis que se emplea para la clasificación comprende del 10 al 19 julio de 1998, periodo en que se presentó un rápido incremento en el ciclo eruptivo. Se emplearon tres distintos tipos de eventos sísmicos para establecer el esquema de clasificación en el Volcanological Survey of Indonesia (VSI), dichos eventos están bien identificados. Eventos Volcanotectónicos VTB ( $h < 2.5$  Km), eventos sísmicos a menor profundidad que los VTB asociados a crecimiento de domo ( $h < 1$  Km) y señales sísmicas relacionadas a fallamiento de roca en el domo de lava, llamado Guguran.

#### **2.6.1.7 Lesage P**

### **Objetivo**

El objetivo del presente trabajo es la caracterización de la sismicidad presente en el volcán Popocatépetl para ello se propuso la creación de un sistema de reconocimiento de señales sísmicas a partir de las características de los eventos sísmicos registrados, basado en la creación de patrones de reconocimiento a partir de la envolvente de las familias sísmicas, la precisión de los patrones puede mejorar al incorporar una mayor cantidad de sismos. Estos mismos patrones sirven para la creación de una base de datos confiable. Además se busca establecer una “memoria” al sistema que le permitirá clasificar la sismicidad del volcán.

### **3. Desarrollo del Sistema de Identificación de Señales Sísmicas del volcán Popocatépetl (SISP)**

Para el procesamiento de los datos se desarrolló un programa en Matlab que permite obtener un patrón de las señales sísmicas, para su reconocimiento y posterior clasificación.

Para el análisis de las señales se diseñaron varias rutinas de procesamiento y graficación, que en conjunto representan la herramienta empleada en este procesamiento.

La idea básica del análisis, consiste en distinguir las características de cada una de las familias en que se encuentra dividida la sismicidad del volcán Popocatépetl, considerando tres parámetros: valores de las frecuencias de las señales, amplitudes de las mismas y la duración de las señales, es decir, el tiempo, para crear patrones de reconocimiento, que se emplearan para la clasificación de los eventos sísmicos.

#### **3.1 Reconocimiento de patrones**

El reconocimiento de patrones, es la lectura de patrones, identificación de figuras y reconocimiento de formas en señales. No sólo es un campo de la informática sino un proceso fundamental que se encuentra en casi todas las acciones humanas.

El punto esencial del reconocimiento de patrones es la clasificación: se quiere clasificar una señal dependiendo de sus características. Señales, características y clases pueden ser de cualquiera forma, por ejemplo se puede clasificar imágenes digitales de letras en las clases «A» a «Z» dependiente de sus píxeles o se puede clasificar ruidos de cantos de los pájaros en clases de órdenes aviares dependiente de las frecuencias.

El objetivo es clasificar patrones con base en un conocimiento a priori o información estadística extraída de los patrones. Los patrones a clasificar suelen ser grupos de medidas u observaciones, definiendo puntos en un espacio multidimensional apropiado.

Un sistema de reconocimiento de patrones completo consiste en un sensor que recoge las observaciones a clasificar, un sistema de extracción de características que transforma la información observada en valores numéricos o simbólicos, y un sistema de clasificación o descripción que, basado en las características extraídas, clasifica la medición.

La clasificación utiliza habitualmente uno de las siguientes procedimientos: clasificación estadística (teoría de la decisión), clasificación sintáctica (estructural). El reconocimiento estadístico de patrones está basado en las características estadísticas de los patrones, asumiendo que han sido generados por un sistema probabilístico. El reconocimiento estructural de patrones está basado en las relaciones estructurales de las características.

Para la clasificación se puede usar un conjunto de aprendizaje, del cual ya se conoce la clasificación de la información a priori y se usa para entrenar al sistema, siendo la estrategia resultante conocida como aprendizaje supervisado. El aprendizaje puede ser también no supervisado, el sistema no tiene un conjunto para aprender a clasificar la información a priori, sino que se basa en cálculos estadísticos para clasificar los patrones.

Entre las aplicaciones del reconocimiento de patrones son el reconocimiento de voz, la clasificación de documentos (por ejemplo, spam/no spam), el reconocimiento de escritura, reconocimiento de caras humanas y muchas más. Los dos últimos ejemplos son representativos del análisis de imágenes, un subconjunto del reconocimiento de patrones que toma imágenes digitales como entradas del sistema.

El reconocimiento de patrones es más complejo cuando se usan plantillas para generar variantes. Por ejemplo, en castellano, las frases a menudo siguen el patrón "sujeto-predicado", pero se requiere cierto conocimiento de la lengua para detectar el patrón. El reconocimiento de patrones se estudia en muchos campos, incluyendo psicología, etología, informática y procesamiento digital de la señal

## 3.2 Conceptos básicos para el análisis espectral

### 3.2.1 Señales

Una señal es una variable física que contiene o transporta información. Algunos tipos de señales son: tensión, sonido, imagen, temperatura captada por un sensor. Nos interesan especialmente las señales que varían en el tiempo. No todas las señales varían en el tiempo, ejemplo: una imagen fotográfica. Las señales variables en el tiempo pueden representarse mediante una función del tiempo (figura 3.1). Estas señales pueden ser de dos tipos: continuas o discretas.

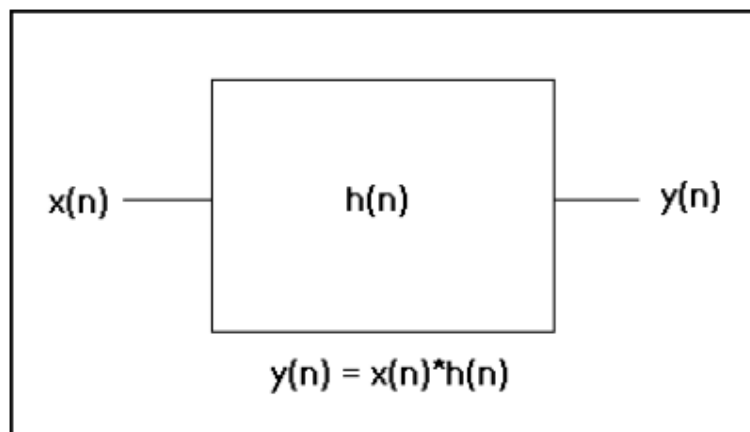


Figura 3.1 Modelo de un sistema



El procesamiento digital de señales implica haber expresado previamente la magnitud de la señal en forma numérica. Cada número, así obtenido, representa la magnitud de la señal en un instante determinado. Entonces, tendremos una sucesión de muestras de la señal en lugar de la señal completa. Reemplazaremos así la señal continua por la señal discreta, en la cual solo interesan los valores en instantes discretos. En la práctica el muestreo se logra multiplicando la señal continua por un tren de impulsos unitarios, tal como se aprecia en la Figura 3.2.

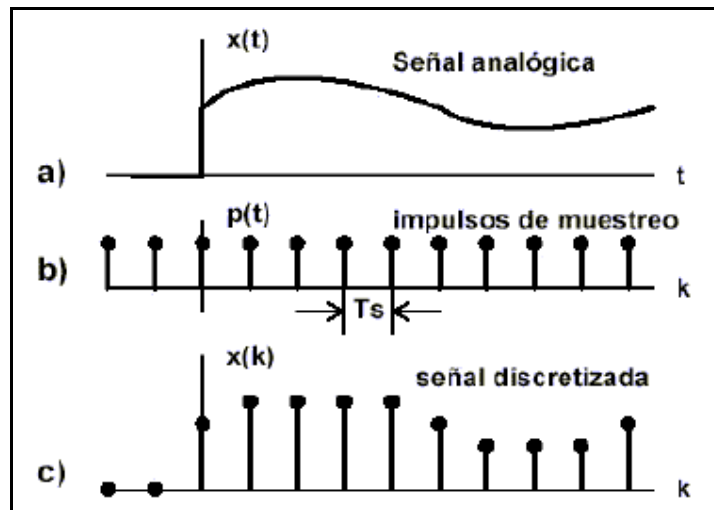


Figura 3.2 Proceso de muestreo

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

### 3.2.2 Señales en el dominio de tiempo

El ámbito temporal es el dominio de primario en el que se manejan y captan las señales. Matemáticamente las señales son representadas como funciones de una ó más variables independientes.

### 3.2.3 Señales en el dominio de la amplitud

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

### 3.2.4 Señales en el dominio de la frecuencia

La base de 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.

### 3.2.5 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 diversidad de señales que en una zona volcánica se producen, es necesario distinguir unas de otras y también caracterizarlas.

Es posible que un 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 de tipo volcanotectónico, de tal forma que se hace necesario usar otro tipo de herramientas, la mayoría localizada en el dominio de la frecuencia.

### 3.2.6 Ruido

Es aquello que perturba o modifica el contenido de información de una señal. El **ruido blanco** es una señal aleatoria (proceso estocástico) que se caracteriza porque sus valores de señal en dos instantes de tiempo diferentes no guardan correlación estadística. Como consecuencia de ello, su densidad espectral de potencia (PSD, Power Spectral Density) es una constante, i.e, su gráfica es plana. Esto significa que la señal contiene todas las frecuencias y todas ellas tienen la misma potencia. Igual fenómeno ocurre con la luz blanca, lo que motiva la denominación. Si la PSD no es plana entonces se dice que el ruido está "coloreado" (correlacionado). También puede afirmarse que el ruido es una distorsión. Hasta el momento no es posible tener un sistema que no tenga ruido pero gracias a procesos matemáticos, es posible reducirlo.

### 3.2.7 Transformada discreta de Fourier

El análisis de Fourier surgió apartir del intento de su autor 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.

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

$$U(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U(t)e^{-i\omega t} dt$$

$\omega$ .- Frecuencia angular

Como la transformada de Fourier es una función reversible entonces, si tenemos  $U(\omega)$ , es posible encontrar  $U(t)$  mediante:

$$U(t) = \int_{-\infty}^{\infty} U(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

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 una parte imaginaria.

La parte real se ve representada por:

$$U_r(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U(t) \cos(\omega t) dt$$

Mientras que la parte imaginaria está representada por:

$$U_i(\omega) = - \int_{-\infty}^{\infty} U(t) j \sin(\omega t) dt$$

De tal forma que:

$$U(\omega) = U_r(\omega) + U_i(\omega)$$

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:

$$A(\omega) = [U_r^2(\omega) + U_i^2(\omega)]^{1/2}$$

Y la fase por:

$$\Phi(\omega) = \arctang[U_i(\omega)/ U_r(\omega)]$$

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:

$$U(t) = \sum U_j(t-j\Delta t)$$

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

$$U(\omega) = \sum^N U_j e^{-i\omega j\Delta t}$$

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, el tiempo de cálculo que se requiere para su realización es uno de los principales problemas que aparecen al realizar un diseño de estos algoritmos.

### **3.2.8 La Transformada Rápida de Fourier**

Como se expuso anteriormente realizar el diseño del algoritmo de la transformada discreta de Fourier requiere mucho tiempo. Para solucionar este problema surgió el diseño de la transformada rápida de Fourier (FFT), 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, ya que mientras en una aumenta el número de operaciones necesarias para la resolución de forma exponencial, la otra lo hace prácticamente de forma lineal.

La aparición del algoritmo de la transformada rápida de Fourier (Cooley y Turkey, 1965), 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 análisis 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 de 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 puede reducir el cálculo.

La FFT reconoce esta redundancia de coeficientes y analiza un proceso de decimalización para reducir los cálculos, realizando en total  **$N \log_2 N$**  multiplicaciones en lugar de las  **$N^2$**  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 muestra como la transformada rápida de Fourier es una herramienta absolutamente necesaria para el cálculo de espectros pues reduce de manera considerable el número de operaciones y por tanto también el tiempo de cálculo.

### **3.2.9 Resolución del análisis**

Otro de los problemas relevantes para el cálculo del espectro de Fourier es el margen de resolución del 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 digitizado 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  $\Delta t$  que bien pueden variar entre las 80 y las 200 muestras por segundos (mps). Debido a este intervalo de muestreo el rango de frecuencias del análisis también se ve limitado.

### **3.2.10 Frecuencia de Nyquist**

El teorema del muestreo establece que si una señal se muestrea de manera que se cumpla la condición de Nyquist ( $F_s > 2f_m$ ), es decir, que la frecuencia de muestreo tiene que ser el doble que la máxima frecuencia contenida en la señal, entonces es posible recuperar la señal. Se puede pensar que ésta es la mayor frecuencia a la que se puede acceder pero realmente la máxima frecuencia a la que se tiene acceso, es justo a la mitad de ella debido a que en la mayoría de los instrumentos a esta frecuencia se suele colocar los denominados filtros antialiasing; Por lo que de manera general se puede decir que dado un  $\Delta t$  como intervalo de muestreo, la máxima frecuencia a la que se podrá acceder con suficiente fiabilidad será  $\frac{1}{4\Delta t}$ .

En el caso del volcán Popocatépetl el muestreo es de 100mps que corresponde a 100Hz. Generalmente, las señales sísmicas contienen componentes de frecuencias de 1 a 10 Hz, por lo que la frecuencia de muestreo debe ser de 20Hz como mínimo.

### **3.2.11 Intervalo de resolución**

Otro factor a considerar es el intervalo de resolución, en el que se obtendrá la señal en el dominio de la frecuencia  $\Delta f$ , mismo que está considerado por la longitud de la ventana temporal seleccionada para el análisis. Si se llama  $\Delta T$  a la longitud temporal (medida en segundos), el valor de  $\Delta f$  será  $1/\Delta T$  además este valor 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 Nyquist se encuentra en 50 Hz donde los filtros antialiasing estarán situados por regla general en 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.

### **3.2.12 Acondicionamiento de las ventanas para análisis**

Cuando se desea hacer un análisis espectral existe un factor importante que no se debe pasar por alto, es la ventana ó muestra a seleccionar de la señal que

se va a analizar. Esto se refiere al hecho de tomar una porción de señal directamente, sin considerar ningún tipo espectral en especial, este fenómeno se da con frecuencia 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 se la hará la transformada y se le multiplicará a la transformada de la señal seleccionada. Este hecho puede implicar que se introduzca una señal que no corresponde a la señal sumada 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 es para aumentar resolución o para minimizar los efectos de los lóbulos laterales.

En general, cuando se trabaja con eventos puramente volcánicos es 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 convincente usar la escala doble lineal que permita identificar los picos espectrales, analizar su anchura, etc. El tener una señal sísmica en el dominio de la frecuencia facilita otro tipo de estudios.

### **3.3 Datos**

#### **3.3.1 Earthworm**

Earthworm (1993) es un sistema de adquisición y procesamiento de datos, inicialmente utilizado por la Red Sísmica del Norte de California (NCSN) en Estados Unidos, así como en observatorios volcánicos, entre ellos el Observatorio de Volcanes de Hawai, el Observatorio Vulcanológico de Alaska, la Red Sísmica del Sur de California y otros. El sistema Earthworm se divide en dos partes: Hardware y Software.

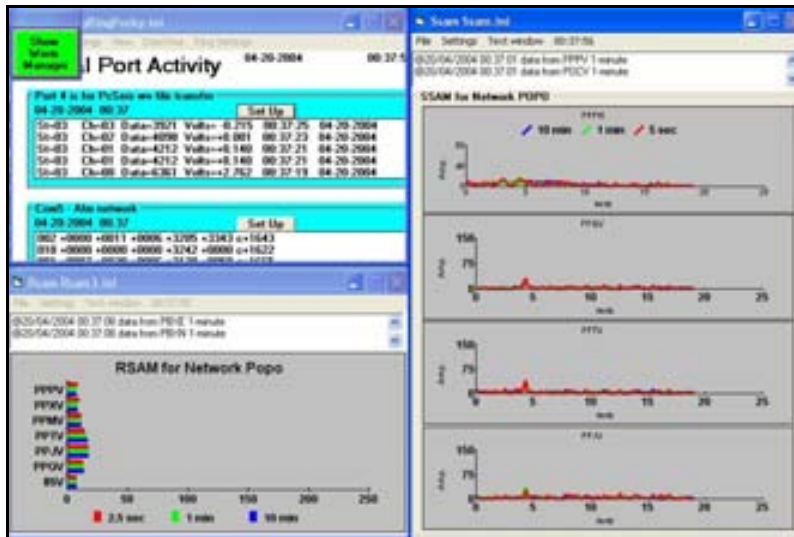
El hardware es una tarjeta de adquisición de datos National Instruments PCI-MIO, de 12 bits, contiene un convertidor de datos análogo-digital, con capacidad para 64 canales (señales), en el caso del volcán Popocatépetl se ocupan 28 canales. El canal número uno se emplea para introducir una señal de tiempo proveniente de un GPS base marca True Time.

Las señales analógicas de los sensores de periodo corto de las estaciones sísmicas, provenientes del volcán, ingresan a la tarjeta de adquisición, ahí se convierten a señal digital.

Una vez convertidas a datos digitales el sistema Earthworm realiza distintos procesos con ellos a través de programas independientes denominados módulos, cada uno de estos módulos contiene una programación específica, una ventaja del funcionamiento mediante módulos es que pueden trabajar de forma independiente, además pueden agregarse nuevos módulos y suspender

el uso de alguno de ellos sin que se afecte al funcionamiento general del sistema.

El sistema incluye módulos gráficos presentes en la figura 3.3 como el RSAM (Real Time Amplitude Seismic System), el SSAM (Seismic Spectral Amplitude Measurement) y el RingPorky (adquisición de datos de inclinómetros y detectores de flujos).



**Figura 3.3** Imagen del sistema Earthworm (EW) que opera para el volcán Popocatépetl en CENAPRED.

Además de datos sísmicos de sensores de periodo corto (analógicas), Earthworm (EW) contiene módulos para ingresar señales provenientes de sensores de banda ancha y de acelerómetros. Para los sensores de banda ancha EW tiene un módulo llamado **Scream** que se conecta al sistema mediante una dirección IP.

Para la adquisición de datos de acelerómetros, Earthworm cuenta actualmente con módulos que permiten la conexión con adquisidores RefTek y K2. El equipo REFTEK es un registrador sísmico de banda ancha con aplicaciones para réplicas sísmicas, sismicidad regional, etc. El equipo K2 de Kinematics, Inc. de Pasadena, California, es un acelerógrafo empleado para obtener las aceleraciones que se generan durante los movimientos fuertes.

La versatilidad del sistema Earthworm en la adquisición de las señales sísmicas descritas demuestra lo eficiente del sistema además de no requiere licencia de uso. Actualmente el sistema Earthworm se encuentra operando en más de 50 observatorios volcánicos en el mundo.

### 3.3.2 Instrumentación sísmica en el volcán Popocatépetl

En la actualidad el volcán cuenta con 7 estaciones de periodo corto, 6 de ellas triaxiales (Mark L4C T=1s), 1 de periodo corto uniaxial (Mark L4C T=1s),

además tres de estas estaciones contienen sismómetros de banda ancha, dos sensores Guralp modelo CMG6TD (30 sec a 50 Hz + 1 sec a 50Hz) y uno Guralp modelo CMG-40T (30 sec a 50 Hz). También cuenta con 4 estaciones equipadas con geófonos para la detección de flujos de lodo. En la figura 2.1 se muestra la ubicación de las estaciones. Todas las señales llegan en tiempo real a un centro de procesamiento localizado en el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) para ser procesadas y analizadas. Los datos sísmicos empleados en este trabajo corresponden a los datos registrados por los sensores de periodo corto.

### **3.3.3 Características de archivos sísmicos**

**Muestreo de datos:** 100 muestras por segundo.

**Duración del archivo:** Configurada por software corresponde a 5 minutos.

**Número de muestras totales por archivo:** 30,000 muestras.

**Formato origen:** demultiplexado ó dmx, es decir, un número de señales analógicas o digitales de entrada que se suman para obtener un archivo de salida único.

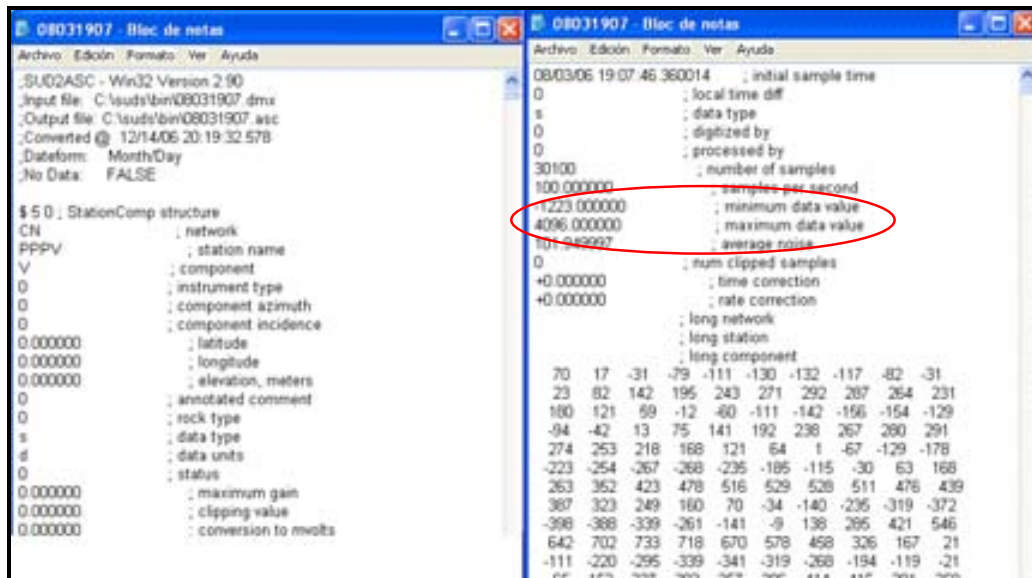
**Contenido del archivo 'dmx':** Datos sísmicos provenientes de estaciones sísmicas y de un sensor acústico.

