



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS ESPECTRAL DEL TREMOR VOLCÁNICO
DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL DEL PERÍODO DE
ENERO DE 1999 A JUNIO DE 2003 Y SU CORRELACIÓN
CON OTROS EVENTOS SÍSMICOS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A:

GEMA VICTORIA
CABALLERO JIMÉNEZ

DIRECTOR DE TESIS:
Dr. Carlos Valdés González



Ciudad Universitaria

Noviembre 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIA

**A MI MAMÁ TERESA,
A MI HERMANO MAXIMILIANO
Y A MI ABUELITO JUAN JIMÉNEZ
TREJO†**

AGRADECIMIENTOS

AGRADEZCO A DIOS POR DEJARME EXISTIR.

A MIS PAPÁS PERO SOBRETUDO A MAMÁ POR DARME LA VIDA Y LUCHAR POR MI, POR APOYARME Y ESTAR SIEMPRE A MI LADO Y SOBRETUDO POR ENSEÑARME A LUCHAR POR LO QUE QUIERO. A MI HERMANO MAX POR APOYARME INCONDICIONALMENTE Y ESTAR SIEMPRE. A MAMÁ AURIA, A MIS TÍAS Y TÍOS ANGELICA, AURIA, MARU, GLORIA, BLANCA, JUAN, DAMIAN Y LALO POR ECHARME PORRAS PARA SEGUIR ADELANTE. A MIS PRIMOS DAMIAN, LUIS, ALEJANDRO, FRAN, MANOLO, GAROS, VALE, BRENDA, PAULA, MANUEL DAVID, GAEL, CARLOS Y CAMI POR DARME MOMENTOS DE ALEGRIA Y FELICIDAD.

A MI TUTOR CARLOS VALDÉS POR LA OPORTUNIDAD DE CONOCERLO, SU PACIENCIA Y ENSEÑANZA A LO LARGO DE ESTE TRABAJO, POR TODA LA CONFIANZA Y APOYO QUE ME HA BRINDADO.

A LA DRA. ALICIA MARTÍNEZ BRINGAS POR SU AMISTAD, TODO EL APOYO Y LA PACIENCIA QUE ME TUVO DURANTE MI ESTANCIA EN CENAPRED.

A MIS AMIGAS ADRIANA SERNA, IZA, ARANZAZÚ, PAOLA, MIROS, CHAYO, PAULINA Y PAM POR COMPARTIR LOS DIAS DE ESCUELA Y HACER MAS AMENA ESTA CARRERA.

A MIS COMPAÑEROS DEL SERVICIO DE GUARDIAS ADRIANA, JONATÁN, AARON Y LEO POR TODO SU APOYO Y ENSEÑANZA DURANTE MI ENTRENAMIENTO.

A MIS AMIGOS ONCHE, ADRIANA, ABEL, LULU Y LEETCH POR TODO SU APOYO SIEMPRE Y LOS MOMENTOS DE DISTRACCION QUE PASAMOS JUNTOS.

AL ING. ANGEL GÓMEZ, TEOFILLO HERNÁNDEZ, ANA MARIA ALARCON Y ANDRES RAMÍREZ POR ENSEÑARME COSAS NUEVAS TANTO LABORALES COMO PERSONALES.

A LA DRA. GRACIELA ZAPATA, ULISES, ISRAEL, ITZEL E ISABEL POR LA AMISTAD Y APOYARME EN ESTOS ÚLTIMOS MESES.

FINALMENTE AGRADEZCO AL CENAPRED POR LOS DATOS PROPORCIONADOS ASÍ COMO POR MANTENER EL BUEN FUNCIONAMIENTO DE LAS ESTACIONES SÍSMICAS YA QUE SIN ESTO NO HABRIA PODIDO REALIZAR ESTE TRABAJO.

ÍNDICE GENERAL

	Pag.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
RESUMEN	ix
INTRODUCCIÓN	x
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	1
1.1 Ubicación	1
1.2 Geología	2
1.3 Actividad eruptiva	4
CAPÍTULO 2. MONITOREO Y ACTIVIDAD SÍSMICA DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL	8
2.1 Monitoreo del volcán Popocatépetl	8
2.1.1 Monitoreo Visual	9
2.1.2 Monitoreo Geoquímico	10
2.1.3 Monitoreo Geodésico	12
2.1.4 Monitoreo sísmico	13
2.2 Actividad sísmica en el volcán Popocatépetl	15
2.2.1 Eventos Volcano-Tectónicos	16
2.2.2 Eventos de largo periodo	17
2.2.3 Eventos híbridos	18
2.2.4 Explosiones	18
2.2.5 Tremor volcánico	19
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS EPISODIOS DE TREMOR	22
3.1 Elección de los datos	22
3.2 Procesado	24

CAPÍTULO 4. RESULTADOS	33
4.1 Amplitud y Frecuencia Dominante de los eventos de Tremor	33
4.1.1 Amplitud	33
4.1.2 Frecuencia dominante	35
4.1.3 Variación en la frecuencia de los sobretonos	38
4.2 Eventos VT	39
4.3 Eventos LP	41
4.4 Explosiones	43
4.5 Exhalaciones...	45
4.6 Domos	46
CAPÍTULO 5. CORRELACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS EPISODIOS DE TREMOR	48
5.1 Tremor y Niveles de Boro	48
5.2 Tremor y Eventos LP	51
5.3 Tremor y Eventos VT	52
5.4 Tremor, Exhalaciones y Explosiones	53
5.5 Variación de la frecuencia fundamental y sus armónicos de los episodios de tremor	54
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	56
6.1 Conclusiones	56
6.2 Recomendaciones	57
REFERENCIAS	58

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pag.
Figura 1.1	Ubicación del volcán Popocatepetl. a) Tomada de Lermo-Samaniego b) tomada de http://maps.google.com.mx/	1
Figura 1.2	Geología del volcán Popocatepetl. Tomado de Del Pozo et al., 2002	3
Figura 2.1	Ubicación de los manantiales en el volcán Popocatepetl. Tomado de Amienta et al., 2007.	10
Figura 2.2	Red de monitoreo del Volcán Popocatepetl	13
Figura 2.3	Evento volcano-tectónico registrado el 18 de agosto de 2002 a las 16:33 hrs.	15
Figura 2.4	Evento de largo periodo registrado el 16 de agosto del 2002 a las 00:02 horas.	16
Figura 2.5	Explosión registrada en el volcán Popocatepetl el día 9 de marzo a las 01:30 horas.	18
Figura 2.6	Segmento de tremor armónico registrado en el volcán Popocatepetl el día 16 de diciembre del 2000 a las 12:28 horas	20
Figura 3.1	Segmento de tremor armónico registrado el 30 de enero de 1999 por la estación Chiquipixtle en su componente este (PPXE).	26
Figura 3.2	Segmento de tremor armónico registrado el 30 de enero de 1999 por la estación Canario en su componente este (PPPE).	27
Figura 3.3	Segmento de tremor registrado el 1° de marzo de 1999 por la estación Canario en su componente este (PPPE).	27
Figura 3.4	Segmento de tremor registrado el 1° de marzo de 1999 por la estación Chiquipixtle en su componente este (PPXE).	28
Figura 3.5	Segmento de tremor registrado el 1° de marzo de 1999 por la estación Chiquipixtle en su componente vertical (PPXV)	28
Figura 3.6	Segmento de tremor registrado el 15 de diciembre del 2000 por la estación Canario en su componente este (PPPE).	29
Figura 3.7	Segmento de tremor registrado el 15 de diciembre del 2000	29

	por la estación Chiquipixtle en su componente este (PPXE).	
Figura 3.8	Segmento de tremor registrado el 15 de diciembre del 2000 por la estación Canario en su componente norte (PPPN).	30
Figura 3.9	Segmento de tremor registrado el 15 de diciembre del 2000 por la estación Canario en su componente vertical (PPPV).	30
Figura 3.10	Segmento de tremor registrado el 15 de diciembre del 2000 por la estación Chiquipixtle en su componente norte (PPXN).	31
Figura 3.11	Segmento de tremor registrado el 15 de diciembre del 2000 por la estación Chiquipixtle en su componente vertical (PPXV).	31
Figura 4.1	Gráfica del número de eventos por intervalos de amplitud (pico a pico).	33
Figura 4.2	Porcentaje de los eventos que se encuentran en los rangos por intervalos de amplitud (pico a pico).	33
Figura 4.3	Gráfica del contenido de frecuencias en la componente E-W de los episodios de tremor registrados en las estaciones de Canario (PPP) y Chiquipixtle (PPX).	34
Figura 4.4	Gráfica del contenido de frecuencias en la componente N-S de los episodios de tremor registrados en las estaciones de Canario (PPP) y Chiquipixtle (PPX).	35
Figura 4.5	Gráfica del contenido de frecuencias en la componente Z de los episodios de tremor registrados en las estaciones de Canario (PPP) y Chiquipixtle (PPX).	36
Figura 4.6	Número de eventos por intervalos de frecuencias.	36
Figura 4.7	Segmento de tremor armónico registrado en la estación Chiquipixtle el día 09 de marzo de 2002 a las 01:30 horas.	37
Figura 4.8	Segmento del episodio de tremor registrado el 14 de marzo de 2001 en la estación canario en su componente vertical. Los sobretonos están espaciados a 1 Hz aproximadamente.	38
Figura 4.9	Gráfica de eventos volcano-tectónicos por día. El triángulo indica que el 16 de junio de 1999 se registraron 32 eventos VT's.	39
Figura 4.10	Gráfica de profundidad de los eventos VT's.	40
Figura 4.11	Número de eventos LP por día	42

Figura 4.12	Explosión registrada el día 19 de diciembre del 2000 a las 06:56 hrs. Imagen tomada de www.cenapred.unam.mx .	44
Figura 4.13	Exhalación registrada el día 14 de marzo de 2001 a las 17:25 hrs. Imagen tomada de www.cenapred.unam.mx	45
Figura 4.14	Fotografía de domo en el cráter del volcán tomada el 11 de diciembre del 2002 por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Imagen tomada de www.cenapred.unam.mx	46
Figura 5.1	Gráfica de las frecuencias principales de los episodios de tremor (en medio), profundidad y magnitud de los eventos volcanotectónicos (abajo), número de eventos LP por día y niveles de boro registrados en los manantiales (arriba), (E) Exhalaciones mayores a 2 km, (e) Exhalaciones menores a 2 km y (D) Domos.	49

ÍNDICE DE TABLAS

		PAG.
Tabla 1.1	Historia de la actividad del Volcán Popocatepetl. Tomada de www.cenapred.unam.mx . Las letras significan: (a) Años atrás, (b) Antes de Cristo y (c) Después de Cristo.	5
Tabla 1.2	Actividad del volcán Popocatepetl de 1992 a 2003 (Arámbula, 2007).	6
Tabla 3.1	Días en que se registraron eventos de tremor y su duración. (Datos tomados de los sismogramas en papel de periodo corto, CENAPRED).	22
Tabla 4.1	Días en que se registraron eventos de tremor con amplitudes de más de 1000 cuentas en las estaciones de Canario (PPP) y Chiquipixtle (PPX). (Datos obtenidos de los registros de banda ancha, CENAPRED).	32
Tabla 4.2	Número de eventos volcano-tectónicos registrados por mes. (Datos proporcionados por la Dra. Alicia Martínez Bringas, CENAPRED)	39
Tabla 4.3	Número de eventos LP registrados mensualmente (CENAPRED).	41
Tabla 4.4	Días en que el CENAPRED reporto explosiones.	43
Tabla 4.5	Fechas en que se reporta emplazamiento de domo en el cráter del volcán. (Datos proporcionados por el Ing. Ángel Gómez Vázquez, CENAPRED)	46

RESUMEN

El volcán Popocatépetl es de los principales volcanes activos de nuestro país. Desde su reactivación, en 1994, ha estado en constante monitoreo y se han desarrollado diversos trabajos con el fin de entender mejor el comportamiento dentro y fuera de éste.

El presente trabajo tiene como objetivo el análisis espectral (frecuencias fundamentales y sobretonos) de los episodios de tremor armónico (de enero de 1999 a junio de 2003) y su correlación con eventos sísmicos, tales como: eventos volcánico-tectónicos (VT), eventos de largo periodo (LP), explosiones, exhalaciones y formación de domos, así como también lecturas de los niveles de boro en los manantiales cercanos al volcán. Esto para entender el estado interno del volcán, determinar si se acerca una actividad eruptiva importante y así poder tomar decisiones oportunas para mitigar el riesgo a la población que vive a sus alrededores.

Para el análisis espectral del tremor, se utilizó el programa Seismo_Volcanoanalysis desarrollado por François Auger, Olivier Lemoine, Paulo Gonçalvès y Patrick Flandrin bajo los derechos del Centro Nacional de Investigación Científica de Francia y en colaboración con el Instituto de Geofísica de la UNAM.

Se analizaron 78 episodios de tremor (el 95% es tremor armónico), una vez obtenidas las frecuencias fundamentales se hizo una correlación con los eventos antes mencionados y se encontró que: El contenido de frecuencias predomina en la banda de 0.5 y 3 Hz.

INTRODUCCIÓN

El Volcán Popocatépetl es el segundo volcán más activo del país, alrededor de éste viven más de 20 millones de personas, debido a su cercanía con la Cd. de México, por ello es de vital importancia un monitoreo adecuado de la actividad del mismo, ya que en un evento eruptivo podemos tener grandes pérdidas humanas.

En el primer capítulo se presenta la ubicación del volcán, se menciona el aspecto geológico de donde se encuentra el volcán y se da una breve descripción de su actividad eruptiva desde la destrucción del edificio volcánico conocido como Nexpayantla, hasta su reactivación 1994.

Las diferentes técnicas de vigilancia y monitoreo llevadas a cabo en el volcán Popocatépetl, se describen brevemente en el capítulo 2. Así mismo se presentan las señales sísmicas que se registran por los instrumentos de monitoreo sísmico instalado en el edificio volcánico, de estas se da una breve descripción de sus características.

En el capítulo 3 se describe el modo en que se procesaron las señales de tremor en el programa Seismo_Volcananalysis, el cual fue desarrollado por François Auger, Olivier Lemoine, Paulo Gonçalvès y Patrick Flandrin bajo los derechos del Centro Nacional de Investigación Científica de Francia (CNRS, Centre National de la Recherche Scientifique of France) y en colaboración con el Instituto de Geofísica de la UNAM.

Para el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos en cuanto al contenido de frecuencias de los episodios de tremor, así como de los sobretonos. También se grafican la ocurrencia de eventos VT, LP, explosiones, exhalaciones, domos y niveles de boro, todos estos registrados durante el periodo de estudio (de enero de 1999 a junio de 2003).

En el capítulo 5 se hace la correlación de las frecuencias fundamentales de los episodios de tremor con las distintas señales sísmicas presentes en el volcán y con una parte geoquímica (niveles de boro).

Finalmente en el capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones desprendidas del presente trabajo.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

1.1 Ubicación

El volcán Popocatepetl es un Estratovolcán andésítico- dacítico. Se ubica en la faja Volcánica Transmexicana, la cima del volcán se localiza en las coordenadas geográficas 19° 02´ N, 98° 62´ W a 55 Km al sureste de la ciudad de México y a 45 Km al oeste de la ciudad de Puebla, su edificio volcánico alcanza un área de 500 Km² y abarca los estados de Puebla, Morelos y Estado de México (ver Figura 1.1). Su cráter presenta forma elíptica con un semieje mayor de 800 m y un semieje menor de 600 m., en el interior del cráter las paredes son verticales y alcanzan una profundidad de 250 m (Boudal y Robin 1987), el volcán alcanza una elevación de 5452 msnm.

El volcán Popocatepetl es el segundo volcán más alto de nuestro país (Suárez, 1995). A lo largo de su historia el volcán Popocatepetl ha mostrado diversas formas de actividad eruptiva, numerosas erupciones de carácter menor, algunas mayores y algunos grandes eventos. De la actividad mayor existen evidencias geológicas en forma de depósitos volcánicos, pero las menores rara vez dejan depósitos persistentes que puedan ser analizados (De la Cruz-Reyna et al., 1995).

En 1994 inicia una nueva fase de actividad, después de 67 años de reposo, y esto ha llevado a que un gran número de especialistas de este país, y el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), estén trabajando para llevar a cabo el monitoreo del Volcán Popocatepetl y de esta manera estimar su nivel de actividad y una nueva posible erupción volcánica.

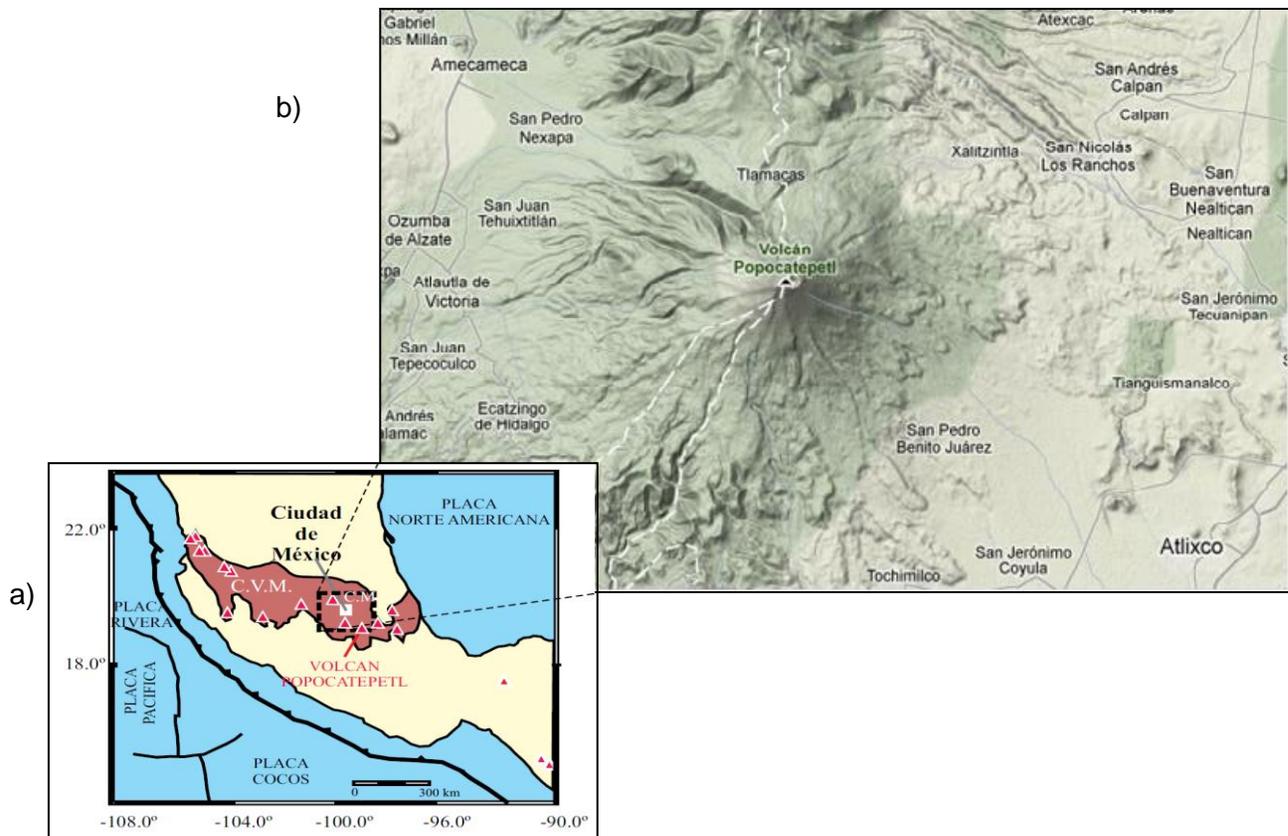


Figura 1.1- Ubicación del volcán Popocatepetl. a) Tomada de Lermo-Samaniego b) tomada de <http://maps.google.com.mx/>

1.2 Geología

El volcán Popocatepetl es un Estratovolcán con una historia compleja. Los depósitos volcánicos están dispersos en un área de más de 3000 km². El cono del Popocatepetl fue construido sobre un viejo volcán que colapso hacia el sur formando avalanchas de desechos y fue llamado por Fries (1966) como la Formación Tlayepac. El Popocatepetl fue construido, principalmente por el emplazamiento de flujos de lava andesíticos a dacíticos y al menos 8 erupciones del tipo pliniano, las cuales produjeron grandes depósitos de piedra pómez, flujos piroclásticos y lahares. Las dos últimas erupciones plinianas ocurrieron, una entre 700 y 850 DC, y la otra ocurrió en el primer siglo DC. Inmediatamente al norte del Popocatepetl, se encuentra el Amacuilecatl o Pies del Volcán, los cuales forman

parte del complejo Volcánico Iztacíhuatl. Sus flujos de lava limitan la distribución de los flujos del lado norte del Popocatepetl. Afloramientos de lavas andesíticas del terciario y secuencias volcanoclasticas pueden ser encontradas en la parte sur y este del Volcán. Estas rocas volcánicas están sobrepuestas por sedimentos de lago hacia el sur, y están compuestas de yeso, calizas y lutitas intercaladas con ceniza volcánica, las cuales pertenecen a la formación Cuayuca.

