

01131  
12



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ANALISIS DE LAS ETAPAS DE ACTIVIDAD DEL VOLCAN  
POPOCATEPETL UTILIZANDO TIEMPOS DE VIAJE DE  
EVENTOS SISMICOS REGIONALES Y LEJANOS DE  
1996 A 2001.

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO GEOFISICO  
P R E S E N T A :  
AIDA QUEZADA REYES

DIRECTOR DE TESIS:  
DR. CARLOS VALDES GONZALEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA

MARZO DEL 2003

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

1



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-1-0004

**SRITA. AIDA QUEZADA REYES**  
**Presente**

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

**ANÁLISIS DE LAS ETAPAS DE ACTIVIDAD DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL  
UTILIZANDO TIEMPOS DE VIAJE DE EVENTOS SÍSMICOS REGIONALES Y LEJANOS  
DE 1996 A 2001**

- I INTRODUCCIÓN
- II ANÁLISIS DE EVENTOS SÍSMICOS AL ATRAVESAR  
EL EDIFICIO VOLCÁNICO
- III GRÁFICAS
- IV RESULTADOS
- V CONCLUSIONES  
REFERENCIAS

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

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

Atentamente  
**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**  
Cd. Universitaria, D.F., a 7 de enero de 2003  
EL DIRECTOR

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**ING. GERARDO FERRANDO BRAVO**

GFB\*RLLR\*gtg

R

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**ANÁLISIS DE LAS ETAPAS DE ACTIVIDAD DEL VOLCÁN  
POPOCATÉPETL UTILIZANDO TIEMPOS DE VIAJE DE  
EVENTOS SÍSMICOS REGIONALES Y LEJANOS DE 1996 A  
2001.**

Tesis que para obtener el título de Ingeniero Geofísico presenta:

**AÍDA QUEZADA REYES**

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico el contenido de mi trabajo receptor.

NOMBRE: Aída Quezada Reyes

FECHA: 19-Marzo-2003

FIRMA: \_\_\_\_\_

Director de Tesis:  
Dr. Carlos Valdés González



*"Vista del Popocatépetl", 1934*

Gerardo Murillo (Dr. Atl)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## AGRADECIMIENTOS

*A mis Padres Luis Quezada y Náyade Reyes,*

Gracias por su apoyo incondicional, por su entrega, por compartir mis éxitos y mis fracasos, y sobre todo, por el amor y la educación que me han brindado para hacer de mí un mejor ser humano. Este trabajo está dedicado a ustedes.

*A mi hermana Cintia,*

Siempre serás mi ejemplo a seguir. Te quiero mucho.

*A mis tías Ceres Reyes y Elvia Santiago,*

Porque siempre han sido una parte importante en mi vida. Gracias por su dedicación y cariño.

*A Tim*

Por ser un gran compañero y amigo. Por estar siempre conmigo aún cuando la distancia sea inevitable. TA.

*A mis amigos Adrián Buenrostro, Ricardo Córdoba, David Erazo, Francisco Castillo, Marcos Chavacán, Licelda Téllez, Nahúm Pérez, Vicente Hernández, Raúl Arámbula, Rodolfo Hidalgo, Guillermo Hernández, Carlos Pérez y Luis Federico,*

Gracias a todos por su ayuda, por esta gran amistad que nos une y por las hermosas experiencias que vivimos durante la carrera.

*Al Lic. Rubén Fernández,*

Porque la relación entre la geofísica y la política siempre será una gran amistad.

*Al CENAPRED*

Especialmente al Ing. Gilberto Castelán, Ing. Javier Ortiz, Jazmín, Ing. Ana María Alarcón y M en C. Alicia Martínez Bringas, por su apoyo durante mi estancia en este centro.

*A mis maestros,*

Porque sin ustedes no hubiera sido posible la realización de esta meta.

*A la Universidad Nacional Autónoma de México,*

Por darme la oportunidad de estudiar una carrera universitaria y de portar sus colores con orgullo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Agradezco especialmente a mi profesor y director de tesis, el *Dr. Carlos Valdés González* por su valiosa ayuda, comentarios y sugerencias durante la realización de este trabajo. Su apoyo y calidad humana han sido siempre una gran motivación para seguir adelante.

Gracias por enseñarme que aún las metas más difíciles son posibles de alcanzar con dedicación y coraje.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## ÍNDICE

<b>Resumen</b> .....	1
<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	2
1.1 Sismicidad .....	3
1.1.1. Sismicidad en México.....	5
1.2 Tiempos de Viaje .....	7
1.2.1. Tablas de Tiempos de Viaje.....	7
1.2.2. Tomografía Sísmica.....	8
1.3 El Volcán Popocatepetl .....	10
1.3.1. Etapas de Actividad Volcánica .....	11
1.3.2. Monitoreo Sísmico .....	16
<b>Capítulo 2. Análisis de Eventos Sísmicos al Atravesar el Edificio Volcánico</b> .....	21
2.1 Selección de Eventos .....	22
2.2 Procesamiento de Datos .....	27
2.2.1 Cálculo de Residuales Relativos y Absolutos .....	27
2.2.2 Separación en el Procesamiento de Eventos Tomando en Cuenta Cambios en la Actividad Volcánica .....	29
<b>Capítulo 3. Gráficas</b> .....	34
<b>Capítulo 4. Resultados</b> .....	55
4.1 Análisis de las Gráficas .....	56
<b>Capítulo 5. Conclusiones</b> .....	63



<b>Apéndice A. Tiempos de Viaje de Herrin.....</b>	<b>67</b>
<b>Apéndice B. Actividad Histórica del Popocatepetl.....</b>	<b>70</b>
<b>Apéndice C. Método Kriging de Interpolación.....</b>	<b>74</b>
<b>Apéndice D. Glosario .....</b>	<b>77</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>80</b>