**Formato de lectura:** Para la lectura del archivo \*.dmx, este se transformó a formato ASCII, mediante el empleo de una de las utilidades del PC-SUDS. (Banfill R.)

El archivo consta de dos partes, un encabezado que proporciona nombre de la red sísmica, de la estación, especificaciones del sensor y otros datos. Después aparecen 10 columnas de números que contienen a la señal sísmica, estos valores están relacionados con el número de bits (12) de la tarjeta de adquisición analógica-digital, el valor máximo de dato es de  $\pm 2048$  y la máxima amplitud pico a pico es de 4096, en la figura 3.4 se muestra esto.

**Estaciones:** El archivo contiene los datos de las 7 estaciones sísmicas, por lo que se necesita una subrutina que permita la elección de cualquiera de las estaciones. Así los datos procesados en este trabajo corresponden a la estación Canario (PPP), ya que es la más cercana al cráter del volcán.





(a)

(b)

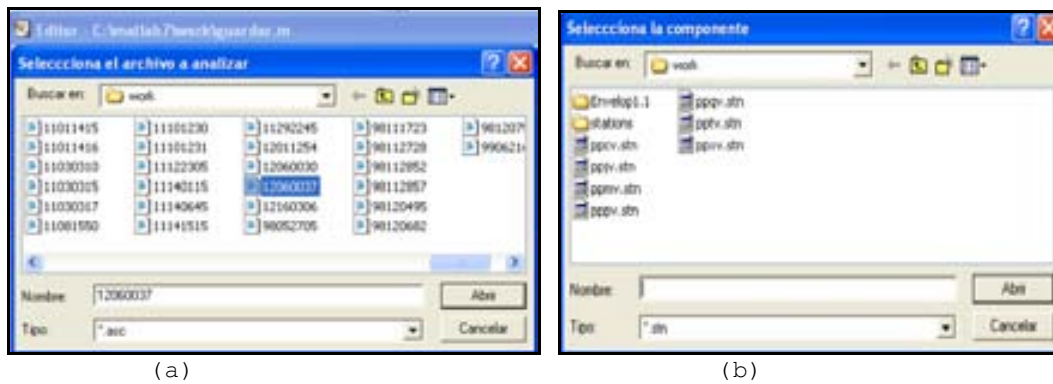
Figura 3.4 Estructura de un archivo ASCII: a) Encabezado b) Datos

### 3.4 Identificación de señales sísmicas para el volcán Popocatépetl

La actividad sísmica generada por volcanes es variada y corresponde esencialmente a mecanismos de fuente diferentes, así como atenuación en las ondas sísmicas por el trayecto y en algunos casos por efecto de sitio en donde se encuentra ubicada la estación. En el volcán Popocatépetl se han generado diversos sismos con formas de onda y características espectrales bien definidas. La variación en el tiempo de estos sismos nos indica un cambio en los mecanismos que los generan y nos pueden prevenir acerca de una actividad eruptiva diferente o más intensa. Basados en las características espectrales de las señales sísmicas, se desarrolló una herramienta que permite identificar los eventos sísmicos facilitando la clasificación de las mismas, el software utilizado para este fin es Matlab versión 7.0. A dicha herramienta se le denominó **Identificación de Señales Sísmicas del volcán Popocatépetl** y para una fácil referencia se le reconocerá por siglas (**SISP**).

#### 3.4.1 El desarrollo del SISP:

**El desarrollo del SISP consistió en dos etapas.** La primera parte consiste en implementar rutinas para la elección del dato, la selección de la estación y componente, además de la reorganización del contenido del archivo, esto último para facilitar la graficación, la figura 3.5(a) presenta el directorio donde residen los datos en formato ASCII y la figura 3.5 (b) muestra el directorio de estaciones y componentes permitiendo elegir la que se desee.



**Figura 3.5 (a) Interfaz que permiten la elección de archivo \*.asc. (b) Selección de la estación con la que se desea trabajar.**

Una vez que se elige la estación, SISP presenta los datos automáticamente a través de una grafica, esto permite saber si el dato que se eligió es útil para su procesamiento. Posteriormente se realiza el cálculo de la FFT y después se obtiene el espectrograma. Para comprobar el desempeño de SISP se ingresaron eventos de cada una de las familias en la que se encuentra clasificada la sismicidad volcánica.

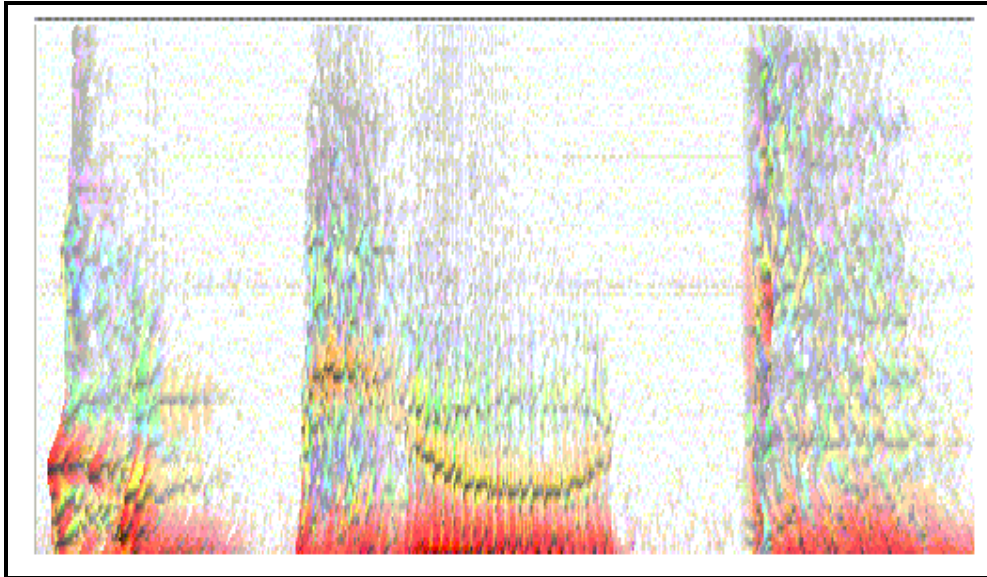
### 3.4.2 Espectrograma

El espectrograma es una representación visual de las variaciones en tiempo de la frecuencia de una señal. Mediante colores se representa la intensidad ó amplitud del contenido de frecuencias.

La mejor manera de analizar sonidos complejos y variables en el tiempo, es mediante el uso de espectrogramas o de iconografía espectral. Algunos dicen que no se puede conocer la música antigua porque no se ha encontrado en forma escrita, ni grabaciones de ella, pero los espectrogramas aunque similares, son mejores que los pentagramas para escribir y leer todo tipo de sonidos y los artefactos sonoros recuperados en buenas condiciones pueden funcionar como reproductoras, si se excitan como en la antigüedad y se exploran todas sus capacidades sonoras. Los espectrogramas de los sonidos digitalizados se obtienen mediante mapeos matemáticos repetidos, hacia el espacio de las frecuencias, usando la Transformada Rápida de Fourier, mismos que se filtran, traslapan y escalan, para que puedan ser graficadas las componentes de frecuencia de los sonidos con su intensidad (dB, dados en grados de negros y grises), frecuencia (Hz, del eje de las "y") y tiempo (segundos, del eje de las "x").

Los seres humanos se comunican por medio de lengua hablada y escrita. La lengua hablada pertenece a un desarrollo anterior en la historia de la especie y del individuo que la lengua escrita; sin embargo, el discurso es más misterioso que la escritura, el ser humano lo emplea para comunicar sus pensamientos, sus necesidades y emociones a otros, de hecho, el discurso puede muy bien ser un código.

Si el discurso es un código, entonces los espectrogramas proporcionan nuestra mejor pista a qué clase de código corresponden. Un espectrograma es una traducción en el dominio visual del discurso y otros sonidos que procesamos normalmente con nuestros oídos. Muy temprano en nuestras vidas, comenzamos a adquirir la habilidad de traducir la información auditiva en lengua significativa. Sin embargo, es casi imposible que analicemos este proceso. La traducción es hecha por los centros neurológicos más bajos sin ninguna implicación consciente. Un ejemplo se presenta en la figura 3.6 de la palabra cálculo.



**Figura 3.6** Espectrograma de la palabra “cálculo.” El eje vertical representa frecuencias hasta 8000 Hz, el eje horizontal demuestra tiempo positivo hacia la derecha, y los colores representan los picos acústicos más importantes para un marco de tiempo dado, con el rojo representando las energías más altas, entonces por orden decreciente de la importancia, de la naranja, del amarillo, del verde, de cianico, de azul, y de magenta, con las áreas grises teniendo incluso menos energía y las áreas blancas debajo de un nivel de decibel del umbral

### 3.4.3 Señales Sísmicas

#### Sismicidad volcánica

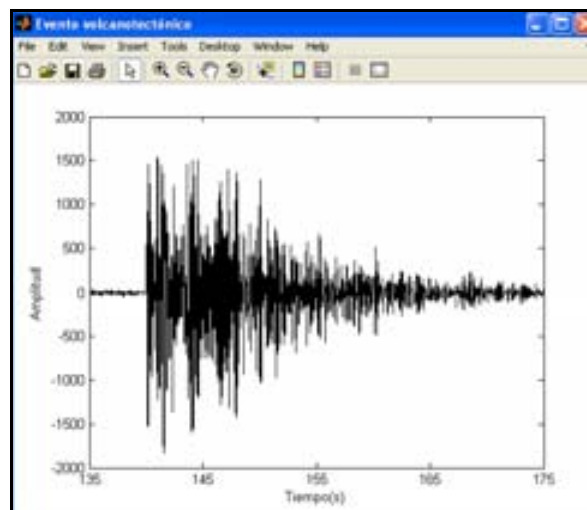
El estudio de una región volcánica, desde el punto de vista sísmico, es importante porque nos permite conocer diferentes aspectos del sistema volcánico. Entre otros: la dinámica y transporte de fluidos, los efectos o consecuencias de esa dinámica y el posible estado de esfuerzos local y regional (mecanismos de fuente sísmica). Esto hace que las señales que se puede registrar en este tipo de ambientes sean diversas entre sí, y algunas de ellas muy diferentes a las que se pueden esperar en un ambiente puramente tectónico (Ibáñez, 2000).

El estudio y análisis de una región volcánica usando datos sísmicos requiere: detección y registro de las señales, identificación y clasificación, y finalmente,

un análisis cuantitativo de la misma. Así se podrá obtener información de numerosos aspectos, como los parámetros de la fuente (posición, evolución temporal, cuantificación energética, física y naturaleza, etc) y del medio (estructura de velocidad, atenuación, respuesta local, heterogeneidades, etc.). Como primer paso se deben determinar y caracterizar los eventos, esta caracterización está condicionada por el tipo de instrumento usado, el muestreo y el contenido espectral de la señal. Por otra parte, el estado de actividad del volcán también condicionará el tipo de señal y su clasificación (Ibáñez, 2000).

### Volcanotectónico

En la figura 3.7 se presenta un evento volcanotectónico, estos eventos son generados por fallamiento ó fracturamientos de corte en rocas sólidas, como los ocasionados en las zonas de subducción, es decir, tienen un mecanismo de doble par.



**Figura 3.7** Señal correspondiente a un sismo volcanotectónico registrado en el Popocatepetl en diciembre de 2006.

### Evento de Largo Periodo (LP's)

Este tipo de señales tienen un arribo de onda P emergentes, pero no puede ser identificada la llegada de ondas S, la duración de la coda es menor a los 25 segundos, y los espectros de amplitudes muestran una variedad de frecuencias centradas entre 1 y 5 Hz, con picos principalmente entre 2 y 3 Hz (McNutt, 2000). Un ejemplo de estos eventos se pueden observar en la figura 3.8, con un sismograma de 40 segundos de duración.

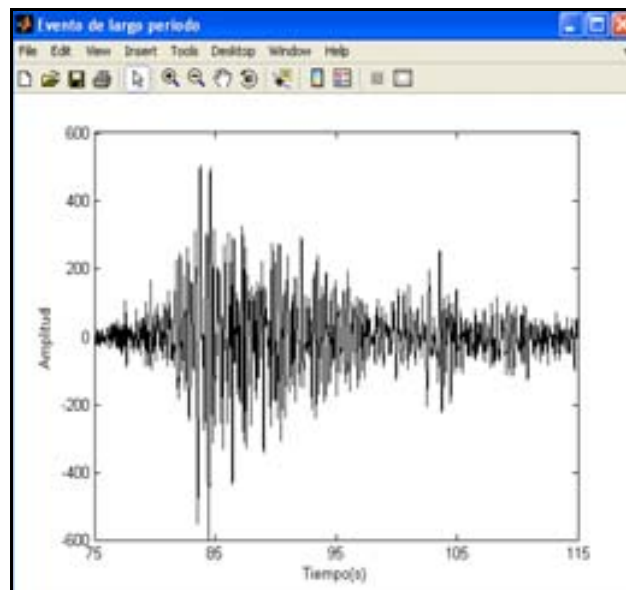
Chouet en (1996) afirma que este tipo de eventos vienen acompañados en su inicio por una señal energéticamente más débil con un contenido de frecuencias mayor a 5 Hz.

Chouet (1985,1996) interpreta a este tipo de señales, como causados por resonancias iniciadas por presiones transitorias en un conducto o en una fractura saturada con algún tipo de fluido, gas o material magmático. Otros

mecanismos generadores de este tipo de sismicidad sugieren que son producidos por flujos de material, como gas, magma ó un fluido magmático transitando por un conducto, así como burbujas de gas expandiéndose ó contrayéndose.

Algunos investigadores consideran que la fuente debe de ser puntual y otros postulan que es un ensamble de la energía provocada por la intrusión de magma o agua dentro de estos conductos o diques. Las profundidades de estos eventos son menores a los 2 kilómetros abajo del cráter.

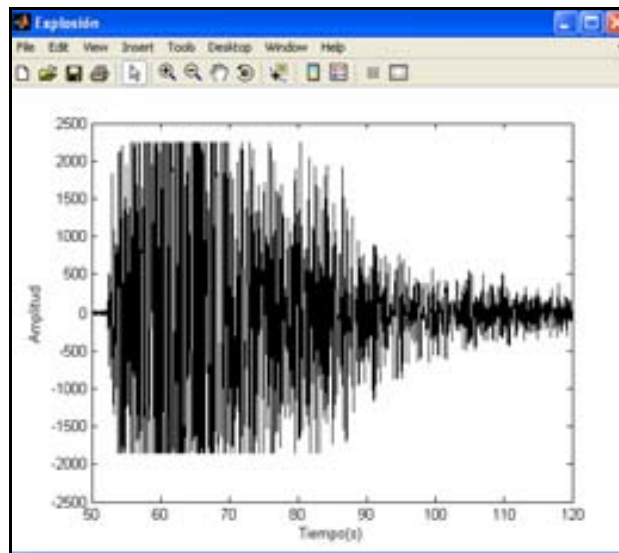
A los eventos de largo periodo (LP's) se les llama comúnmente exhalaciones, las cuales están asociadas a la salida de gas y en algunas ocasiones cenizas en el volcán Popocatépetl (Servando de la Cruz, comunicación personal 2002).



*Figura 3.8 Señal correspondiente a un evento de largo periodo (LP) registrado en el volcán Popocatépetl en marzo del 2003.*

## **Explosiones**

Estos eventos tienen una onda P de tipo impulsiva, las frecuencias dominantes se encuentran entre 1 a 5 Hz, la duración del evento es de aproximadamente unos 40 segundos. En la figura 3.9 se muestra un evento explosivo ocurrido en el volcán Popocatépetl, estas señales se relacionan con explosiones de burbujas de magma, en las cuales hay una ruptura y recuperación del conducto de lava cerca de la superficie. A veces este tipo de señales vienen acompañados por temores de distinto contenido de frecuencias.



*Figura 3.9 Señal correspondiente a una explosión registrada en el Popocatepetl en mayo del 2003.*

### **Tremores**

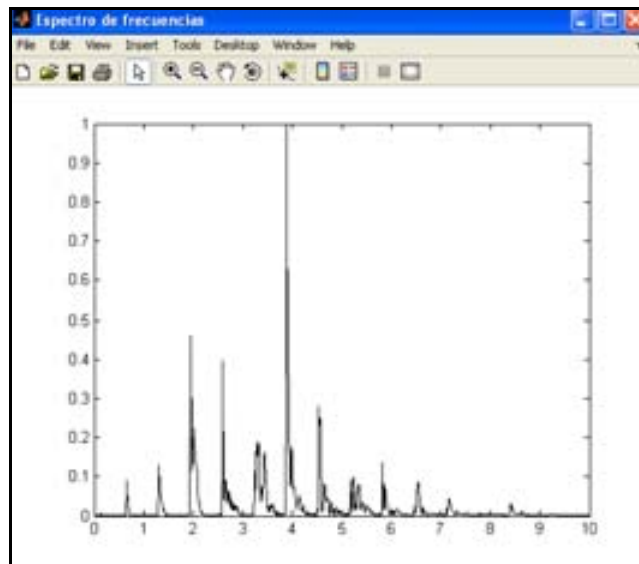
El tremor volcánico es una señal sísmica cuya principal característica es la de mantener amplitudes y frecuencias constantes, que puede oscilar entre varios minutos y horas, y en algunos casos hasta meses, con un contenido espectral con picos agudos y centrados generalmente en bajas frecuencias. Es común observar una frecuencia (pico dominante) con algunos picos subdominantes. Las frecuencias centrales de los picos dominantes son estables y no suelen estar en función del tipo de erupción. Generalmente no parece existir una correlación entre la actividad volcánica visual y la envolvente del tremor, esto quiere decir que aunque exista una gran amplitud del tremor, en algunas ocasiones no necesariamente el volcán se encuentra en un periodo de fuerte actividad (Arámbula, 2002).

Debido a la similitud en las características espectrales y en las temporales de los eventos LP's y los tremores, se piensa que tienen la misma fuente. La única variación es el corto tiempo de duración de una señal LP con respecto del tremor. De tal forma que la generación del tremor se podría decir que es el resultado de una sostenida actividad volcánica, debido a un cambio de presión, producto del flujo de fluidos, gases o magma dentro de los conductos, reservorios y mantos, así como fracturas dentro del edificio volcánico (Arámbula, 2002).

En otros volcanes el tremor ha sido precursor de erupciones, como lo demuestran (Barbieri, et al., 1992), quien con base a registros históricos, observó que en 132 casos, el tremor es el precursor más común de erupciones freáticas. De igual forma McNutt (1994) estudió 80 volcanes de los cuales encontró que aproximadamente el 60% de los episodios de tremor en estos volcanes acompañaron erupciones de gas, cenizas o lava. Además cerca del 20% de los episodios de tremor ocurrieron a menos de 10 días de entrar en erupción el volcán.

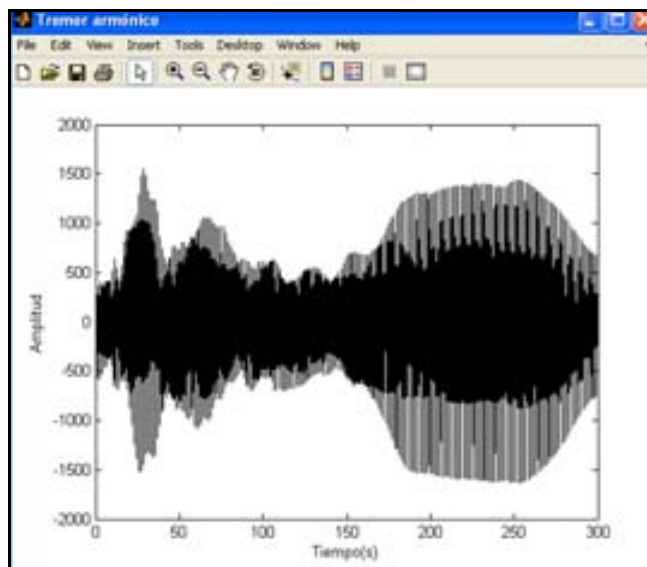
## Tremor armónico

En el volcán Popocatepetl se ha clasificado como armónico debido a su frecuencia regular y constante, así como su amplitud. En la figura 3.10 se presenta el espectro de frecuencia de un segmento de tremor armónico ocurrido en el volcán Popocatepetl el 4 de agosto del 2006, se muestran varias frecuencias y el pico de mayor amplitud se localiza en 4 Hz aproximadamente.