Una secuencia con más de 1200 m de espesor de finas capas de calizas y lutitas conocidas como la formación Mexcala, son la base de los depósitos volcánicos y de lago del terciario. Estas rocas fueron plegadas y falladas durante el cretácico tardío y el terciario temprano. Después de la deformación, varias intrusiones granodioríticas fueron emplazadas formando la granodiorita Jantetelco. La depresión fue rellenada por más de 200 m de sedimentos continentales conocidos como la formación Balsas.

Afloramientos de 600-1000 m de espesor de calizas y dolomitas marinas someras con nódulos de pedernal, son la base de la formación Cuautla y Morelos y pueden encontrarse en el flanco sur del Volcán Popocatepetl. Grandes secuencias sedimentarias Mesozoicas fueron depositadas hacia el sur del Popocatepetl sobre el lado norte y oeste de la gran falla Papalutla. Las rocas más viejas pertenecen a la formación Zicapa, que son areniscas, lutitas y conglomerados, con algunas intercalaciones de calizas delgadas. El espesor total de la formación Zicapa es de +/- 700 m en su localidad tipo. Hacia el oeste hay intercalaciones con anhidrita de la formación Huitzucó, la mayoría de los cuales son diapiricos. Afloramientos de rocas metamórficas viejas hacia el sur también como sus xenolitos en la secuencia volcánica sugieren su presencia directamente por debajo del Popocatepetl.

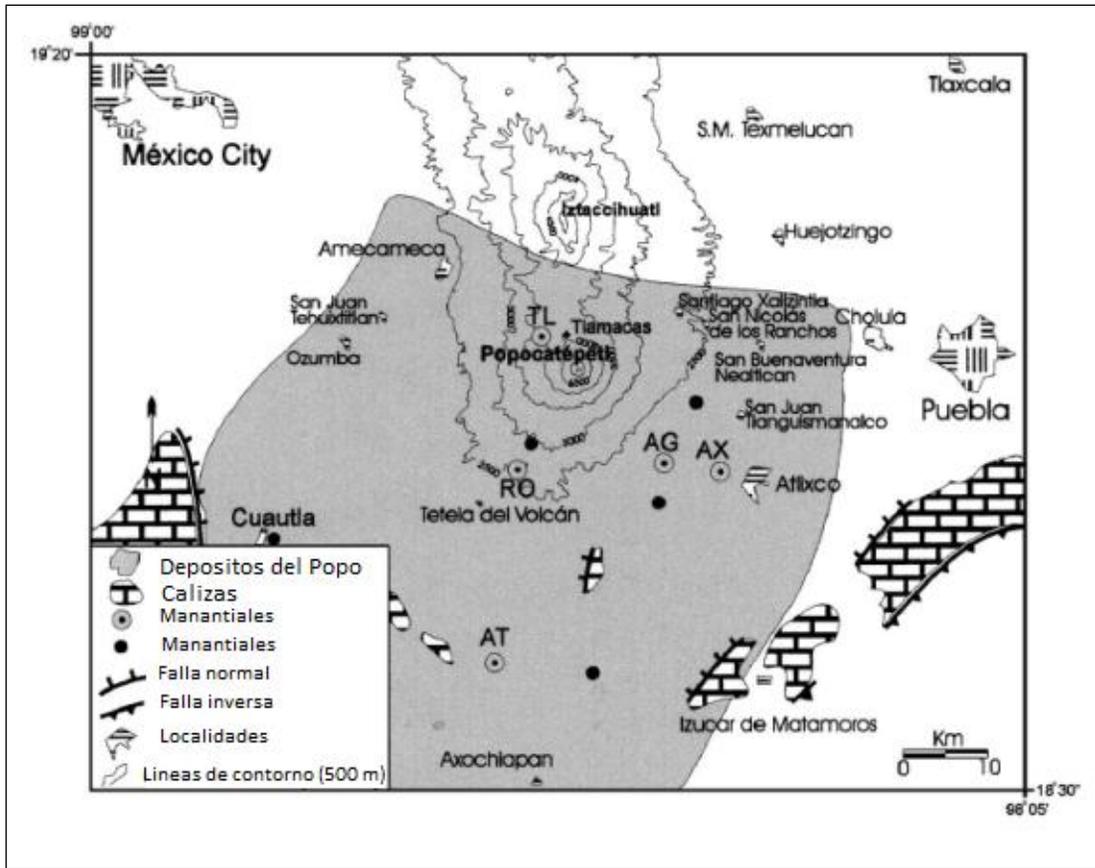


Figura 1.2- Geología del volcán Popocatépetl. Tomado de Del Pozo et al., 2002

1.3 Actividad Eruptiva.

El viejo volcán Nexpayantla fue destruido por una avalancha de escombros de tipo Bezymianny aproximadamente hace 24,000- 19,000 años (Siebe et al., 1995). Posteriormente una actividad explosiva continuo por 20,000-10,000 años ocurriendo actividad explosiva en ciclos de 1000 a 3000 años. La actividad fue caracterizada por lo menos por 7 erupciones plinianas. Los procesos constructivos fueron interrumpidos por varios episodios destructivos. La gran acumulación de material volcánico indica un periodo de gran actividad eruptiva (Siebe et al., 1997). Las más recientes erupciones ocurrieron en los periodos de 3195-2830 A. C., 800-215 A. C. y 675-1095 D.C. (Siebe et al., 1997). Posteriormente a esta actividad se cuenta con los registros históricos. Aunque la actividad histórica no es clara, en cuanto a la intensidad que han presentado los eventos eruptivos, estos registros

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

se inician con los manuscritos prehispánicos, de donde se tiene referencia de actividad en los años de 1534 y 1363, y luego se tienen referencias hasta 1509 y 1512. Para el año de 1519 se mencionan grandes erupciones. En los años 1539, 1540, 1548, 1562-1570, 1571, 1592 se reportaron grandes emisiones de ceniza. A esto siguió un periodo de calma hasta 1663 y solo fue interrumpido en 1642 por una erupción de humo y ceniza. De 1663 a 1697 se reportan emisiones de ceniza, continuando con un periodo de calma hasta probablemente una actividad menor en 1720. De 1720 a 1919 solo se presentó actividad solfatárica considerable. Este intervalo de quietud es interrumpido en febrero de 1919 por una explosión de una mina de azufre que se encontraba en el interior del cráter, donde fueron colocados 28 cartuchos de dinamita principalmente en torno a la antigua chimenea. Esto dio lugar a la apertura y conmoción de la chimenea central provocando un verdadero sismo en la cima del volcán, que hizo oscilar las paredes del cráter con derrumbes y tronidos abriendo la antigua chimenea. Esto según reportes de Dr. Atl (1940) y Waitz (1921) propició la reaparición de la actividad explosiva. La actividad continuó hasta 1927 y desde entonces el volcán tuvo un periodo de calma hasta el 21 de diciembre de 1994 en que se inició una nueva fase que continua hasta la fecha (Martínez B., 1998). En la siguiente tabla se muestra un resumen de la actividad del Volcán.

Tabla 1.1 Historia de la actividad del Volcán Popocatepetl. Tomada de www.cenapred.unam.mx. Las letras significan: (a) Años atrás, (b) Antes de Cristo y (c) Después de Cristo:

AÑO	BREVE HISTORIA DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL
23,000a	Gran erupción tipo Sta. Helena destruye el edificio volcánico previo.
14,000a	Gran erupción pliniana produce lluvias de ceniza y pómez sobre el Valle de México.
14,000-5,000a	Ocurren varias erupciones menores y al menos cuatro grandes erupciones
3,000b	Erupción grande
200b	Erupción grande
800c	Erupción grande
800c-	Después de la última erupción explosiva, la actividad del Popocatepetl ha sido moderada. A lo largo de los últimos 1200 años se han presentado numerosos episodios de actividad similar a la actual. Algunos de ellos están documentados.
1354c	Erupción menor
1363c	Fumarolas
1512c	Fumarolas
1519 c	Erupción moderada seguida de actividad fumarólica.
1530c	Termina actividad fumarólica
1539-1549c	Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez
1571c	Emisiones de ceniza
1592c	Fumarolas y emisiones de ceniza.
1642c	Fumarolas y emisiones de ceniza
1663c	Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez
1664c	Emisiones de ceniza
1665c	Emisiones de ceniza
1697c	Fumarolas
1720c	Erupción leve y actividad fumarólica
1804c	Fumarolas leves
1919 - 1927c	Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez. Se forma un pequeño domo de lava en el fondo del cráter. Hubo algunas víctimas en el interior del cráter al realizar trabajos de explotación de azufre.
1994-?	Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez. Se forma un domo de lava en el fondo del cráter que alcanza el 20% de su capacidad. 5 personas perecieron cerca del borde del cráter durante una explosión ocurrida en mayo de 1996.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

Valdés (et. al.) realizó una clasificación detallada de la actividad reciente del volcán Popocatepetl en 15 etapas de actividad de 1992 a 2003, esta se resume en la siguiente tabla:

Tabla 1.2. Actividad del volcán Popocatepetl de 1992 a 2003 (Arámbula, 2007):

ETAPA	PERIODO	DESCRIPCIÓN
1	1º de enero de 1992 al 22 de octubre de 1994	Fase de preparación
2	23 de octubre de 1994 al 21 de diciembre de 1994	Fase premonitoria
3	21 de diciembre de 1994 al 1º de abril de 1995	Fase eruptiva
4	2 de abril de 1995 al 3 de marzo de 1996	Fase fumarólica y limpieza de conductos
5	4 de marzo de 1996 a septiembre de 1996	Primera fase de construcción de Domo
6	Octubre de 1996 al 18 de agosto de 1997	Fase de pulsos cuasi-cíclicos
7	19 de agosto de 1997 al 24 de diciembre de 1997	Formación de un gran domo de lava
8	25 de diciembre de 1997 al 22 de noviembre de 1998	Fase explosiva y 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 post eruptiva y de relajación
11	4 de septiembre de 1999 al 15 de septiembre de 2000	Fase de Relajación
12	16 de septiembre del 2000 al 10 de diciembre del 2000	Fase de recarga
13	11 de diciembre del 2000 al 23 de enero de 2001	Crecimiento rápido de domo y fase eruptiva
14	24 de enero del 2001 a junio de 2002	Fase post eruptiva y construcciones repetitivas de domos
15	1º de junio de 2002 a diciembre de 2003	Eventos explosivos moderados y retorno a un periodo de relajación

CAPÍTULO 2. MONITOREO Y ACTIVIDAD SÍSMICA DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL

2.1 Monitoreo del Volcán Popocatépetl

La vigilancia de un volcán consiste en la observación continua y permanente por medio de una instrumentación especializada, con la finalidad de detectar oportunamente alguna variación importante de su actividad, y de ser posible anticipar alguna condición anómala precursora de un proceso eruptivo, para que a su vez con esta información se tomen medidas de seguridad o en su caso se ponga en marcha un plan de emergencia, previamente establecido (Quass et al., 1995).

Los cambios físicos y químicos del sistema magmático bajo un volcán reflejan condiciones de intranquilidad en el sistema volcánico. Algunos de estos cambios pueden ser percibidos directamente por la población que vive en los alrededores del volcán, mientras que otros pueden ser detectados solo con el uso e instrumentos extremadamente sensibles. La vigilancia de un volcán puede hacerse ya sea por observación o instrumentalmente.

El monitoreo del volcán Popocatépetl, desde su reactivación, consiste principalmente de 4 aspectos y actualmente lo realiza el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) conjuntamente con el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM):

- Monitoreo Visual
- Monitoreo Geoquímico
- Monitoreo Geodésico
- Monitoreo Sísmico

A continuación se hace una breve descripción de estas técnicas de monitoreo usadas en el Volcán.

2.1.1 Monitoreo Visual

Este monitoreo consiste en vigilar la actividad volcánica y se realiza mediante la observación a simple vista, con registros fotográficos o por medio de una videocámara, todo esto con la finalidad de observar señales visibles de deformación en el edificio volcánico, actividad magmática en el cráter o sus alrededores, aumento o disminución en la tasa de emisión de gases y cenizas, ocurrencia de lahares o derrumbes, entre otras.

Para el volcán Popocatepetl el monitoreo visual consiste principalmente de 2 cámaras de vigilancia marca Pelco, ubicadas en el cerro de Tlamacas y el Cerro de Alzomoni, cuyas imágenes son enviadas en promedio cada 45 segundos a través de un enlace de microondas a la estación central en el CENAPRED. La imagen del volcán se almacenaba las 24 horas en formato VHS y actualmente se almacena en formato DVD. En noviembre de 2007 comenzó a operar una tercera cámara de video ubicada en la población San Juan Tianguismanalco, Puebla, que transmite imágenes del flanco suroeste del volcán.

Las cámaras pueden ser operadas a distancia, lo cual permite detectar cualquier cambio visible, diferenciar las emisiones de gases o ceniza y determinar la altura y dirección de la pluma. También se cuenta con una cámara infrarroja en Alzomoni que captura imágenes que muestran las características térmicas del edificio volcánico y las emisiones del volcán.

Las imágenes aéreas del cráter son obtenidas por sobrevuelos realizados por la Dirección General de Carreteras Generales Federales de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, con estas imágenes es posible observar domos de lava y estimar su volumen así como su evolución y observar las características morfológicas del volcán.

2.1.2 Monitoreo Geoquímico.

Todos los sistemas volcánicos tienen una zona de aguas y fluidos calentados, llamado el sistema geotérmico envoltura, que rodea al magma, fundido o solidificado, pero todavía caliente. Un aporte de magma nuevo o movimiento del ya existente dentro del edificio volcánico, puede resultar en el escape de gases distintivos hacia la atmosfera o a los fluidos en la envoltura geotérmica. Adicionalmente, perturbaciones en el régimen térmico y en los patrones de circulación hidrotermal pueden causar una interacción hasta cierto grado en el sistema geotérmico, tanto con la roca encajonate como con el régimen de aguas subterráneas. En última instancia tales efectos aparecen como cambios geoquímicos visibles o medibles instrumentalmente en la superficie del volcán, manifestándose como variaciones en la temperatura, composición y tasa de emisión de gases y fluidos descargados en fumarolas y manantiales (Banks et al., 1989).

Un monitoreo continuo en los parámetros de manantiales y lagos, como la temperatura, concentración de gases disueltos, conductividad, pH, entre otros pueden proporcionar información valiosa acerca de procesos relacionados con la actividad de un volcán (Carapezza y Federico, 2000).

Para el volcán Popocatepetl, desde 1995 se hace periódicamente un muestreo de 7 manantiales y estos se ubican en los estados de Puebla y Morelos: San Baltazar Atlimeyaya, Paleorío, Chihuahuita, Axocopan, Guadalupe Huexocoapan y el Bosque (Armienta et al., 2008). Del análisis continuo se ha observado que los cambios en la composición química de los manantiales están directamente relacionados con el aporte de gases volcánicos. La detección oportuna de variaciones en la concentraciones de elementos como el boro, iones como cloruros, sulfatos fluoruros y gases como el radón y el bióxido de carbono relacionados con la actividad volcánica, ha sido de gran utilidad en la evaluación de riesgos volcánicos (Armienta et al., 2002a).

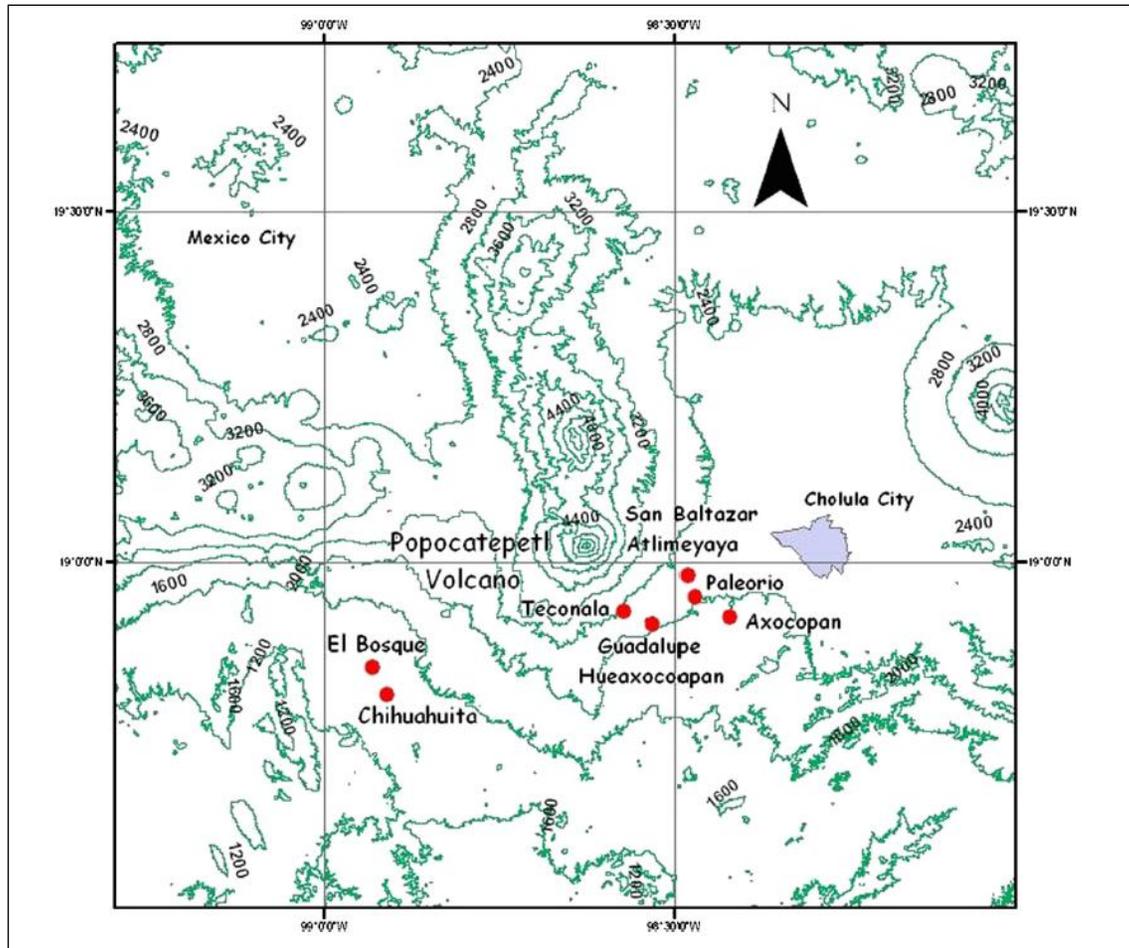


Figura 2.1 Ubicación de los manantiales en el volcán Popocatepetl. Tomado de Armienta et al., 2008.

También se realizan estudios a partir de las muestras de cenizas (Armienta et al., 2002b; Martín del Pozzo et al., 2008) y lixiviados (Armienta et al., 2002b) cuya composición química permiten conocer el grado de composición magmática y el estado de degasificación del magma (Martín del Pozzo et al., 1996; Armienta et al., 2002b) en diferentes etapas de actividad del volcán desde su reactivación.

2.1.3 Monitoreo Geodésico.

El monitoreo geodésico básicamente consiste en la medición de las deformaciones que el edificio volcánico sufre a consecuencia de los esfuerzos ejercidos desde el interior del volcán. Estos cambios en la estructura están asociados a la actividad volcánica, ya que reflejan la respuesta de procesos internos del volcán relacionados con el movimiento del magma. La deformación también puede estar relacionada a variaciones en la presión, provocando la deflación o inflación del volcán, así como también al paso de fluidos a través del sistema geotérmico del volcán.