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

El presente trabajo está compuesto por un análisis de las etapas 5 a 14 de la actividad más reciente del Popocatepetl, correspondientes a los años 1996 a 2001. Se utilizaron tiempos de viaje de las primeras ondas de arribo procedentes de sismos regionales y telesismos registrados en las estaciones que constituyen la Red de Monitoreo del Volcán Popocatepetl. Los tiempos de viaje para los diferentes eventos fueron calculados por computadora utilizando un programa basado en las tablas de tiempos de viaje de Herrin. El procedimiento realizado corresponde a la primera parte de la técnica conocida como Tomografía Sísmica. Con ello, se pretende mostrar la relación existente entre las variaciones de los residuales relativos obtenidos a partir de los tiempos de viaje y los procesos que se llevan a cabo en el interior del volcán a lo largo de dichas etapas.

Se analizaron 129 sismos ocurridos durante los años 1996 a 2001, obteniéndose los residuales relativos para cada evento y por etapas en las estaciones de la red existentes hasta ese momento. El análisis se dividió en dos secciones para todas las etapas: La Sección 1, que comprende los eventos ocurridos dentro de un rango acimutal de 90 a 150° y la Sección 2, con un rango de 150 a 240°. Tomando en cuenta ambas secciones, se generaron mapas de contornos con el promedio para cada estación de dichos residuales. Se elaboraron dos perfiles por etapa (SE – NW para la Sección 1 y S – N para la Sección 2) que incluyen los mismos valores y estaciones de los mapas. Del análisis de estos mapas se observó que las variaciones en los residuales registrados en las estaciones de la red durante la etapa 5 se presentan a causa de la presencia de material que propicia la formación del domo. Los residuales positivos (retrasos) de la etapa 6 podrían estar relacionados con estados de recarga fallidos que se llevan a cabo durante esta fase, considerada como cuasi-cíclica. La estructura interna del edificio sufrió cambios debido a la redistribución de esfuerzos que fueron detectados durante la etapa 10, considerada como una fase post-eruptiva. También se observaron variaciones en los valores de los residuales como consecuencia de los esfuerzos compresivos, ascenso y acumulación de magma durante la etapa 12, previa a la fase eruptiva intensa que tuvo lugar en Diciembre de 2000. En las etapas 5, 6, 7, 13 y 14, los mapas de contornos presentan curvas con una tendencia característica en la región SE del edificio volcánico, la cual sugiere la presencia de una falla con dirección SE – NW.

---

CAPÍTULO 1  
INTRODUCCIÓN

---

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Diciembre de 1994 marca el inicio de la actividad contemporánea del Volcán Popocatepetl. A través de todo este tiempo, ha sido posible conocer su comportamiento y los cambios que sufre en su interior por medio de un monitoreo continuo que ha permitido, más de una vez, la mitigación del riesgo y los efectos de una erupción en asentamientos humanos cercanos.

La inquietud de realizar un estudio sobre el Popocatepetl surge por la necesidad de conocer más a fondo todo aquello que no sería posible a simple vista, como los procesos internos que se gestan en el volcán y que pueden ser indicadores de eventos eruptivos inminentes. Hay que recordar que mientras más información tengamos de su comportamiento, mayor será la probabilidad de evitar catástrofes innecesarias, como la ocurrida en 1902, cuando el Monte Pelée destruyó el puerto de St. Pierre. Otro ejemplo muy conocido es la erupción del Vesubio (79 d. C.) cuya intensidad acabó con las ciudades de Pompeya, Stabiae y Herculano.

El presente trabajo consiste en un análisis de las etapas de actividad del volcán Popocatepetl con la ayuda de una rama de la Geofísica que aporta elementos suficientes para conocer la estructura de interés. Se utilizaron residuales de los tiempos de viaje procedentes de sismos regionales y lejanos que fueron registrados en las estaciones que pertenecen a la Red de Monitoreo del volcán de 1996 a principios del 2001. El objetivo de este estudio es conocer los cambios que se presentaron en el edificio volcánico durante la actividad más reciente utilizando el método conocido como Tomografía Sísmica.

### 1.1 Sismicidad

Para estudiar el interior de la Tierra, uno de los métodos más completos es la Sismología, que analiza las ondas que viajan a través de la misma y que son reflejadas en su superficie. El término "Sismología" se deriva del griego *seismos* (temblor) y *logos* (estudio o tratado) y actualmente se usa para referirse a la rama de la Geofísica que se encarga de estudiar, medir, interpretar y analizar, además de los sismos, los registros de cualquier vibración en la Tierra producidos de manera natural o artificial.

Una buena parte de la explicación del origen de los sismos se basa en la tectónica de placas, donde se considera que la parte superficial de la Tierra está dividida en dos capas. La capa más superficial, conocida como *litósfera*, es rígida y tiene aproximadamente 100 km de espesor bajo los continentes. Esta capa está compuesta por corteza y rocas rígidas del manto superior. La capa inferior es la *asténosfera*, que se extiende hasta 700 km de profundidad y en la cual las rocas del manto son más susceptibles a ser deformadas. La capa rígida de la litósfera está constituida por varios bloques amplios e irregulares llamados *placas* (Fig. 1.1). Cada placa se extiende a una profundidad de 80 km aproximadamente y no son estacionarias, por el contrario, la placa se mueve horizontalmente en relación a las placas vecinas, sobre una capa de rocas más viscosas a una velocidad aproximada de 2 cm por año (Kulhánek, 1990). La idea de la deriva de placas fue propuesta en 1912 por A. Wegener.

