

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.

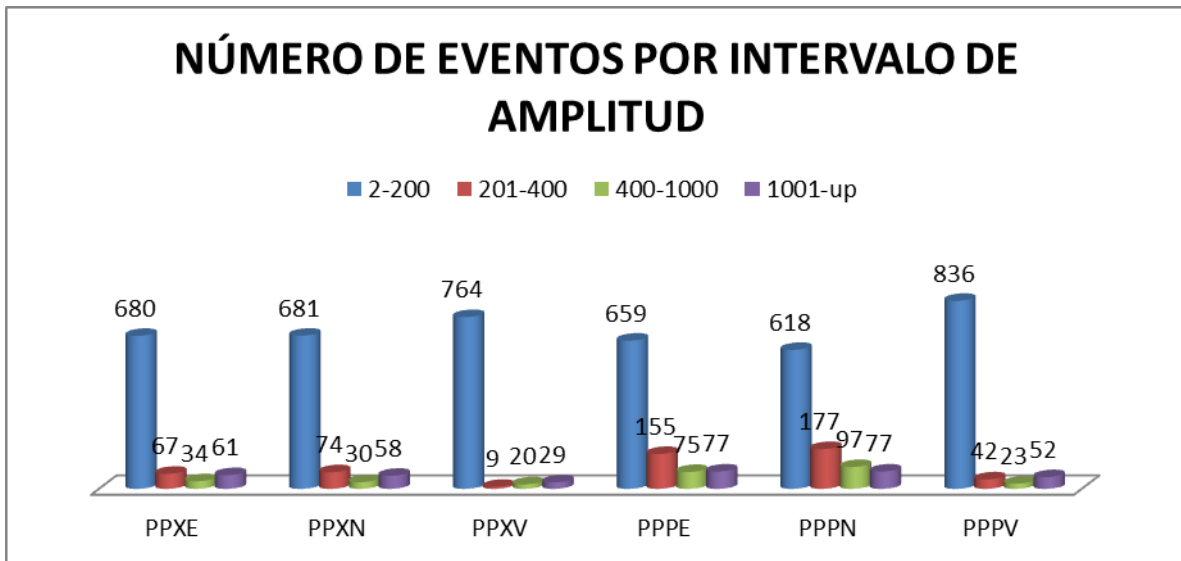


Figura 4.1- Gráfica del número de eventos por intervalos de amplitud (pico a pico).

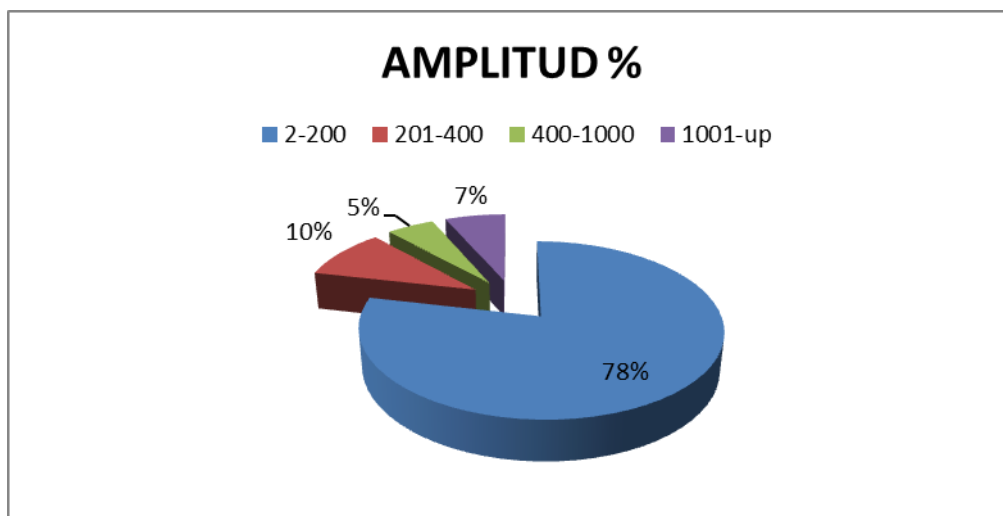


Figura 4.2. Porcentaje de los eventos que se encuentran en los rangos por intervalos de amplitud (pico a pico).