*Figura 3.10. Señal de tremor armónico que se presentó después de un evento LP.*

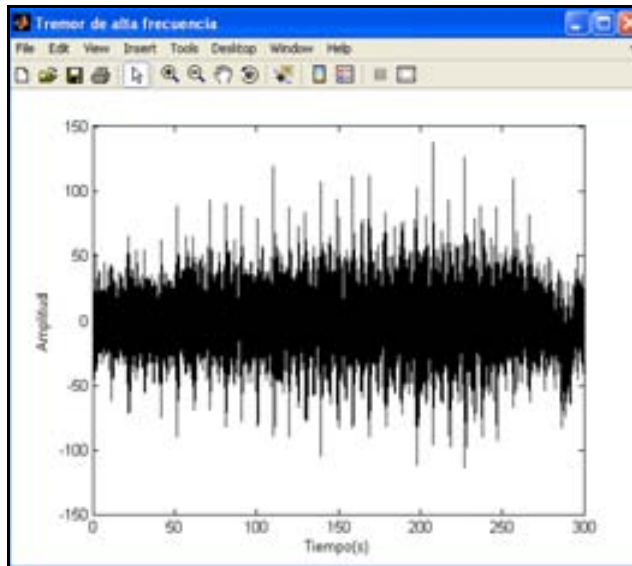
Estos episodios de tremor continuaron de manera intermitente incrementando de forma considerable su amplitud, la mayor observada desde diciembre de 2000 (figura 3.11).



*Figura 3.11 Segmento de tremor armónico cuya duración total es de 12 horas.*

### Tremor espasmódico

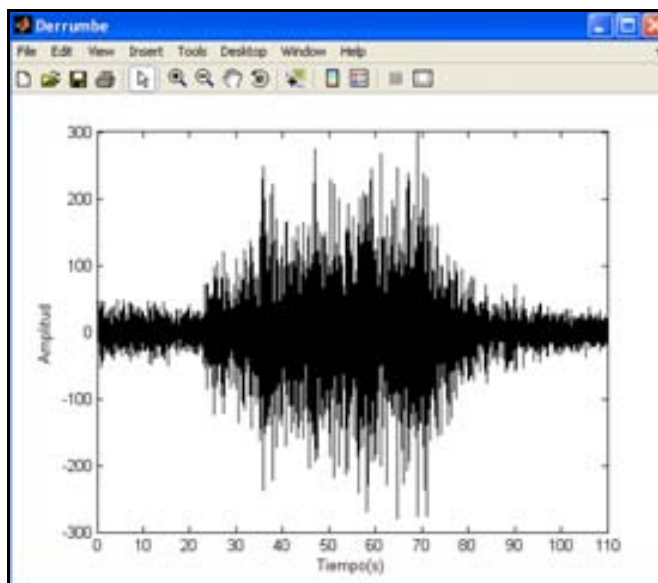
Si el tremor es variable en cuanto a su frecuencia y amplitud se le llama espasmódico (Brandsdóttir, et al., 1992), como por ejemplo el producido por los flujos de lodo, ó el registrado después de exhalaciones ó explosiones, figura 3.12.



*Figura 3.12 Segmento de tremor espasmódico registrado en el volcán Popocatépetl.*

### Derrumbes

Los derrumbes en los volcanes se generan por movimientos del material favorecidos por las pendientes de las laderas, estos se generan por deslizamientos de rocas, colapsos de domo y derretimiento de glaciar. En la figura 3.13 se muestra un derrumbe registrado en el volcán Popocatépetl.



*Figura 3.13 Señal correspondiente a un derrumbe registrado en mayo de 1998.*



### 3.4.4 Procesamiento

Como se mencionó al principio de este capítulo los parámetros a considerar en este análisis son la frecuencia, la amplitud y el tiempo. Se parte de las formas de onda de las señales sísmicas, descritas en la sección 3.4.3 pero incorporando la FFT; así, se buscó obtener una forma de onda a partir de espectros de frecuencia que pudiera usarse como un patrón de reconocimiento, a continuación se describirá este proceso.

Se consideró dividir la señal en segmentos de un segundo sin embargo como se sabe la FFT se hace con un número de muestras que es potencia de 2 entonces la señal se dividió en segmentos de 1.28 segundos, cada uno contiene 128 muestras. Para una mejor resolución y definición se estableció un traslape de medio segundo, es decir, en el primer segundo se tomaron las primeras 128 muestras, para formar el segundo segmento se traslapó medio segundo antes (64 muestras) y así sucesivamente. Por lo que para un archivo de 5 minutos se obtuvieron aproximadamente 234.37 segmentos de 128 muestras cada uno.

### 3.4.5 Aplicación de FFT para cada uno de los segmentos

A cada uno de los segmentos de datos se le aplicó la FFT (ver sección 3.2.8) para tener los datos de frecuencia (Hz) de los eventos, obteniéndose la parte real y la imaginaria de la FFT, con esto se calculó el módulo y el ángulo de fase. Después de esto se procedió a elegir el valor máximo de amplitud de la FFT de cada segmento, a lo que se le llamó valor máximo de una serie de espectros. Estos valores máximos se graficaron con respecto al tiempo y se obtuvo una señal dentro de la cual se pudieron identificar las características de cada una de las familias sísmicas, esto se describe en la sección 3.4.6.

### 3.4.6 Representación y descripción

Ahora se realizará un análisis descriptivo a las figuras que se obtuvieron con el valor máximo de espectros. El orden de los eventos será el mismo de la sección 3.4.3.

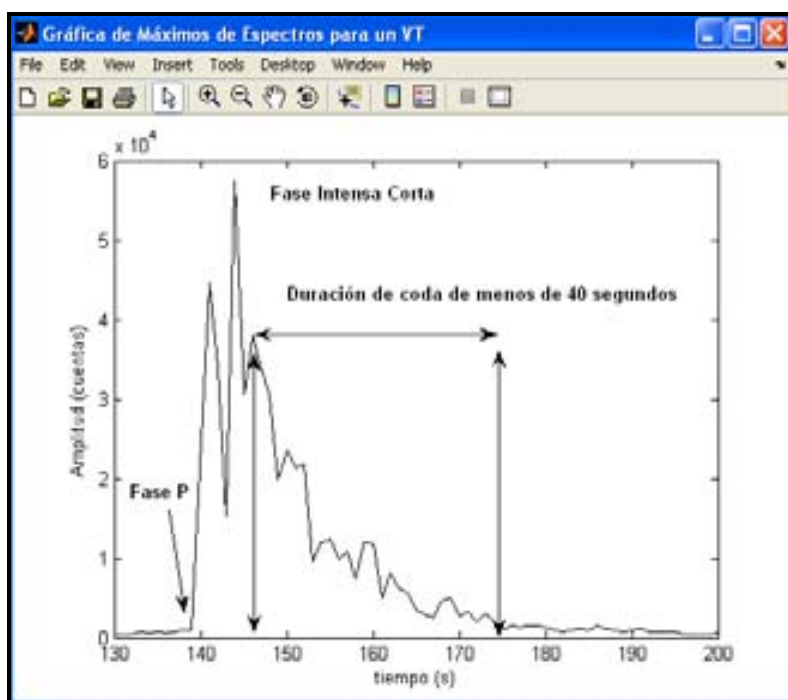
#### Sismos Tipo A ó Volcanotectónico (VT)

Es poco común registrar sismos volcanotectónicos con magnitudes superiores a 4. La aparición de sismos volcanotectónicos suelen ser en forma de lo que se conoce como “enjambre sísmico”, esto es, una secuencia de numerosos terremotos agrupados en el tiempo, de tamaño similar y compartiendo una misma zona epicentral. Especialmente, los sismos volcanotectónicos se suelen presentar en un amplio rango de profundidades, desde la decena de kilómetros hasta la misma superficie del edificio volcánico. En su proyección en superficie, la distribución es muy variada, entorno a un posible conducto, pero también a lo ancho de todo el sistema volcánico. En estructuras caldéricas, se puede apreciar una distribución en forma de anillo (Ibáñez, 2000).

Temporalmente, este tipo de actividad sísmica se presenta de manera muy común en casi todos los ambientes volcánicos, independientemente del estado de actividad de la región. Es más, cuando la región a estudiar se encuentra en reposo, la presencia de los sismos volcanotectónicos representa el único síntoma de actividad en la región. La aparición de enjambres sísmicos en el momento de una posible erupción resulta difícil de modelar. Es cierto que previamente a erupciones se ha observado un brusco aumento de la actividad sísmica, pero existen enjambres sin una relación aparente con una erupción, y existen erupciones sin aumento significativo de la actividad sísmica (Beniot y McNutt, 1996).

### Características:

En la gráfica del valor máximo de espectros obtenida para un sismo volcanotectónico de la figura 3.14 se aprecia que el inicio de la señal es impulsivo y corresponde a la onda P, su forma se onda es representada por la detección de la llegada de los paquetes de ondas P y S, una fase intensa corta, así como la contribución de ondas superficiales y un decaimiento final en forma de exponencial decreciente que representa la coda, cuya duración es menor a 1 minuto, generalmente.



*Figura 3.14 Características de un sismo volcanotectónico a partir del gráfico obtenido del valor máximo de espectros.*

### Eventos de Largo Periodo

Estos eventos, debido a su forma de onda y composición son difíciles de detectar y localizar usando técnicas clásicas. Lahr et. al (1994), estudiando el volcán Reboabt (Alaska), localizaron este tipo de eventos muy delimitados en el conducto volcánico y en la superficie, a una profundidad inferior al kilómetro. Sin embargo, también ha sido posible detectar señales parecidas a los LP, a

profundidades cercanas a los 20 km, como ha sido el caso del volcán Pinatubo (Filipinas) ó en Long Valley (California), (Chouet comunicación personal).

La ocurrencia temporal de los eventos de tipo LP suele ser en forma de enjambre sísmico, a veces con un elevado número de eventos por hora. Se ha podido observar (Chouet, 1996) que existe una muy fuerte relación entre la ocurrencia de enjambres de eventos de tipo LP y la ocurrencia de erupciones volcánicas.

### Características:

Los denominados eventos de Largo Periodo -LP- (también se les conoce como Eventos de baja Frecuencia ó sismos Tipo B) son señales típicas de ambientes volcánicos. Están caracterizados por tener una duración de pocos segundos hasta algo más de un minuto, y con un contenido espectral muy limitado a unas bandas de frecuencia relativamente estrechas ( $0.5 < f < 5$  Hz). A menudo es posible encontrar eventos LP que aparecen precedidos por llegadas algo menos energéticas, a frecuencias algo mayores ( $f > 5$  Hz). Ferrazzini y Aki (1992).

La gráfica del valor máximo de espectros obtenida para un evento LP se presenta en la figura 3.15, ahí se puede ver que su fase inicial es emergente, por lo que resulta difícil determinar el momento exacto del comienzo de la señal. No presentan fases claras de onda S. El contenido espectral de esta señal puede variar de volcán a volcán, e incluso dentro del mismo sistema volcánico.

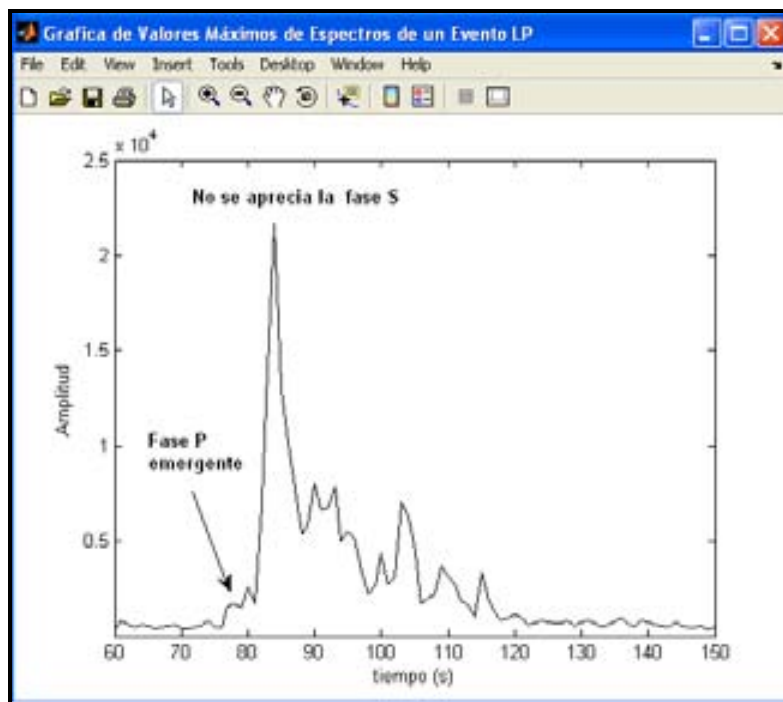


Figura 3.15 Características de un evento LP ocurrido el 29 de marzo del 2003 obtenido de la gráfica a partir del valor máximo de espectros.

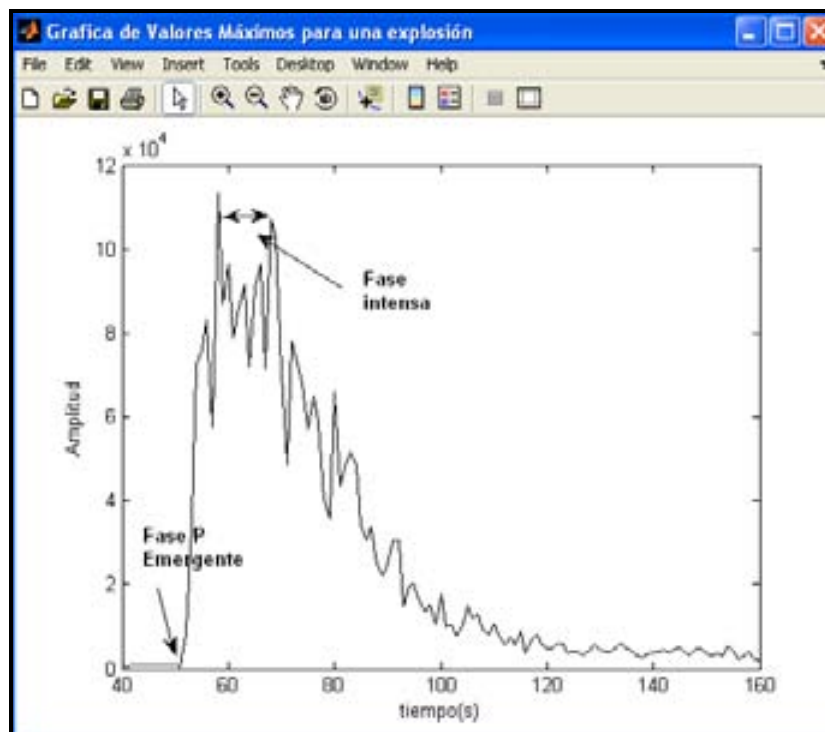
### Explosiones

Quizás las señales provenientes de explosiones en los edificios volcánicos corresponden, junto al tremor, a las señales sísmicas más características cuando se encuentra en marcha un proceso eruptivo.

### Características:

En este caso, las explosiones son identificables por el aumento brusco de amplitud en la señal (parecido al sismo volcanotectónico). La señal tiene dos llegadas diferentes. La primera asociada con la propagación en forma de ondas internas o superficiales de la explosión. La segunda es la llegada de lo que se conoce como ondas de aire, ondas de choque y ondas sonoras, con una velocidad de propagación clara de 340 m/s. Esta velocidad de propagación tan lenta y clara es la forma más fácil de poder identificar este tipo de eventos sobre los sismogramas cuando no ha sido posible distinguirlos en el momento de ocurrencia.

En la figura 3.16 se muestra la grafica de valores máximos de espectros obtenida para una explosión, en la que se observa un arribo impulsivo, una fase intensa de mayor duración comparada con la que se observa en los sismos volcanotectónicos y un decaimiento final en forma de exponencial decreciente que representa la coda del evento.



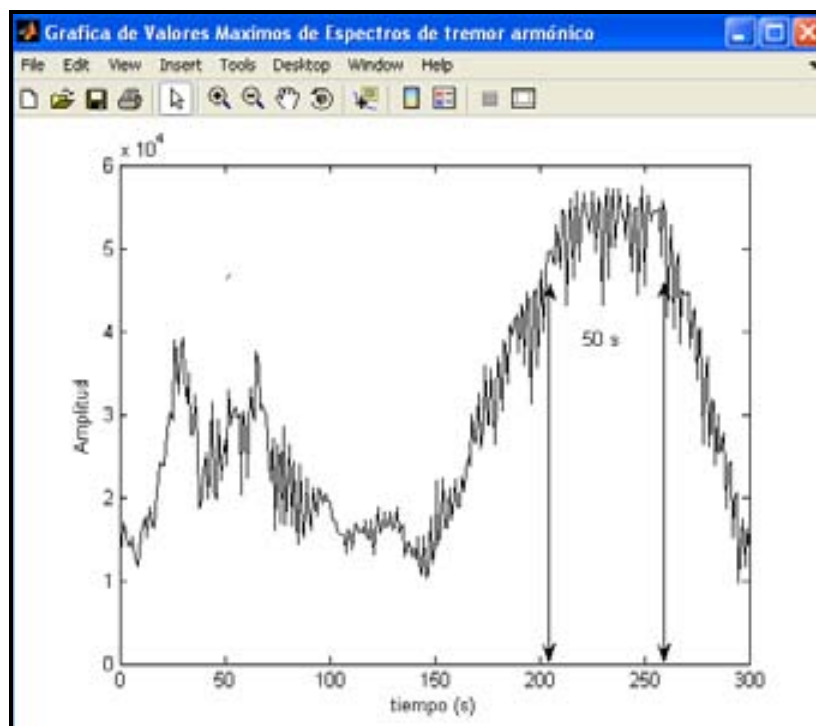
*Figura 3.16 Características de una explosión ocurrida el 29 de noviembre de 1998 se describen a partir de la grafica obtenida con valores máximos de espectros.*

### Tremor volcánico

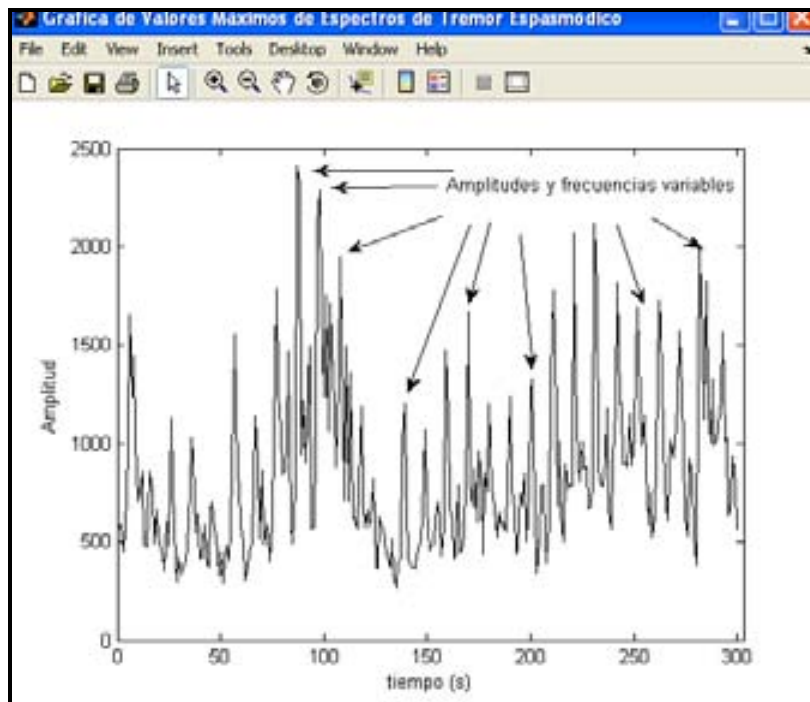
El tremor volcánico es una señal sísmica que se caracteriza por mantener la amplitud constante durante un largo período de tiempo que puede oscilar entre los varios minutos y horas. Existen dos tipos de tremor: armónico y espasmódico.

### Características:

Su espectro presenta por regla general un pico dominante con algunos picos subdominantes (figura 3.10). Las frecuencias centrales de los picos dominantes son estables y no suelen estar influenciadas por las características de la erupción. Muchas señales de tremor vienen precedidas inicialmente por unas llegadas con altas frecuencias similares a las encontradas en algunos eventos de tipo L.P. No se puede identificar la presencia de llegadas de fases de tipo P ó S. En las figuras 3.17 (armónico) y 3.18 (espasmódico) se muestran las graficas que obtuvieron a partir de los valores máximos de espectros en las cuales se puede observar algunas de las características mencionadas.