La medición de la deformación se lleva a cabo a partir de métodos geodésicos convencionales tales como la inclinometría, la triangulación o la nivelación. En los últimos años se han incorporado a este tipo de monitoreo técnicas avanzadas de medición automatizada, que se realizan mediante sistemas de posicionamiento global (GPS) y EDM (Electronic Distance- Meter) o a través de InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar). Estas técnicas son muy utilizadas en distintos volcanes del mundo, incluido el Volcán Popocatépetl.

Para el volcán Popocatépetl se estableció una red de triangulación que consiste de 5 vértices (Las cruces, Tres amigos, Texcalco, Meseta y La Cruz) y dos vértices base, uno ubicado en el cerro de Tlamacas y el otro en el monumento de paso de Cortes. También desde 1996 se han operado continuamente 2 estaciones de GPS de doble frecuencia, POPN y POSW, en el flanco norte y suroeste del volcán, respectivamente. Estas estaciones tienen una precisión de 5-10 ppm en dirección vertical y 1 ppm en dirección horizontal. Además se tiene una estación ubicada en Tonantzintla a 35 km del cráter para monitorear la contribución tectónica regional a la deformación local en las series de tiempo. En 2001, adicionalmente, se instalaron 5 estaciones de una frecuencia, distribuidas en los flancos norte y oeste del volcán. Los receptores adquieren los datos a 1 Hz y la

información se envía a través de una red inalámbrica a la estación Alzomini y de allí se envían al Instituto de Geofísica (Cabral- Cano et al., 2008)

2.1.4 Monitoreo sísmico.

La vigilancia sísmica de los volcanes se lleva a cabo utilizando sismómetros de periodo corto y de banda ancha de 3 componentes, los cuales deben de estar distribuidos alrededor del edificio volcánico y sobre el cráter. Los sismógrafos detectan los movimientos en el interior de un volcán, por muy pequeños que estos sean. Las vibraciones del suelo, producidas por la fracturación de la roca o por el movimiento de fluidos magmáticos en el interior volcánico, generan señales sísmicas que son detectables por los instrumentos y estas señales pueden ser predecesoras de una actividad eruptiva importante. Es por ello que el monitoreo sísmico es de los más importantes en el monitoreo volcánico, ya que si un volcán está en proceso de reactivación, se generan señales sísmicas de varios tipos y pueden presentarse de pocos eventos por día a varios cientos de señales al día.

La red de monitoreo sísmico del volcán Popocatepetl actualmente consiste de 7 estaciones de periodo (1 Hz): Tlamacas (PPM), Juncos (PPJ), Tetexcaloc (PPT), Los Cuervos (PPQ), Colibrí (PPC), Chiquipixtle (PPX), y Canario (PPP), las 3 últimas estaciones también cuentan con sensores triaxiales de banda ancha. (Ver Figura 2.2).

Los sismómetros de banda ancha son triaxiales CMG-40T con digitalizador integrado. El rango de detección es de 30 segundos a 50 Hz, con excepción del STS-2, que registra de 120 segundos a 50 Hz y este se encuentra en Tlamacas. Las señales provenientes de estos sensores, son muestreadas de forma continua a 100 mps, convertidas a formato digital y transmitidas a la estación central de registro. La información de todas las estaciones es transmitida por telemetría a la estación central del CENAPRED.



Figura 2.2- Red de monitoreo del Volcán Popocatépetl

2.2 Actividad sísmica en el volcán Popocatepetl

Es muy importante conocer todas las señales sísmicas que se desprenden de la actividad de un volcán, ya que con estas podemos entender mejor los procesos que se llevan a cabo dentro y fuera del edificio volcánico. Todos los volcanes activos son fuente de una gran variedad de señales sísmicas, las cuales se han clasificado de acuerdo a su forma de onda, contenido espectral y/o localización. Ibáñez (1997) afirma que las variaciones en la clasificación de las señales dependen del tipo de instrumento, las condiciones geológicas y el tipo de volcán. En la siguiente Tabla se presenta una breve clasificación que se le da a las señales sísmicas volcánicas, dependiendo del autor y del volcán:

Tabla 2.1. Comparación de las distintas clasificaciones de señales sísmicas por varios autores. Tomado de Molina (2001).

Molina (1999) Volcán Tungurahua (Adopta la de Power)	Minakami (1960, 1974) Volcanes Asama Y Sakurajima Dibble (1974) Ruapehu ^(a)	Latter^(b) (1979,1981) Volcanes Ruapehu y Ngauruhoe Ntepe y Dorel (1990) V. Stromboli	Power et al (1994) Volcán Redoubt	McNutt et al (1996) Mammoth Mountain	Otros Tipos Mount St Helens, V.N. del Ruiz, Soufriere Hills
Volcano-tectónico (VT)	Tipo A	Volcano-tectónico	Volcano-tectónico VT	Alta frecuencia HF	Alta frecuencia (Endo et al., 1981; Nieto et al., 1990), Tipo h (Malone et al., (1983)
Largo período (LP)	Tipo B	Volcánico	Largo período	Baja frecuencia LF	Baja frecuencia (Endo et al., 1981), Tipo M y Tipo L (Malone et al., 1983), Largo período (Nieto et al., 1990)
Híbrido (HB)	-	-	Híbrido	Frecuencia mixta	Híbrido (White,R., 1998), Media frecuencia
Tremor Volcánico	Tremor volcánico	Tremor volcánico (baja, media y alta frecuencia)	Tremor volcánico	Tremor volcánico	Tremor armónico, tremor espasmódico

A continuación se hace una breve descripción de las señales sísmicas asociadas al volcán Popocatépetl:

2.2.1. Eventos Volcano-Tectónicos

Los eventos volcano- tectónicos o también llamados eventos de alta frecuencia o eventos tipo A, son eventos que se asocian con el fracturamiento de la roca en respuesta a los esfuerzos asociados y se caracterizan por tener una señal de duración variable, con un arribo de la onda P más o menos impulsiva y se puede identificar el arribo de la onda S (Ibáñez et. al. 2000), estos eventos presentan frecuencias entre 5 y 15 Hz y ocurren a una profundidad de 1 a 15 Km. Su forma de onda es similar a los eventos tectónicos y pueden involucrar procesos de cizalla ligados a los esfuerzos inducidos por el movimiento del magma o fallas de tensión en la roca, causada por la contracción térmica debido al enfriamiento en la cercanía del cuerpo magmático en el interior del edificio volcánico. En la Figura 2.3 se muestra un evento volcano-tectónico registrado en el volcán Popocatépetl, con su respectivo espectrograma y su espectro de Fourier.

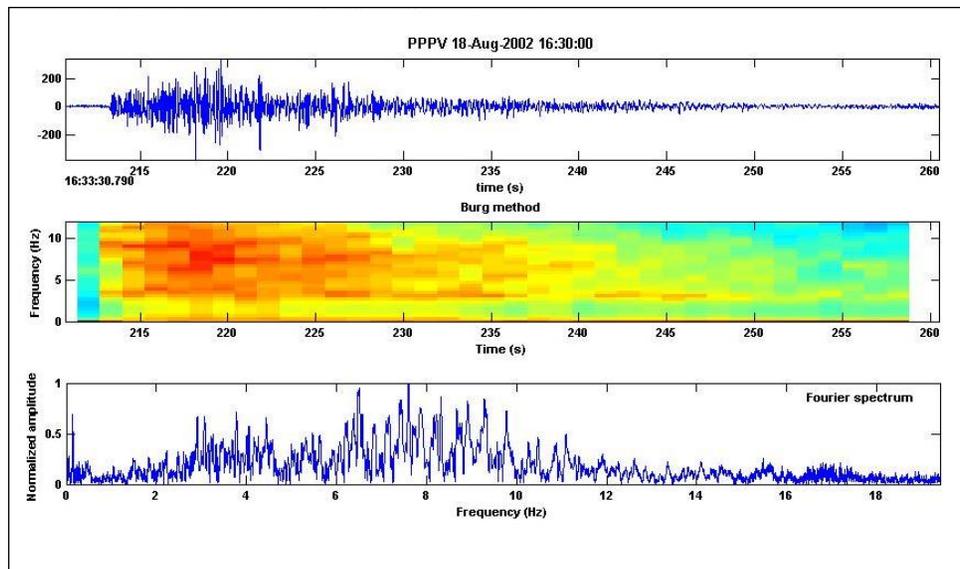


Figura 2.3- Evento volcano-tectónico registrado el 18 de agosto de 2002 a las 16:33 horas.

2.2.2. Eventos de largo periodo

Los eventos de largo periodo o eventos de baja frecuencia (o eventos tipo B) son señales típicas de volcanes activos, se originan en los cráteres o cerca de ellos y son extremadamente superficiales. Están caracterizados por tener una duración entre los pocos segundos hasta algo más de 1 minuto (Ibáñez, 2000), estos se atribuyen a la resonancia de grietas o conductos rellenos de fluidos inducidas por presiones en el fluido. Su comienzo generalmente es emergente por lo tanto no se puede definir con claridad el arribo de las ondas P y S. Su contenido espectral es limitado a bandas de frecuencias relativamente estrechas que van de 1 a 5 Hz, alcanzando una máxima amplitud entre los 2 y 3 Hz.

La ocurrencia temporal de los eventos tipo LP suelen ser en forma de enjambre sísmico, a veces con un elevado número de eventos por hora. Chouet (1996) observo que hay una muy fuerte relación entre la ocurrencia de enjambres de eventos de tipo LP y la presencia muy cercana de erupciones volcánicas. En la Figura 2.4 se presenta un evento de largo periodo registrado en el volcán Popocatépetl el día 16 de agosto del 2002 a las 00:02 horas.

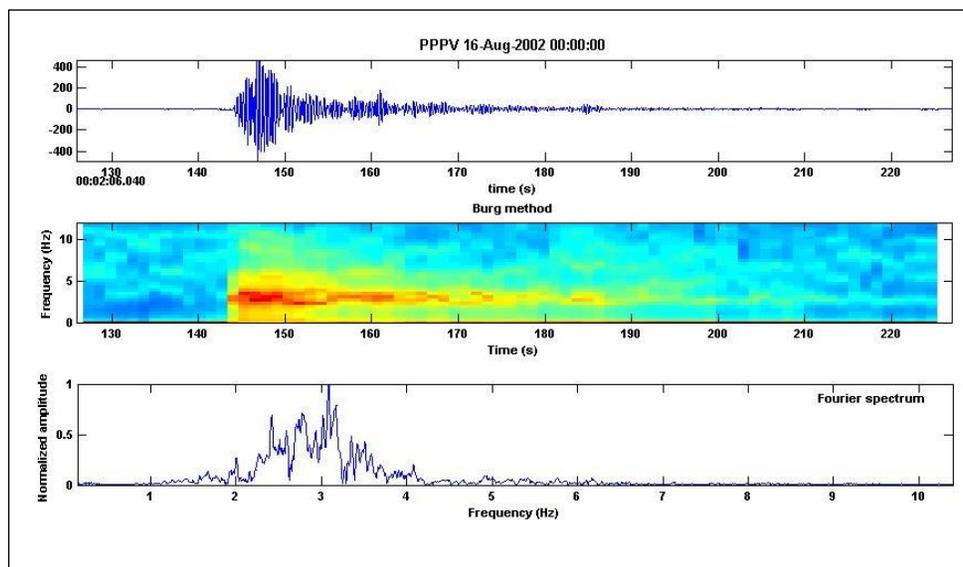


Figura 2.4- Evento de largo periodo registrado el 16 de agosto del 2002 a las 00:02 horas.

2.2.3 Eventos híbridos

Estos eventos tienen un comienzo caracterizado por señales de alta frecuencia, seguido de bajas frecuencias, normalmente con una amplia banda espectral (más de 10 Hz), en donde se pueden identificar las fases P y S, por lo que se le asocia a un pequeño terremoto. Después de la primera llegada aparece una señal muy similar en forma de onda, duración y contenido espectral a los eventos de largo periodo, no se debe confundir con un evento del tipo LP, con una llegada en alta frecuencia inicial. Por regla general la llegada en alta frecuencia de los híbridos debe presentar ondas P y S claras (Ibáñez et al., 2000). Las amplitudes de las ondas P y S son más pequeñas que los eventos volcano-tectónicos y la duración de la coda en todo el evento es menor a 150 segundos (Arámbula, 2002).

Su origen está basado en una fractura propiciada por altas presiones generadas por fluido o material magmático y es similar a la clasificación que hace Valdés (1995) de los eventos tipo H: donde se lleva a cabo el fallamiento se presentan las altas frecuencias, seguido de este proceso hay una intrusión de este mismo material el cual se inyecta en el conducto variando la presión dentro de este y así generando las bajas frecuencias, por eso es considerado como una mezcla de volcano-tectónico con LP.

2.2.4 Explosiones

Las explosiones son identificadas por el aumento brusco en la amplitud de la señal y un incremento en las frecuencias de la misma, por regla general tiene al menos 2 llegadas diferentes y claras, la primera asociada con la propagación en forma de ondas internas o superficiales de la explosión. La segunda es lo que se conoce como ondas de aire, ondas de choque y ondas sonoras con una velocidad de 340 m/s (Ibáñez & Carmona, 2000). En estos eventos la energía sufre una partición: una parte de la energía viaja a través del terreno como ondas sísmicas y la otra parte viaja como las ondas de aire. Estos eventos tienen una onda P de tipo emergente, las frecuencias dominantes se encuentran en la banda de 1 a 5 Hz y su duración es de aproximadamente de 40 segundos, en el caso del volcán Popocatépetl, en general, la duración es mayor a 40 s. Estas señales junto con el temblor son las señales más características cuando se encuentra en marcha un

proceso eruptivo. Las explosiones aparecen superpuestas a una señal de tremor de fondo (Ibáñez & Carmona, 2000). En la Figura 2.5 se muestra el registro de una explosión registrada en el volcán Popocatépetl el día 12 de marzo de 1999 a las 01:30 horas. También se puede ver su espectrograma y su espectro de Fourier.

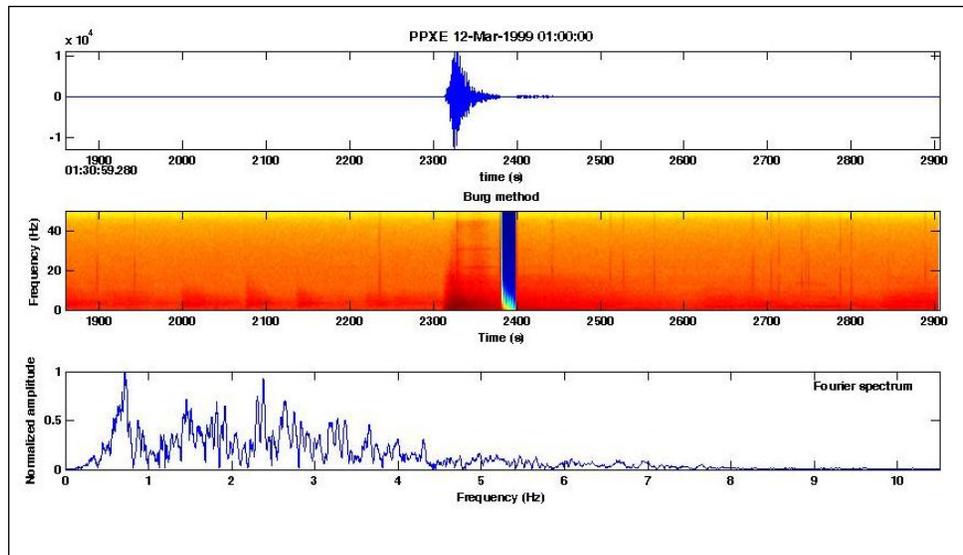


Figura 2.5- Explosión registrada en el volcán Popocatépetl el día 9 de marzo a las 01:30 horas.

2.2.5 Tremor volcánico

El tremor volcánico es una señal muy característica de volcanes activos. Este tipo de evento se caracteriza por producir señales sísmicas que conservan una amplitud constante por un largo periodo de tiempo, que van desde los pocos minutos hasta varias horas o incluso hasta varios días, con contenido espectral centrado en bandas de frecuencia relativamente estrechas (Ibáñez & Carmona, 2000).

Las características comunes a estos eventos son:

Su contenido espectral se centra en bandas de frecuencias relativamente estrechas con un pico dominante y algunos picos subdominantes. Las frecuencias

centrales de los picos dominantes son particularmente estables y no suelen estar influenciados por las características de la erupción ni por la posición de las estaciones sísmicas. Muchas señales de tremor vienen precedidas inicialmente por unas llegadas de alta frecuencia similares a las de un evento LP.

Por regla general, parece no existir una correlación entre la actividad volcánica visual y la envolvente del tremor. Un tremor fuerte no tiene que estar relacionado con una fuerte actividad volcánica visual. En algunas ocasiones, se observan temores intensos cuando la actividad eruptiva es rítmica. En cuanto a la relación entre el tipo de material volcánico emitido y los tipos de temores que se generan, las amplitudes del tremor están muy bien correlacionadas con la fuerza de las erupciones de ceniza, vapor o gas, mientras que para erupciones de lava o flujos de lava, las amplitudes del tremor suelen ser más bajas. En los temores no se ha observado un desplazamiento en frecuencia de los picos espectrales durante los procesos eruptivos, afectando simplemente a la amplitud de la señal, por lo que parece derivarse que la amplitud de la señal parece estar más relacionada con la fuerza de la erupción que con el tamaño de la fuente (Ibáñez & Carmona, 2000).

No se puede identificar las llegadas de las fases P y S, por esta razón la localización espacial de estos eventos es complicada.

La ocurrencia temporal del tremor es continua en cualquier fase ya sea esta pre-eruptiva o post eruptiva.

En la Figura 2.6 se muestra el segmento de un episodio de tremor armónico registrado en el volcán Popocatépetl el día 16 de diciembre del 2000, en la estación Canario (PPP)

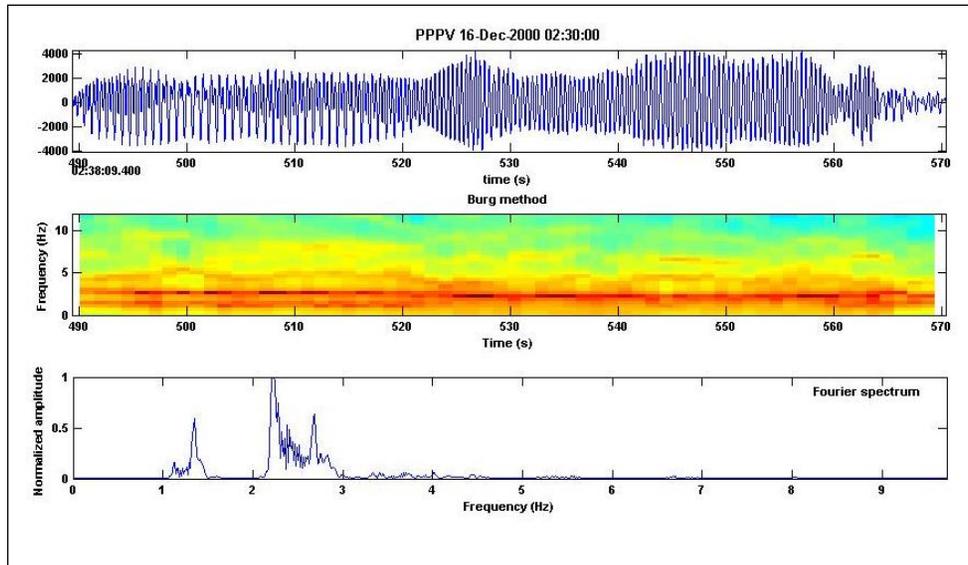


Figura 2.6- Segmento de tremor armónico registrado en el volcán Popocatépetl el día 16 de diciembre del 2000 a las 12:28 horas.

CAPÍTULO 3. ANALISIS DE LOS EPISODIOS DE TREMOR.

3.1 Elección de los datos

Los datos de este trabajo fueron obtenidos de la Red de Monitoreo Sísmico del Volcán Popocatepetl de banda ancha. Se utilizaron las estaciones de Chiquipixtle (PPXB) y Canario (PPPB), las cuales fueron instaladas en julio y marzo de 1998 respectivamente. Ambas estaciones cuentan con un sismómetro triaxial de banda ancha de marca Guralp Cmg-40T con una respuesta plana de 0.03 a 50 Hz. Los sismómetros de banda ancha permiten obtener datos en una banda de frecuencias más grande que los de periodo corto, y debido a su mayor rango dinámico no hay saturación de los datos, en el caso de una gran actividad sísmica. Estas estaciones están localizadas a una altura de 3980 y 4170 m., respectivamente y ambas estaciones están sobre el cono volcánico.