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.

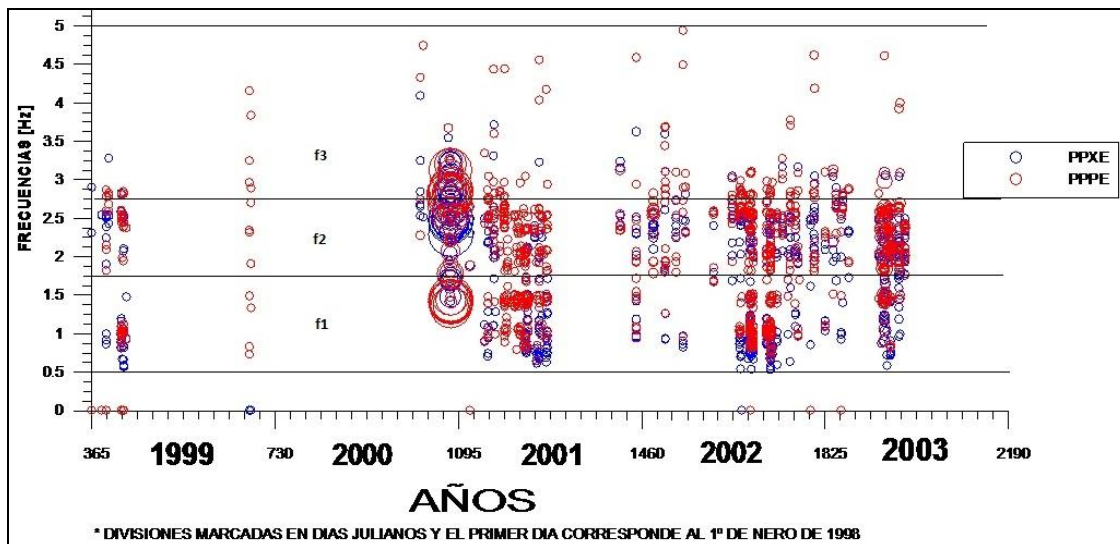


Figura 4.3. Gráfica del contenido de frecuencias en la componente E-W de los episodios de tremor registrados en las estaciones de Canario (PPP) y Chiquipixtle (PPX).

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.