La estructura de las placas experimenta cambios constantemente. Por ejemplo, cuando la lava fluye continuamente hacia el exterior, en las dorsales. Esta roca se mueve lentamente sobre la superficie de la Tierra dando origen a un nuevo suelo submarino en ambos lados de la dorsal. De esta forma, las placas se extienden sobre la superficie. A su vez, las capas de roca vieja se sumergen en el interior de la Tierra en las fosas o trincheras oceánicas asociadas a continentes, que se conocen como *zonas de subducción* (Gubbins, 1990). Al hundirse una placa hacia las depresiones oceánicas, ocurren en ella las fracturas que generan los sismos superficiales.

Debido a los procesos de la tectónica de placas, es fácil comprender que se generan y acumulan esfuerzos (tensión, compresión, entre otros) en las rocas a lo largo de los límites entre placas a distintas profundidades. Cuando el esfuerzo vence la fuerza elástica de la roca, ésta se fractura a lo largo de un plano de debilidad (o plano de falla) y se genera un sismo. La roca se desplaza a una nueva posición mientras la energía del esfuerzo es liberada total o parcialmente. La ruptura del material proviene de una región, considerada por facilidad como puntual (foco o hipocentro) que se encuentra cerca de la orilla del plano de falla y se propaga a lo largo de dicho plano.

Los terremotos se presentan a lo largo de los bordes donde existe subducción de una placa (*sismos interplacas*). También tienen lugar en el interior de las mismas los *sismos intraplacas*, que están asociados posiblemente a variaciones de temperatura, profundidad y resistencia de las rocas de la superficie (Gubbins, 1990).

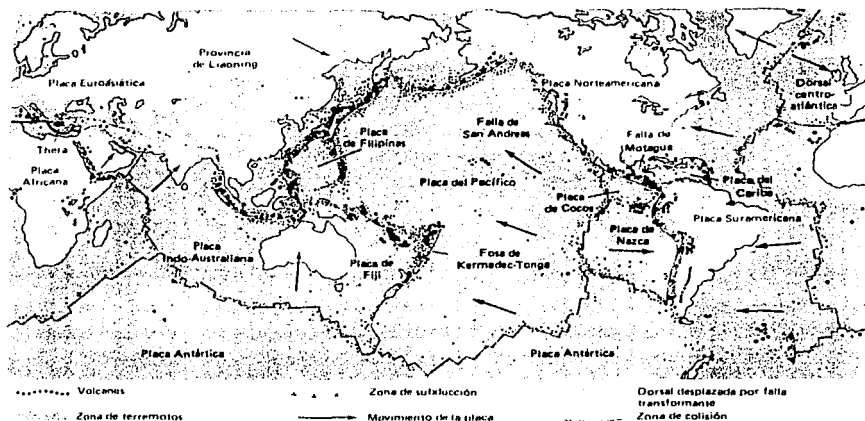


Fig. 1.1. Placas Tectónicas (Tomado de Bolt 1980).

### 1.1.1 Sismicidad en México

México se considera una de las regiones con un índice de sismicidad importante (3.1 % del total de la energía liberada, junto con Guatemala) (Lomnitz, 1974). Su geología refleja que gran parte del territorio se encuentra sometido a esfuerzos tectónicos que propician la acumulación constante de sismos por año.

En México, la sismicidad parece estar distribuida en una secuencia de cinturones (Lomnitz, 1974) (Fig. 1.2). Al norte de Cabo Corrientes la sismicidad sigue el rumbo de la Sierra Madre Occidental en Sonora, al oeste de Chihuahua, Durango y Zacatecas, Sinaloa y Nayarit. Es una región con sismicidad baja (sin considerar el Golfo de California).

El Eje Neovolcánico Transversal es una cadena montañosa que atraviesa la República Mexicana desde Cabo Corrientes hasta Veracruz, pasando por Jalisco, Colima, Michoacán, Estado de México, Distrito Federal, Morelos, Tlaxcala y Puebla. El volcanismo en esta zona es activo. Los centros

volcánicos y las depresiones tectónicas relacionadas (Valle de México) están asociadas a sismicidad somera.

Al Sur de la Sierra Madre Occidental, los epicentros de profundidad normal se encuentran distribuidos a lo largo de las costas de Michoacán, Guerrero y Oaxaca. La Sierra Madre Occidental se extiende aproximadamente a unos 1000 km. Paralela a la costa. Presenta fallamiento en gran cantidad, así que la mayoría de los sismos que tienen lugar fuera de las costas se originan por reactivación en la zona (Lomnitz, 1974). Los epicentros de profundidad media se localizan bajo el complejo de la Sierra Madre y entre el área Chiapas-Tehuantepec.

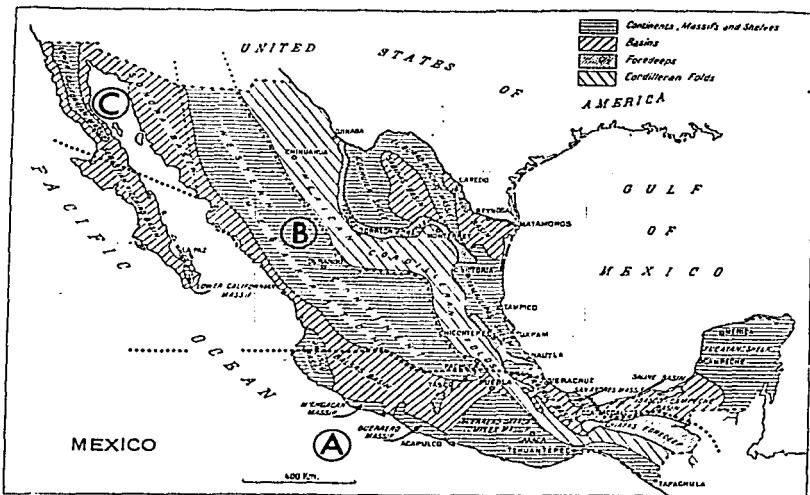


Figura 1.2. Mapa tectónico de México (Tomado de Global Tectonics and Earthquake Risk, Lomnitz, 1979).