Los datos registrados por las estaciones son enviados teleméricamente y en forma continua al centro de registro del CENAPRED. Las señales son digitalizadas a razón de 100 muestras por segundo para cada canal y hasta 1999 se utilizó el sistema automático XDETECT, a partir del año 2000 a la fecha el sistema de registro utilizado es EARTHWORM, con este programa los datos son almacenados en formato dmx, con una duración de 10 minutos.

Para tener un resultado más confiable y estable del comportamiento, la amplitud y las frecuencias características del tremor generado por el volcán Popocatepetl, en este análisis se tomaría en cuenta un evento significativo de tremor por semana durante los años de 1999, 2000, 2001, 2002 y 2003. Sin embargo esto no se pudo llevar a cabo al 100%, debido a que los datos almacenados se han perdido o porque el volcán no registró actividad alguna dentro del periodo de análisis.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS EPISODIOS DE TREMOR

En la Tabla 3.1 se hace un resumen de los días en que se registraron eventos de tremor y que fueron incluidos en este análisis, así mismo se incluye la duración de los mismos.

Tabla 3.1. Días en que se registraron eventos de tremor y su duración. (Datos tomados de los sismogramas en papel de periodo corto, generados en el CENAPRED).

Fecha	Duración [min]	Fecha	Duración [min]	Fecha	Duración [min]
01/01/1999	30	03/05/2001	180	06/09/2002	1140
21/01/1999	30	05/05/2001	120	12/09/2002	600
30/01/1999	180	10/05/2001	120	13/09/2002	720
04/02/1999	120	13/05/2001	420	14/09/2002	840
01/03/1999	600	15/05/2001	660	17/09/2002	420
03/03/1999	60	18/05/2001	360	26/09/2002	240
05/03/1999	180	01/06/2001	300	07/10/2002	180
06/03/1999	180	05/06/2001	150	18/10/2002	60
11/03/1999	30	10/06/2001	600	22/10/2002	120
11/11/1999	120	15/06/2001	300	23/10/2002	300
14/11/1999	180	19/06/2001	240	02/11/2002	360
16/10/2000	150	24/06/2001	540	07/11/2002	210
13/12/2000	60	26/06/2001	720	10/11/2002	240
15/12/2000	480	18/11/2001	50	02/12/2002	240
16/12/2000	300	20/12/2001	660	09/12/2002	360
23/01/2001	90	23/01/2002	420	10/12/2002	180
21/02/2001	30	15/02/2002	90	31/12/2002	180
27/02/2001	90	16/02/2002	150	16/01/2003	90
28/02/2001	150	09/03/2002	210	22/01/2003	180
01/03/2001	350	23/03/2002	140	01/02/2003	60
11/03/2001	150	28/03/2002	150	02/04/2003	120
12/03/2001	30	23/05/2002	60	03/04/2003	60
13/03/2001	30	29/06/2002	300	16/04/2003	120
14/03/2001	120	14/07/2002	180	17/04/2003	240
15/03/2001	60	16/07/2002	420	18/04/2003	60
24/03/2001	120	18/07/2002	360	22/04/2003	300
01/04/2001	420	31/07/2002	120	28/04/2003	780
02/04/2001	720	01/08/2002	180	30/04/2003	180
06/04/2001	300	03/08/2002	480	03/05/2003	300
08/04/2001	300	04/08/2002	600	07/05/2003	540
22/04/2001	120	05/08/2002	360	10/05/2003	720
26/04/2001	240	06/08/2002	480	27/05/2003	360
29/04/2001	240	09/08/2002	600	29/05/2003	360
30/04/2001	180	10/08/2002	1080	08/06/2003	420

3.2 Procesado

Para el análisis, los datos se procesaron con el programa SEISMO_VOLCANALYSIS: Signal analysis tools for seísmo-volcanic events, desarrollado por Philippe Lesage. El programa es escrito usando Matlab 7.0, junto con sus interfaces de usuario gráficas y las herramientas del procesado de señales. El análisis de tiempo-frecuencia hace uso de las herramientas de tiempo frecuencia desarrollado por François Auger, Olivier Lemoine, Paulo Gonçalvès y Patrick Flandrin bajo los derechos del Centro Nacional de Investigación Científica de Francia (CNRS, Centre National de la Recherche Scientifique of France) y en colaboración con el Instituto de Geofísica de la UNAM.

El software incluye 6 interfaces, con sus archivos correspondientes de fuente (*.m) y figura (*.fig). Para este trabajo solo se utilizaron dos interfaces, Seismo_volcanalysis1 y Seismo_volcanalysis2, las cuales son brevemente descritas:

La primera interface Seismo_volcanalysis1 puede ser considerada como el programa principal, este permite leer los archivos, seleccionar secciones de los registros y llamar a las herramientas de análisis de señales. Los formatos de los archivos que puede leer son: SAC, SUDS (*.DMX), SEISAN, GCF (Guralp Compressed format), Datos binarios y WAV (PC archivos de audio). Una vez leído el archivo se le puede aplicar un filtro pasabandas Butterworth, indicando la frecuencia del ancho de banda; también se le puede aumentar el tamaño o un acercamiento a alguna parte específica de la señal.

La segunda interface Seismo_volcanalysis2 lleva a cabo estimaciones espectrales y representaciones tiempo frecuencia.

Los métodos espectrales disponibles son:

- Espectro de amplitud basado en la clásica transformada de Fourier
- Espectro de Fourier suavizado

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS EPISODIOS DE TREMOR

- Períodograma promediado (espectro de amplitud)
- Densidad de poder espectral usando el método de Burg
- Densidad de poder espectral usando el método (AR) de Yule-Walker

Para la representación de tiempo-frecuencia, están disponibles los siguientes métodos:

- Transformada de Fourier de tiempo corto
- Método de Burg
- Método (AR) de Yule-Walker
- Escalograma (ondícula de Morlet)
- Espectrograma reasignado
- Distribución Wigner-Ville
- Pseudo Wigner-Ville
- Pseudo suavizado Wigner-Ville
- Distribución Choi-Williams
- Distribución de Interferencia Reducida
- Frecuencia instantánea
- Crestas

En ésta interface en el análisis espectral tiene una opción donde se pueden seleccionar los picos espectrales del espectro calculado.

Para cada evento de tremor se seleccionó una ventana que varía de 60 a 120 segundos cada 10, 20 o 30 minutos dependiendo la duración de cada episodio. A cada segmento seleccionado de la señal se le calculo su espectro y su espectrograma. El espectrograma se calculó usando el método de Burg, que consiste en un modelo auto-regresivo (AR) aplicado a la señal, el cual minimiza los errores de predicción por el método de mínimos cuadrados, al mismo tiempo que restringe los parámetros AR para satisfacer la recursión de Levinson- Durbin. La ventaja que ofrece este método es la de producir un modelo más estable, así como generar un espectrograma de alta resolución.

La importancia del análisis espectral, consiste en analizar su comportamiento en el dominio de la frecuencia, debido a que la energía de la fuente en la señal se manifiesta como la frecuencia dominante en el espectro de Fourier (Etter, 1997), con este análisis podemos obtener la frecuencia dominante de las ondas sísmicas generadas por la fuente durante el movimiento de fluidos magmáticos. Para la mayoría de los casos también se obtuvieron las frecuencias de sobretonos o sub-armónicos que presentaba el espectro, llegando a presentar hasta 5 sub-armónicos.

En total se revisaron 99 episodios de tremor, en su mayoría armónico. De estos episodios se analizaron 990 segmentos por componente, tomando en cuenta que son dos estaciones con tres componentes cada una, hacen un total de 5940 segmentos analizados. Por cada espectro y espectrograma se generó un archivo *.fig, por componente y estación. En total se generaron 5626 figuras, que se guardaron como imágenes con la extensión jpg, las cuales se anexan en un cd ya que son demasiadas para presentarlas todas en este trabajo escrito.

Como se puede observar la Figura 3.3 es una de las figuras generadas y almacenada como imagen, esta consta de 4 partes: la primera, el encabezado, el cual contiene el nombre del archivo, el número de muestras utilizado en la ventana de análisis, si es que se le aplicó un filtro o no y la frecuencia de muestreo; además presenta los parámetros utilizados para generar el análisis tiempo-frecuencia (espectrograma) y el análisis espectral (espectro de Fourier). En la segunda parte se muestra la gráfica de la señal en el tiempo, de esta parte se tomó la amplitud pico a pico. En la tercera parte se muestra el periodograma, que está graficado tiempo [seg] vs frecuencia [Hz] y como encabezado tiene el método usado para su obtención. Finalmente la cuarta parte corresponde al espectro, graficado Frecuencia [Hz] vs Amplitud Normalizada y en la esquina superior derecha muestra el método que se utilizó para calcular el mismo.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS EPISODIOS DE TREMOR

A continuación se presentan algunas imágenes, las cuales contienen la señal, el espectro y espectrograma de algunos episodios de tremor:

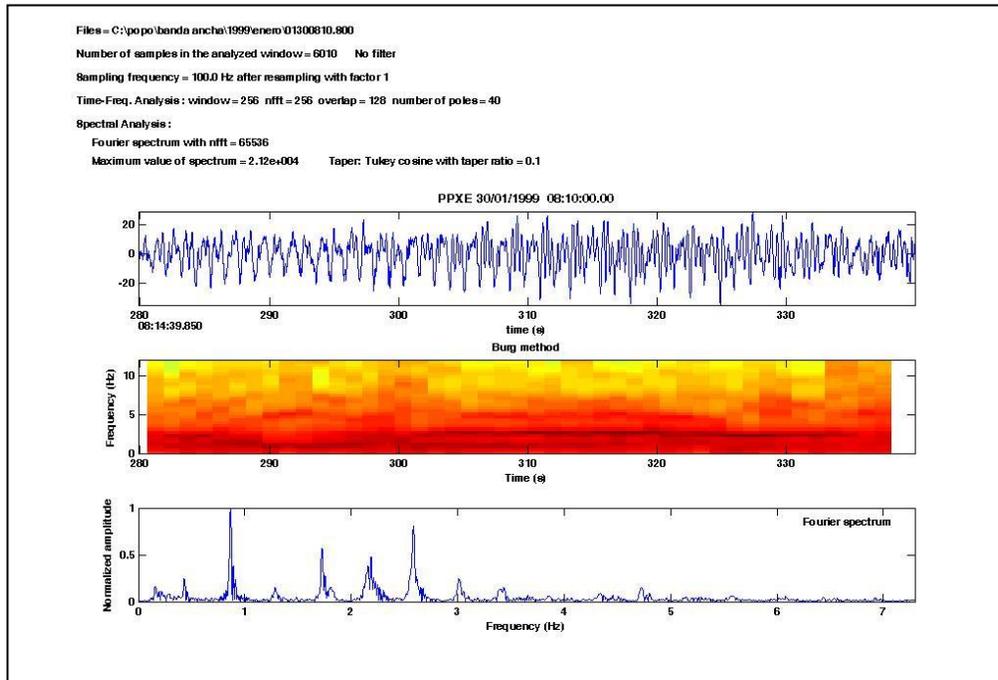


Figura 3.3 Segmento de tremor armónico registrado el 30 de enero de 1999 por la estación Chiquipixtle en su componente este (PPXE)

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS EPISODIOS DE TREMOR

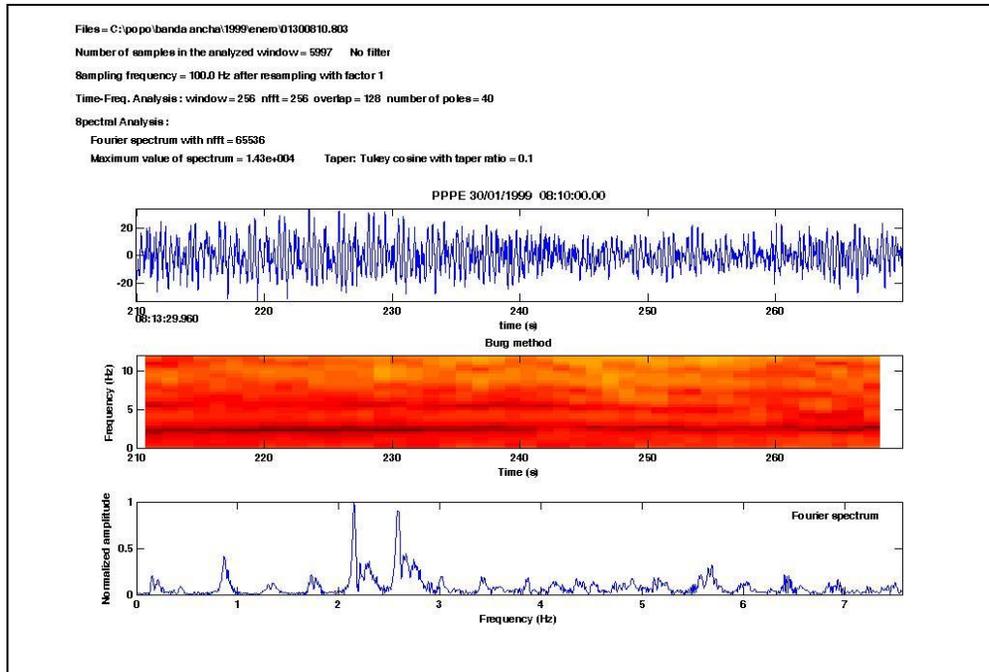


Figura 3.4 Segmento de tremor armónico registrado el 30 de enero de 1999 por la estación Canario en su componente este (PPPE)

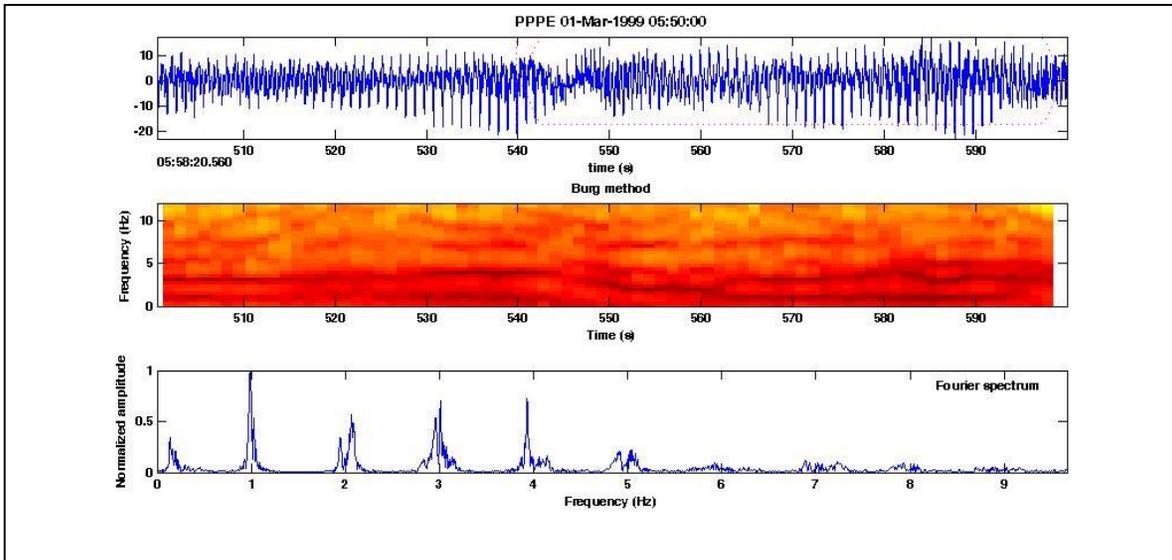


Figura 3.5 Segmento de tremor registrado el 1° de marzo de 1999 por la estación Canario en su componente este (PPPE)

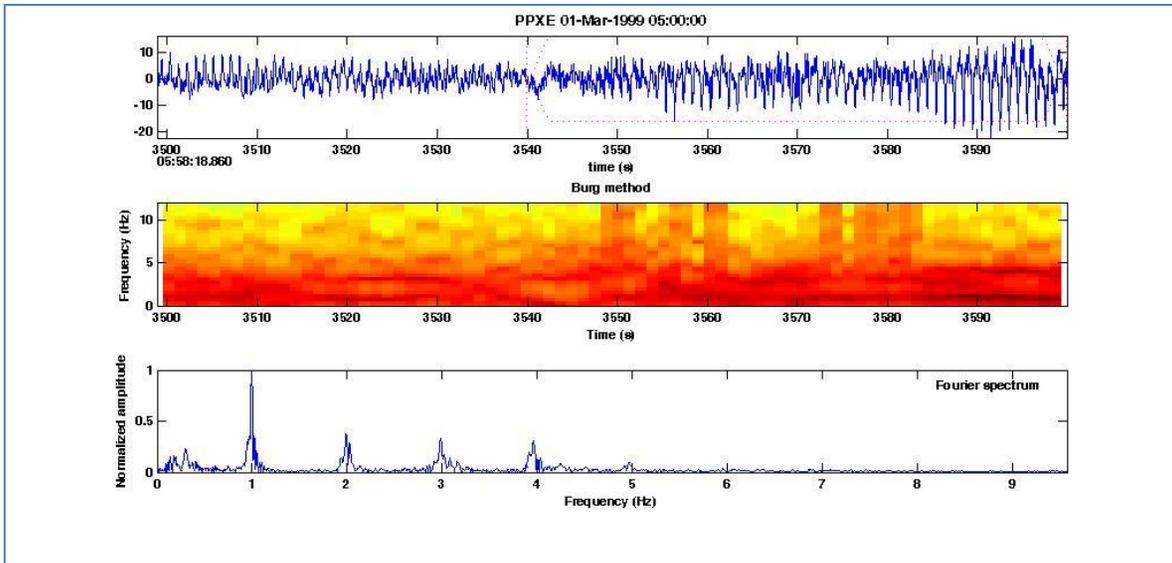


Figura 3.6 de tremor registrado el 1° de marzo de 1999 por la estación Chiquipixtle en su componente este (PPXE)

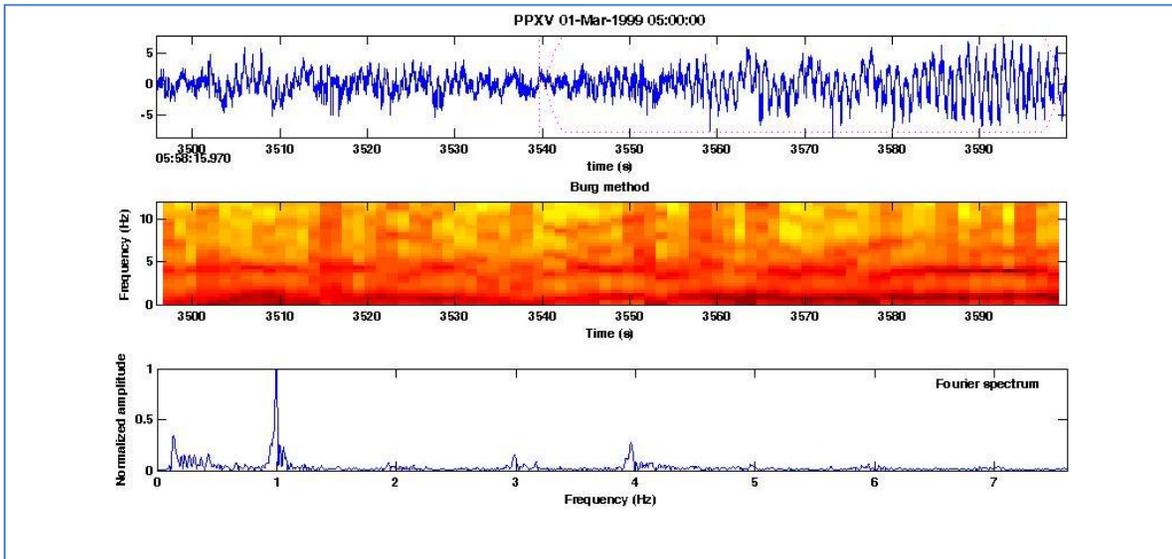


Figura 3.7 Segmento de tremor registrado el 1° de marzo de 1999 por la estación Chiquipixtle en su componente vertical (PPXV)

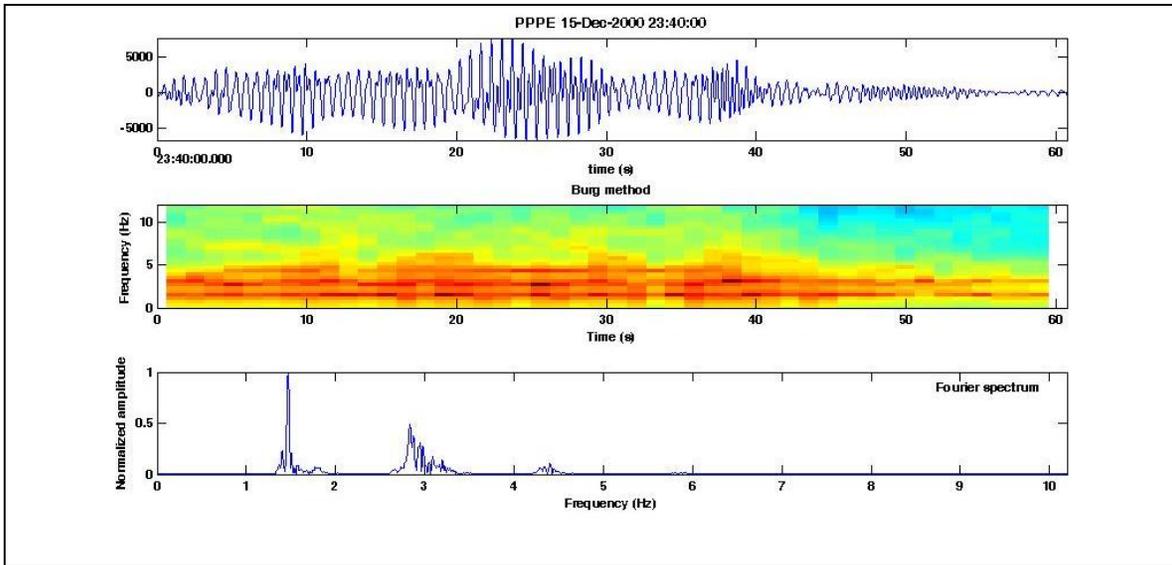


Figura 3.8 Segmento de tremor registrado el 15 de diciembre del 2000 por la estación Canario en su componente este (PPPE).