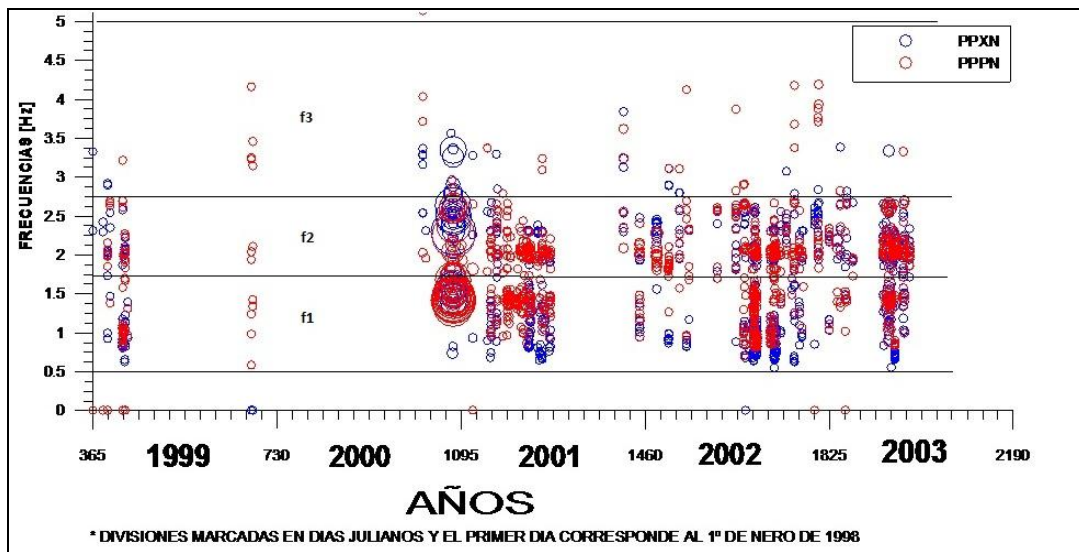


Figura 4.4. Gráfica del contenido de frecuencias en la componente N-S de los episodios de tremor registrados en las estaciones de Canario (PPP) y Chiquipixtle (PPX).

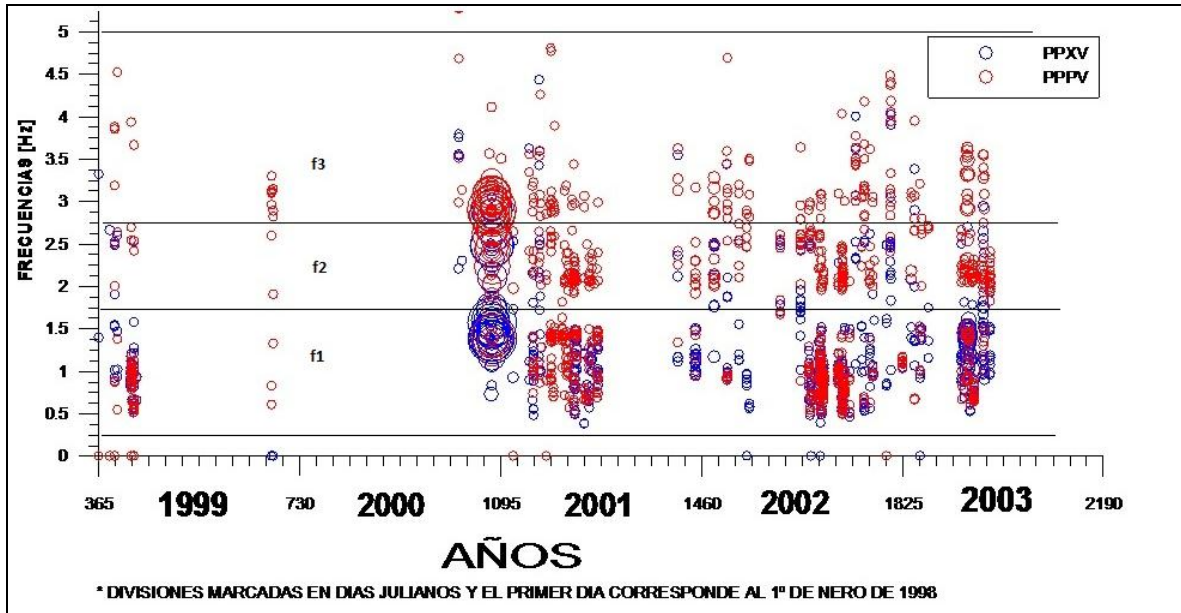


Figura 4.5. Gráfica del contenido de frecuencias en la componente Z de los episodios de tremor registrados en las estaciones de Canario (PPP) y Chiquipixtle (PPX).

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).