## 1.2 Tiempos de Viaje

La observación más común hecha en sismología es aquella relacionada con el tiempo de arribo al comienzo de la perturbación. La exactitud con que éste pueda ser calculado depende principalmente de la forma del pulso inicial y de su tamaño relativo al ruido presente en la señal (Gubbins, 1990). La exactitud del reloj solía ser un problema para instrumentos en áreas remotas. Afortunadamente este problema se ha solucionado al ser implementados relojes más precisos.

La lectura más fácil de realizar corresponde al arribo de una onda de cuerpo, longitudinal, que se conoce como onda *P* u *onda primaria* (del latín *undae primae*). *P* es siempre la primer onda en llegar a una estación. Las partículas de la roca que se ven afectadas por una onda de este tipo oscilan hacia atrás y hacia adelante en la misma dirección de propagación de la onda. Por esta razón, las ondas *P* se registran mejor en las componentes verticales, aunque también pueden ser identificadas en registros de componentes horizontales.

Tomando en cuenta estos conceptos se pensó en la posibilidad de llevar a cabo un estudio con sismos registrados en la Red de Monitoreo del volcán Popocatepetl analizando sus primeros arribos en cada una de las estaciones, así como el comportamiento de sus trayectorias al pasar por él. Para ello, fue necesario obtener sus tiempos de viaje y tener en cuenta la posibilidad de que existieran anomalías que pudieran asociarse con el comportamiento del volcán.

### 1.2.1. Tablas de Tiempos de Viaje

El primer paso para determinar la distancia de un epicentro de una estación de registro es conocer una herramienta fundamental en la sismología: Las tablas de tiempos de viaje de Jeffreys-Bullen (1940), que fueron las primeras de su género y son consideradas como las más completas, ya que incluyen datos mundiales y proporcionan tiempos de viaje y correcciones de profundidad para todas las fases, mientras que otras tablas proporcionan valores únicamente para *P*, con ligeras variaciones de las tablas Jeffreys-Bullen.



Para este estudio se utilizaron las tablas de tiempos de viaje para las fases P de Herrin (1968), que son el resultado de una revisión de las tablas de Jeffreys-Bullen utilizando un modelo de tierra con inhomogeneidades laterales limitadas a los 700 km de la parte superior del manto. Esta revisión se llevó a cabo con el propósito de obtener valores estándar actualizados para determinar epicentros y estudios sobre variaciones en los tiempos de viaje. La razón principal para adoptar este modelo en el procesamiento de los sismos regionales y lejanos registrados en el volcán, fue que los tiempos actualizados en estas tablas tienen una diferencia de 2 a 4 segundos menos con respecto a los valores que se obtuvieron en 1940, asegurando de esta forma una precisión mayor en el cálculo de los mismos.

### 1.2.2. Tomografía Sísmica

De los eventos seleccionados y sus tiempos de viaje (Tabla 2.1), fue posible graficar el comportamiento que presentan las trayectorias de los rayos con base en el tiempo de llegada a cada una de las estaciones. Este procedimiento constituye la parte inicial del método de Tomografía Sísmica (Fig. 1.3).

El término "tomografía" surge del método utilizado en la medicina moderna que consiste en crear una imagen de los órganos internos del cuerpo humano a partir de la atenuación que sufren los rayos-X<sup>1</sup> cuando pasan a través de ellos. El método sísmico fue creado independientemente al ya existente en la comunidad médica, de hecho, se conocía originalmente como "Método de Inversión 3-D"<sup>1</sup>(aunque también es posible en 2-D) hasta principios de los años 1980's, cuando se incorporó a este método la forma iterativa de solución para matrices que se usaba entonces en la tomografía médica.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

<sup>1</sup> Ver: Computed Axial Tomography Scans

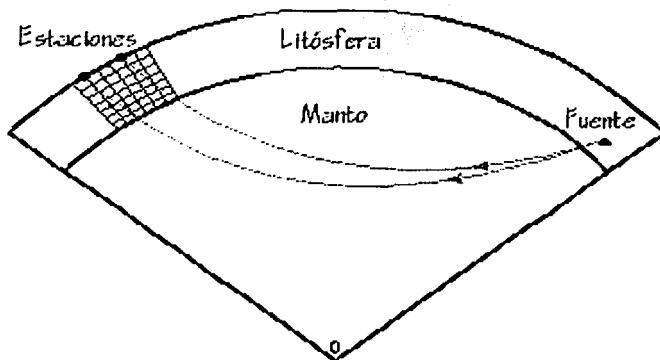


Fig. 1.3. Esquema de Tiempos de Viaje (Modificado de Koch M).

Básicamente, el método consiste en asumir un modelo de tierra inicial (conocido como modelo de referencia) (Herrin, 1968) y calcular los tiempos de viaje esperados (Kenneth, 1993) (en nuestro caso, para cada una de las estaciones que se encuentran sobre y alrededor del volcán). Estos valores se comparan con los medidos y se analizan las discrepancias que resultan del retraso de los rayos (Koch, 1997).