**Figura 3.17** Características de un segmento de tremor armónico del 4 de agosto del 2006 obtenidas a partir de graficar los Valores Máximos de Espectros.



**Figura 3.18** Características de un segmento de *tremor espasmódico* registrado el 28 de abril de 2003 obtenidas a partir de graficar los *Valores Máximos de Espectros*.

Por regla general, parece no existir una correlación entre la actividad volcánica visual y la envolvente del tremor. Un tremor fuerte no tiene porque estar relacionado con una fuerte actividad volcánica visual, o una fuerte desgasificación. En cuanto al material emitido, las amplitudes del tremor están muy bien correlacionadas con las fuerzas de las erupciones de cenizas, vapor o gas, mientras que para erupciones de lava o flujos de lava, las amplitudes del tremor suelen ser más bajas.

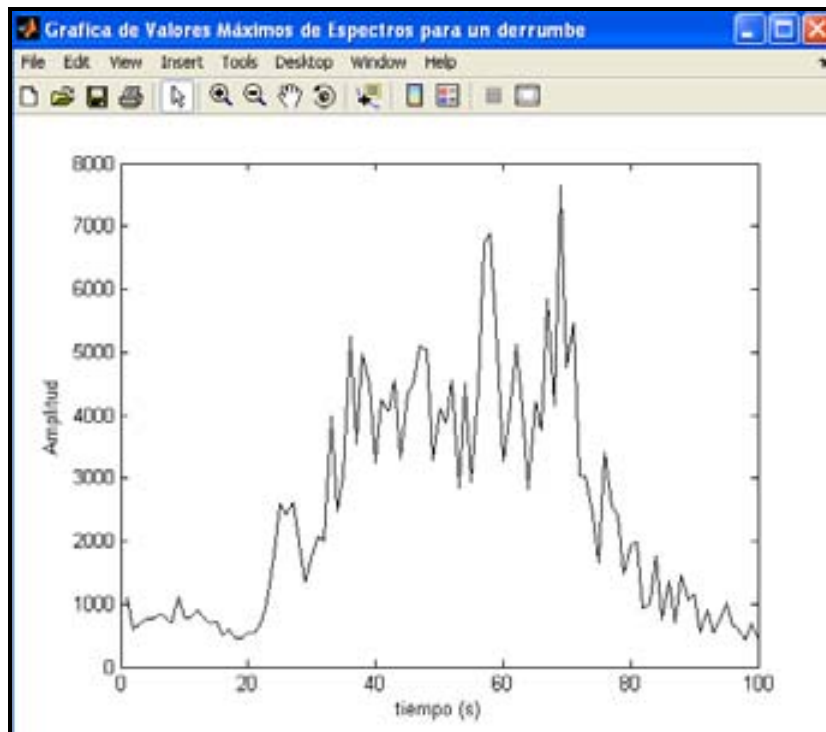
La actividad eruptiva de diciembre del 2000 del volcán Popocatepetl alcanzó una altura de más de 3 Km por arriba de su cráter y arrojó aproximadamente  $3.8 \times 10^6$  m<sup>3</sup> de material, que es aproximadamente el 20% del volumen del domo calculado (volumen estimado en  $19 \times 10^6$  m<sup>3</sup>) en base a fotografías aéreas del día 23 del mismo mes, con estos datos se le asignó un VEI=2. Para la explosión del 22 de Enero del 2001, se le asignó un VEI=3, debido a la altura de la columna (Arámbula, 2002).

En el espectrograma de algunos episodios de tremor en el volcán Popocatepetl se ha observado un desplazamiento de frecuencias, de bajas a altas, esto se a asociado a cambios en las longitudes de los conductos por donde se desplaza el magma.

### **Derrumbe**

Estos eventos se producen sobre las laderas del volcán, pero se mencionan en esta clasificación debido a que se observan con frecuencia en el registro analógico. En la envolvente que se presenta en la figura 3.19 se observan las

características de estos eventos, no presentan paquetes de ondas bien diferenciadas y no se aprecian fases de ondas P ó S.



*Figura 3.19 Características de un derrumbe ocurrido el 27 de mayo de 1998 obtenidas a partir de graficar los Valores Máximos de Espectros.*

### 3.4.7 Valor máximo

#### Segunda Etapa

El siguiente paso después de la obtención de las graficas de valores máximos de espectros consistió en realizar un comparativo grafico con señales de una misma familia, sin embargo no fue posible hacerlo, porque la señal sísmica podría ubicarse en cualquier posición (tiempo) del archivo \*.dmx, como se muestra en la figura 3.20.

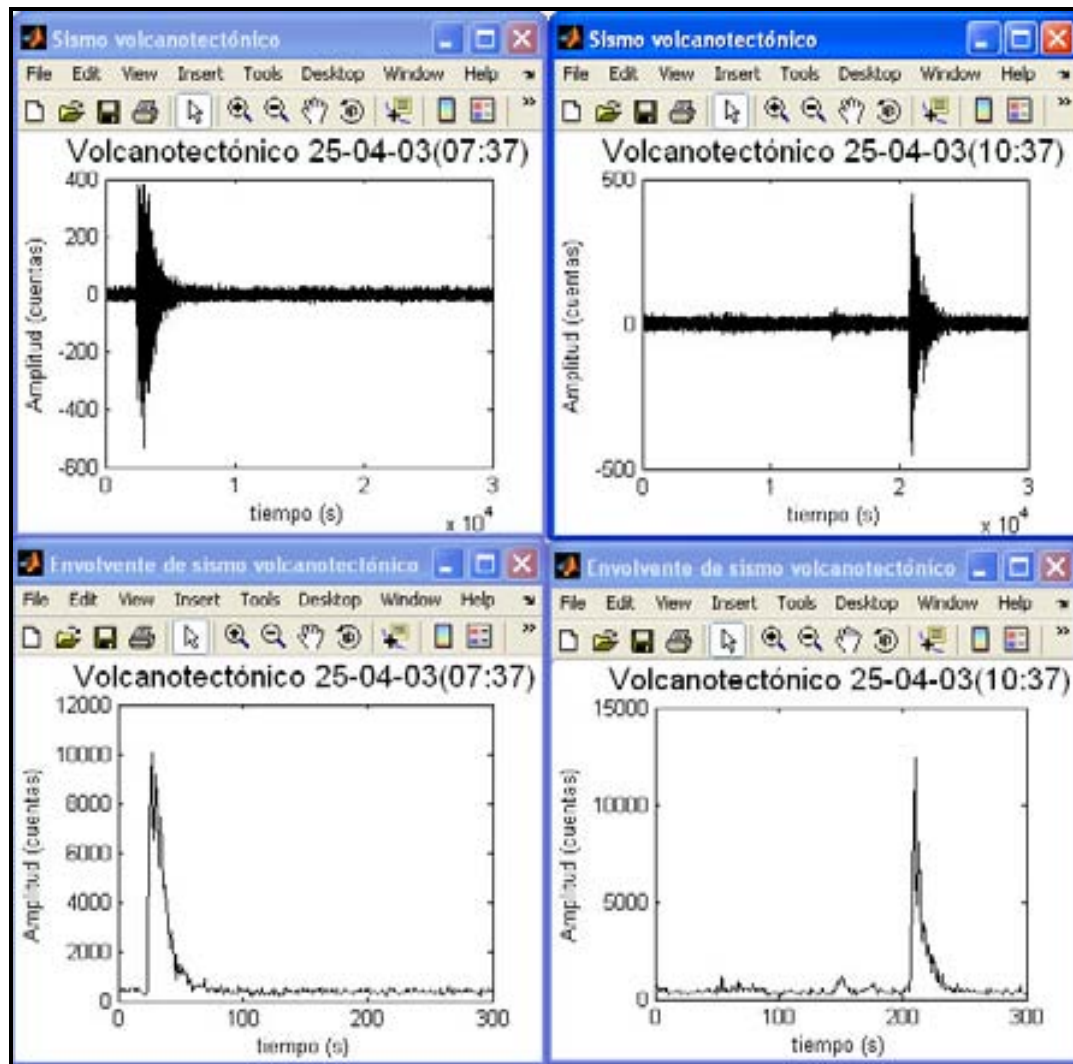


Figura 3.20 La ubicación del evento dentro del archivo dificulta la posible comparación entre ellos.

Los dos eventos ocurrieron en mismo día a distintas horas, en las graficas de valores máximos de espectros se encuentra que tanto las amplitudes como la posición de los VT's son muy distintos, dificultando una posible comparación, para resolver este problema se consideró una característica común encontrada en los eventos denominados Volcanotectónicos, de Largo Período (LP) y Explosiones, la fase de máxima amplitud de los eventos es seguida de un **decaimiento** muy parecido a una **función exponencial** hasta su conclusión. Tomando en cuenta lo anterior la grafica del valor máximo de espectros, se dividió en dos partes.

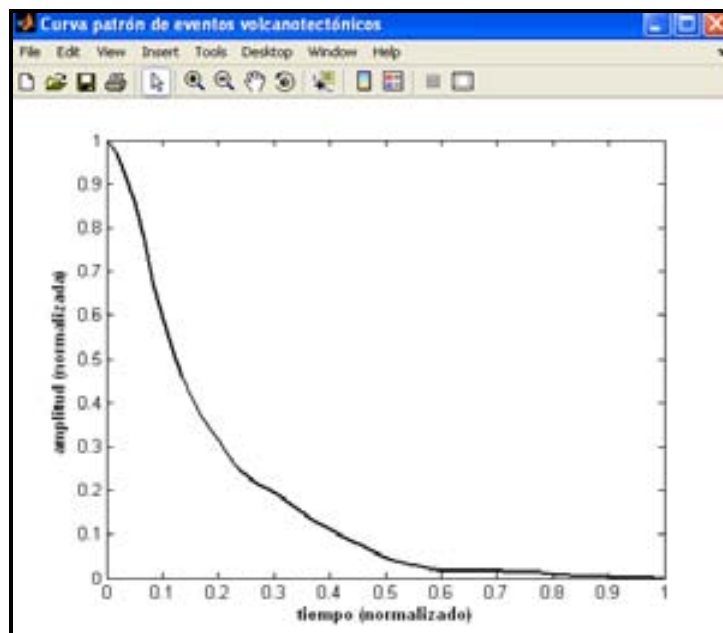
**Primera parte de la grafica de valores máximos de espectros:** Fase inicial de la señal sísmica hasta el valor que representa la mayor amplitud de la señal.

**Segunda parte de la grafica de valores máximos de espectros:** Comienza a partir del valor mayor que corresponde a la mayor amplitud hasta la finalización del evento. Esta segunda parte es la que se utilizará como curva-patrón.



Para detectar el inicio y el final de la señal se calculó un valor promedio que representa el nivel base (ruido) de la señal. Como la cantidad de valores contenidos en la segunda parte de la grafica de valores máximos de espectros es variable, porque depende de la duración del evento, se empleó un procedimiento de interpolación, para uniformizar la cantidad de datos a graficar. Asimismo es necesario que la señal se normalice con el fin de las curvas puedan ser comparadas, es decir, el máximo valor de amplitud será igual a 1, los mismo se hará con el tiempo. Para las amplitudes se localizó el máximo valor numérico, este valor se empleó para dividir el resto.

La figura 3.21 presenta una curva que representa la segunda parte de la gráfica del valor máximo de espectros de los eventos de tipo volcánotectónicos, como se puede observar las escalas en los ejes fueron normalizadas. Este procedimiento se aplicó a eventos de tipo LP (figura 3.22) y a explosiones (figura 3.23), obteniendo curvas que son representativas de la familias y que se denominaron, curvas-patrón.



**Figura 3.21** Curva patrón normalizado de eventos volcánotectónicos

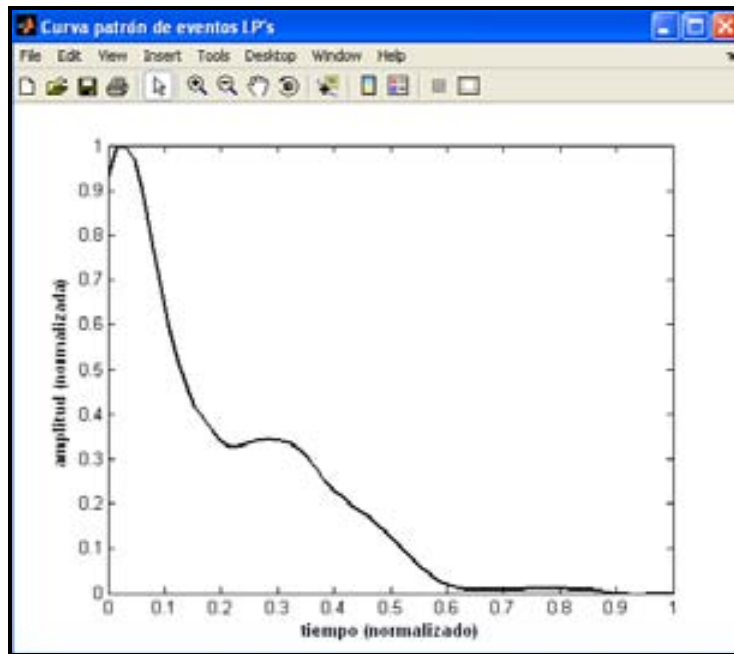


Figura 3.22 Curva patrón normalizado de eventos de Largo Periodo.

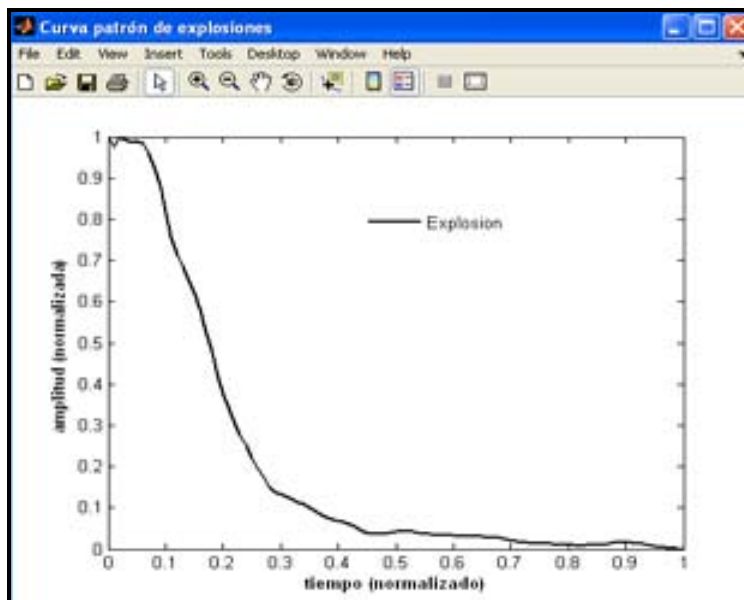
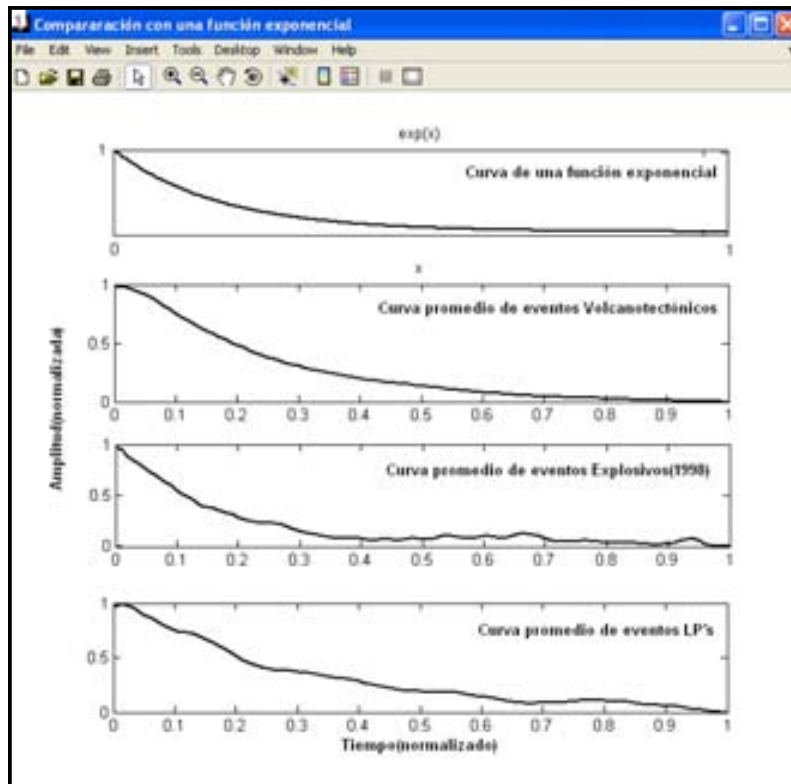


Figura 3.23 Curva patrón normalizado de eventos explosivos.

### 3.4.8 Decaimiento exponencial

Se mencionó la segunda parte de la grafica de valores máximos de espectros presenta un decaimiento muy similar a la curva de una función exponencial para las familias de los eventos volcanotectónicos, de largo periodo y explosivos, la figura 3.24 presenta la comparación entre los eventos sísmicos mencionados con respecto a una función de tipo exponencial.



**Figura 3.24 Muestra las curvas patrón y su comparación con una función exponencial**

La diferencia entre todas las curvas es apreciable sin embargo se reforzará con un análisis de datos estadísticos. A continuación se definirán algunos conceptos estadísticos que se emplearán para la diferenciación.

La desviación estándar puede ser interpretada como una medida de incertidumbre. La desviación estándar de un grupo repetido de medidas nos da la precisión de éstas. Cuando se va a determinar si un grupo de medidas está de acuerdo con el modelo teórico, la desviación estándar de esas medidas es de vital importancia: si la media de las medidas está demasiado alejada de la predicción (con la distancia medida en desviaciones estándar), entonces consideramos que las medidas contradicen la teoría. Esto es de esperarse, ya que las mediciones caen fuera del rango de valores de los cuales sería razonable esperar que ocurrieran si el modelo teórico fuera correcto.

En la figura 3.25 se presentan los valores obtenidos a las función exponencial y a las curvas patrón después de realizarles el cálculo de la Desviación Estándar, la Media y la Mediana.

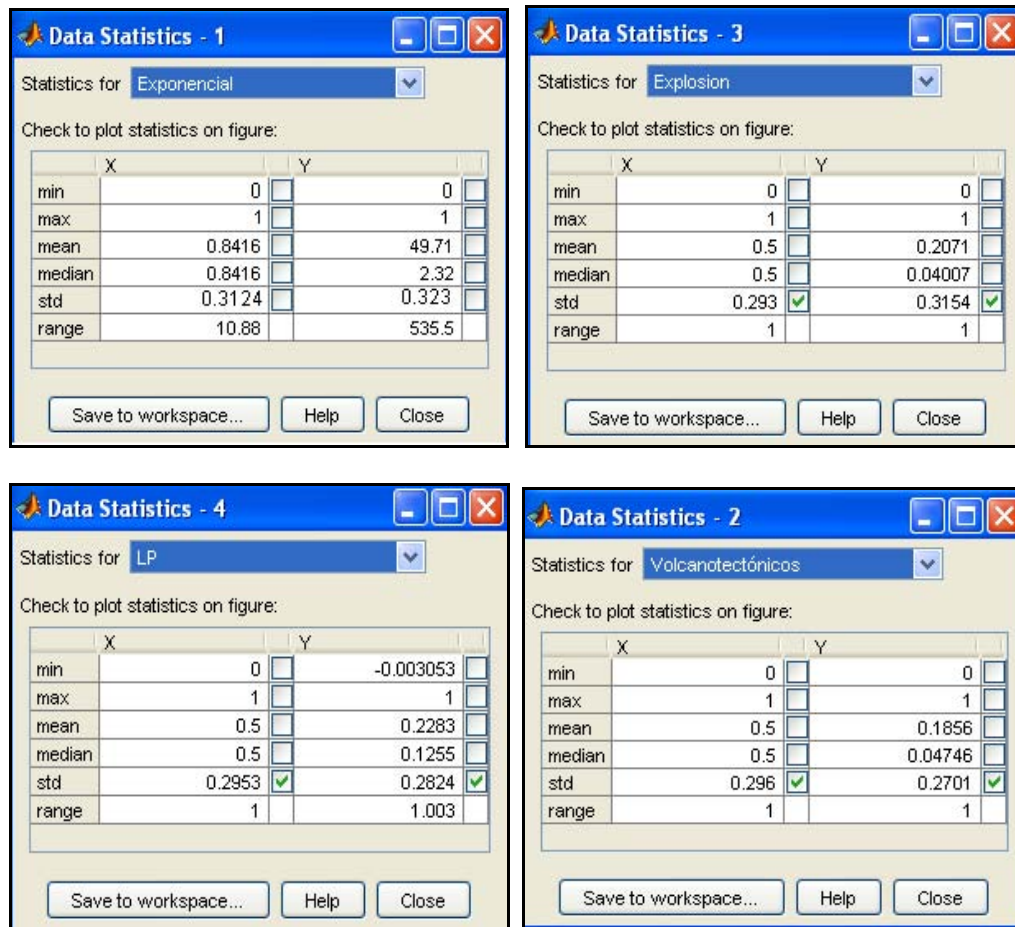


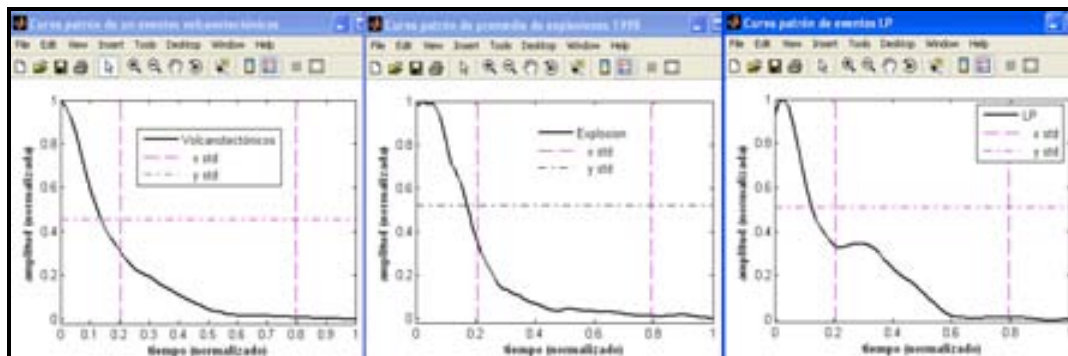
Figura 3.25 Valores estadísticos calculados para la curva exponencial y las curvas-patrón de VT's, Explosiones y eventos LP's.