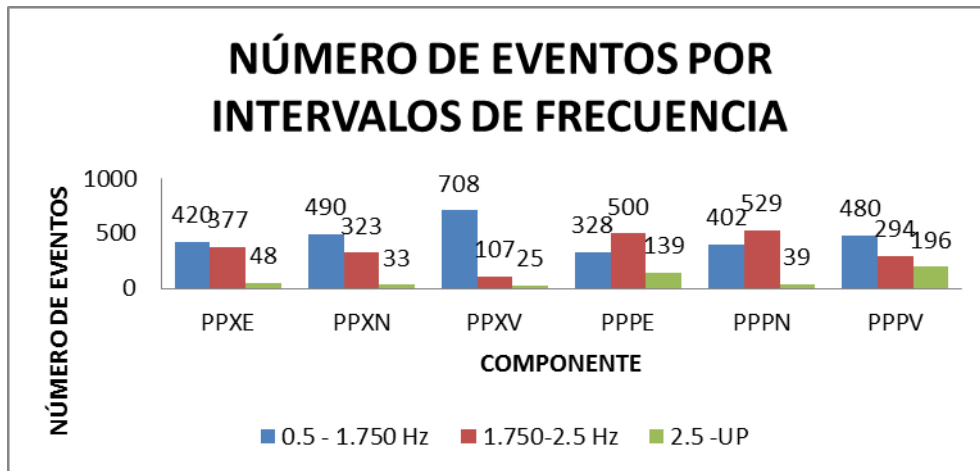


Figura 4.6. Número de eventos por intervalos de frecuencias.

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.

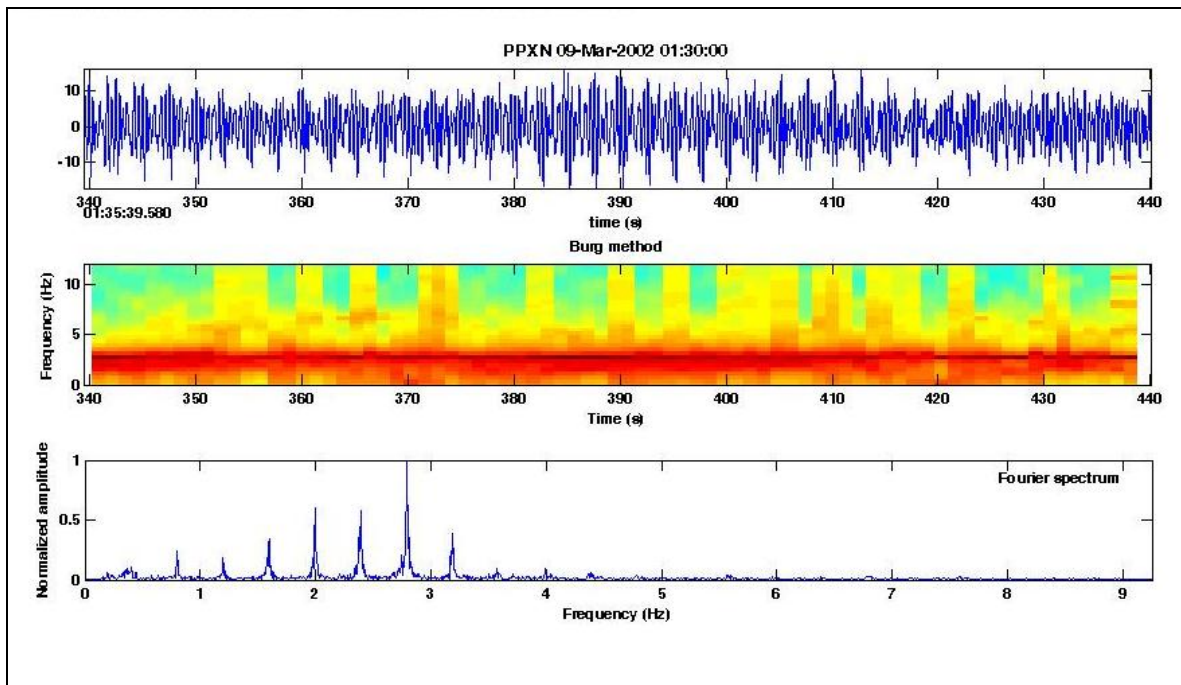


Figura 4.7 Segmento de tremor armónico registrado en la estación Chiquipixtle el día 09 de marzo de 2002 a las 01:30 horas.

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.