Este método ha sido de gran utilidad para identificar o delimitar estructuras cuya visualización no sería posible con otros métodos geofísicos. Un ejemplo es la facilidad con la que puede detectarse la subducción de la litósfera Adriática (De Gori, 2001), cerca de Italia. También se han llevado a cabo estudios de tomografía sísmica en volcanes como el Etna (Aloisi, 2002), donde el método fue bastante efectivo para detallar su estructura y encontrar zonas con fracturamiento intenso y movimiento de magma. Estudios semejantes se han realizado en el Volcán Newberry (Achauer, 1988), el área volcánica localizada al este de California, conocida como Mono Craters

(Achahuer, 1986) o el Vesuvio y en campos geotérmicos como en Coso (Reásenberg, 1980), Larderello (Foley, 1992) y los Geysers.

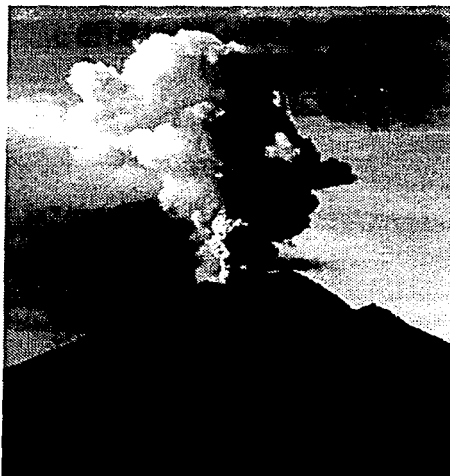
Como se mencionó anteriormente, las imágenes que se crean por tomografía se basan en la distribución espacial de la velocidad de la onda sísmica que se obtiene utilizando datos de tiempos de viaje. Estos datos son generados por un arreglo de estaciones sísmicas colocadas en un área de la superficie terrestre. Existe un amplio rango de fuentes sísmicas que pueden ser utilizadas para un estudio de tomografía sísmica. De este modo, se obtiene información importante a partir de ondas P y S de sismos regionales y telesismos, ondas superficiales, reflexiones del Moho por explosiones, entre otras.

### 1.3 El Volcán Popocatépetl

El volcán Popocatépetl se considera uno de los volcanes con mayor riesgo ya que tiene la capacidad de afectar a las poblaciones que se encuentran en sus alrededores. Puebla, México y Morelos son los estados que colindan en esta zona. Esto implica que una erupción de grandes dimensiones podría generar pérdidas económicas y humanas considerables.

El Popocatépetl (Fig. 1.4) es un estratovolcán Andesítico – Dacítico con una altura de 5,452 msnm, con coordenadas 19° 02' N, 98° 62' W y se encuentra ubicado a 60 km de la Ciudad de México. La forma del volcán es semejante a un cono truncado que ocupa un área de 500 km<sup>2</sup> aproximadamente. Las dimensiones del cráter son de 600 x 900 m que corresponden a los ejes menor y mayor de una elipse. Este volcán presenta también un cráter interno a 150 m de profundidad a partir del labio inferior.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**Fig. 1.4.** El volcán Popocatépetl.

La actividad del volcán se ha manifestado en repetidas ocasiones. Sus efectos pueden observarse en la tabla que presenta la actividad histórica del mismo (ver Apéndice).

### **1.3.1 Etapas de actividad volcánica**

La actividad más reciente del volcán Popocatépetl ha sido clasificada en fases de acuerdo con patrones de comportamiento con características semejantes (Eventos de periodo largo y volcano-tectónicos, acumulación de energía sísmica, entre otros) (McNutt, 2000) durante un periodo de tiempo considerable. Esta clasificación (Tabla 1.1) consta de 14 etapas que describen el comportamiento del volcán de 1992 a 2001.

Este trabajo comprende el estudio de la actividad volcánica a partir de las etapas 5 a 14. No fue posible realizar un análisis detallado de las primeras cuatro etapas por falta de estaciones sísmicas que pudieran aportar datos confiables.

<b>CLASIFICACIÓN DE LA ACTIVIDAD DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL POR ETAPAS</b> (Valdés, 2003)	
<b>ETAPA 1</b>  <i>Fase de Preparación.</i>  1° Enero, 1992 al 22 de Octubre, 1994.	Durante estos años se presentó sismicidad asociada con poca actividad fumarólica. Durante esta etapa se registraron aproximadamente 177 sismos volcano-tectónicos, que representan acumulación de esfuerzos en el edificio volcánico.
<b>ETAPA 2</b>  <i>Fase Premonitoria.</i>  23 de Octubre, 1994 al 21 de Diciembre, 1994.	Incremento en el número de eventos de período largo en el volcán. Es posible que represente presurización en los conductos del volcán. Incremento en los eventos volcano-tectónicos (VTs).
<b>ETAPA 3</b>  <i>Fase Eruptiva.</i>  21 de Diciembre, 1994 al 1° de Abril, 1995.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dec 21. Ocurren en el volcán series de eventos VTs considerados como precursores que posiblemente inician el fracturamiento del material bloqueando los conductos someros. Posteriormente abren los conductos en la base del cráter. Hay emisión de ceniza hacia Puebla.</li> <li>• Presencia de tremor de alta frecuencia durante 100 días.</li> </ul>
<b>ETAPA 4</b>  <i>Fase Fumarólica y de Limpieza de Conductos.</i>  2 de Abril, 1995 al 3 de Marzo, 1996	Durante esta fase no hay presencia de tremor y el comportamiento sísmico se mantiene en un rango estable, donde los conductos se encuentran abiertos o semi-abiertos y hay emisión continua de ceniza y gases.
<b>ETAPA 5</b>  <i>Fase de la Primera Construcción del Domo.</i>  4 de Marzo a Septiembre, 1996	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mar 5. Se inicia una nueva etapa con un evento explosivo seguido por emisión de ceniza. Aparece tremor armónico con una duración de 6 hrs.</li> <li>• Mar 6. Emisión fuerte de ceniza acompañada por tremor.</li> <li>• Mar 29. Un domo de lava es detectado en el cráter del volcán.</li> <li>• El número de emisiones de ceniza y eventos de período largo (LP), como resultado de un incremento en la presión, está caracterizado por dos ciclos:                         <ol style="list-style-type: none"> <li>a) Inicia en Marzo, hay incremento de LPs y decrece posteriormente, en Julio 11.</li> <li>b) Comienza después del 11 de Julio. Hay aumento de LPs. Decrece en Septiembre 30.</li> </ol> </li> </ul> En el primer ciclo los conductos se encontraban abiertos y no hubo necesidad de empujar material por ellos. En el segundo ciclo hay mayor presión por la presencia del domo y material en los conductos, lo que origina eventos VTs para empujar el material hacia arriba y formar el domo.