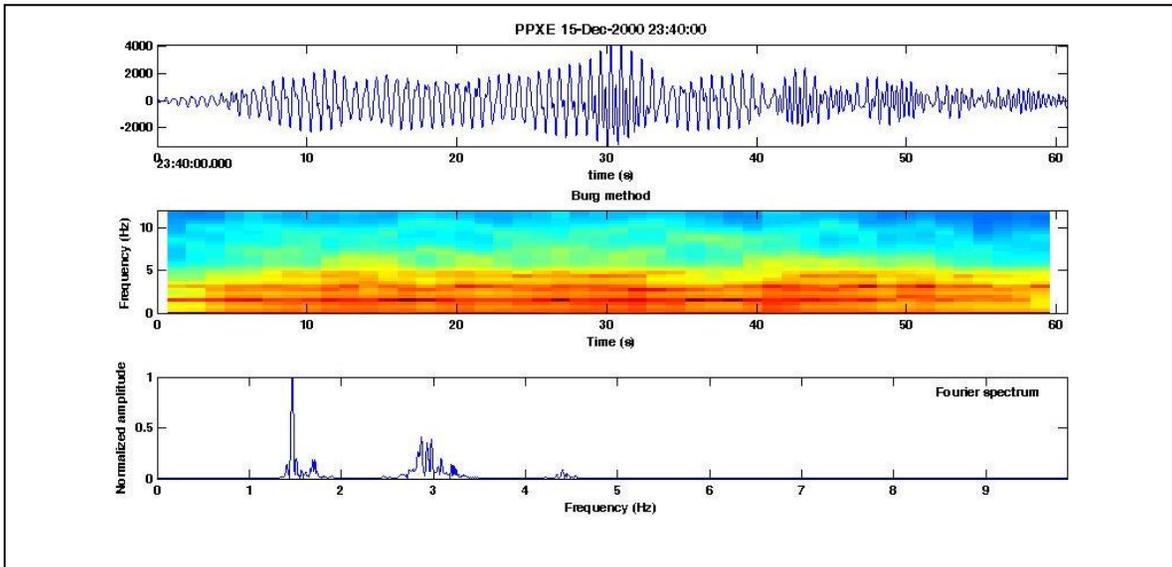


Figura 3.9 Segmento de tremor registrado el 15 de diciembre del 2000 por la estación Chiquipixtle en su componente este (PPXE).

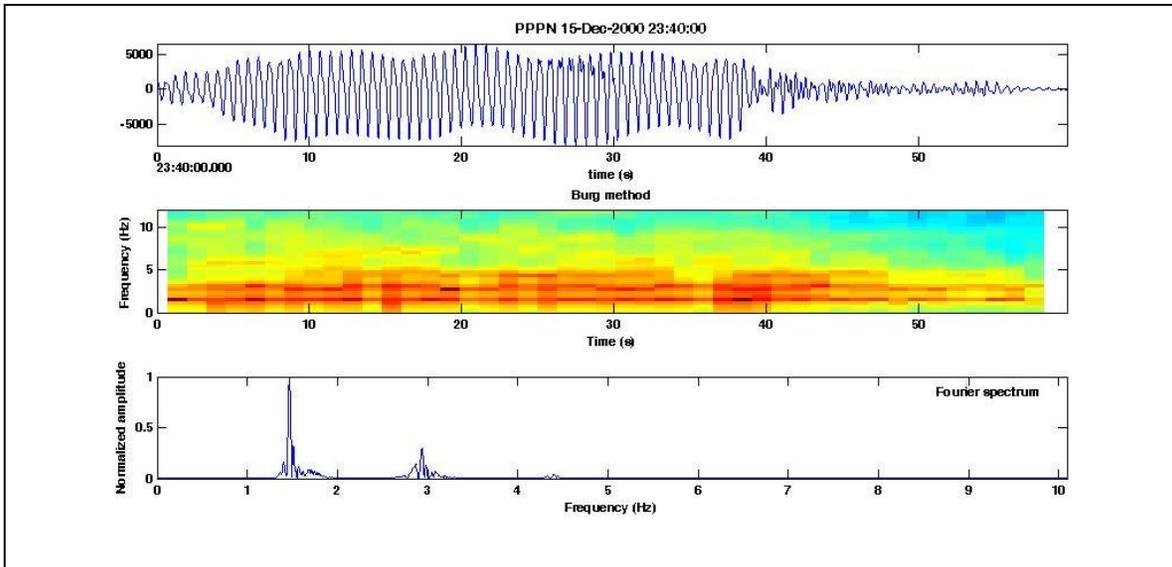


Figura 3.10 Segmento de tremor registrado el 15 de diciembre del 2000 por la estación Canario en su componente norte (PPPn).

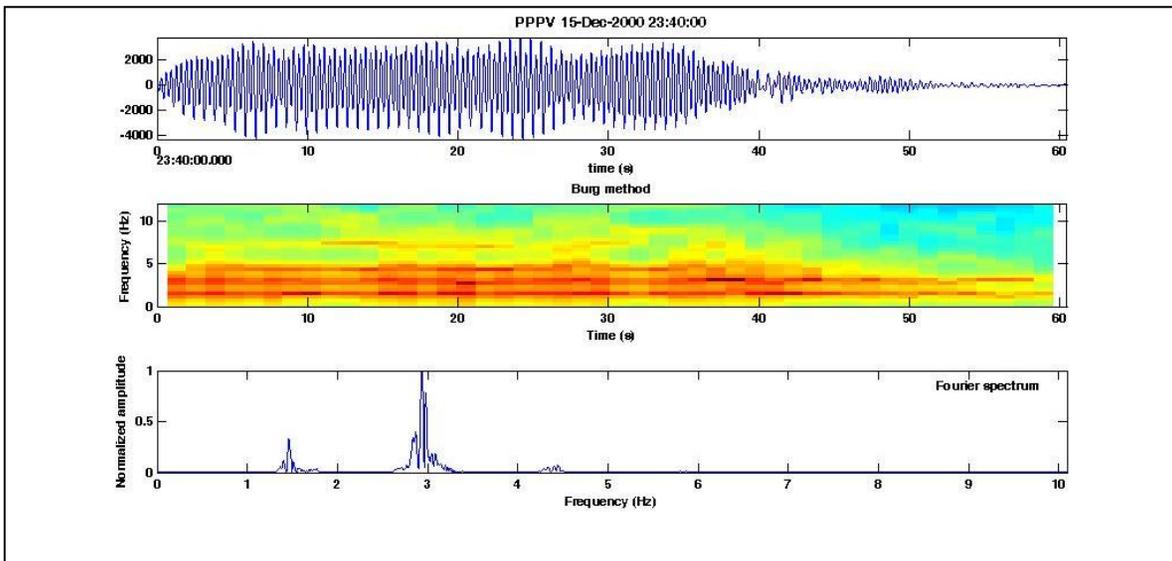


Figura 3.11 Segmento de tremor registrado el 15 de diciembre del 2000 por la estación Canario en su componente vertical (PPPv).

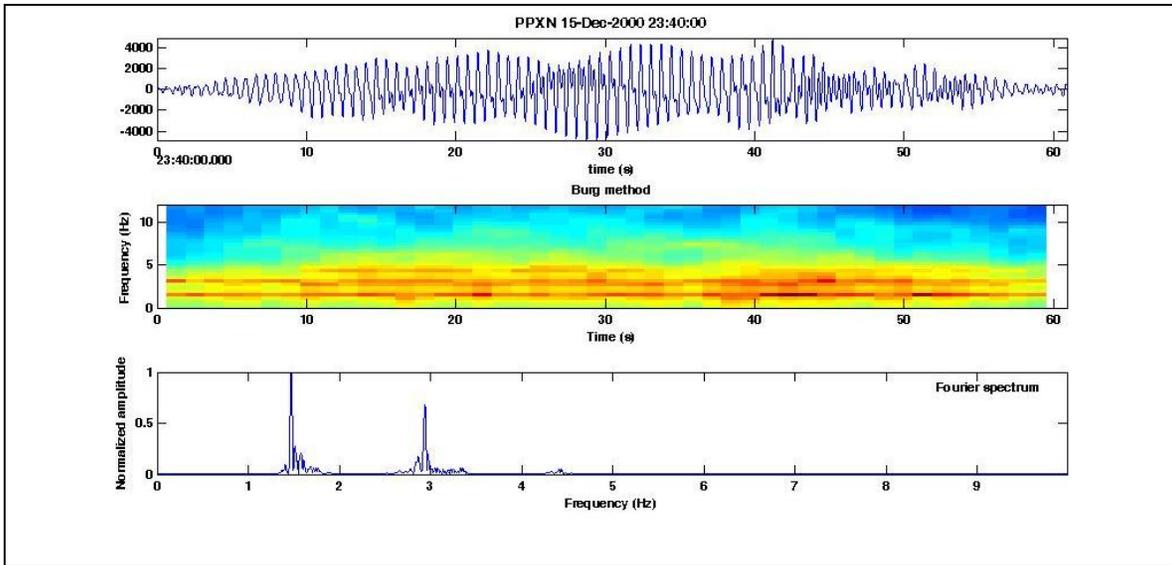


Figura 3.12 Segmento de tremor registrado el 15 de diciembre del 2000 por la estación Chiquipixtle en su componente norte (PPXN).

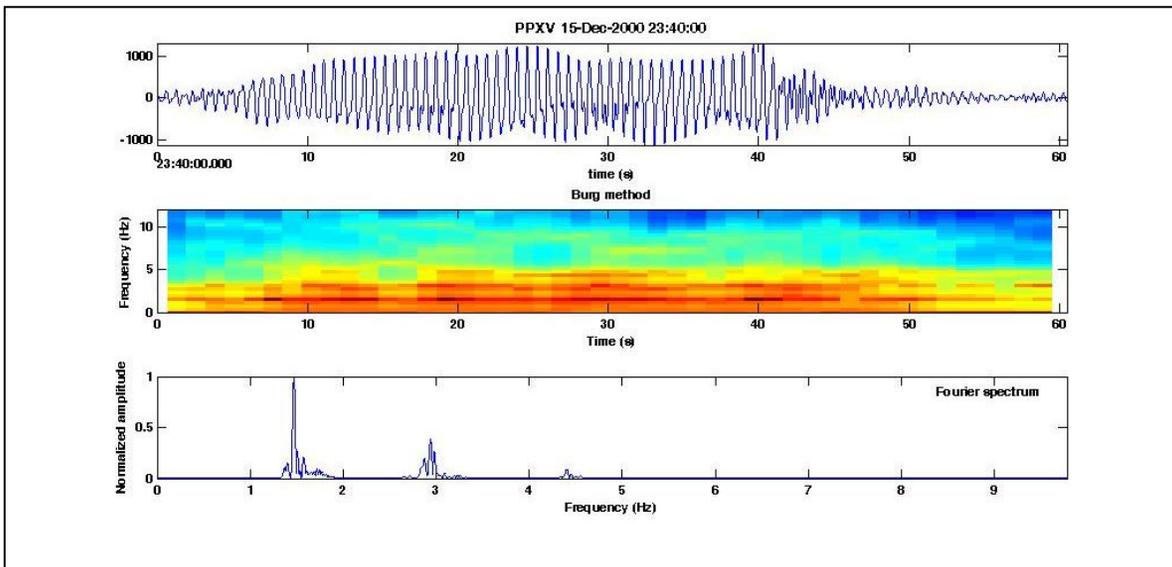


Figura 3.13 Segmento de tremor registrado el 15 de diciembre del 2000 por la estación Chiquipixtle en su componente vertical (PPXV).

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1 Amplitud y Frecuencia Dominante de los eventos de Tremor

4.1.1 Amplitud

La amplitud de los episodios de tremor analizados en este trabajo es muy variable. Las amplitudes más sobresalientes con un valor pico a pico de más de 1000 cuentas fueron los eventos registrados en la estación Canario (PPP) durante los meses de diciembre del 2000, enero de 2001, enero de 2002; enero, abril y mayo del 2003. Para la estación Chiquipixtle (PPX) sólo los eventos de diciembre del 2000, enero del 2002 y enero y abril del 2003 alcanzaron una amplitud de más de 1000 cuentas. En la Tabla 4.1 se hace un comparativo de los días en que se registraron estas amplitudes. Cabe mencionar que los episodios de tremor registrados los días 15 y 16 de diciembre del 2000 alcanzaron una amplitud (pico a pico) de hasta 25,000 cuentas. Desde la reactivación del volcán en 1994, hasta la fecha no se han registrado amplitudes tan grandes.

Tabla 4.1 – Días en que se registraron eventos de tremor con amplitudes de más de 1000 cuentas en las estaciones de Canario (PPP) y Chiquipixtle (PPX). (Datos obtenidos de los registros sísmicos de banda ancha, CENAPRED)

	Dic. 2000	Ene. 2001	Ene. 2002	Ene. 2003	Abr. 2003	May. 2003
PPP	14,15,16	1,23	23	16	28,30	27,29
PPX	14,15,16		23	16	28,30	

En los demás eventos registrados la amplitud varía pero no alcanzan las amplitudes de los eventos antes mencionados. También se presentaron eventos donde la amplitud es muy baja llegando apenas a 4 cuentas en la componente vertical para ambas estaciones y de 6 a 10 cuentas para las componentes horizontales. La mayoría de los segmentos de tremor analizados tienen una amplitud baja (amplitud pico a pico), esto es de 2 a 200 cuentas, lo que representa

el 78 % del total de eventos analizados. En la figura 4.1 se grafican el número de eventos que se encuentran dentro de 4 rangos de amplitud, los cuales son: de 2 a 200 cuentas, de 201 a 400 cuentas, de 401 a 1000 cuentas y de 1001 a 22000 cuentas. En la Figura 4.2 se puede observar de forma porcentual las amplitudes de todos los segmentos de tremor analizados.

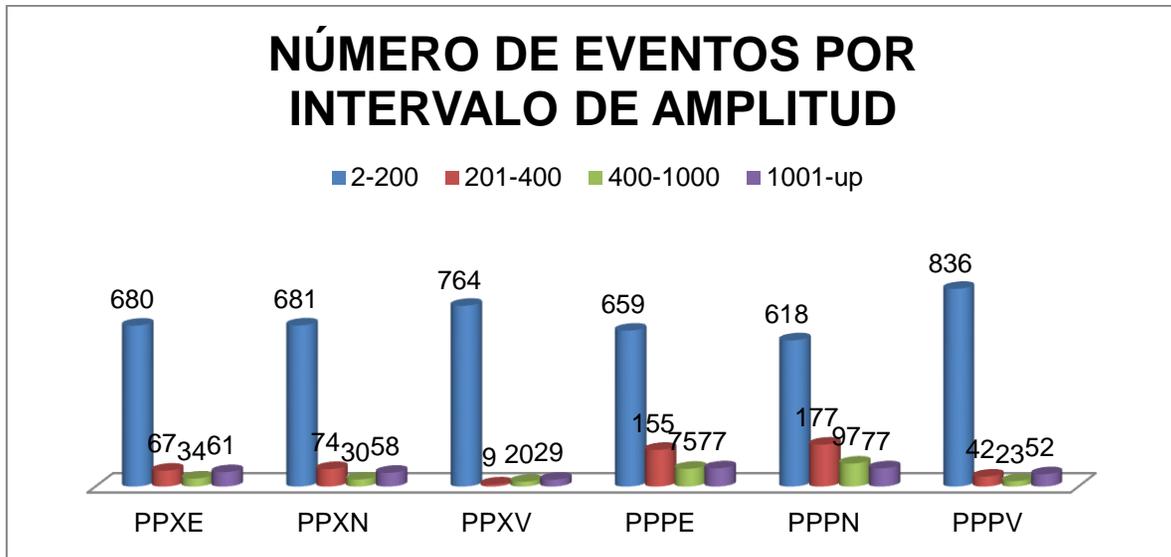


Figura 4.1- Gráfica del número de eventos por intervalos de amplitud (pico a pico).

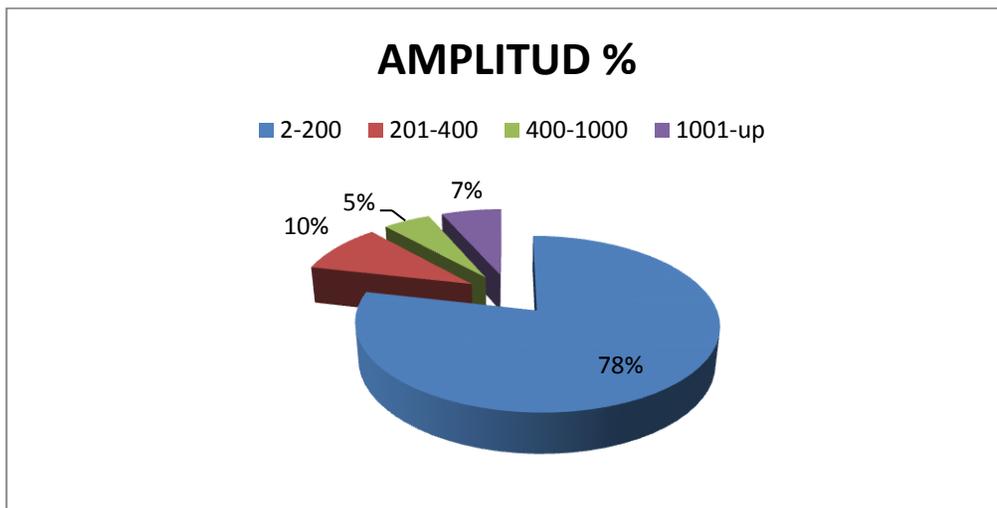


Figura 4.2. Porcentaje de los eventos que se encuentran en los rangos por intervalos de amplitud (pico a pico).

Se puede observar de las Figuras 4.1 y 4.2 que la mayoría de los episodios de tremor analizados presentan una amplitud baja, esto es de 2 a 200 cuentas. Muy pocos eventos presentan grandes amplitudes, como se mencionó anteriormente.