### 3.4.10 Resultados estadísticos

En la tabla 3.1 se presentan los valores estadísticos mostrados en la figura 3.25, para una mejor comparación.

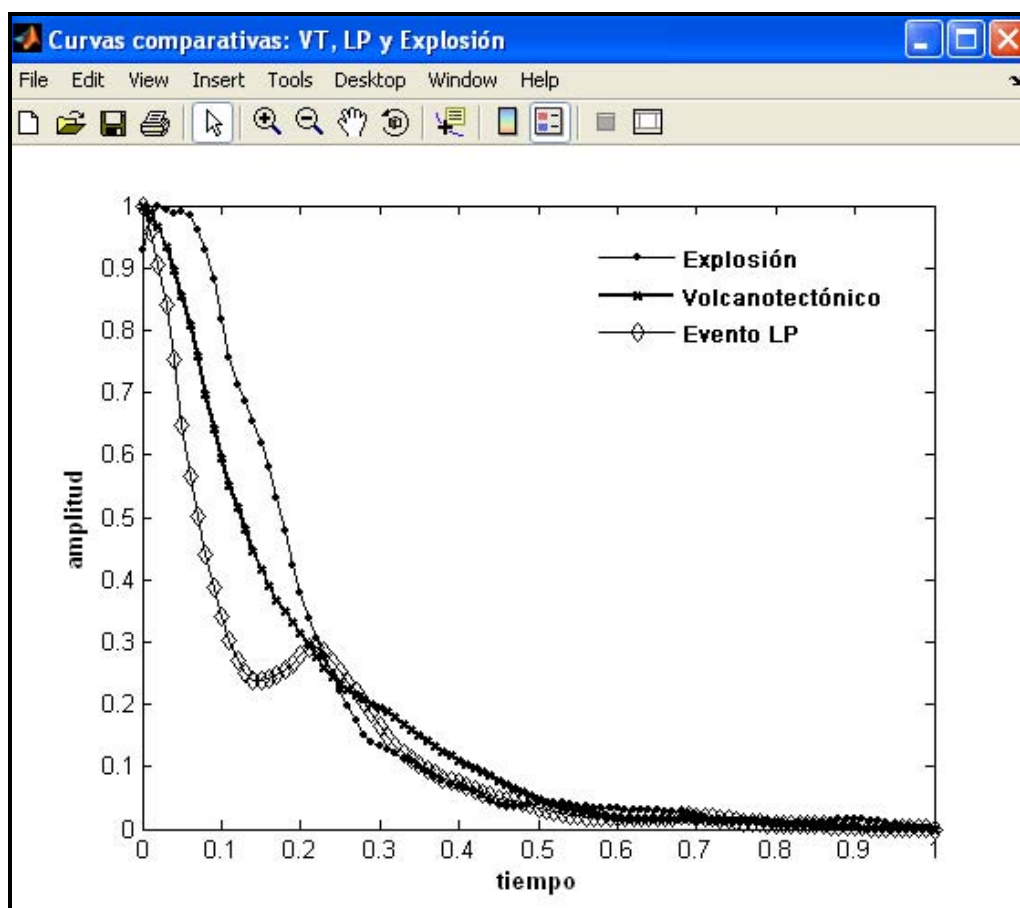
Evento	STD		Media	Mediana
	X	Y		
<b>Función exponencial</b>	0.3124	0.323	0.8416	0.8416
<b>Explosiones</b>	0.293	0.3154	0.5	0.5
<b>Volcanotectónicos</b>	0.296	0.2701	0.5	0.5
<b>Largo Periodo</b>	0.2953	0.2824	0.5	0.5

Los valores STD de los eventos sísmicos con respecto a los valores STD de la función exponencial solo son cercanos entre si, como se observa en la tabla 3.1. En la figura 3.26 se grafican nuevamente las curvas-patrón de eventos sísmicos a una misma escala, sobre una cuadrícula que corresponde a la STD. Visualmente en la figura 3.24 se notaba que los decaimientos de las curvas-patrón son parecidos a una función exponencial, sin embargo de acuerdo los valores mostrados en la Tabla 3.1 y a su graficación en la figura 3.26 se determina que las curvas-patrón decaen de forma diferente.



**Figura 3.26** Desviación estándar para eventos VT's, Explosiones y eventos LP's

Los resultados de estas diferenciaciones podrán ser usadas para obtener una caracterización de estas familias sísmicas, con esto se cumple el objetivo de obtener patrones de reconocimiento que pueden ser empleados para la creación de una base de datos sísmicos del volcán Popocatepetl, como se muestra en la figura 3.27.



**Figura 3.27** Comparativo entre las curvas-patrón de las familias de Volcanotectónicos, de eventos L.P y de eventos explosivos.

### Tremor

Como estas señales corresponden a vibraciones continuas del terreno cuya duración varía de algunos minutos a horas e incluso días y las amplitudes máximas que presentan estas señales se mantienen constantes durante un periodo de tiempo más largo con respecto a las señales de los eventos volcanotectónicos, eventos LP y explosiones, lo anterior dificulta la posibilidad de establecer una curva característica que permita obtener un patrón de la señal a partir de sus envolventes.

Si bien las envolventes obtenidas, a partir de las señales originales, establecen diferencias entre cada uno de los dos tipos de tremores y los derrumbes, no son útiles para la creación de patrones, por lo que es necesario realizar otro tipo de análisis, que está no está considerado en el objetivo de este trabajo.

## 4. Aplicación y resultados

En el capítulo anterior se presentó el desarrollo del sistema de procesamiento de señales en cuanto a su capacidad para identificación de las señales sísmicas del volcán Popocatépetl, SISP (Sistema de Identificación Sísmica del volcán Popocatépetl).

En este capítulo se mostrará la identificación y diferenciación que realiza el programa aplicado a los eventos que conforman las familias de las señales sísmicas del volcán Popocatépetl, para este caso: Volcanotectónicos, Eventos de Largo Periodo (LP) y Explosiones.

Para ello se desarrollaron y anexaron subrutinas a SISP que permiten el almacenamiento de datos mediante creación de directorios y subdirectorios, la graficación dato por dato o bien grupos de ellos y la generación de un formato automático normalizado para realizar comparativos que permitan identificar rasgos particulares entre las señales por separado, por etapas de actividad ó familias. Con la incorporación de lo anterior a SISP se realizó un análisis con los grupos de las señales sísmicas ya mencionados.

### 4.1 Aplicación

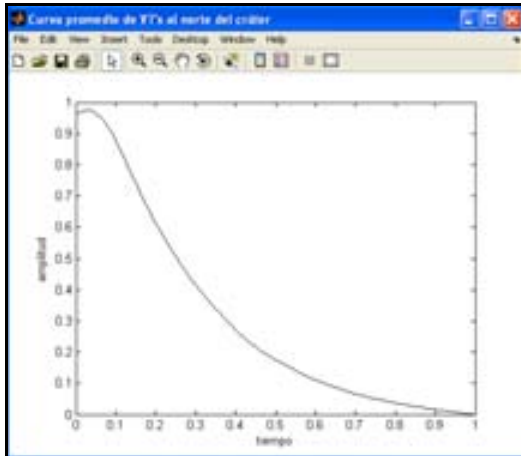
#### 4.1.1 Volcanotectónicos:

Los eventos sísmicos de esta familia se han ubicado debajo del cráter y en sus alrededores, en el capítulo 3 para la obtención de su curva-patrón los eventos se eligieron al azar. En este capítulo los eventos a analizar se conformaron de acuerdo a su localización, se tomó una muestra de 25 eventos por cada sector, alrededor del cráter. Al Suroeste y al Oeste, el número de eventos fue menor, porque en estos sitios se han registrados muy pocos eventos, esto indica que la presencia de los mismos en cada zona es variable. En la Tabla 4.1 se indican los eventos que se emplearon en este capítulo.

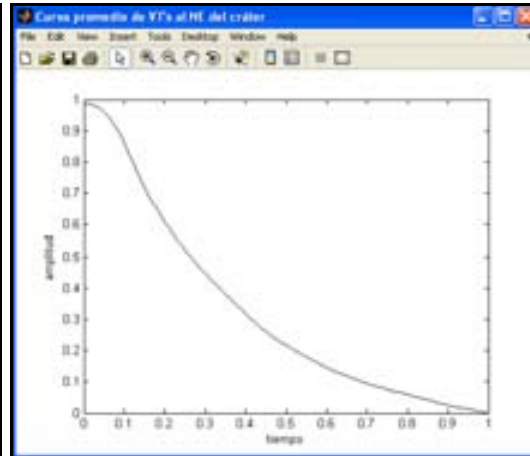
**Tabla 4.1 Sectores y número de sismos volcanotectónicos.**

<b><i>Sector del volcán</i></b>	<b><i>No de sismos</i></b>
<b><i>Norte (a)</i></b>	<b><i>25</i></b>
<b><i>Noreste (b)</i></b>	<b><i>20</i></b>
<b><i>Este (c)</i></b>	<b><i>25</i></b>
<b><i>Sureste (d)</i></b>	<b><i>25</i></b>
<b><i>Sur (e)</i></b>	<b><i>15</i></b>
<b><i>Suroeste (f)</i></b>	<b><i>5</i></b>
<b><i>Oeste (g)</i></b>	<b><i>10</i></b>
<b><i>Noroeste (h)</i></b>	<b><i>20</i></b>
<b><i>Debajo (i)</i></b>	<b><i>25</i></b>

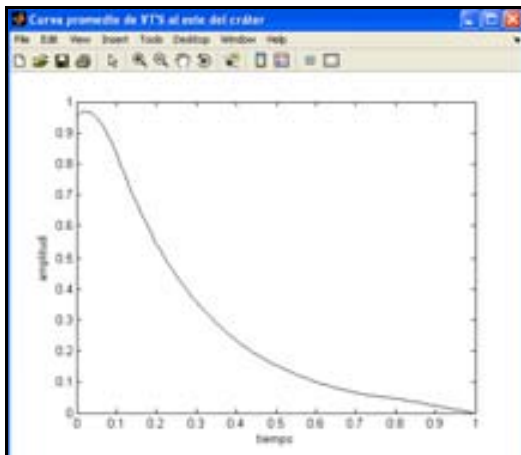
Se procesaron los 25 sismos del sector Norte, la figura 4.1 (a) presenta la curva-promedio obtenida, este procedimiento se repitió para los demás grupos, la figura 4.1 (b) contiene la curva promedio de los eventos del sector Noreste, y así sucesivamente, siguiendo el orden indicado en la tabla 4.1. El sector al que corresponden se indicó en el encabezado de cada figura.



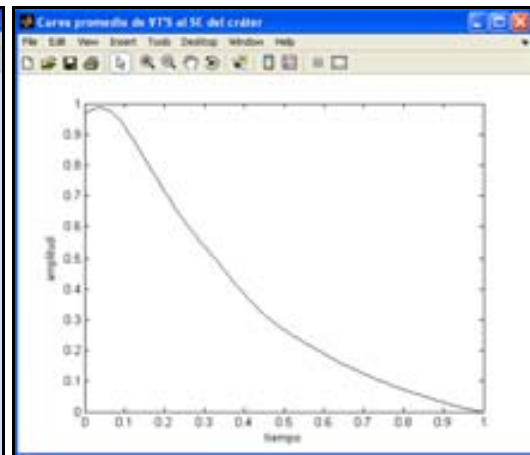
4.1 (a)



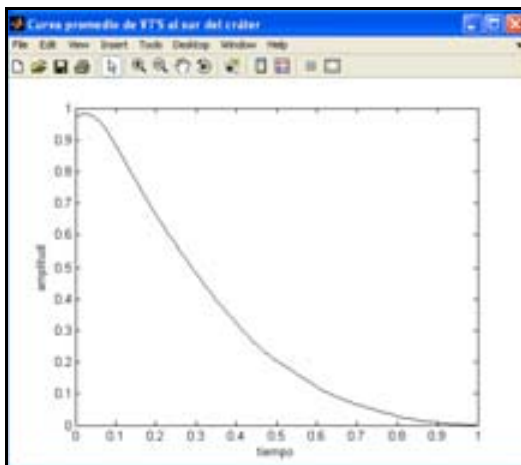
4.1 (b)



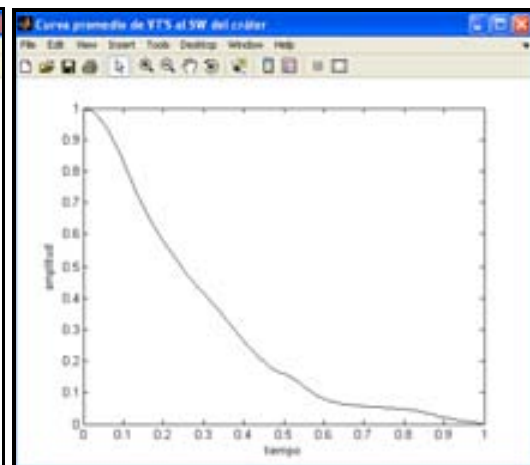
4.1 (c)



4.1 (d)

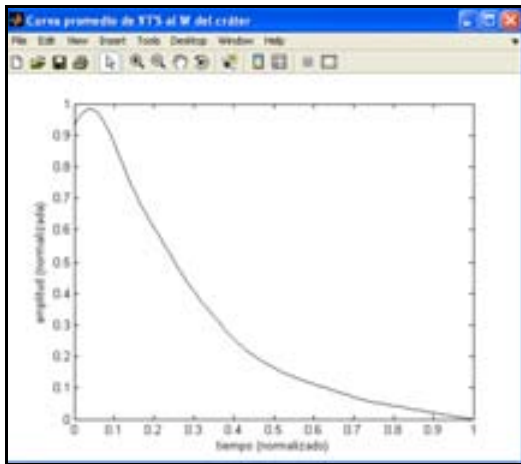


4.1 (e)

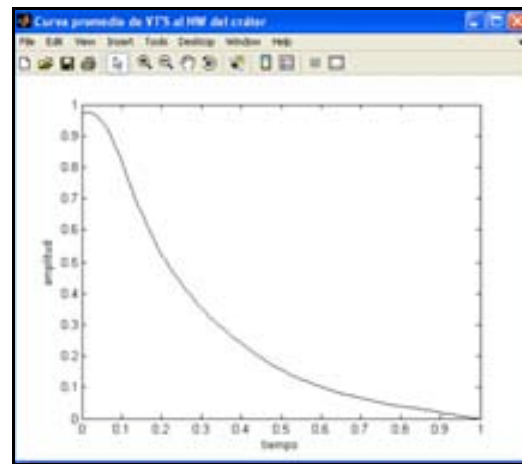


4.1 (f)

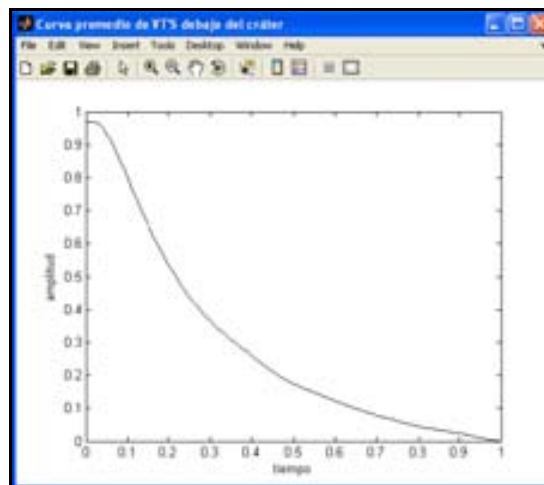




4.1 (g)



4.1 (h)



4.1 (i)

De las figuras anteriores se puede apreciar que las curvas promedio de cada sector del volcán presentan similitud. Esto nos lleva pensar que sí es posible establecer una curva patrón de esta familia de sismos del volcán Popocatepetl y que la localización del sismo no influiría en su curva característica. Lo anterior se comprueba al graficar todas las curvas promedio obtenidas, como se observa en la figura 4.2. Estas curvas pueden ser promediadas para obtener una sola curva, que se denominaría curva-patrón.

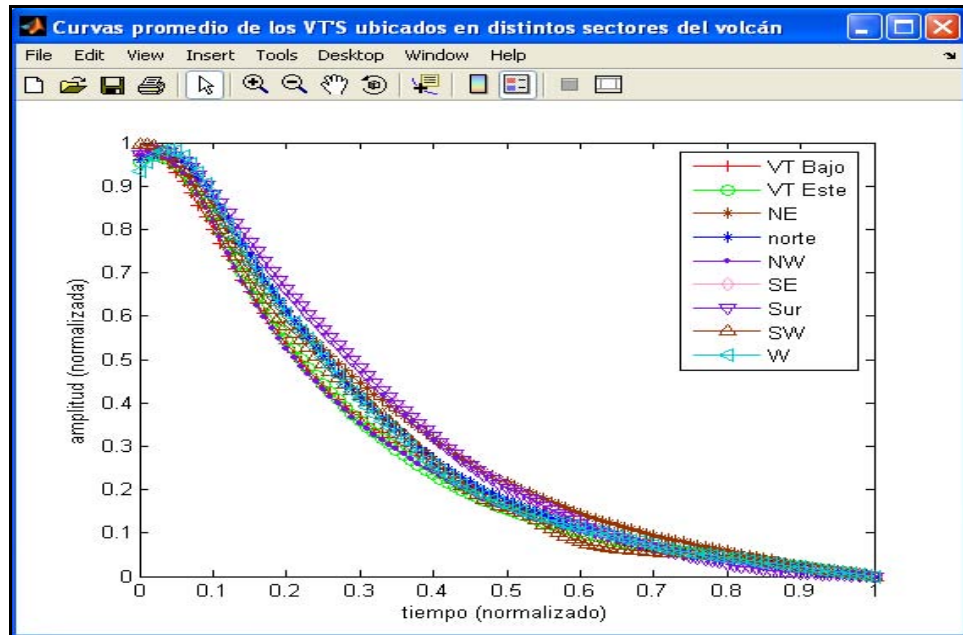


Figura 4.2 Curvas promedio de volcanotectónicos

#### 4.2.1 Eventos de Largo Período (LP) ó “Exhalaciones”:

Las curvas que conforman la figura 4.3 se obtuvieron de eventos LP elegidos que no pertenecen a una misma etapa de actividad, las características que comparten son amplitud y duración en tiempo, este grupo de eventos se pueden identificar como LP's (exhalaciones) medianos. El grupo está conformado por 14 eventos.