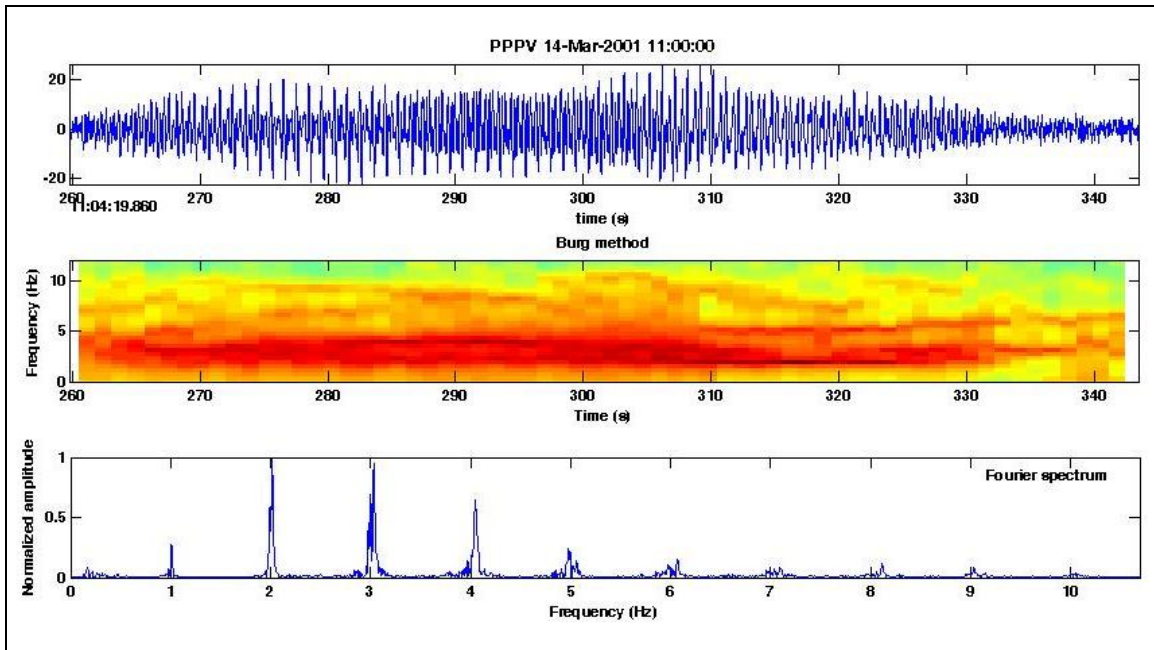


Figura 4.8 Segmento del episodio de tremor registrado el 14 de marzo de 2001 en la estación canario en su componente vertical. Los sobretonos están espaciados a 1 Hz aproximadamente.

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.

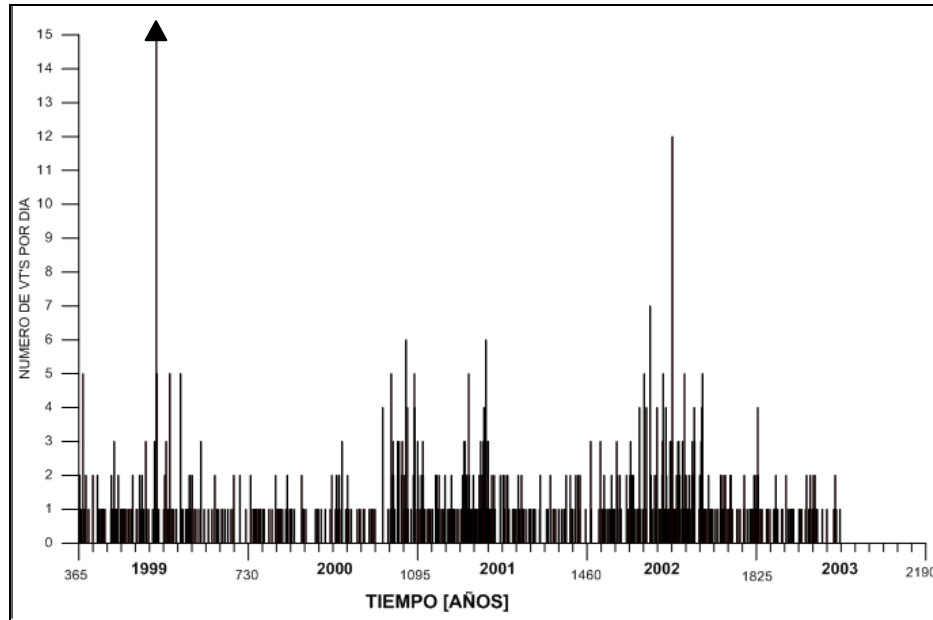


Figura 4.9- Gráfica de eventos volcano-tectónicos por día. El triángulo indica que el 16 de junio de 1999 se registraron 32 eventos VT's