## 1. INTRODUCCIÓN

<p><b>ETAPA 6</b></p> <p><b><i>Fase de Actividad Cuasi-Estática de Pulsos.</i></b></p> <p>Octubre, 1996 al 18 de Agosto, 1997.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oct '96. Comportamiento cíclico de LPs, asociado con ascensión de magma.</li> <li>• Feb 25, '97. Tremor armónico con una duración de 1.5 hrs que incluye 2 grandes emisiones (3 km sobre el cráter).</li> <li>• Mar 19, 20. Se observa tremor y emisiones de ceniza. 12 horas después, se presenta una emisión de ceniza de 7 minutos (4 km sobre el cráter).</li> <li>• Abr 23. Aumento de sismicidad y explosión. Emisión al siguiente día, 4 km sobre el cráter.</li> <li>• Mar y Abr. Eventos VTs con mecanismos dilatacionales que sugieren ascensión de magma en los conductos y provocan emisiones de ceniza.</li> <li>• Jun 30. Mayor episodio eruptivo registrado desde 1994. Precedido por 7 eventos VTs en un intervalo de 13 minutos con magnitudes entre 2 y 2.7. Dichos eventos tuvieron mecanismos compresionales, indicando gran presurización a poca profundidad. Episodios de tremor de larga duración.</li> <li>• Incremento de actividad al sureste, indicando un incremento de esfuerzo en la región donde se ha sugerido una falla.</li> </ul>
<p><b>ETAPA 7</b></p> <p><b><i>Fase de Formación del Domo.</i></b></p> <p>19 Agosto al 24 de Diciembre, 1997</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ago 19. Presencia de tremor armónico.</li> <li>• Ago 29. Incremento en el número de exhalaciones (80). Se presentan dos episodios de incremento en la actividad de LPs. Eventos VTs y constante tremor armónico de baja amplitud y corta duración.</li> </ul> <p>Presencia de eventos VTs en Septiembre, Noviembre y Diciembre. 22 localizados al sureste y el resto bajo el cráter. La vista epicentral sugiere una localización circular de VTs alrededor del cráter y un alineamiento de eventos hacia el Norte.</p> <p>Varios eventos VTs tienen mecanismos de falla que corresponden a fallas normales.</p> <p>Un evento profundo en Diciembre sugiere adición de material reciente caliente a 10 km, posible responsable de un evento explosivo posterior.</p>
<p><b>ETAPA 8</b></p> <p><b><i>Fase Explosiva y de Acumulación de Energía.</i></b></p> <p>25 de Diciembre, 1997 al 22 de Noviembre, 1998.</p>	<p>Esta fase se caracteriza por un número mayor de LPs por día que en la etapa previa de construcción del domo.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dic 24. Comienza con una erupción explosiva, con señales sísmicas intensas no mayores a 10 minutos.</li> <li>• Se observan explosiones similares en Enero, Marzo, Abril, Mayo, Agosto, Septiembre y Octubre de 1998.</li> </ul> <p>Durante esta etapa se observan dos grupos de eventos. Uno bajo el volcán y el otro hacia el sureste.</p> <p>La mayoría de los mecanismos focales de los eventos en este periodo son compresionales y a la mitad del periodo se observa un evento totalmente dilatacional.</p> <p>La parte inicial de esta fase se correlaciona con la destrucción</p>