4.1.2. Frecuencia dominante.

Una vez obtenidas las frecuencias principales o de mayor amplitud, se graficaron para ambas estaciones (PPP y PPX en sus componentes N-S, E-W y Z), de esto se obtuvieron 3 rangos de frecuencia por componente, para las componentes horizontales se obtuvo: f1 de 0.5 a 1.750 Hz, f2 de 1.750 a 2.750 Hz y f3 de 2.750 a 5 Hz. En la componente vertical varia un poco en el primer rango de frecuencia (f1), ya que en esta se registran frecuencias más bajas, quedando el primer rango de frecuencias de 0.250 a 1.750 Hz y los otros dos, f2 y f3, quedan en el mismo intervalo que las componentes horizontales. Para las tres componentes la frecuencia dominante de todos los segmentos analizados es la que comprenden los rangos de frecuencia f1 y f2 (de 0.250 a 2.750 Hz). En las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5 se muestran los rangos de frecuencia antes mencionados.

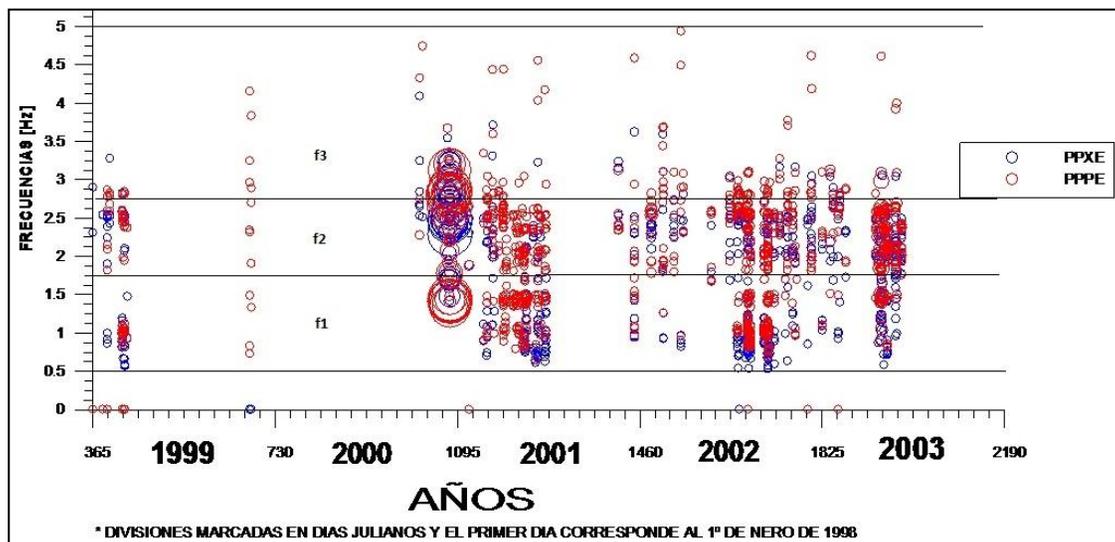


Figura 4.3. Gráfica del contenido de frecuencias en la componente E-W de los episodios de tremor registrados en las estaciones de Canario (PPP) y Chiquipixtle (PPX).

En la gráfica de la Figura 4.5 se observa que el contenido de frecuencias, para la estación Chiquipixtle (PPX) en la componente E-W, está distribuido en los rangos de frecuencia f_1 y f_2 , de 0.5 a 1.750 Hz y 1.750 a 2.750 Hz respectivamente, mientras que para la estación Canario (PPP), en la misma componente, se observa que predominan las frecuencias que caen dentro del rango f_2 (de 1.750 a 2.750 Hz). Para la componente N-S, en la Figura 4.4, las frecuencias que predominan en la estación Canario (PPP) son las del rango f_2 (de 1.750 a 2.750 Hz) y en la estación Chiquipixtle predominan las frecuencias del rango f_1 (de 0.5 a 1.750 Hz). Finalmente para la componente Z, en ambas estaciones, el rango predominante de frecuencias es el f_1 (de 0.250 a 1.750 Hz), ver Figura 4.5.

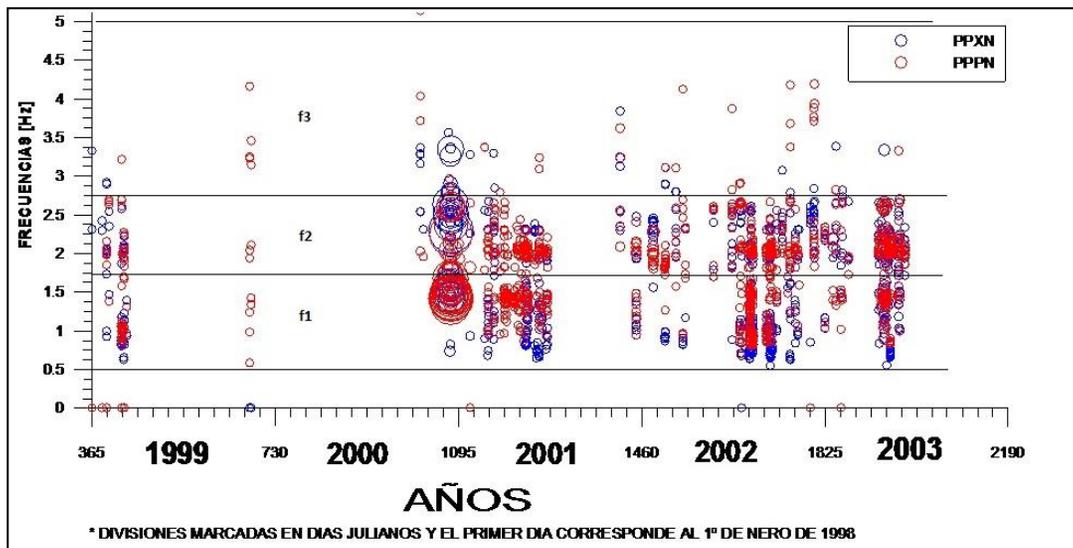


Figura 4.4. Gráfica del contenido de frecuencias en la componente N-S de los episodios de tremor registrados en las estaciones de Canario (PPP) y Chiquipixtle (PPX).

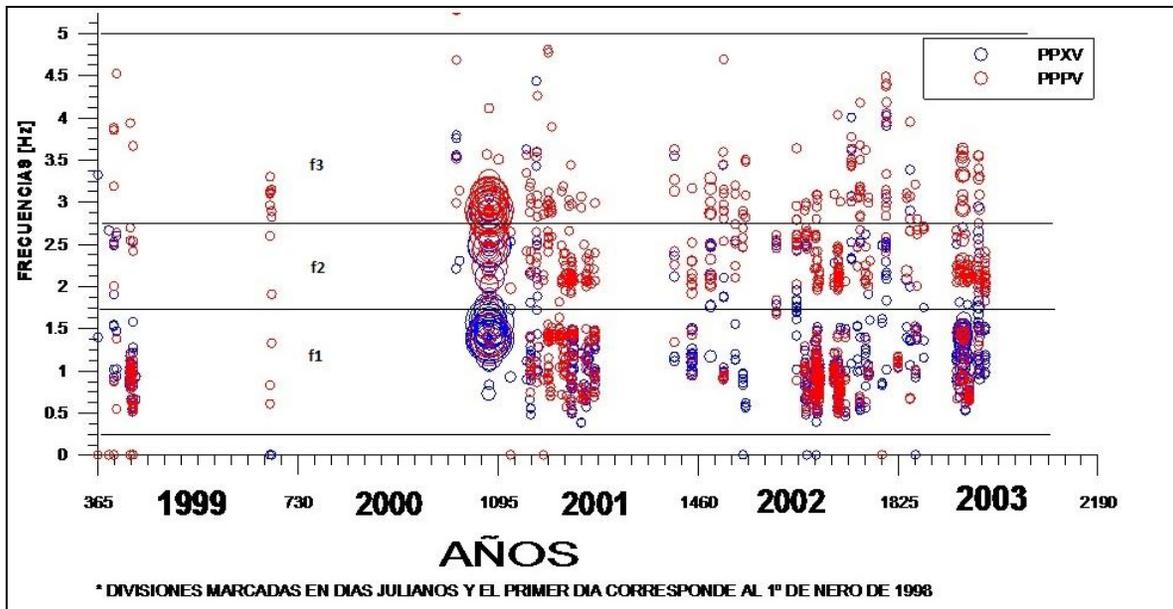


Figura 4.5. Gráfica del contenido de frecuencias en la componente Z de los episodios de temblor registrados en las estaciones de Canario (PPP) y Chiquipixtle (PPX).

Con base a los intervalos de frecuencias descritos anteriormente, se graficaron el número de eventos que caen dentro de los 3 intervalos de frecuencias (f1: de 0.5 a 1.750, f2: de 1.770 a 2.5 y f3 de 2.5 en adelante).

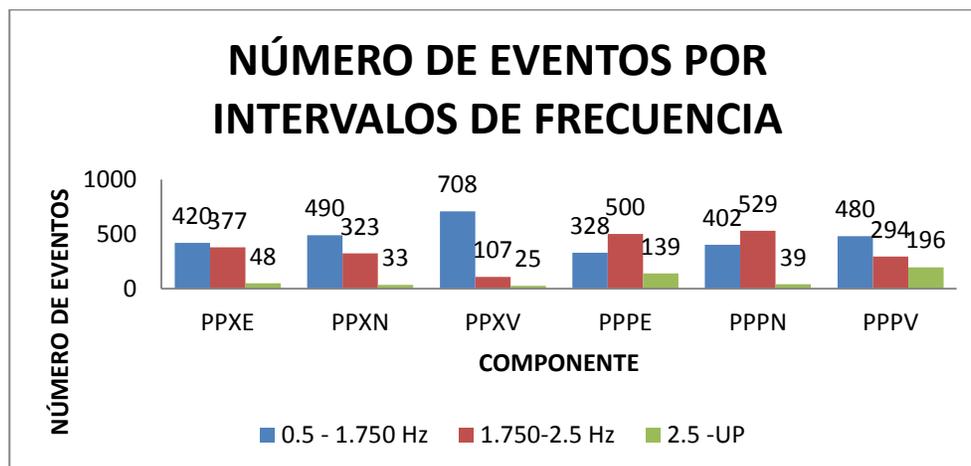


Figura 4.6. Número de eventos por intervalos de frecuencias.

Como se puede observar en la Figura 4.6 para la estación Chiquipixtle el intervalo de frecuencia dominante es el rango f1 (de 0.5 a 1.750 Hz) y para la estación canario es el rango f2 (de 1.750 a 2.5 Hz).

4.1.3 Variación en la frecuencia de los sobretonos

Los sobretonos en los episodios de tremor armónico son bastante estables en cada episodio, presentando una variación de armónico a armónico que va de los 0.5 a 1.5 Hz. En algunos segmentos se pueden observar hasta 7 u 8 armónicos. En la Figura 4.7 se muestra un segmento de tremor armónico registrado en la estación Chiquipixtle, el día 09 de marzo de 2002 a las 01:30 hrs. En este segmento se observa la frecuencia fundamental y 6 armónicos con una separación de 0.5 Hz, aproximadamente, entre pico y pico.

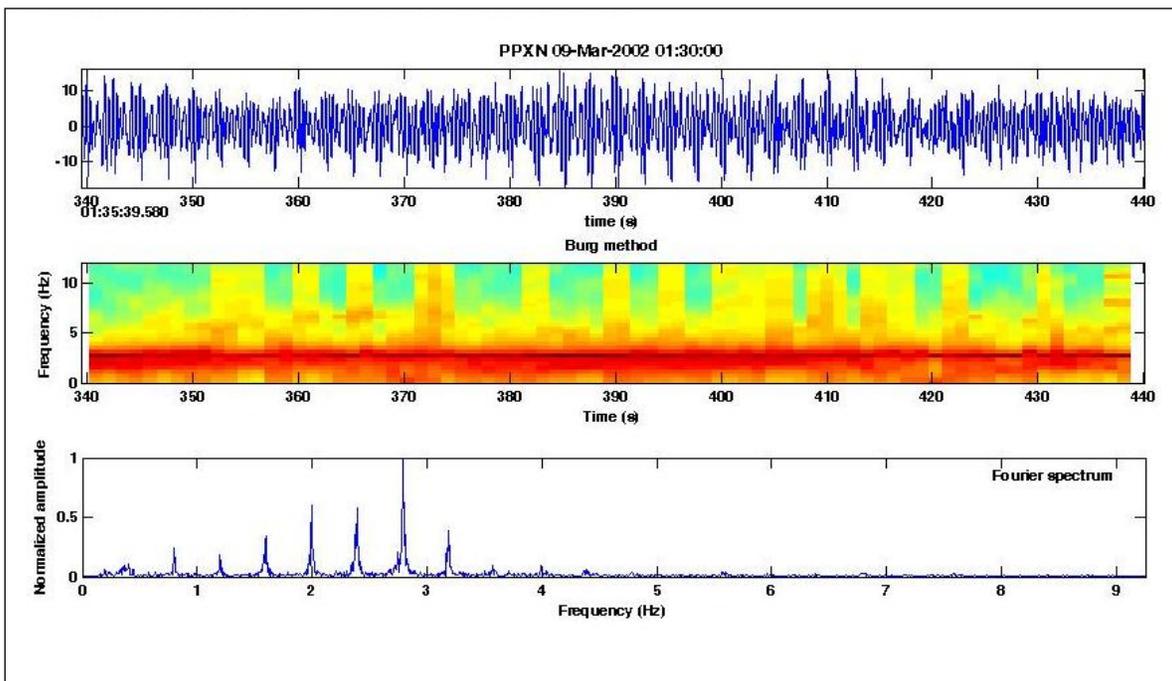


Figura 4.7 Segmento de tremor armónico registrado en la estación Chiquipixtle el día 09 de marzo de 2002 a las 01:30 horas.

En la Figura 4.8 se presenta otro segmento de episodio de tremor armónico con sobretonos equiespaciados cada 1 Hz. Este episodio se registró el día 14 de marzo de 2001 en la estación canario en su componente vertical.

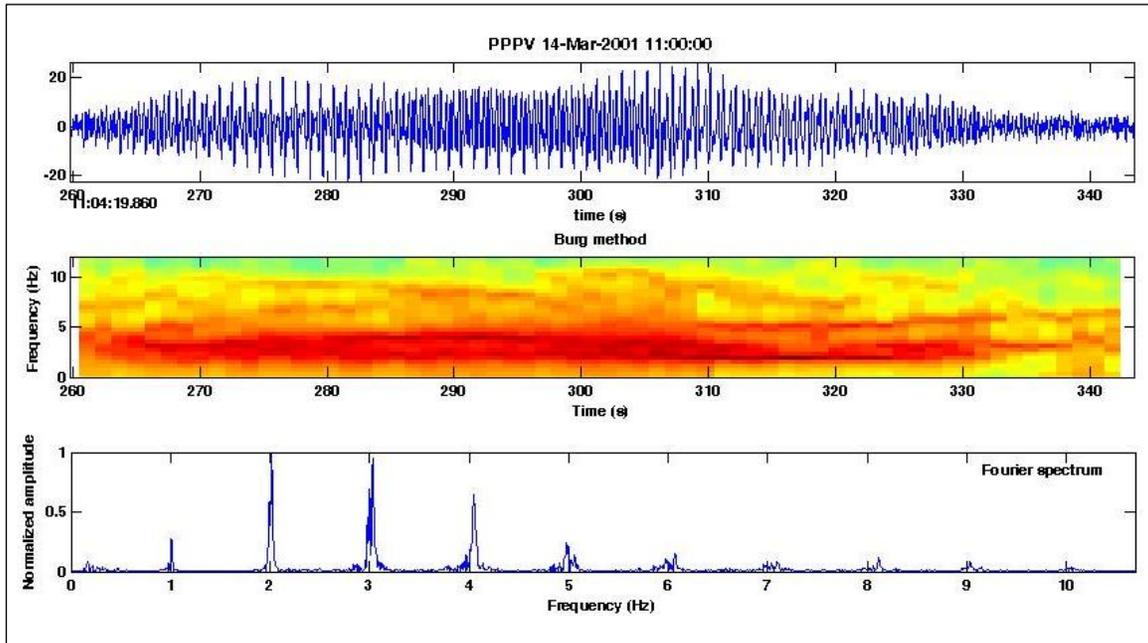


Figura 4.8 Segmento del episodio de tremor registrado el 14 de marzo de 2001 en la estación canario en su componente vertical. Los sobretonos están espaciados a 1 Hz aproximadamente.

4.2 Eventos VT

Desde su reactivación, en 1994, el volcán Popocatepetl se ha caracterizado por un nivel bajo de ocurrencia de sismos volcano-tectónicos (Martínez, 2006). Estos eventos están presentes en todo el periodo de análisis de este trabajo. El número de eventos por día varía, presentándose un enjambre con un máximo de 32 eventos volcano-tectónicos el 16 de junio de 1999 (ver Figura 4.9), con una magnitud que varía de $M_c = 1.62$ a 3.3 y profundidad que va de los 4 a 7 km desde la cima del volcán. Cabe mencionar que este enjambre, muy probablemente se presentó como consecuencia del sismo ocurrido en Tehuacán, Puebla. El 7 de

julio del 2002 se registran 12 eventos volcano-tectónicos de magnitudes que va de $M_c= 1.83$ a 2.8 con profundidades de 3.5 km b.n.m. a 2.2 km s.n.m.

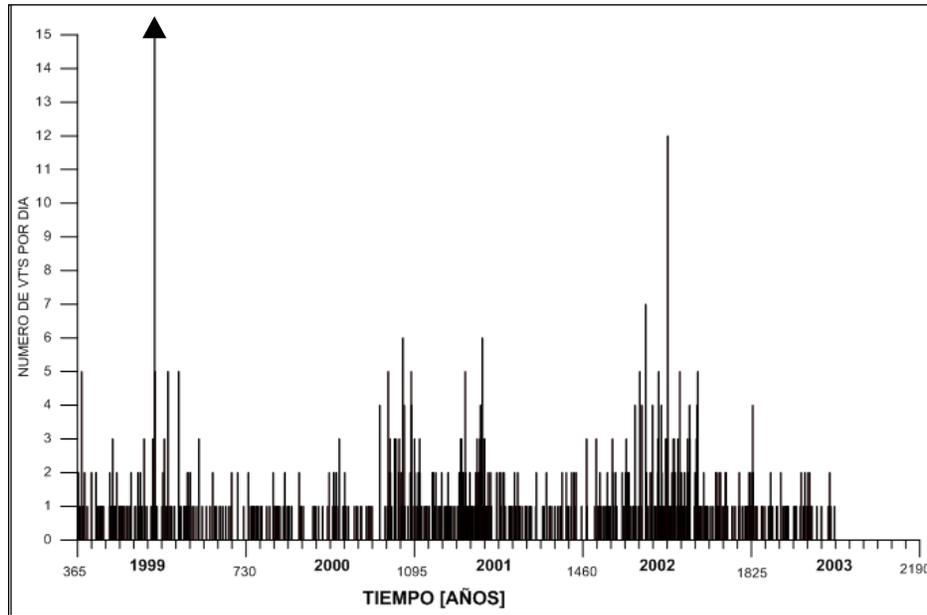


Figura 4.9- Gráfica de eventos volcano-tectónicos por día. El triángulo indica que el 16 de junio de 1999 se registraron 32 eventos VT's

Tabla 4.2 Número de eventos volcano-tectónicos registrados por mes. (Datos proporcionados por la Dra. Alicia Martínez Bringas, CENAPRED)

	Ene.	Feb.	Mar.	Abril.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic
1999	17	9	16	13	15	45	19	17	9	6	8	3
2000	11	7	13	07	4	5	14	8	8	5	27	36
2001	18	12	11	32	39	13	17	15	6	8	10	9
2002	9	12	15	22	30	31	47	27	26	17	9	18
2003	14	7	9	11	10	7						

En la Tabla 4.2 se tabulan el número de eventos VT por mes, estos datos fueron proporcionados por la Dra. Alicia Martínez Bringas. Para el mes de noviembre del 2000 se registran 27 eventos VT y para diciembre de ese mismo año se reportan 36 eventos VT, es muy notable el aumento de estos eventos en los dos últimos

meses de ese año. En el 2001 los meses de enero, abril, mayo y julio son los meses con mayor actividad de VT's reportada con 18, 32, 39 y 17 eventos, respectivamente. A lo largo de todo el año 2002 se registran un gran número de VT's, siendo los meses con mayor actividad de abril a septiembre. Finalmente en el 2003 el mes de enero fue el que presento mayor actividad con un total de 14 VT's registrados. La profundidad de estos eventos varia, el promedio esta entre 3 y 8 km desde la cima, pocos eventos alcanzan profundidades por debajo de los 8 km desde la cima, ver Figura 4.10.