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.

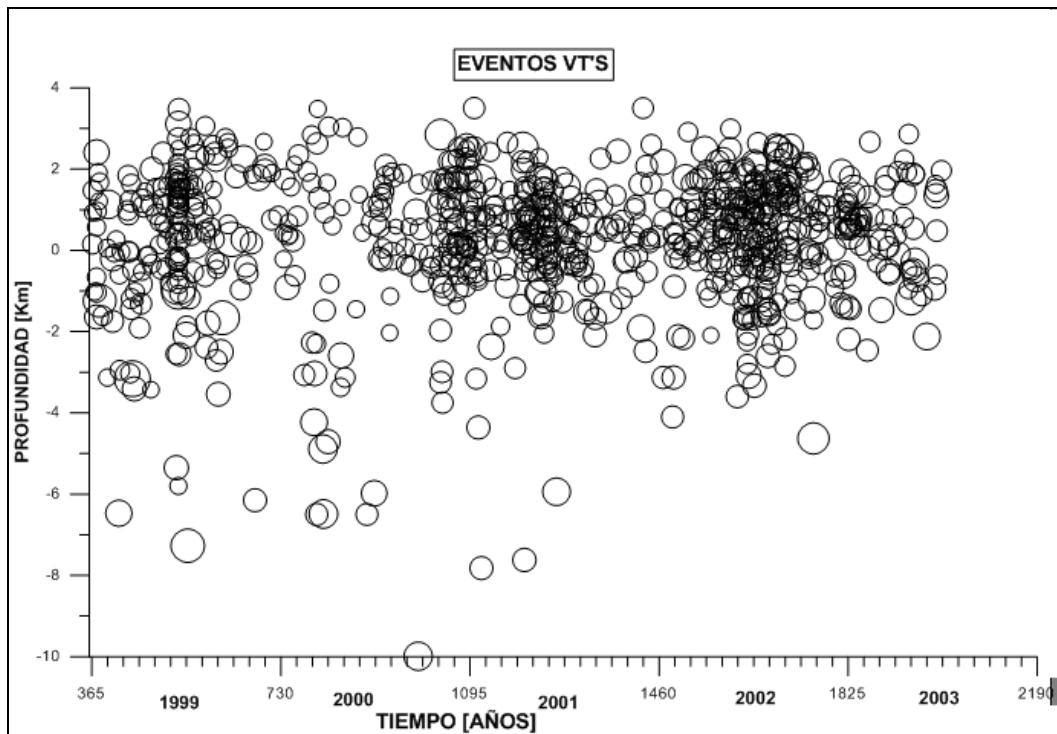


Figura 4.10- Gráfica de profundidad de los eventos VT's.

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 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						