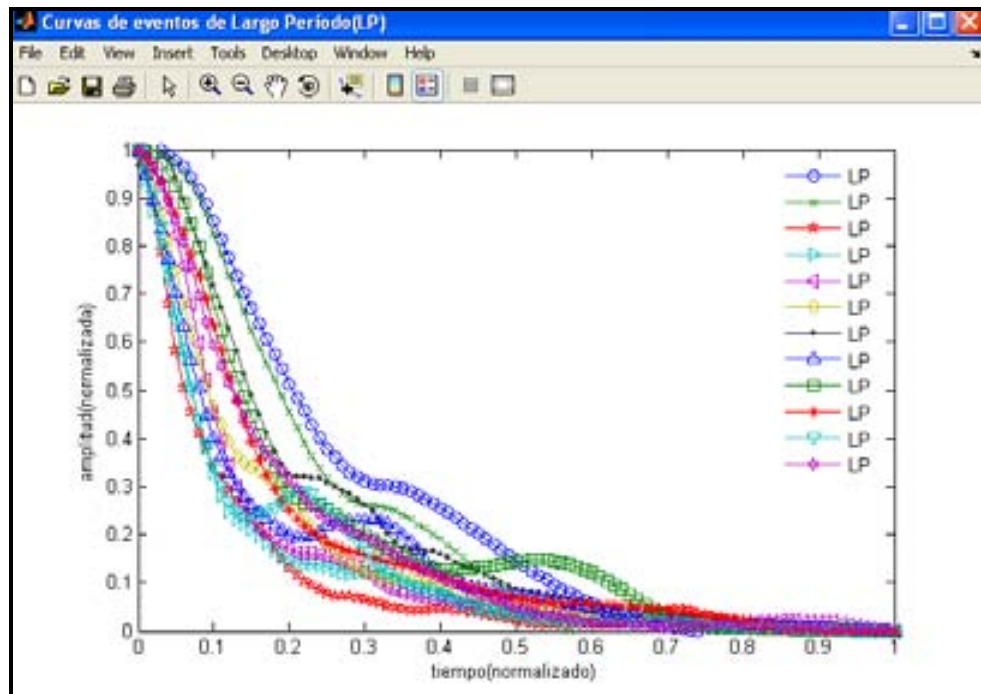


Figura 4.3 Curvas de eventos de Largo Período identificado cada con un símbolo.

En general, en la figura 4.3 podemos observar un decaimiento parecido en cada uno de los eventos LP, la especie de “joroba” que se aprecia en ellos se asocia a señales de tremor de pequeña amplitud.

#### 4.2.2 Eventos de Largo Período (LP) ó Exhalaciones de Febrero del 2003:

Ahora se realizará un análisis a eventos de Largo Periodo de una misma etapa de actividad del volcán, los eventos LP’s (exhalaciones) procesados para este apartado pertenecen a la etapa 15, el registro de los eventos fue en el mes de febrero del 2003, cuyas características comunes fueron columnas de ceniza de entre 1 y 2 kilómetros de altura con dirección NE, y para los eventos del 20 y 22 de febrero se reportó salida de fragmentos incandescentes, tal como se observa en la figura 4.4. La amplitud y duración de estos eventos LP’s es mayor que los descritos en el apartado anterior.

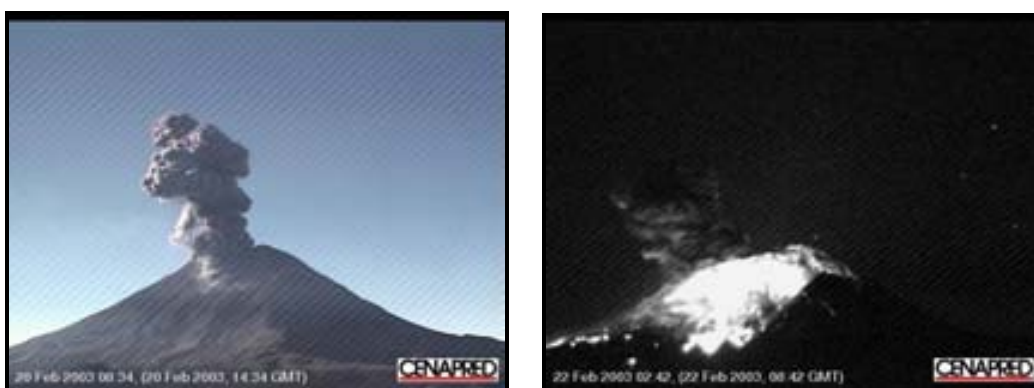


Figura 4.4 Imágenes de los eventos LP’s (exhalaciones) del 20 y 22 de feb del 2003.

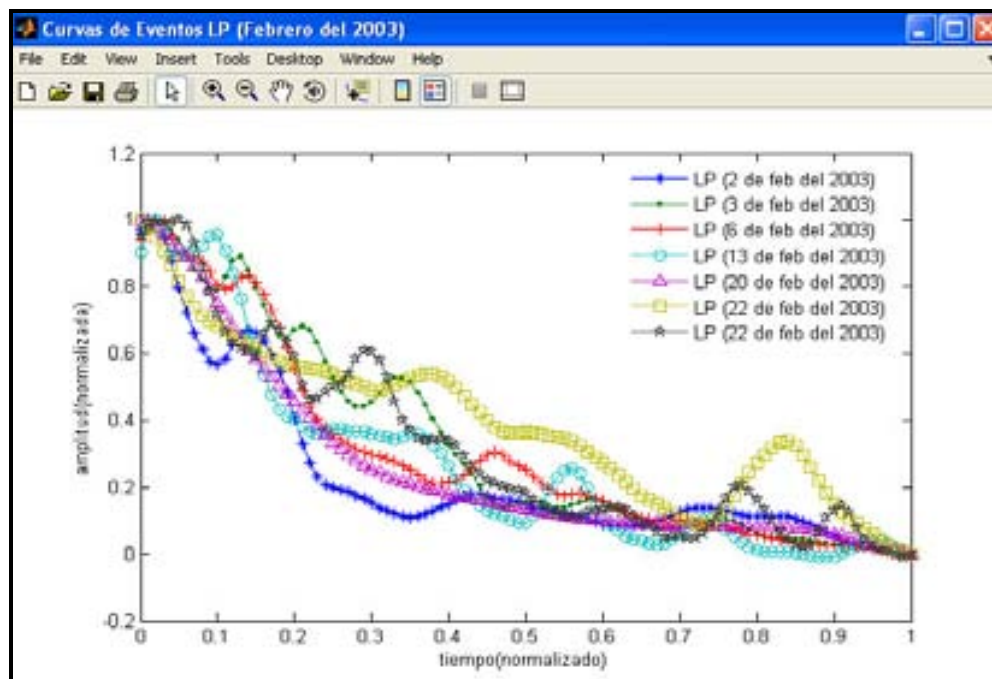
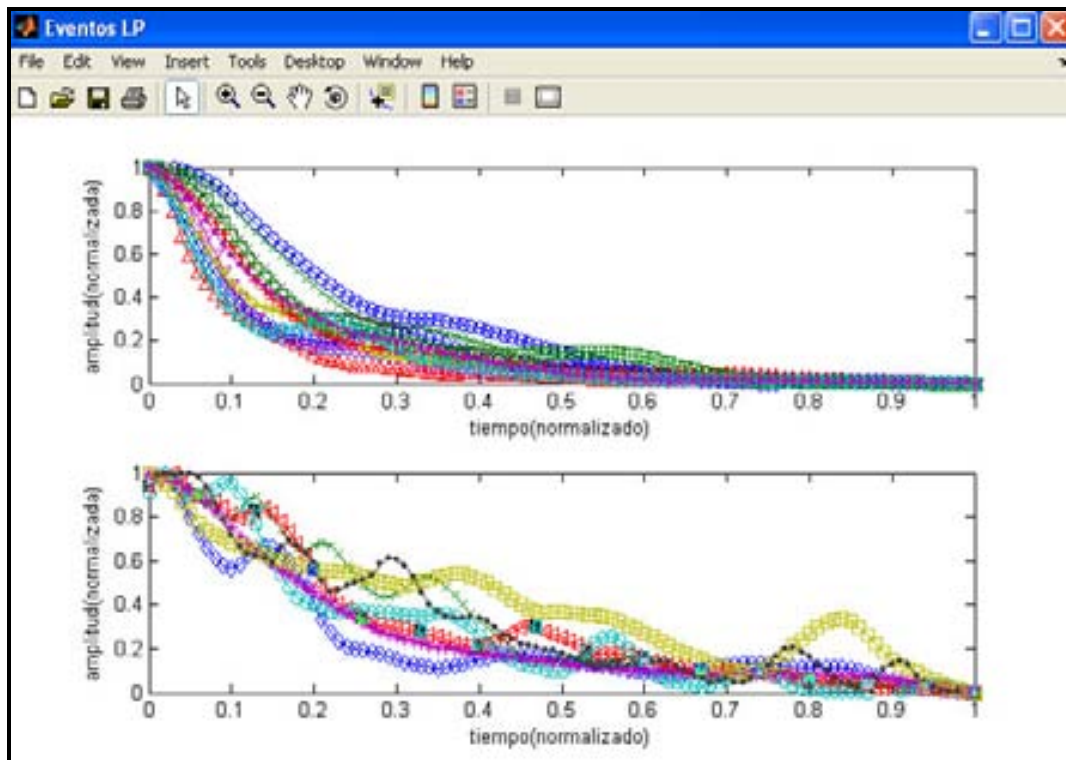


Figura 4.5 Curvas de eventos LP’s registrados en el mes de febrero del 2003.

En la figura 4.6 se presenta un comparativo entre el primer grupo de eventos del apartado 4.2.1 y los eventos del apartado 4.2.2, si bien los dos grupos de eventos presentan diferencias notables, se puede inferir que los patrones obtenidos mediante SISP variaron de acuerdo al estado de actividad del volcán. Así, si el volcán se encuentra en un periodo de baja actividad su curva patrón será como las del apartado 4.2.1 y si el estado de actividad se incrementa entonces las curvas serán como las del apartado 4.2.2.



**Figura 4.6** Comparativo de eventos LP's, la parte superior presenta los eventos de la figura 4.3 y en la parte inferior están los correspondientes a la figura 4.5.

### 4.3 Explosiones

Corresponden a señales impulsivas muy energéticas con duraciones de más de un minuto, acompañadas por la eyección de fragmentos de roca y ceniza a partir del cráter. La presencia de estos eventos se asocia a un incremento de actividad en el volcán Popocatépetl. En la figura 4.8 se agrupan las explosiones más importantes de la Etapa 9 de la actividad del volcán Popocatépetl, en total 19 explosiones, descrita por (González, 2004). Para comenzar se presenta la descripción de esta etapa así como imágenes.

#### 4.3.1 Fase Muy Explosiva (23 de noviembre de 1998 al 3 de enero de 1999):

*“Esta etapa inicia a finales de noviembre de 1998 y se caracteriza por episodios explosivos y tremor armónico, que indican una rápida ascensión del*

*material magmático en el fondo del cráter y subsecuentemente obstrucción de los conductos, sellándolos e incrementando la presión, lo que produce explosiones subsecuentes. Las fechas en que ocurrieron las explosiones más importantes son: 25, 26, 27, 28, 29 y 30 de noviembre, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 15, y 17 de diciembre. Todas estas explosiones estuvieron acompañadas por señales sísmicas fuertes con duración mayor a un minuto”.*

En la figura 4.7 se presentan imágenes correspondientes a algunas de las explosiones ocurridas durante esta etapa explosiva. La imagen del inciso (a) corresponde al 25 de noviembre, la del inciso (b) es del día 28, el inciso (c) es del día 29 y la imagen del inciso (d) es del 30.



4.7 (a)

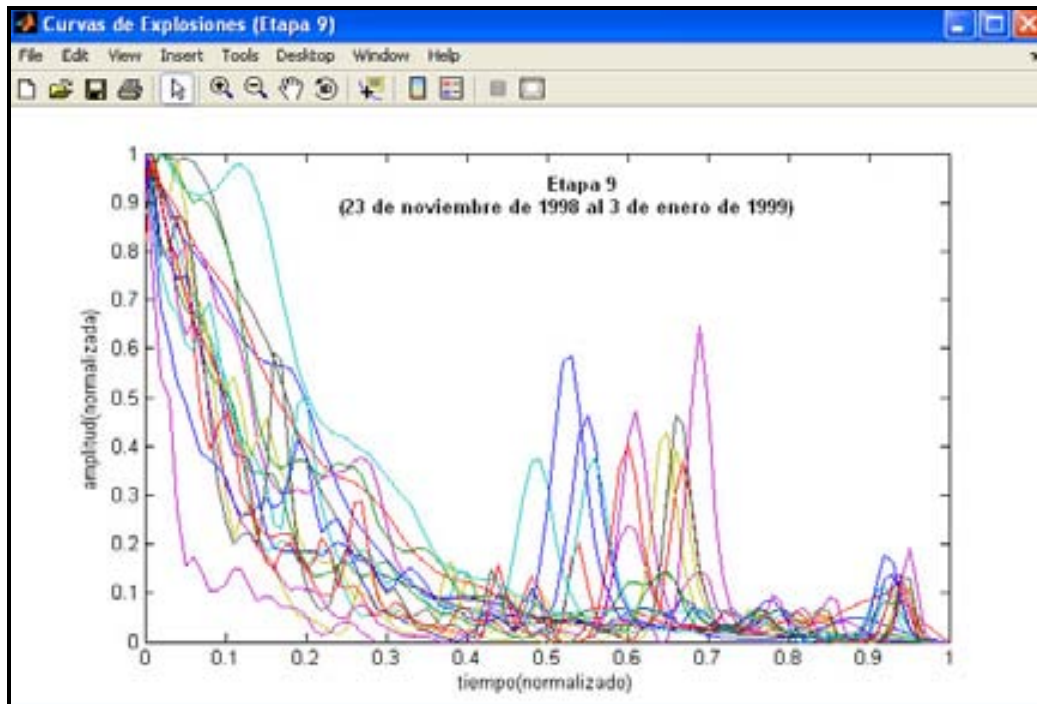


4.7 (b)



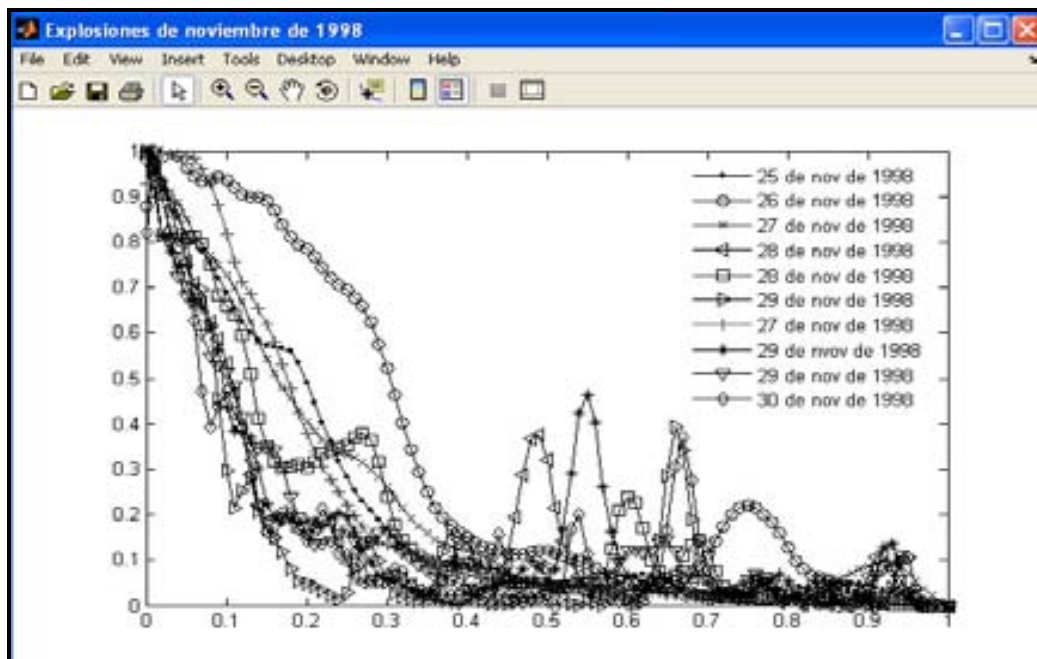
**Figura 4.7.- Imágenes de las explosiones, en las dos inferiores se aprecia la salida de fragmentos**

En las curvas de la figura 4.8 se observa que después de la explosión, en el punto 0.40 se registra el inicio de una señal que se asocian a movimiento de fluidos y finaliza en aproximadamente 0.75.



**Figura 4.8 Explosiones correspondientes a la etapa 9 de la actividad del volcán Popocatépetl.**

Al observar que la amplitud de la señal que precede a la explosión es variable se procedió a realizar una subdivisión de las explosiones, así en la figura 4.9 se muestran las explosiones ocurridas en noviembre.



**Figura 4.9 Las explosiones registradas en noviembre, se graficaron siguiendo su orden de ocurrencia, se consideran del 25 al 30 de noviembre de 1998**

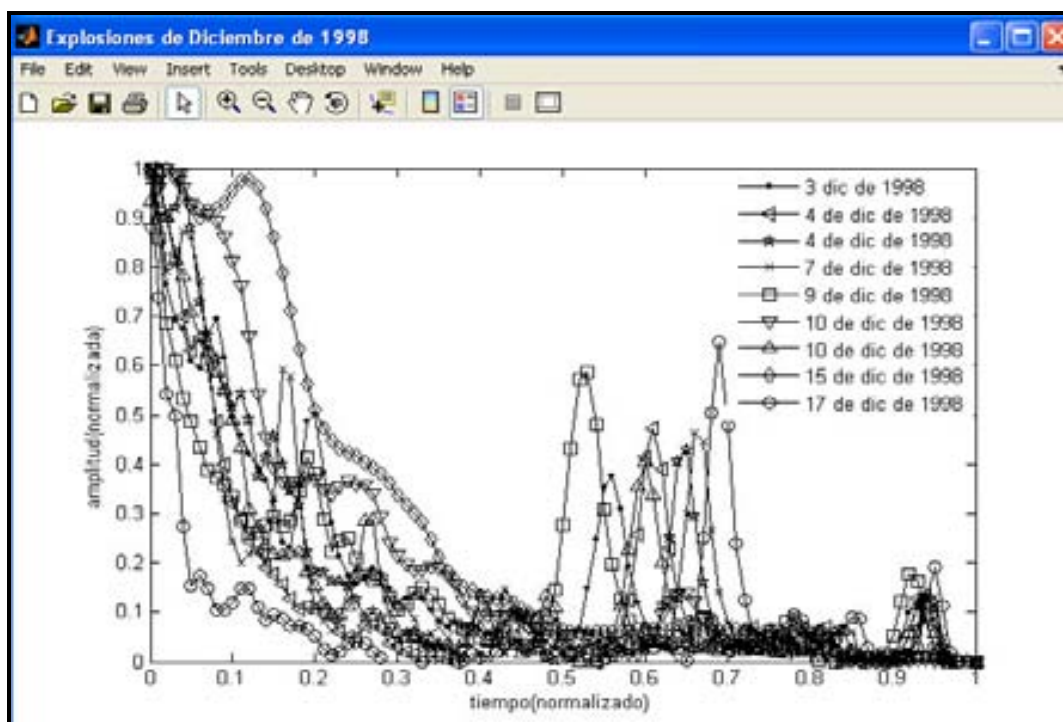
Entre la última explosión del mes de noviembre ocurrida el día 30 y la siguiente registrada el 3 de diciembre, se presentaron señales de tremor. (WWW.CENAPRED:UNAM:MX).

El 1 de diciembre.- Señal de tremor armónico de baja amplitud con duración de 27 minutos.

El 2 de diciembre.- Algunas señales de tremor.

El 3 de diciembre.- Señal persistente de tremor de bajo nivel.

Ahora en la figura 4.10 se presentan las explosiones registradas en el mes de diciembre, a simple vista se nota que las amplitudes de las señales que preceden a la explosión son mayores que las que se registran en el mes de noviembre. Una característica en común entre los eventos de noviembre y diciembre es que la finalización del evento principal se presenta en alrededor de 0.45, este punto corresponde al tiempo. Al parecer el tiempo de duración de las explosiones en esta etapa es el mismo.