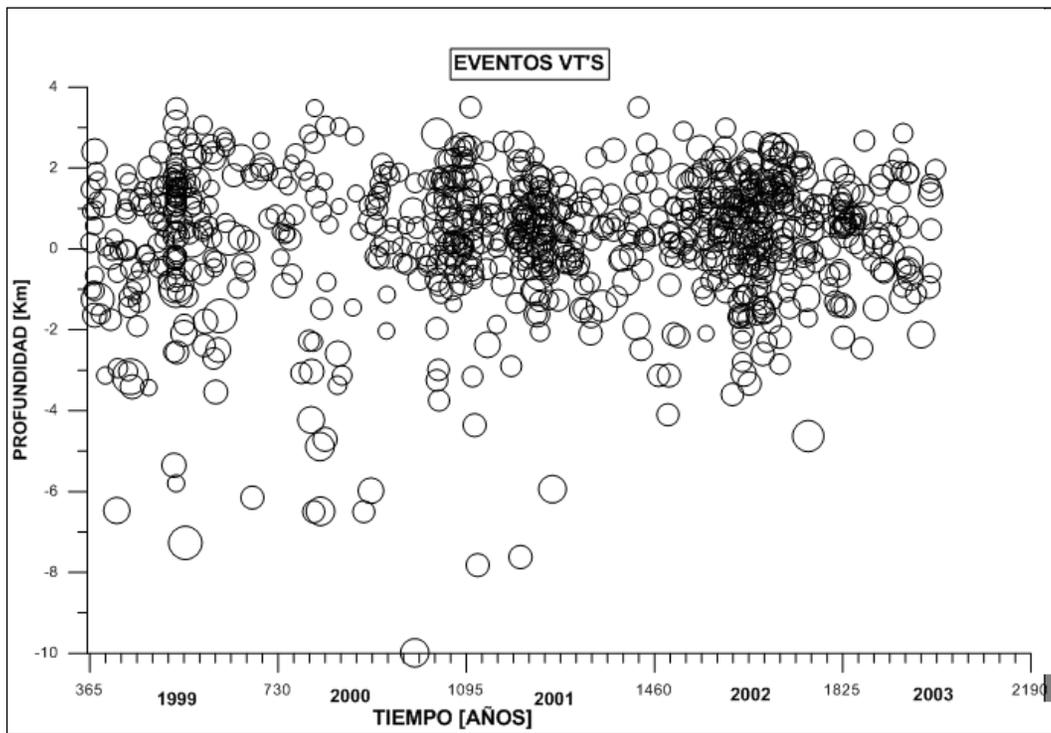


Figura 4.10- Gráfica de profundidad de los eventos VT's.

4.3 Eventos LP

La ocurrencia de eventos LP durante el periodo de análisis es muy grande, en la Tabla 4.3 se tabulan el número de eventos LP por mes (comunicación personal Dra. Alicia Martínez Bringas). En 1999 la sismicidad de este tipo es baja

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

comparada con los años siguientes, los meses con una mayor ocurrencia de eventos LP son marzo y diciembre con 683 y 668 eventos mensuales, respectivamente. Para el año 2000 presentó la mayor cantidad de eventos, concentrándose, estos, de septiembre a diciembre del mismo año. En el 2001 los meses de marzo, abril y agosto presentan la ocurrencia de sismos LP por arriba de los 1000 eventos mensuales. En el 2002 abril y mayo son los meses con mayor cantidad de LP. Finalmente en el 2003 la ocurrencia de estos disminuye, alcanzando 774 en el mes de marzo. Es notorio como este tipo de sismicidad va en aumento conforme pasa el tiempo (durante el periodo de análisis). Por otro lado la sismicidad diaria también presenta grandes variaciones, como se puede observar en la Figura 4.11, el 16 y 17 de agosto de 2001 se registraron más de 400 y 371 eventos, respectivamente, estas cantidades son las más alta registrada en un día desde su reactivación. Los días del 13 al 19 de diciembre del 2000 se registraron 300 LP por día, dando un total de 2100 eventos tan solo en estos 7 días. En el 2002, enero 23, febrero 19 y abril 28 se registran 200 eventos por día. En el 2003 el día con mayor cantidad de eventos registrados es el 08 de febrero con 129 eventos, desde esta fecha comenzó a bajar el registro de eventos LP.

Tabla 4.3 Número de eventos LP registrados mensualmente

	Ene.	Feb.	Mar.	Abril.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic
1999	252	305	683	252	219	261	349	338	308	580	505	668
2000	583	1258	887	612	468	508	585	766	1254	1203	2741	3394
2001	524	361	1209	1182	456	678	849	1985	869	503	460	828
2002	482	588	385	912	1223	352	601	807	550	251	501	638
2003	695	657	774	307	547	693						

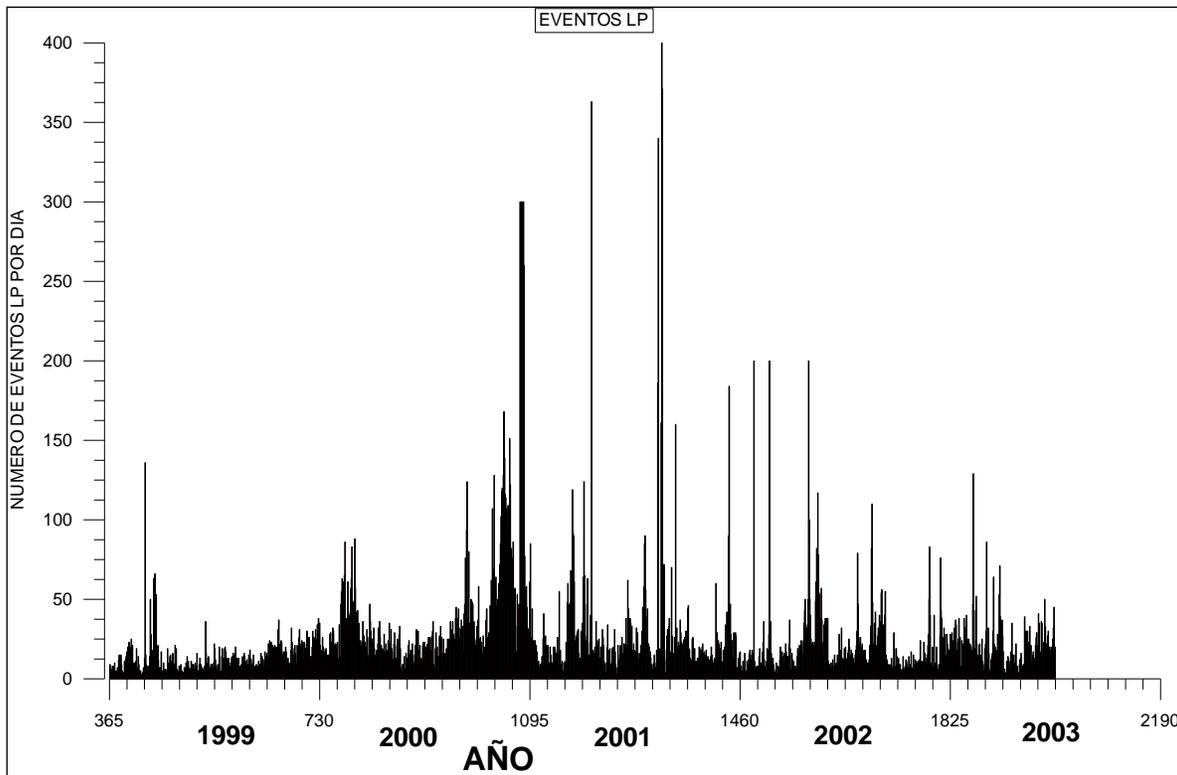


Figura 4.11- Número de eventos LP por día (CENAPRED).

4.4 Explosiones.

En este periodo de análisis el CENAPRED reportó aproximadamente 35 explosiones distribuidas de la siguiente manera: 6 explosiones durante los meses de marzo y abril para el 2009; 6 explosiones en los meses de enero, octubre y diciembre para el 2000; 8 explosiones en los meses de marzo, abril, mayo, junio, julio y septiembre para el 2001; 6 explosiones en los meses de enero, febrero, marzo y diciembre para el 2002 y finalmente 8 explosiones en los meses de febrero y abril para el 2003.

Tabla 4.4 – Días en que el CENAPRED reporto explosiones.

Mes Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1999			11,12, 18,19	4,15								
2000	12									16		17,18, 24,27
2001			13	16,29	13,31	09	3		8			
2002	23	19,23			02,21							18
2003		4,6, 14,28		17,24, 26,28								

La Tabla 4.4 muestra los días en que se registraron estas explosiones. El tamaño de las mismas fue de pequeñas a moderadas y solo para los días 18 y 19 marzo de 1999 se reportaron de moderadas a grandes.

En la Figura 4.12 se muestra una explosión ocurrida el día 19 de diciembre del 2000 a las 06:56, hora local, tomada desde el cerro de Tlamacas. Esta explosión lanzó fragmentos incandescentes en el flanco oeste del cráter a una distancia de 1 km. Así mismo se puede observar una columna de ceniza que se elevó a más de 3 km de altura.



Figura 4.12. Explosión registrada el día 19 de diciembre del 2000 a las 06:56 hrs. (tomada de www.cenapred.unam.mx)

4.5 Exhalaciones.

Desde la reactivación del Volcán en 1994, las exhalaciones han estado presentes, aun en periodos de relativa calma. Para este análisis, los datos utilizados se clasificaron en: exhalaciones con columna eruptiva menor a 2 km (e) y exhalaciones con columna eruptiva mayor a 2 km (E). La mayor cantidad de exhalaciones con columna eruptiva mayor a 2 km se presentan de septiembre de 2001 a febrero de 2002 y de noviembre de 2002 a junio de 2003. Las exhalaciones con una columna eruptiva menor a 2 km son más frecuentes en los primeros meses de 1999, de marzo de 2000 a febrero de 2001, de abril a diciembre de 2001 y de enero a marzo de 2003. Durante todo el periodo de análisis se reportaron emisiones de vapor de agua y gas así como emisiones de ceniza, que acompañan estas exhalaciones.

En la Figura 4.13 se muestra la imagen de una exhalación registrada en día 14 de marzo de 2001 a las 17:25 hrs., esta exhalación es acompañada por vapor de agua, gas y pequeñas cantidades de ceniza.



Figura 4.13 Exhalación registrada el día 14 de marzo de 2001 a las 17:25 hrs. (tomada de www.cenapred.unam.mx)

4.6 Domos.

La presencia de domos en el cráter de un volcán es señal de que material magmático está ascendiendo a la superficie. El volcán Popocatepetl no podía ser la excepción. El CENAPRED reporta las siguientes fechas de emplazamientos de domo en el cráter:

Tabla 4.5 – Fechas en que se reporta emplazamiento de domo en el cráter del volcán. (Datos proporcionados por el Ing. Ángel Gómez Vázquez, CENAPRED).

Año	Mes y Día en que se reportaron explosiones
2000	Enero 12, Agosto 28 y Diciembre 13
2001	Febrero 28, Agosto 9 y 20, Septiembre 8 y Noviembre 11
2002	Enero 24, Febrero 28, Mayo 22, Agosto 2 y Noviembre 23
2003	Enero 10 y 16 y Abril 8

Los domos juegan un papel muy importante en la actividad del volcán, ya que éstos obstruyen la salida de los gases y fluidos magmáticos hacia la superficie, acumulándose la presión dentro de los conductos, y provocando explosividad en el cráter.

En la Figura 4.14 se muestra la presencia de domo en el cráter. Esta fotografía fue tomada en un sobrevuelo por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes el día 11 de diciembre del 2002.

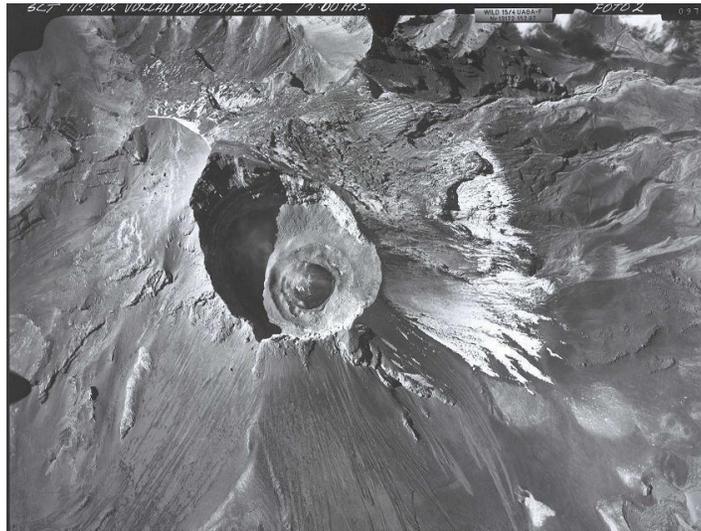


Figura 4.14 Fotografía de domo en el cráter del volcán tomada el 11 de diciembre del 2002 por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (Tomada de www.cenapred.unam.mx)

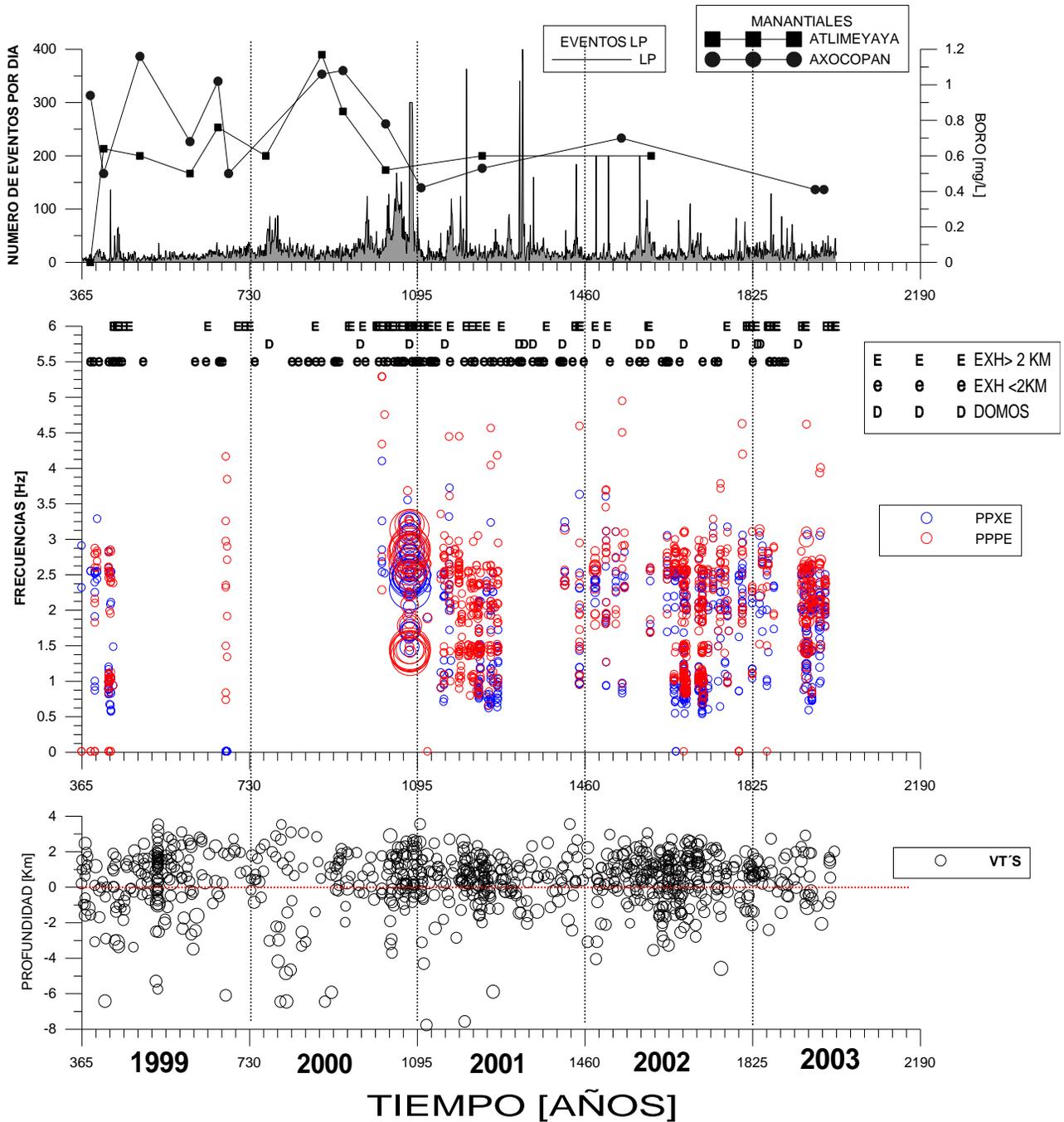
CAPÍTULO 5. CORRELACION Y DISCUSION DE LOS EPISODIOS DE TREMOR

A continuación correlacionaremos la actividad de diferentes fenómenos volcánicos como son: eventos Volcano-tectónicos, de Largo Periodo, niveles de Boro, Exhalaciones y Explosiones con los episodios de tremor analizados en este trabajo, para ver su comportamiento en conjunto y así poder entender mejor la dinámica que se lleva a cabo dentro del edificio volcánico.

5.1 Tremor y Niveles de Boro

La concentración de boro por arriba de los niveles de detección en varios manantiales, en un periodo de intensa y explosiva actividad volcánica, sugiere la interacción de gas volcánico en los manantiales (Armenta et al., 2008). Como se puede observar en la Figura 5.1 para los meses de abril a octubre de 1999 cuando hay lecturas altas de boro registradas en los manantiales Atlimeyaya y Axocopan, no hay registro de episodios de tremor. Estos altos niveles sugieren que empieza un movimiento de material dentro de la cámara magmática, o que el magma empieza a ascender, aunque esto último no se puede correlacionar con episodios de tremor. Al final de estos meses las lecturas de boro descienden drásticamente. En noviembre se tiene registro de un episodio de tremor y los valores que se registran de boro aumentan de forma considerable. De enero a septiembre del 2000, aunque se registran episodios de tremor, no son muy constantes y para este análisis no hay datos, en éste lapso de tiempo los niveles de boro se vuelven a registrar altos, lo cual indicaría que el material magmático sigue su ascenso a la superficie pero lo hace de una manera tan lenta y estable que no es posible correlacionar con eventos de tremor. Cuando se presentan los episodios de tremor en diciembre del 2000 las lecturas de boro son bajas a comparación de meses anteriores, para este entonces el material ya había ascendido completamente y por tanto la interacción a niveles profundos ya no se daba. En junio de 2001

vuelven a subir los niveles de boro y esto se pueden correlacionar con los episodios de tremor registrados durante los meses de mayo a agosto. Esta correlación puede deberse a material remanente en el interior de la cámara magmática. Para el mes de marzo del 2002 se registran pocos episodios de tremor y las lecturas de boro suben un poco a comparación de la lecturas anteriores. El aumento en estas lecturas se correlaciona con los episodios de tremor registrados. Finalmente la última lectura que se tiene en el periodo de estudio son para los meses de mayo y junio del 2003, pero estas lecturas son solo del manantial Axocopan ya que en Atlimeyaya no se reportan niveles registrables. Así mismo estas lecturas son las más bajas del todo el periodo de estudio. Los episodios de tremor aunque son de duración y amplitud considerable no se correlacionan con los niveles bajos de boro, esto indicaría que el material ya se encuentra muy somero y no alcanza a llegar completamente a los manantiales. El boro aparece en uno o más manantiales por un corto tiempo y después desaparece hasta el siguiente episodio relevante de actividad volcánica. Este comportamiento refleja una fuente intermitente de boro, cuya concentración en el agua no es lo suficiente como para permanecer o incrementar con el tiempo. Con la ausencia de frecuente actividad explosiva, las anomalías de boro han aparecido a priori de un emplazamiento de domo. Por lo tanto el boro puede considerarse como un posible precursor de actividad efusiva (Armenta et al., 2008).



* DIVISIONES MARCADAS EN DIAS JULIANOS Y EL PRIMER DIA CORRESPONDE AL 1º DE NERO DE 1998

Figura 5.1- Gráfica de las frecuencias principales de los episodios de tremor (en medio), profundidad y magnitud de los eventos volcanotectónicos (abajo), número de eventos LP por día y niveles de boro registrados en los manantiales (arriba), (E) Exhalaciones mayores a 2 km, (e) Exhalaciones menores a 2 km y (D) Domos.