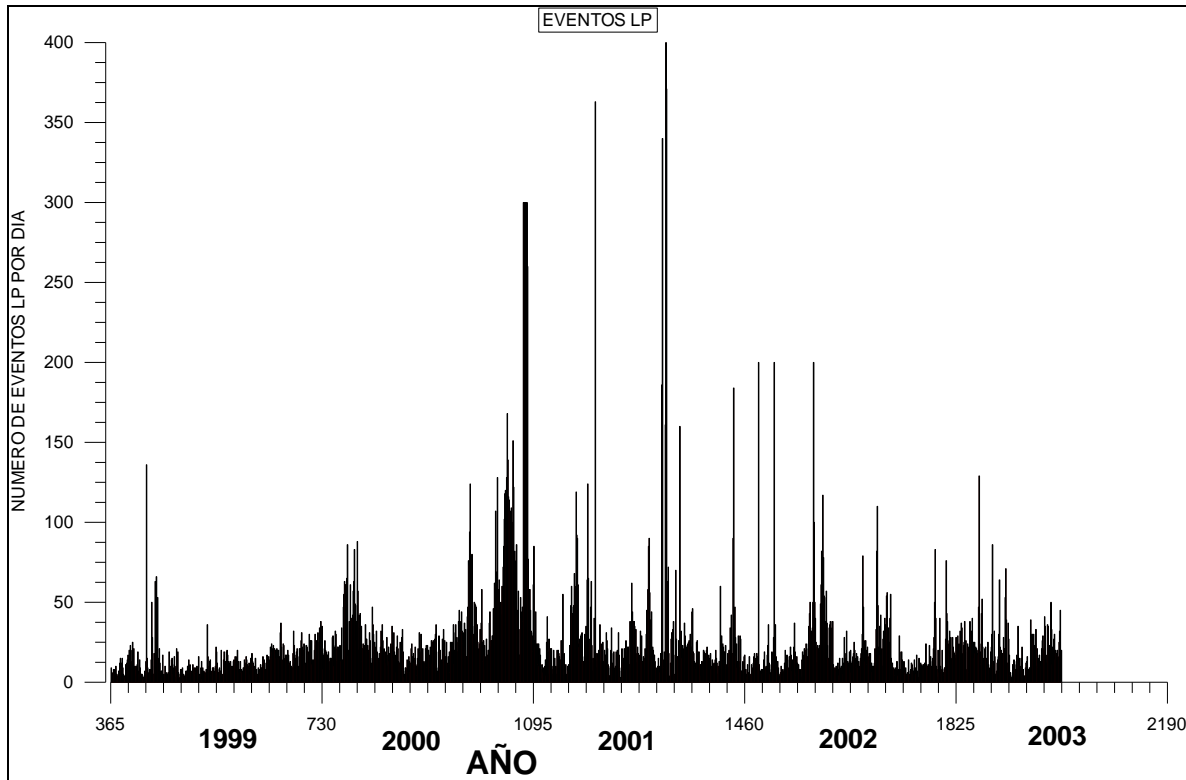


Figura 4.11- Número de eventos LP por día (CENAPRED).

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.

CAPITULO 4. RESULTADOS

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).

CAPITULO 4. RESULTADOS

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.

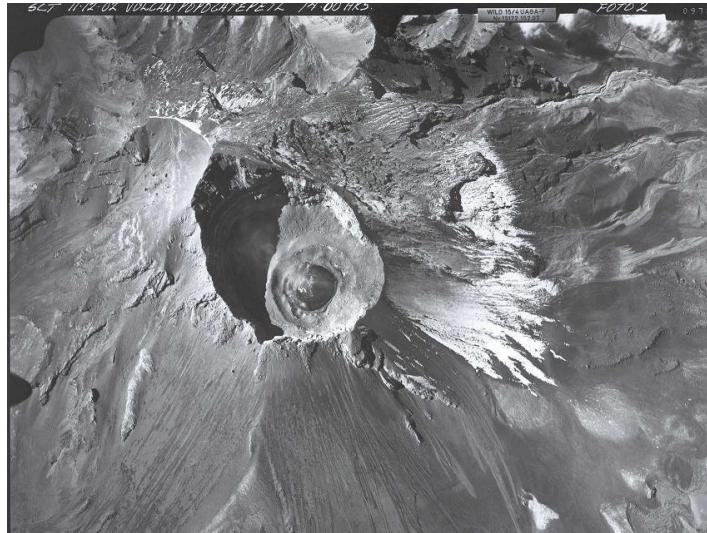


Figura 4.14 Fotografía de domo en el cráter del volcán tomada el 11 de diciembre del 2002 por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (Tomada de www.cenapred.unam.mx)