## I. INTRODUCCIÓN

<p><b>ETAPA 9</b></p> <p><i>Fase Muy Eruptiva</i></p> <p>23 Noviembre, 1998 al 3 Enero 1999</p>	<p><b>del domo por explosiones y la limpieza de los conductos.</b></p> <p>Esta fase se caracteriza por episodios explosivos y presencia de tembor armónico, asociado a fluidos magmáticos a poca profundidad que obstruyen y sellan los conductos, incrementando la presión que es liberada posteriormente en explosiones subsecuentes</p>
<p><b>ETAPA 10</b></p> <p><i>Fase Post-Eruptiva y de Relajación.</i></p> <p>4 Enero, 1999 al 3 de Septiembre de 1999.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mar 11, 12, 18, 19 / Abr 4, 15. Explosiones moderadas que arrojan fragmentos incandescentes a los flancos del volcán.</li> </ul> <p>Se presentan eventos VTs alrededor del cráter. Algunos al sureste, cerca de la estación PPC. Se asocia a esta etapa con una redistribución del estado de esfuerzos bajo el volcán.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Jun 15. Sismo tectónico Mw=7.0. 22 horas después ocurren 36 VTs en el edificio volcánico que sugieren un cambio de esfuerzos a lo largo de un conducto o fractura. El incremento de esfuerzos puede originarse por un incremento de presión en un sistema cerrado debido a un rápido bombeo en una burbuja magmática por el paso de una onda.</li> </ul>
<p><b>ETAPA 11</b></p> <p><i>Fase de Recarga Fallida.</i></p> <p>4 de Septiembre, 1999 al 15 de Septiembre, 2000</p>	<p>Esta etapa inicia con eventos que acarrear ceniza y marcan un incremento en la actividad sísmica.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mar 8, '00. Un incremento en la actividad de LPs y VTs marcan un cambio en la actividad del volcán. Se presentan también episodios esporádicos de tembor armónico.</li> <li>• Sep 3. Ocurre una explosión moderada seguida por 25 minutos de tembor de alta frecuencia.</li> <li>• Sep 8, 12. Incremento de LPs por día.</li> </ul> <p>En esta etapa se observa una concentración de VTs bajo el cráter y cerca de las estaciones PPX, PPT y PPC. Los VTs son de carácter compresivo principalmente. La actividad no explosiva se asocia a la formación de pequeños domos.</p>
<p><b>ETAPA 12</b></p> <p><i>Fase de Recarga.</i></p> <p>16 de Septiembre al 10 de Diciembre, 2000</p>	<p>La actividad se incrementa gradualmente en esta etapa. Se observan LPs de larga duración seguidos de eventos VTs bajo el cráter. Se detectó tembor armónico en la coda de algunos LPs.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sep/Oct. Exhalaciones de bajo nivel, tembor. En octubre se incrementó la actividad en las exhalaciones generando plumas con ceniza hasta de 6 Km. La explosividad de las exhalaciones se incrementa alrededor de Octubre 16, cuando son arrojados fragmentos incandescentes.</li> <li>• Nov. Incremento en la actividad interna con el comienzo de un enjambre de sismos VTs al sureste del volcán.</li> <li>• Dic 2. Moderada exhalación con gran salida de ceniza y una duración aproximadamente de 90 minutos.</li> <li>• Dic 6. Enjambre de sismos de baja magnitud. Los sismos fueron acompañados por un periodo de tembor armónico de gran amplitud, baja frecuencia y poca duración (Diciembre 10).</li> </ul> <p>En esta fase el carácter inicial de los VTs fue compresional.</p>

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

	<p>cambiando a dilatacional al final de la fase. Las propiedades que se observaron en los VTs indican una concentración de esfuerzos a lo largo de conductos o fracturas en la región menos profunda y sugieren inyección de magma hacia la superficie. El episodio corto de tremor se relaciona con la ascensión inicial de material magmático hacia el cráter, lo que sugiere un proceso de recarga.</p>
<p><b>ETAPA 13</b></p> <p><b><i>Rápido Crecimiento del Domo y Fase Eruptiva Intensa.</i></b></p> <p>11 de Diciembre, 2000 al 23 de Enero, 2001.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dic 12. Exhalaciones con ceniza y hasta 6 km de altura. Incandescencia en el cráter y salida de fragmentos calientes. Aumento en LPs (saturación de estaciones cercanas). Se asocia a despeje de conductos.</li> <li>• Dic 15. Tremor armónico de baja frecuencia y gran amplitud que posteriormente se convierte en una señal continua con amplitudes mayores que saturan los registros. Los tremores fueron identificados como producto de la extrusión de magma en un rango muy alto.</li> <li>• Dic 16. Se presenta una nueva señal de tremor armónico de baja frecuencia y de amplitud creciente que satura nuevamente los registros.</li> <li>• Dic 15-17. La actividad se asocia a movimiento ascendente de magma. Los episodios de quietud y de tremores de gran amplitud y baja frecuencia pueden ser interpretados como un modelo de carga y descarga. Se observa crecimiento del domo. Los episodios de tremor se relacionan con periodos de eyección de lava.</li> <li>• Dic 18. Ocurrencia de la explosión más grande registrada desde entonces.</li> <li>• Dic 24. Primera explosión por destrucción del domo.</li> </ul> <p>Los eventos VTs sugieren acumulación de presión y culminan con una explosión moderada el 24, indicando el comienzo de la destrucción explosiva del domo.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ene 21. Explosiones. Evento VT seguido de una emisión de vapor produce tremor de alta frecuencia, que se convierte posteriormente en uno armónico y produce un evento explosivo con una columna de ceniza de 10 Km</li> </ul>
<p><b>ETAPA 14</b></p> <p><b><i>Fase Post-Eruptiva y de Pequeñas Repeticiones de Construcción del Domo.</i></b></p> <p>24 de Enero al 31 de Diciembre de 2001</p>	<p>Etapa compuesta por explosiones pequeñas los días 29 de Enero y 9 de Febrero. Relacionadas posiblemente con la destrucción del domo remanente.</p> <p>Posterior a esta etapa explosiva, el volcán entró en una fase pequeña de formación de domo y su destrucción por pequeñas explosiones. La formación de los domos estuvo acompañada la mayoría de las veces por una actividad intensa de LPs que duró de 3 a 5 días.</p>

Tabla I.1 Etapas Eruptivas del Volcán Popocatepetl



### 1.3.2 Monitoreo Sísmico

Cuando un volcán se encuentra en estado activo, es recomendable que se establezca un programa de vigilancia permanente con métodos que permitan detectar cambios en la actividad que podrían dar lugar a procesos eruptivos importantes. El monitoreo volcánico (Banks, 1993) es el conjunto de estudios científicos que observan, registran y analizan sistemáticamente los cambios que ocurren en el volcán y sus alrededores (Fig. 1.5) La observación de los volcanes por personal con conocimientos sobre los fenómenos volcánicos ha sido de gran ayuda desde siempre, ya que proporciona información útil y de bajo costo sobre el estado de un volcán. Sin embargo, se requiere un monitoreo de tipo instrumental por la necesidad de conocer el comportamiento interno que no es posible percibir a simple vista. Por todo esto, es fácil comprender que la ventaja de vigilancia frecuente radica en obtener datos que describen el comportamiento actual del volcán. De este modo, se tiene la posibilidad de realizar una predicción a corto plazo y tomar las medidas preventivas necesarias para evitar una catástrofe.