5.2 Tremor y Eventos LP

Los eventos de largo periodo son de las señales más características en un volcán activo. En el periodo de estudio del presente trabajo, la mayoría de los episodios de tremor, están precedidos por eventos de largo periodo. Así mismo se observa que los eventos de largo periodo están asociados con la emisión de gases y cenizas (Del Pozo et al, 2002). El aumento de en este tipo de sismicidad está relacionada con el ascenso del magma o gases, a profundidades someras (menos de 3 km) por debajo del cráter. En el volcán Redoubt, Alaska, el tremor fue observado como el resultado de un enjambre de eventos LP individuales, el cual precedió la erupción de este volcán el 14 de diciembre de 1989 (Chouet et al, 1994) y en el volcán Monserrat, los LP usualmente se presentan en enjambres y ocasionalmente se convierten en tremor.

También se puede observar que después de algunos episodios de tremor le sigue una gran cantidad de eventos de largo periodo. Esto puede deberse a lo propuesto por Aki et al. (1977), en donde modelan un conjunto de grietas conectadas entre sí por canales angostos y estas grietas se abren y se cierran en respuesta a la presión de los fluidos magmáticos. Una vez que la presión dentro de las grietas cae, ya no es suficiente para mantenerlas abiertas y por lo tanto no es posible generar tremor, dando lugar a los LP's. Otro modelo puede ser la rápida descarga de gases dentro de los conductos (Steinberg and Steniberg, 1975). Lahr et al. (1994), encuentran para el volcán Redoubt, que los eventos LP resultan de la excitación volumétrica de grietas o conductos llenos de fluidos involucrados en el transporte hacia la superficie de agua con vapor y/o otros gases magmáticos.

El 16 de agosto del 2001 se registra la mayor cantidad de eventos de largo periodo, contabilizando más de 600 eventos. En este caso no se observó tremor pero si se pudo corroborar la presencia de un domo en el cráter. Este enjambre de LP's se parece a los que describe Gil-Cruz et al. (1999) para el volcán Galeras en Colombia y en donde también se pudo corroborar un emplazamiento de domo.

5.3 Tremor y Eventos VT.

Los eventos volcano-tectónicos se dan a una mayor profundidad (de 3 a 10 km por debajo del cráter), que el tremor y los eventos de largo periodo. Para el volcán Popocatepetl Martínez Bringas (1998) encuentra que para 1995 ocurren en su mayoría entre los 5 y 8 Km, desde la cima, y que existe una zona rocosa con alto contenido de material fundido que se extiende a la región oriental del volcán. Dentro del periodo de estudio el 92% de los eventos volcanotectónicos se encuentran entre los 3 y 7 Km desde la cima, con algunos VT's que alcanzan hasta los 11 Km desde la cima. Estas profundidades sugieren un cambio en la presión y el fracturamiento del conducto (Valdés et al., en preparación) y con esto el transporte de material.

En cuanto los volcanotectónicos se vuelven más someros (3.5 a 6 km por debajo del cráter), los episodios de tremor se hacen más frecuentes. Por lo general se presentan después de un episodio de tremor. Estos reflejan cambios de los esfuerzos asociados con la inyección y transporte de magma y volátiles hacia la superficie (Lahr et al., 1994). Así mismo se puede observar en la figura 5.1 que cuando hay presencia de grandes episodios de tremor, también se registra un aumento en los volcanotectónicos los cuales aparecen como enjambres, lo que representa un claro indicativo de que hay movimiento de fluidos magmáticos, ya sea dentro del reservorio magmático propuesto por Arciniega (1998) entre los 0 y 5 Km bnm, o en el conducto en donde Arciniega (1998), localizó la posible fuente de tremor, a profundidades de 2.5 km bnm.

De un estudio de eventos sísmicos de los volcanes Ruapehu y Ngauruhoe en Nueva Zelanda, Latter (1979), claramente distinguió eventos volcanotectónicos ocurriendo en la región sólida del volcán.

En otros volcanes, como en la erupción del Monte Pinatubo el 15 de junio de 1991 (Harlow et al., 1999), o la erupción del volcán Augustine en Alaska en 1986 (Power,

1988), los eventos volcanotectónicos son la actividad sísmica predominante, cosa que no sucede en el volcán Popocatepetl, ya que aunque la sismicidad aumenta durante los episodios de tremor, los eventos volcanotectónicos, no llegaron a registrar los niveles de las erupciones antes mencionadas. Esto nos indica que estructuralmente el volcán es estable y sólo se deforma sin romperse, para dar paso al material magmático que asciende al cráter (Martínez-Bringas, 2006).

5.4 Tremor, Exhalaciones y Explosiones.

Las exhalaciones de gas, ceniza y vapor de agua están presentes en todo el periodo de estudio y se observa un claro aumento de estas cuando se presentan episodios de tremor.

Las exhalaciones moderadas (con columna eruptiva por debajo de los 2 km) fueron mucho más frecuentes, aunque no se hayan registrado episodios de tremor. Las exhalaciones grandes (con columna eruptiva por arriba de los 2 km) aunque menos frecuentes, aparecen con grandes episodios de tremor y explosiones en el cráter. Este tipo de actividad se ha observado en otros volcanes como el volcán Galeras, en Colombia (Gil-Chouet, 1997), el Monte Pinatubo, en las Filipinas (Harlow et al., 1999), entre otros.

La presencia de las exhalaciones, ya sean grandes, moderadas o bajas, nos indican que hay una gran cantidad de gases dentro de los conductos y estas se asocian con la intrusión de magma a profundidades someras (de 2 a 5 km por debajo de cráter).

Después de la ocurrencia de una gran exhalación o de una explosión se han presentado episodios de tremor.

5.5 Variación de la frecuencia fundamental y sus armónicos de los episodios de tremor.

La frecuencia fundamental de los episodios de tremor de diciembre del 2000 aumenta, a valores de frecuencia más altas, y estas se centran entre 1.25 y 3.25 Hz, en relación a los episodios previos de tremor, los cuales presentan un contenido de frecuencias, de valores más bajos (de 0.5 a 2.75 Hz). Este aumento en el contenido de frecuencias puede ser por dos razones: a) Si la presión del fluido aumenta y el conducto es angosto, la velocidad de salida aumentará y esto nos puede generar valores de frecuencias altos (en este caso las ya mencionadas de 1.25 a 3.25) y b) si la presión del fluido aumenta, el conducto es ancho y además hay una gran cantidad de material queriendo salir a la superficie, también nos generará frecuencias altas. Para el inciso (b) puede ser el caso de la erupción de diciembre del 2000, donde se pudo observar la salida de una gran cantidad de material. Para los episodios de tremor analizados del mes de enero al mes de abril del 2001 el contenido de frecuencias comienza a bajar y se centran en el ancho de banda de 0.75 a 2.75 Hz, esto puede ser debido a que la cantidad de material que se encuentra en los conductos y que busca salir a la superficie es mucho menor que la del episodio de del 2000 y puede deberse a lo que se plantea en el inciso (a), mencionado anteriormente. El ancho de banda de las frecuencias fundamentales en los episodios de mayo a junio del 2001, disminuye y se encuentran entre 0.75 y 2.5 Hz. Los episodios posteriores tienen un ligero aumento en el ancho de banda de la frecuencia fundamental y están entre 0.75 y 3 Hz. Neuberg (2000) sugiere que los eventos de bajas frecuencias indican un mecanismo de recarga.

También se observan cambios en la frecuencia de un mismo episodio de tremor y esto puede ser debido al cambio en la frecuencia del evento disparador del mismo episodio (Powell and Neuberg, 2003). En el volcán Arenal también se ha observado este comportamiento y sugieren que la fuente debe de ser un

mecanismo de retroalimentación estable o no destructivo. Julian (2000) sugiere que las oscilaciones del fluido son causadas por fluctuaciones en el flujo del material a través de los conductos elásticos, y amortiguando el sistema pueden producir doble periodo.

Para el volcán Monserrat Pawell y Neuberg (2003) observaron que los eventos de bajas frecuencias son disparados más frecuentemente antes de una explosión y menos frecuentemente después de ella. Basado en estas observaciones Neuberg (2000) sugiere una conexión relacionando la presurización del sistema volcánico con la frecuencia de disparo y la fracción del volumen del gas. Así mismo sugiere que los armónicos son debidos a un cambio en la tasa de excitación de la fuente.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Con base en el análisis espectral de los episodios de tremor durante el período de enero de 1999 a junio de 2003, en general, el contenido de frecuencias es estable. Existen pequeñas fluctuaciones y estas se presentan cuando hay una mayor cantidad de magma ascendiendo dentro de los conductos hacia la superficie. La mayoría de los episodios de tremor se centran en el rango de frecuencias de 0.5 a 2.5 Hz.

La amplitud del tremor está relacionada con la presión, la velocidad, la geometría de los conductos y cantidad de magma que se encuentra en los conductos. Las mayores amplitudes se pueden observar en los episodios de tremor de diciembre del 2000 y abril de 2003. En donde éstos tenían un gran contenido de magma así como ceniza y vapor de agua y/o gas.

El 78 % de los episodios analizados tienen una amplitud baja (de 0 a 200 cuentas) y esta amplitud se relaciona con el contenido de gases y la velocidad del fluido dentro de los conductos.

El tremor que predomina en el volcán Popocatepetl, en el periodo de estudio, es el tremor de tipo armónico. Lo que esto implica es que el sistema de retroalimentación debe de ser estable o no destructivo.

Este periodo de estudio es de gran actividad de degasificación y se puede correlacionar muy bien los eventos de largo periodo, las exhalaciones y las explosiones con las observaciones visuales.

Días después de que se detectan altos niveles de boro, la actividad sísmica volcánica se incrementa, por lo tanto la presencia de boro en los manantiales cercanos al volcán es un claro indicativo de actividad dentro de éste. El saber esto será de mucha ayuda, en cuanto se detecten cambios en la geoquímica del volcán podemos esperar actividad importante.

6.2 Recomendaciones

El monitoreo volcánico es de mucha importancia y nos ayuda a tomar decisiones en momentos de crisis eruptivas, es por ello que debe ser constante y de calidad, por lo tanto se recomienda monitorear la evolución o variación de las frecuencias en próximos episodios de actividad ya que nos puede dar información acerca del volumen de magma que está ascendiendo a la superficie.

Se recomienda un monitoreo geoquímico constante y en un menor intervalo de tiempo entre lectura y lectura, claro siempre y cuando las condiciones lo permitan, ya que se podría correlacionar mejor con los eventos sísmicos.

El almacenamiento de datos y la disponibilidad de los mismos es una herramienta favorable para futuras investigaciones, por lo cual se sugiere que las técnicas para el guardado de los mismos se actualicen y con esto tener una mayor durabilidad de los archivos.

REFERENCIAS

- Aki, K., Fehler, M., Das, S., 1977. Source mechanism of volcanic tremor: fluid-driven crack models and their application to the 1963 Kilauea eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 2, 259-287.
- Arámbula Mendoza, R., 2002. Interpretación del tremor armónico registrado en el volcán Popocatepetl durante la crisis eruptiva de diciembre del 2000. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería. UNAM.
- Arámbula Mendoza, R., 2007. Estado de esfuerzos en el volcán Popocatepetl obtenido con mecanismos focales, en el periodo de actividad de 1996 a 2003. Tesis de Maestría. Instituto de Geofísica. UNAM.
- Armenta, M. A., De la Cruz Reyna, S., Morton, O., Cruz, O., Cisneros, N., 2002b. Chemical variations of tephra-fall deposits leachates for three eruptions from Popocatepetl volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 113, 61-80.
- Armenta, M. A., Zamora, V., Varley, N., Ramos, E., 2002a. Randon and chemical monitoring at Popocatepetl volcano. *Geofísica Internacional* 41, 271-276.
- Armenta, M. A., De la Cruz Reyna, S. Gómez, A., Ramos, E., Ceniceros, N., Cruz, O., Aguayo, A., Martínez, A., 2008. Hydrogeochemical indicators of the Popocatepetl volcano activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 170, pp. 25-50.
- Boudal, C., Robin, C. 1987. A gigantic Bezymianny-type event at the beginning of modern Volcán Popocatepetl. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 31, pp.115-130.
- Cabral-Cano, E., Correa-Mora, F., Meertens, C., 2008. Deformations of Popocatepetl volcano using GPS: Regional geodynamic context and constrains on its magma chamber. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 170, 24-34.
- Chouet, B., 1985. Excitation of a Buried Magmatic Pipe: A Seismic Source Model for Volcanic Tremor. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 90, No. B2, p. 1881-1893.
- Chouet, B., 1996. Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting. *Nature* 380, 309-316.
- De Barros, L., Pedersen A., Helle., Métaxian, J.P., Valdés-González., Lesage, P., 2008. Crustal structure below Popocatepetl Volcano (México) from analysis of Rayleigh waves. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 170:5-11.
- De la Cruz Reyna, S., Quezada, J. L., Peña, C., Zepeda, O., Sanchez, T., 1995. Historia de la actividad reciente del Popocatepetl (1354-1995). *Volcán Popocatepetl Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994-1995*. 3-22. CENAPRED. México
- Dr. Atl, 1940. *Volcanes de México. La actividad del Popocatepetl*. Vol. 1. Edit. Polis. México. pp. 72
- Gil- Cruz, F., Chouet, B. A., 1997. Long-period events, the most characteristic seismicity

accompanying the emplacement and extrusión of a lava dome in Galeras Volcano, Colombia, in 1991. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 77, pp. 121-158.

Gil-Cruz, F., 1999. Observations of two special kinds of tremor at Galeras volcano, Colombia (1989-1991). *Annali di Geofisica*, Vol.42, No. 3

Goldstein, P., Chouet, B. 1994. Array measurements and modeling of sources of shallow volcanic tremor at Kilauea Volcano, Hawaii. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99 No. B2., p. 2637-2652.

Gómez Santiago, F. 2009. Sismicidad del Volcán Popocatepetl durante el crecimiento de dos domos de lava en agosto de 2001. Tesis de Maestría. Instituto de Geofísica, UNAM.

Hellweg, M., 2003. The polarization of volcanic seismic signals: medium or source?. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 128, pp. 159-176.

Ibañez, J.M., Carmona, E., 2000. Sismicidad Volcánica. Instituto Andaluz de Geofísica. Universidad de Granada, España.

Jiménez, Z., Espíndola, V. H., Espíndola, J. M., 1999. Evolution of the seismic activity from the 1982 eruption of El Chichón Volcano, Chiapas, México. *Bull. Volcanol.* 61:411-422.

Julian, B. R., 1994. Volcanic tremor: Nonlinear excitation by fluid flow. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, No. B6, Pp. 11,859-11,877.

Konstantinou, K. I., Schlindwein, V., 2002. Nature, wavefield properties and source mechanism of volcanic tremor: a review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2511, pp. 1-25.

Lahr, J. C., Chouet, B. A., Stephens, C. D., Power, J. A., Page, R. A., 1994. Earthquake classification, location and error analysis in a volcanic environment: implications for the magmatic system of the 1989-1990 eruptions at Redoubt volcano, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 62:137-151.

Latter, J. H., 1979. Volcanological observations at Tongariro national Park, 2 types and classification of volcanic earthquakes, 1979- 1978, Rep. 150, 60 pp. N. Z. dep. Of Sci. and Ind. Res., Geophys. Div., Wellintong.

Lermo-Samaniego, J., Antayhua-Vera, Y., Chavacán-Ávila M., 2006. Análisis de la Actividad Sísmica en el Volcán Popocatepetl (México) durante el periodo 1994-1997. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Número Especial de Geología Urbana, Tomo LVIII, Núm. 2, P. 253-257.

Lesage, P., Glangaud, F., Mars, J., 2001. Applications of autorregressive models and time-frequency analysis to the study of volcanic tremor and long-period events. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 114: 391-417.

Martin-Del Pozo, A. L., Espinasa-Pereña, R., Armienta, M. A., Aguayo, A., Reyes, M., Sánchez, G., Cruz, O., Cisneros, N., Lugo, J., Gonzáles, V., Butrón, M. A., Villareal, M., 1996. La emisión de cenizas y variaciones geoquímicas durante diciembre-marzo en el

volcán Popocatépetl. Volcán Popocatépetl Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994-1995. CENAPRED. México. 285-294.

Martin-Del Pozo, A. L., González-Morán, T., Espinasa-Pereña, R., Butrino, M. A., Reyes, M., 2008. Characterization of the recent ash emissions at Popocatépetl volcano, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 170, 61-75.

Martin-Del Pozzo, A.L., Aceves, F., Espinasa, R., Aguayo, A., Inguaggiato, S., Morales, P., Cienfuegos, E., 2002. Influence of volcanic activity on spring water chemistry at Popocatepetl Volcano, Mexico. *Chemical Geology* 19, pp. 207-229

Martin-Del Pozzo, A.L., Cifuentes-Nava, G., Cabral-Cano, E., Sánchez-Rubio, G., Reyes, M., Martínez-Bringas, A., Garcia, E., Arango- Galván, C., 2002. Volcanomagnetic signals during the recent Popocatépetl (México) eruptions and their relation to eruptive activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2384:1-14.

Martínez Bringas, A, 1998. Atenuación de las ondas coda en el volcán Popocatépetl. Tesis de Maestría. Instituto de Geofísica. UNAM.

Martínez Bringas, A., 2006. Variaciones temporales de la atenuación de las ondas coda y del valor de b, asociadas a la actividad del volcán Popocatépetl de 1995 a 2003. Tesis de Doctorado, Instituto de Geofísica, UNAM.

Martini, M., Gases Volcánicos y Eventos Eruptivos. Dep. Ciencias de la Tierra. Universidad de Florencia. Vía la Pira, 4. 50121 Florencia (Italia).

Miller, A. D., Stewart, R. C., White, R. A., Luckett, R., Baptie, B.J., Aspinall W. P., Latchman, J. L., Lynch, L. L., and Voight, B., 1998. Seismicity associated with dome growth and collapse at the Soufriere Hills Volcano, Monserrat. *Geophysical Research Letters*, Vol. 25 NO. 18, pp. 3401- 3404.

Nakanu, M., Kumagai, H., Kumazawa, M., Yamaoka, K., Chouet, B., The excitation and characteristic frequency of the long-period volcanic event: An approach based on an inhomogeneous autoregressive model of a linear dynamic system. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, No. B5, Pp. 10,031-10,046.

Neuberg, J., 2000. Characteristics and causes of shallow seismicity in andesite volcanoes. *The Royal Society*. 258, pp. 1533-1546.

Neuberg, J., Luckett, R., Baptie, B., Olsen, K., 2000. Models of tremor and low-frequency earthquake swarms on Monserrat. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 101, pp. 83-104.

Powell, T. W., Neuberg, J., 2003. Time dependent features in tremor spectra. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 128, pp. 177-185.

Quaas, R., González, R., Guevara, E., Ramos, E., De la Cruz Reyna, S., 1995. Monitoreo Volcánico: Instrumentación y Métodos de Vigilancia. . Volcán Popocatépetl Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994-1995. Pages 25-73.

Schindwein, V., Wassermann, J., Scherbaum, F., 1995. Spectral analysis of harmonic

tremor signals. *Geophysical Research Letters*, Vol. 22, No. 13, pp. 1685-1688.

Siebe, C., Abrams, M., Macias, 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*. 195-220. CENAPRED. México

Siebe, C., Macias, J. L., Abrams, M., Rodríguez, S., Castro, R., 1997. Catastrophic Prehistoric eruptions at Popocatepetl and Quaternary explosive volcanism in the Serdán-Oriental basin, East-Central México. IAVCEI Assembly, Puerto Vallarta, México. *Fieldtrip Guidebook, Pre-meeting Excursion No. 4*, pp. 87

Suárez, G. 1995. Introducción. *Volcán Popocatepetl Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994-1995*. X. CENAPRED. México.

Valdés, C., González, G., Arciniega, A., Guzmán, M., Nava, E., Gutierrez, C., Santoyo, M., 1995. Sismicidad del Volcán Popocatepetl a Partir del 21 de Diciembre de 1994 al 30 de Marzo de 1995. *Volcán Popocatepetl Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994-1995*. CENAPRED. México. 129-138.

Waitz, P., 1921. La nueva actividad y el estado actual del Popocatepetl. *Memorias de la Sociedad Científica Antonio Alzate* 37:295-313.

Witham, C. S., 2005. Volcanic disasters and incidents: A new database. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 148:191-233.