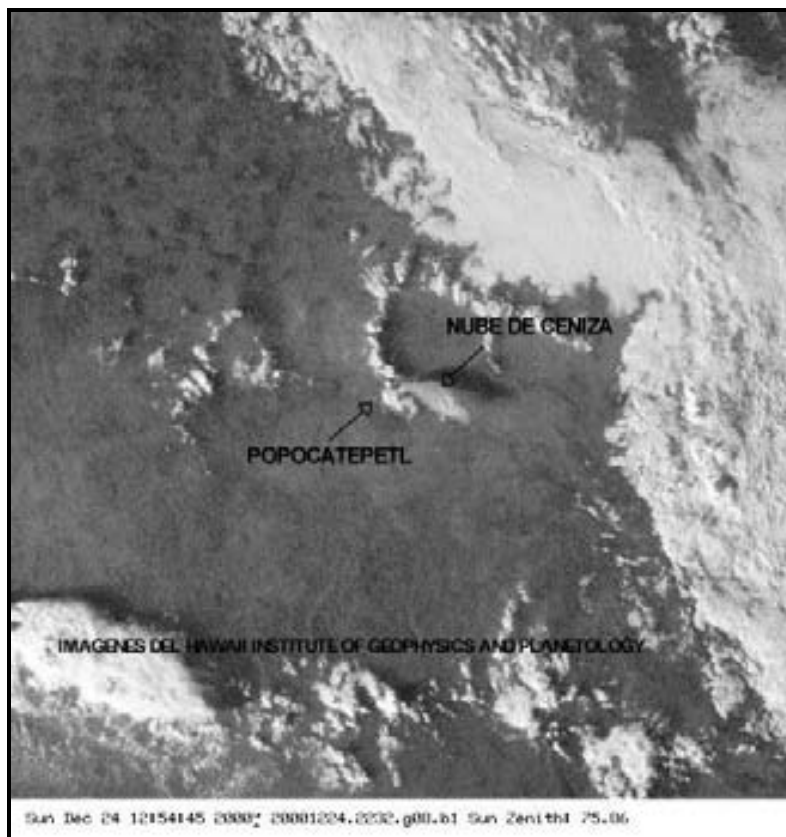
**Figura 4.10 Explosiones registradas en diciembre, se graficaron siguiendo su orden de ocurrencia, se consideran del 3 al 17 de diciembre de 1998.**

La presencia de este tipo de eventos en la actividad del volcán representa el fin de un periodo activo constituido principalmente por eventos de Largo Periodo y episodios de tremor. En este punto nuevamente el criterio de construcción de SISP reconoció los cambios presentes en la misma familia de eventos explosivos, asociados a los cambios que se generan dentro de la actividad del volcán.

Como ya se ha visto las características de los eventos de Largo Periodo y las explosiones están determinadas por la actividad del volcán, por lo que se decidió considerar más eventos explosivos, con dos fines, uno probar SISP y por otro lado identificar diferencias o similitudes entre los eventos de esta familia. Los eventos que se agregaron fueron una explosión del 24 de diciembre del 2000, la explosión del 21 de enero del 2001(cuyo inicio se presenta como evento de Largo Período), la mayor que se ha presentado en el volcán y eventos correspondientes a un periodo comprendido entre febrero y julio del 2003.

#### 4.3.2 Explosión 24 de diciembre del 2000

Durante el año 2000 se registraron pocas explosiones, una de las principales ocurrió el 24 de diciembre del 2000, descrita como una explosión moderada, que generó una columna de ceniza que alcanzó una altura de 5 km sobre el cráter del volcán y arrojó fragmentos incandescentes a una distancia estimada de 3.5 km. La imagen de satélite (figura 4.11) tomada en esa fecha muestra que la columna de ceniza tuvo un desplazamiento con dirección hacia el Sureste.

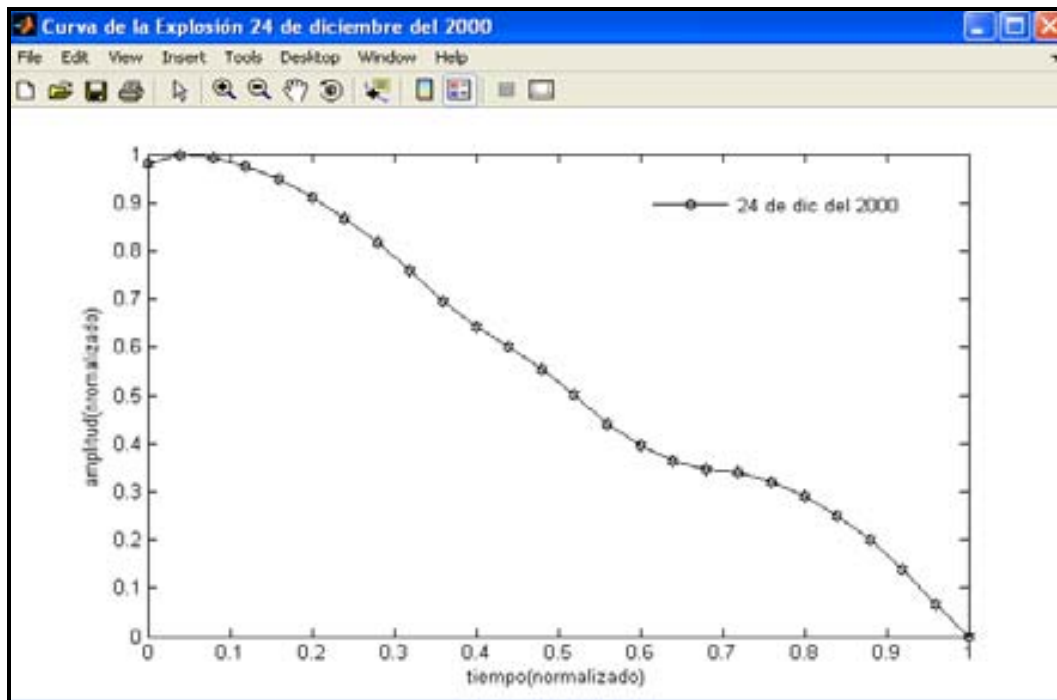


**Figura 4.11 Imagen satelital del Hawaii Institute Of Geophysics and Planetology correspondiente a la explosión del 24 de enero del 2000. Al centro de la imagen se indica la ubicación del volcán Popocatépetl y también la presencia de la columna de ceniza. Fuente : [www.cenapred.unam.mx](http://www.cenapred.unam.mx)**

En la figura 4.12 se presenta la curva característica de la explosión del 24 de diciembre del 2000, obtenida con SISP, en ella se observa que el tiempo de duración del evento es mayor comparado con cualquiera de las curvas de la



Etapa 9, lo mismo pasa con la amplitud. Todos los archivos procesados tienen una duración de 5 minutos lo que da una idea del tamaño de la explosión. Por el tamaño de la explosión, se consideraba que hasta ese momento se había registrado una de las mayores explosiones en el volcán, sin embargo la actividad del volcán continuó aumentando.



*Figura 4.12 En la explosión registrada el 24 de diciembre del 2000 la amplitud y el tiempo de duración son mayores comparadas con las explosiones de la Etapa 9.*

#### 4.3.3 Evento del 22 de enero del 2001

El día 22 de enero a las 15:15 en el volcán inició una exhalación de vapor de agua que alcanzó 1 Km de altura, luego a las 16:15 comenzó una exhalación grande de ceniza, para las 16:23 se incrementó la explosividad de esta emisión lanzando fragmentos y generando flujos de ceniza, denominados flujos piroclásticos, que descendieron por varias de las cañadas del volcán alcanzando distancias estimadas preliminarmente entre 4 y 6 Km, se apreciaron particularmente descendiendo por las barrancas de la cara norte del volcán y también por el flanco Noroeste. A las 16:40 la emisión de ceniza había alcanzado una altura de 8 Km sobre el nivel del cráter. De acuerdo a las características descritas, este evento es el más grande que se ha registrado dentro del período de actividad reciente en el volcán Popocatepetl. Como ya se describió, su inicio comprende eventos de Largo Período (LP), la duración total de la explosión es muy grande con respecto a las ya registradas, por lo que no se incluyó en el apartado, sin embargo el evento LP que produjo la columna de ceniza si se consideró, en la figura 4.13 se presenta su curva característica pudiéndose observar una especie de “joroba” que se asocia a movimiento de fluidos, esta característica también está presente en la figura 3.22.

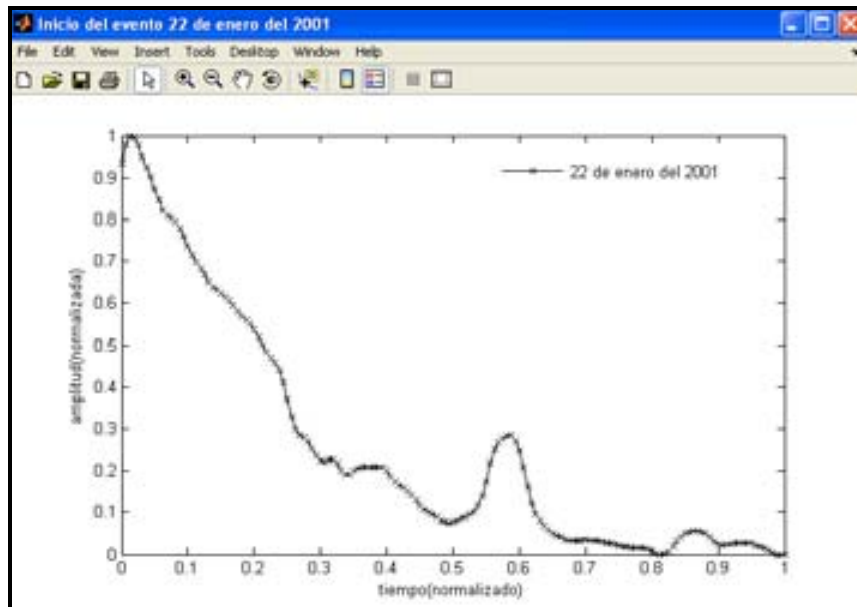


Figura 4.13 Exhalación de ceniza del evento del 22 de enero del 2001.

#### 4.3.4 Periodo Febrero-Julio 2003

Otras explosiones consideradas en este trabajo ocurrieron entre febrero y julio del 2003. Los eventos se presentaron como sigue, dos en febrero los días 4 y 14, cuatro en abril los días 25, 26, 27 y 28 y una en julio el día 19. Previo al comienzo de estas explosiones, el día 2 de diciembre de 2002 se observa la existencia de un pequeño domo de lava de 90 m de diámetro y 40 m de altura aproximadamente, indicado en la fotografía por la flecha en la figura 4.14



Figura 4.14 Fotografía aérea tomada por la SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) en la que se muestra la presencia de un pequeño domo de lava en el cráter del volcán.  
Fuente: [www.cenapred.unam.mx](http://www.cenapred.unam.mx).

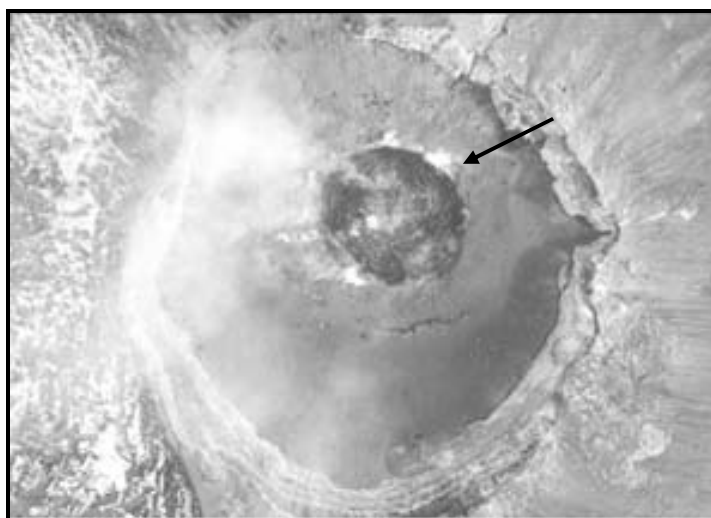
En una fotografía tomada el 11 de diciembre del mismo año por la SCT se comprobó que el domo había incrementado sus dimensiones, ahora tenía 180

m de diámetro y 46 m de altura aproximadamente, como se indica en la figura 4.15.



**Figura 4.15** Fotografía aérea tomada por la SCT muestra la imagen del domo y de la cual se calculan sus nuevas dimensiones comprobando su crecimiento. Fuente: [www.cenapred.unam.mx](http://www.cenapred.unam.mx)

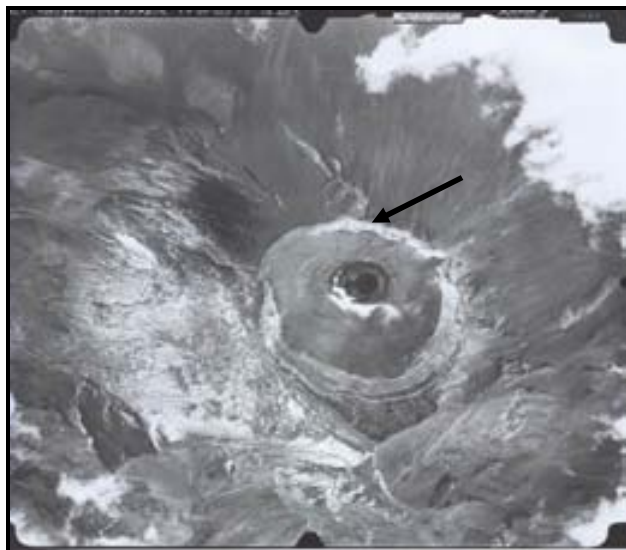
En los días 18 y 23 de diciembre se registró actividad explosiva en el volcán que se relacionó con la destrucción de este domo. Lo anterior se confirma en una fotografía tomada el día 9 de enero por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, donde se observa una subsidencia en el interior del cráter (figura 4.16). El volumen desalojado calculado es de aproximadamente de 500,000 metros cúbicos. (Fuente: [WWW.CENAPRED.UNAM.MX](http://WWW.CENAPRED.UNAM.MX)).



**Figura 4.16** No hay evidencia de un domo de lava [www.cenapred.unam.mx](http://www.cenapred.unam.mx).

Al mismo tiempo, continuaron registrándose episodios de tremor armónico de alta frecuencia y el día 16 de enero se presentó un incremento en la actividad

consistente en un episodio de tremor armónico, similar al registrado el 10 de diciembre del año 2000, con una duración de 6 minutos, la actividad antes descrita se asoció al emplazamiento de un nuevo domo de lava en el interior del cráter. En una fotografía aérea tomada por SCT el día 17 de enero (figura 4.17), se pudo confirmar la presencia de un nuevo domo de lava dentro del cráter del volcán, relacionado con el tremor reportado el día 16 de enero.



**Figura 4.17** Fotografía aérea tomada por la SCT que revela la presencia de un nuevo domo de lava asociado a un episodio de tremor ocurrido el 16 de enero del año 2002. [www.cenapred.unam.mx](http://www.cenapred.unam.mx).

Con la presencia de este domo, el 4 de febrero del año 2003 ocurrió una primera explosión que se relacionó con la destrucción parcial del domo de lava y que lanzó fragmentos incandescentes a una distancia aproximada de 2 Km del cráter, figura 4.18. (Fuente: WWW.CENAPRED.UNAM.MX).



**Figura 4.18** Imagen de la explosión del 4 de febrero del 2003 donde se aprecia la salida de fragmentos incandescentes del cráter y la columna que generó.

La existencia de remanentes del domo en el interior de cráter, mantuvo la probabilidad de próximas explosiones, así continuaron registrándose

exhalaciones de tamaño moderado y episodios de tremor. (Fuente: WWW.CENAPRED.UNAM.MX). Lo expresado se confirma con las imágenes de las figuras 4.19 y 4.20.



**Figura 4.19 (a) Izquierda, imagen de la explosión del 14 de febrero. (b) Derecha imagen de la explosión del 24 de abril del 2003.**

En la explosión del 14 de febrero los fragmentos emitidos provocaron algunos incendios en la zona de pastizales. Después de este evento, que tuvo una duración de 4 minutos en su fase intensa, el volcán regresó a sus niveles previos de actividad (tomado de los reportes diarios del CENAPRED).

A las 20:50 horas del 24 de abril del 2003 se registró una explosión moderada que lanzó fragmentos incandescentes a una distancia estimada entre 1.5 a 2 km alrededor del cráter y generó una columna de ceniza de aproximadamente 2.5 km de altura sobre el cráter, con dirección inicial al Este, (tomado de los reportes diarios del CENAPRED).



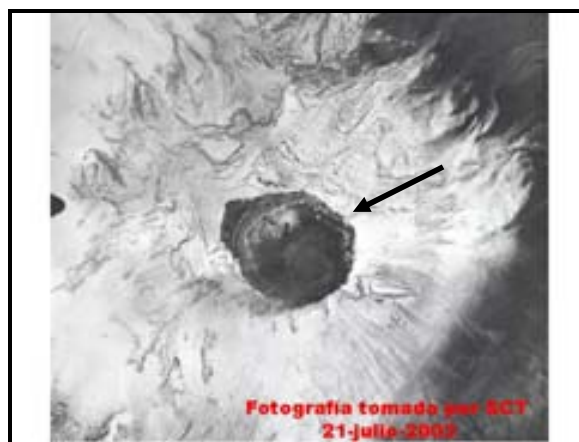
**Figura 4.20 (a) Izquierda, imagen de la explosión del 28 de abril. (b) Derecha, imagen de la explosión del 19 de julio del 2003.**

A las 01:20 h del 28 de abril ocurrió una explosión moderada en el cráter que arrojó fragmentos incandescentes sobre los flancos Este y Noreste del volcán, hasta una distancia aproximada de 800 m, la duración de la fase más intensa de la explosión fue de 40 segundos. Posteriormente, a partir de las 05:12 de

hoy, se registra la presencia de episodios de tremor armónico de amplitud moderada. Otras manifestaciones asociadas a la condición actual son los niveles de bióxido de azufre, y pequeñas deformaciones del edificio volcánico. (Fuente: WWW.CENAPRED.UNAM.MX).

El monitoreo geoquímico realizado entre febrero y abril sugiere un ligero incremento de influencia magmática en las características químicas de los manantiales. Todos estos elementos son consistentes con el ascenso y extrusión de magma a una tasa más alta que las observadas en eventos análogos de este año y finales del año pasado, por lo que es probable la formación de un domo mayor que los observados en los últimos meses, que se estaría formando en el piso del cráter, a poca profundidad con respecto al nivel del labio inferior del mismo. (Fuente: WWW.CENAPRED.UNAM.MX).

El 19 de julio por la mañana se registra otra explosión de moderada intensidad que lanzó fragmentos incandescentes alrededor del cráter, a una distancia estimada de 1 km, la altura de la columna fue estimada en aproximadamente 3 km, esta explosión destruye el domo como se comprueba en la fotografía de la figura 4.21, tomada por la SCT el día 21 del mismo mes. (Fuente: WWW.CENAPRED.UNAM.MX).



**Figura 4.21** La fotografía aérea tomada el 21 de julio por la SCT, no muestra la presencia de un domo de lava externo sobre el piso del cráter, tomado de los reportes diarios del CENAPRED.

Para día 25 del mismo mes se registró una nueva explosión de intensidad moderada en el volcán que probablemente lanzó fragmentos alrededor del cráter, a corta distancia, al momento del evento la nubosidad impidió la visibilidad hacia el volcán. (Fuente: WWW.CENAPRED.UNAM.MX). Después de esta explosión el volcán entró en una etapa de reposo hasta mediados del año 2004.

Los eventos explosivos de este periodo se procesaron con SISF, la figura 4.22 muestra las curvas de los eventos, en la gráfica se puede ver que las explosiones del 4 de febrero y el 19 de julio, presentan similitudes entre sí pero son diferentes con respecto a las demás explosiones. Ambas señales, corresponden al inicio y final de la este periodo explosivo, respectivamente.

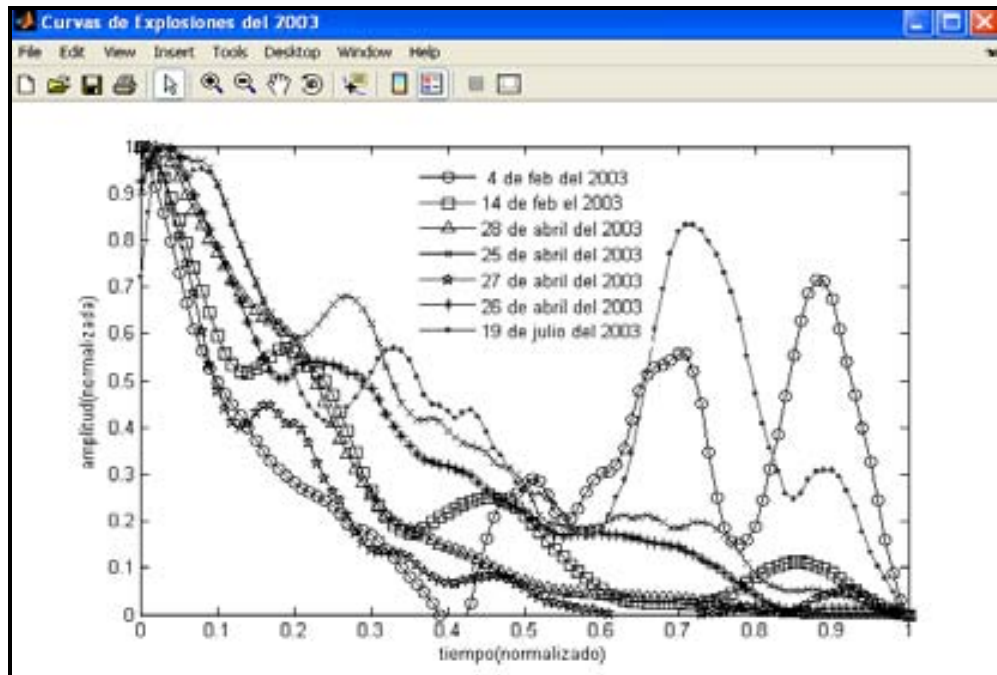


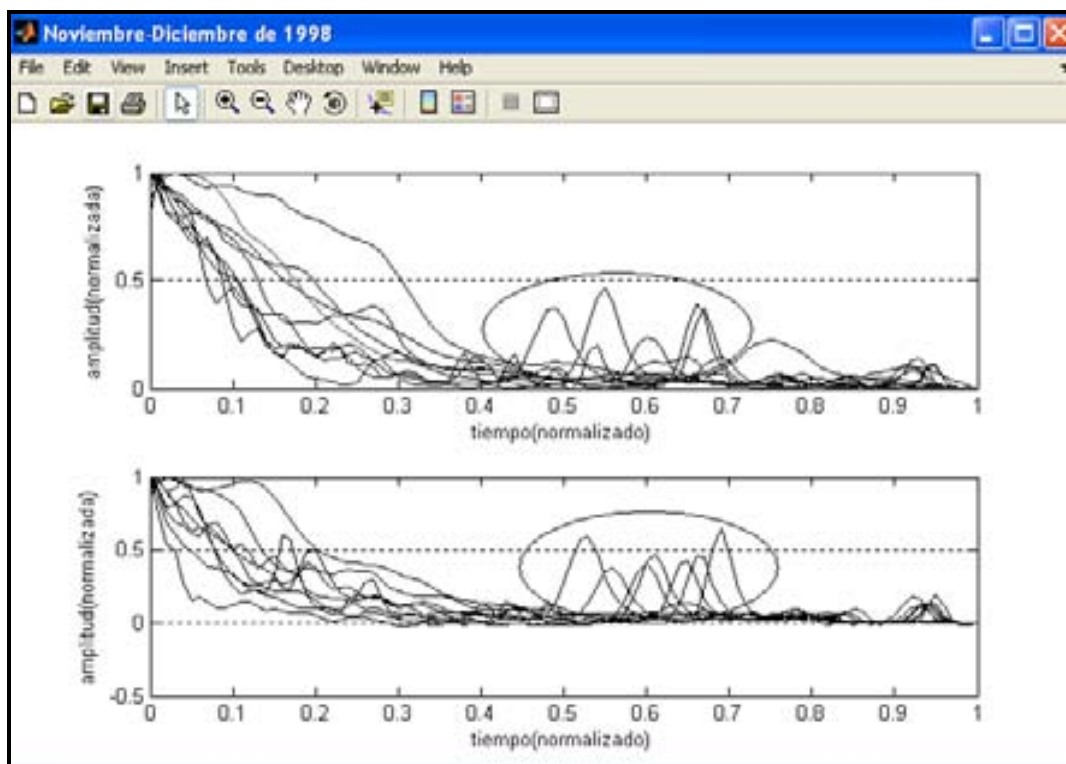
Figura 4.22 Curvas de identificación de las explosiones ocurridas de Febrero-Julio del 2003.

## 4.2 Resultados

### Explosiones Noviembre-Diciembre del 1998 y Febrero-Julio del 2003

#### Observaciones

La mayoría de las curvas correspondientes a las explosiones de noviembre y diciembre de 1998 presentan un decaimiento casi total en el valor 0.4 en el tiempo, seguida por un nuevo incremento en la amplitud de la señal, el cual se asocia a una señal de tremor. Este comportamiento está presente en el mes de noviembre en 6 explosiones, de un total de 10 y para el mes de diciembre son 6 de un total de 9, esto se puede apreciar en la figura 4.23.



**Figura 4.23 Comparativo entre las curvas de noviembre-diciembre de 1998.**

La señal que precede a las explosiones se asocia a una señal de tremor, que como ya se mencionó corresponde a movimiento de fluidos, el hecho de las variación de las amplitudes, menores en noviembre que en diciembre, probablemente tienen que ver con un menor nivel de explosividad y también a que en diciembre, al parecer, había mayor aporte de material. La mayoría de las curvas presentan un decaimiento casi final en 0.8 en el eje del tiempo, la duración total del archivo es de 5 minutos, con respecto a la amplitud.

Ahora las explosiones del 24 de diciembre del 2000 y la del 22 de enero del 2001, son eventos extraordinarios, determinados por la fuerte actividad del volcán, como esto no es frecuente, la curva de cada una de ellas es un patrón único, que servirá de antecedente dentro de la actividad explosiva del volcán.

Teniendo las curvas de las explosiones de nov-dic de 1998 y las del periodo de febrero a julio del 2003 se realizó un comparativo, que se muestra en la figura 4.24, se trazó en cada gráfico una línea media, como referencia para usarse en las amplitudes de las señales. Así, se puede ver que las amplitudes del tremor de dos de las explosiones del periodo febrero-julio del 2003 no presentan un decaimiento que indique la finalización del evento, con lo que se considera que el tamaño de estas explosiones es mayor con respecto a las registradas en nov-dic de 1998.



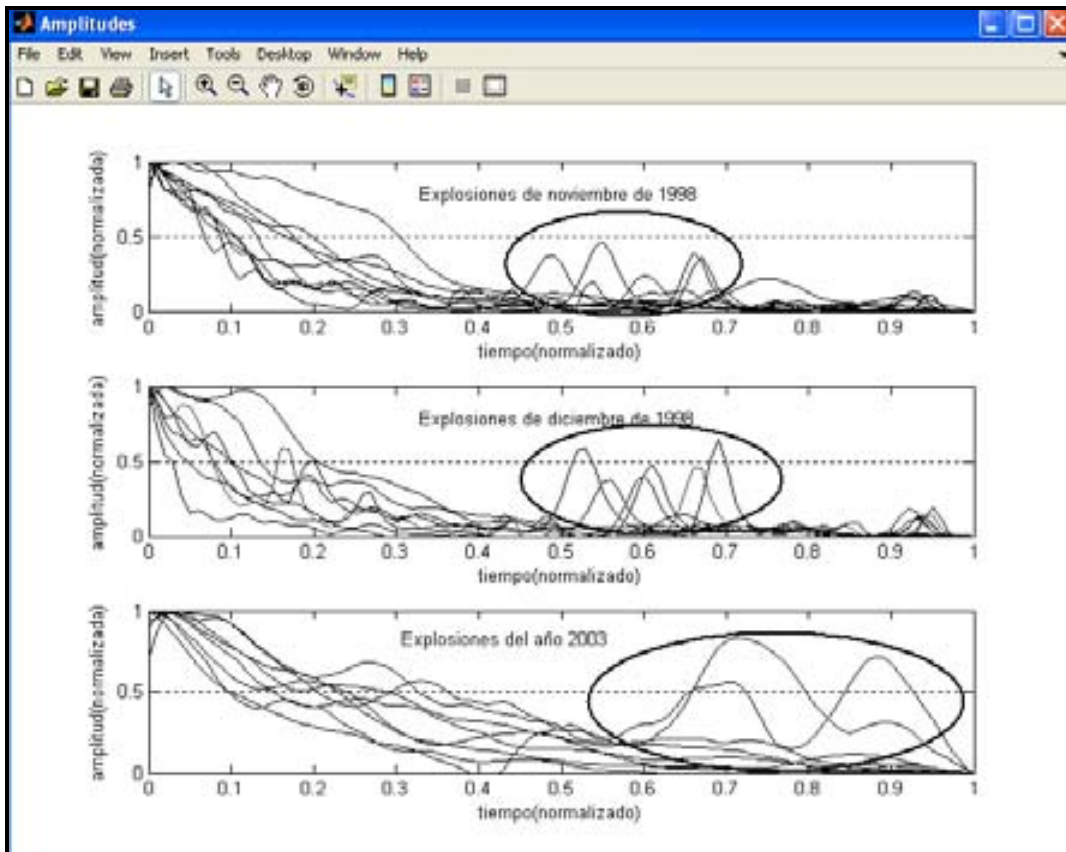


Figura 4.24 Se presentan las curvas de las explosiones y sus señales de tremor,

### Datos estadísticos

En este apartado se realizó un breve análisis estadístico a los tres grupos de curvas de explosiones, utilizando la Desviación Estándar.

La **desviación estándar** es una medida de dispersión para variables de razón (ratio o cociente) y de intervalo. Es una medida (cuadrática) de lo apartado de los datos con respecto a su media, y por tanto, se mide en las mismas unidades que la variable.

Para conocer con detalle un conjunto de datos, no basta con conocer las medidas de tendencia central, sino que necesitamos conocer también la desviación que representan los datos en su distribución, con objeto de tener una visión de los mismos más acorde con la realidad a la hora de describirlos e interpretarlos. La obtención de la desviación estándar se aplicó a los siguientes grupos de explosiones y los resultados se encuentran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1.- Desviación estándar

Grupo de Explosiones	Desviación Estándar
Noviembre de 1998	0.2484
Diciembre de 1998	0.2328
Febrero-Julio 2003	0.2414

Basados en estos valores se observó que el comportamiento de las curvas generadas por las explosiones de Noviembre de 1998 y las de Febrero-Julio del 2003, tienen un valor de distribución muy similar. Por lo que se podría asumir que la naturaleza de actividad explosiva correspondiente de estos grupos tiene características similares.

## 5. Conclusiones

1. El Sistema de Identificación de Señales Sísmicas del volcán Popocatepetl (SISP), sirve como herramienta de análisis para la clasificación sísmica de los eventos asociados a las diferentes etapas de actividad del volcán.
2. La construcción de SISP se basa en elementos de análisis espectral que permiten establecer patrones de las señales sísmicas del volcán Popocatepetl.
3. De acuerdo al análisis realizado a la sismicidad, se encontró que los patrones sísmicos de las familias de volcanotectónicos, de eventos LP y explosiones tienen características que permiten diferenciarlas.
4. Así mismo para el análisis realizado en las familias del inciso 3 se realizó un análisis de tipo cualitativo, que permitieron identificar mejor las diferencias entre las familias analizadas.
5. La sismicidad correspondiente a tremor (armónico y espasmódico) y derrumbes, si bien no fue posible determinar un patrón único que las caracterice, si es posible diferenciarlas de las familias mencionadas en el inciso 3.
6. Del análisis realizado con SISP a las explosiones correspondiente a la Etapa 9 descrita como muy explosiva de la actividad del volcán Popocatepetl, se encontró que existía una menor amplitud en las explosiones ocurridas en noviembre con respecto a las de diciembre, esto se asoció a que la explosividad de noviembre era menor que en diciembre.
7. Los patrones obtenidos de eventos volcanotectónicos empleados en este trabajo, cuya localización abarca 9 sectores del volcán Popocatepetl, ayudaron a establecer que la ubicación del volcanotectónico no influye en su curva característica, y por tanto se puede obtener una curva-patrón para esta familia sísmica.

## REFERENCIAS

Arámbula Mendoza R. (2002). Interpretación del tremor armónico registrado en el volcán Popocatepetl a partir de la crisis de 1994. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería. UNAM.

Arámbula Mendoza R. (2007). Estado de esfuerzos en el volcán Popocatepetl obtenidos con mecanismos focales, en el período de actividad de 1996 a 2003. Tesis de Maestría. Instituto de Geofísica. UNAM.

Arciniega Ceballos M. A. (2002). Análisis de datos sísmicos de banda ancha registrados en el volcán Popocatepetl, México. Tesis de Doctorado. Instituto de Geofísica. UNAM.

Banfill R., 'A Collection of Tools for Routine Processing of Seismic Data Stored in the Seismic Unified Data System for DOS (PC-SUDS).

Banks G., Tilling I. R., Harlow H. D., Ewert W. J. (1989). Vigilancia volcánica y pronóstico a corto plazo 2-3 julio de 1993. Santa Fe. Nuevo México. E.U. Editor Tilling R. I. WOVO, pp. 51-82.

Barbieri F. B. Andi P. P (1992). A review on phreatic eruptions and their precursors. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol 52. pp 231-246.

Benítez, C. J. (2006). CONTINUOUS HMM-BASED VOLCANO MONITORING AT DECEPTION ISLAND, ANTARCTICA. Ramírez, J. C. Segura, A. Rubio, Dept. Signal Theory, Networking and Communications. University of Granada. Spain.

Benoit, J. P. and S. R. McNutt, Global volcanic earthquake swarm database and preliminary analysis of volcanic earthquake swarm duration, *Annali de Geofisica*, 39, 221-229, 1996.

Brandsdóttir B., Einarsson P. (1992). Volcanic tremor and low-frequency earthquakes in Iceland. In Gasparini, P., Scarpa, R., Aki, K. (Eds.). *Volcanic Seismology*. IAVCEI. Proc. Volcanol. 3. pp 212-222.

Chouet B. (1985). Excitation of a buried magmatic pipe: a seismic source model for volcanic tremor. *Journal of Geophysical Research*. Vol.90. no B2. pp 1881-1893.

Chouet B. (1996). Long periodo volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting. *Nature*. Vol 380. pp 309-316.

Cooley and Turkey, 1965. J.W. Cooley and J.W. Turkey, An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Math. Comput.* **19** (1965), pp. 297-301.

De la Rosa Moreno F. (2002). Análisis de patrones sísmicos asociados a exhalaciones y explosiones del volcán Popocatepetl. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería. UNAM.

Earthworm.(1993). Geological Survey, Earthquake Hazards Team (USGS, EHZ). Carl Johnson.

Ferrazzini and Aki, 1992. Ferrazzini, V., Aki, K., 1992. Preliminary results from a field experiment on volcanic events at Kilauea using an array of digital seismographs. In: In: Gasparini, P., Scarpa, R., Aki, K. (Eds.), Volcanic Seismology. IAVCEI Proc. Volcanol. 3, 168–189.

Gasperini et al., 1992 P. Gasperini, D. Yuen and R. Sabadini, Postglacial rebound with a non-Newtonian upper mantle and a Newtonian lower mantle rheology, Geophys. Res. Lett. 19 (1992), pp. 1711–1714.

González Pomposo G. J. (2004). Análisis de la sismicidad asociada a la actividad del volcán Popocatepetl y determinación de su estructura por medio de tomografía sísmica. Tesis de Doctorado. Instituto de Geofísica. UNAM.

Elaboración de Mapas de Peligros Volcánicos. Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Fenómenos Geológicos. Serie Atlas Nacional de Riesgos. CENAPRED (noviembre de 2006)

Gutiérrez, L.A. (2006), Ramírez, J., Benítez C., HMM-based classification of seismic events recorded at Stromboli and Etna Volcanoes, Dept. Signal Theory Networking and Communications, University of Granada, Granada, Spain.

Havskov, J.J., De la Cruz-Reyna, S., Krishna, S. S. Medina-Martínez, F., Gutiérrez-Martínez, C. (1983). Actividad sísmica relacionada con las erupciones del volcán Chichonal en marzo-abril de 1982; Chiapas. El Volcán Chichonal. Editado por el Instituto de Geología. UNAM. pp.36-48.

Hidden Markov Model (Leonard E. Baum and other authors in the second half of the 1960s).

Ibáñez J. M. (2000) Sismicidad Volcánica. Instituto Andaluz de Geofísica. Universidad de Granada, España.

Ibáñez J. M. (2006). CONTINUOUS HMM-BASED VOLCANO MONITORING AT DECEPTION ISLAND, ANTARTICA. J. Almendros, A. García-Yeguas, Instituto Andaluz de Geofísica. Universidad de Granada, España.

Ibáñez J. M. (2006). HMM-based classification of seismic events recorded at Stromboli and Etna Volcanoes, J. Almendros, A. García-Yeguas, Instituto Andaluz de Geofísica. Universidad de Granada, España.

Lahr, J. C., Chouet, B. A., Stephens, C.D., Power, J. A. Page, R. A. (1994). Earthquakes classifications, location, and error analysis in a volcanic environment: implications for the magmatic systems of the 1989-1990 eruptions at Reboudt volcano, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. 62. No. 1-4. pp. 137-151.

Langer H. (2003), Falsaperla and G. Thompson , Automatic Identification of Seismic Transients Recorded on Soufriere Hills Volcano, Montserrat, S. INGV, Sez. Catania, Italy.

Lienert, B. R., Berg, E., Frazer, L. N. (1986). HYPOCENTER : An earthquake location method using centered, scale and adaptively damped least squares. *Bulletin Seismological Society American*. Vol. 76. pp. 771-783.

Martínez B. Alicia. "Atenuación de las Ondas Coda en el Volcán Popocatépetl", UNAM, Master. Sc., September, 1998.

Martínez B. Alicia. Temporal variations of  $Q_c^{-1}$  and  $b$ -values associated to the volcanic activity at the Popocatepetl volcano, Mexico. Tesis Doctoral. Instituto de Geofísica. UNAM.

McNutt S. R. (1994). Volcanic tremor amplitud correlated with eruption explosivity and its potencial use in determining ash hazard to aviation. *Volcanic ash and aviation safety: Proceedings of the First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety*. U.S. Geological Survey Bulletin 2047. pp 377-385.

McNutt S. R.(1996) Seismics monitoring and eruption forecasting of volcanoes: a review of the State-of-the-Art and case histories. *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. Scarpa R., Tilling R. I. Ed. Springer. Alemania. pp 99-146.

McNutt S. R. Seismic Monitoring. (2000). *Encyclopedia of volcanoes*. Academic Press. pp 1095-1120.

Minakami, T. (1974). *Seismology of volcanoes in Japan*. L. Civetta, P. Gasperini, G. Luongo and A. Rapolla (Editors). *Physical Volcanology*. Vol. 6. Elsevier. Amsterdam, pp 1-27.

Newhall, C.G., Self,S. (1982). The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 87 C2. pp 1231-1238.

Ohrnberger, M. (2001). *Continuous Automatic Classification Of Seismic Signals Of Volcanic Origin at Mt. Merapi, Java, Indonesia*. Universidad de Postdam. Alemania.

Peña J. (2001). *Espectrogramas basados en funciones de Wavelets*. Depto de Vulcanología, Museo Nacional de Ciencias Naturales. CSIC. Madrid. España.

Pérez Campos N. (2001). Difusión rectificada en el volcán Popocatepetl debido al sismo de Mw = 7.0 del 15 de junio de 1999. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería. UNAM.

Power J. A., Lahr J. C., Page R. A., Chouet B. A., Stephens C.D., Harlow D. H., Murray T. L., Davies J. N. (1994). Seismics evolutions of the 1989-1990 eruptions sequence of Redoubt Volcano, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol 62. pp 69-94.

Quaas, R. González, E. Guevara, E. Ramos and S. De la Cruz, (1995). Monitoreo Volcánico, Instrumentación y Métodos de Vigilancia, *Volcán Popocatepetl, Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994-1995*, CENAPRED-UNAM, México, D.F. (1995), pp. 25-76.

Rowe Charlotte. (2005): SOUFRIÈRE HILLS VOLCANO - TEN YEARS ON SCIENTIFIC CONFERENCE. MONSERRAT.

Siebe C., Abrams M. and Macías J.L., (1995) Derrumbes gigantes, depósitos de avalancha de escombros y edad del actual cono del Volcán Popocatepetl, *Volcán Popocatepetl, Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994-1995*, CENAPRED-UNAM, México, D.F (1995), pp. 195-220.

Siebe et al., 1996 C. Siebe, M. Abrams, J.L. Macías and J. Obenholzner, Repeated volcanic disasters in Prehispanic time at Popocatepetl, Central Mexico: past key to the future?, *Geology* **24** (1996), pp. 399-402.

Siebert L., Calvin C., Kimberly P., Luhr J.F and Kysar G. 2003, *Volcanoes Of México*, V 10. Smithsonian Institution, Global Volcanism Program. Digital Information Series. G VP-6.

Stephens C. D., Chouet B. A. , Page R. A. , Lahr J. C. <sup>(1)</sup> ; Power J. A. (1995) Seismological aspects of the 1989-1990 eruptions at Redoubt Volcano, Alaska: the SSAM perspective. Vol. 62, n° 1-4 (17 ref.), pp. 153-182.

Tilling, R. I. Volcanic hazard. World Organization of Volcano Observatories, Division of Earth Sciences (UNESCO). Office of Foreign Disaster Assistance (U.S. Agency for International Development) y U.S Geological Survey, N.Y.

USGS. U.S Geological Survey.

Valdés-González, C., Sismicidad del volcán Popocatepetl, CENAPRED, pp. 130.

Valdés-González, C., González-Pomposo, G. J., Martínez-Bringas, A. (en preparación). Seismicity associated with the december 1994 – december 2003 eruptive activity of Popocatepetl volcano, México: Insight into physical processes.

Waitz, P. (1921). Popocatepetl again in activity. *Am. Journal of Science* 5<sup>th</sup> Ser. Vol.1.pp 81-85.

[WWW.CENAPRED.UNAM.MX](http://WWW.CENAPRED.UNAM.MX)