Según Quaas (1996), los tipos de monitoreo y vigilancia comúnmente utilizados en un volcán son los siguientes:

- \* Vigilancia Visual
- \* Monitoreo Geodésico
- \* Monitoreo Geoquímico
- \* Monitoreo Sísmico

Este último forma parte de una de las técnicas de monitoreo más utilizadas hasta la fecha y ha sido una herramienta clave para muchos pronósticos eruptivos.

El monitoreo sísmico consiste básicamente en la medición local o remota de la actividad microsísmica. Este tipo de monitoreo permite localizar la fuente de energía y suponer la estructura interna del volcán o los cambios que se manifiestan en ella. Además, es de gran utilidad para predecir erupciones, como la ocurrida durante 1914 en el volcán Sakurajima, Japón (Banks, 1993) y registrar cambios ocurridos antes, durante y después de un

evento importante, como los que ocurren continuamente en el Monte Erebus (Rowe, 2000), en Antártica, o la erupción del volcán Santa Helena, que tuvo lugar el 18 de mayo de 1980, después de intensa actividad sísmica.

Para obtener este tipo de información se instalan redes, sobre el volcán, compuestas por sismómetros de tres componentes: Una vertical y dos horizontales (N-S y E-W) de periodos corto y largo. Los instrumentos de periodo corto se utilizan para registrar ondas P, S y sismos locales (que tienen frecuencias más altas) mientras que los instrumentos de periodo largo se utilizan para ondas superficiales y sismos lejanos. Los sismógrafos de banda ancha presentan rangos de frecuencia mayores que los del movimiento del suelo, para grandes distancias. Un sismograma es el registro del movimiento del suelo como una función del tiempo. La apariencia actual de un sismograma refleja los efectos combinados de la fuente, la trayectoria de propagación del rayo, las características del instrumento y el ruido que se genera debido a condiciones específicas particulares del sitio donde se realiza el registro. Finalmente, las señales sísmicas registradas son transmitidas por radio o telemetría satelital a un centro de acopio de datos para ser procesados. A todas las señales procedentes de estos instrumentos y que son grabadas en forma digital o registradas en tambores de grabación se les conoce como sismogramas.

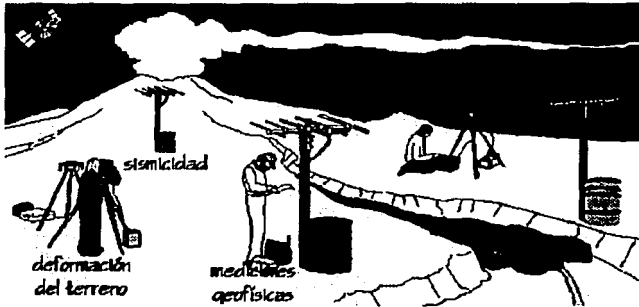


Fig 1.5. Monitoreo Volcánico

(Modificado de <http://volcanoes.usgs.gov/About/What/Monitor/monitor.html>).

La red de monitoreo del volcán Popocatepetl está compuesta por 25 canales de información sísmica o estaciones remotas, 15 de las cuales cuentan

## 1. INTRODUCCIÓN

con sismómetros de periodo corto o banda ancha (Fig. 1.6). La información que se obtiene de las estaciones llega a la central de adquisición y procesamiento de datos localizada en las instalaciones del CENAPRED por medio de técnicas de telemetría, que consisten en la transmisión por radio de las señales registradas al puesto central. En esta red no solamente se registra actividad proveniente del volcán. Cuando hay actividad sísmica de tipo tectónico regional o lejano, el evento puede observarse en los registros provenientes de dichas estaciones (Tabla 1.3). De esta forma se obtuvieron los eventos para realizar el presente estudio.

CLAVE	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	LOCALIZACIÓN DE LA ESTACIÓN	ALT. (m)	LAT N	LON W	INSTRUMENTACIÓN	INSTITUCIÓN	FECHA DE INSTALACIÓN
IIA	Altzomoni	Microondas Altzomoni	4000	19.1204	98.6535	Sismómetro vertical (1 Hz)	IDEI, CENAPRED	Julío, 1994
PPA	Altzomoni	Microondas Altzomoni	4000	19.1204	98.6535	Sismómetro triaxial de banda ancha	CENAPRED, TELMEX	Marzo, 1998
PPB	Bonsai	Ladera NE cerca de Santiago Xalitzintla	3080	19.0498	98.5600	Sismómetro vertical (1 Hz)*	CENAPRED, USGS	Enero, 1995
PPC	Colibri	Ladera SW cerca de San Pedro, Benito Juárez	2650	18.987	98.5572	Sismómetro triaxial (1 Hz)	CENAPRED	Noviembre, 1994
FPJ	Juncos	Base del Ventorrillo, ladera NW	4452	19.0342	96.6446	Sismómetro triaxial (1 Hz)	CENAPRED, USGS	Noviembre, 1997
PPM	Tlamacas	Microondas Tlamacas	3980	19.0663	98.6278	Sismómetro triaxial (1 Hz)	IGEOF, CENAPRED	Septiembre, 1994
PPN	Lomo del Negro	Yoloxóchitl, ladera NW	3700	19.0744	98.6738	Sismómetro vertical (1 Hz)	CENAPRED	Septiembre, 1995.
PPP	Canario	Refugio El Canario	4300	19.0412	98.6280	Sismómetro triaxial (1 Hz)	CENAPRED, USGS	Enero, 1998
PPQ	Los Cuervos	Parte alta ladera sur	4200	19.0009	98.6246	Sismómetro triaxial (1 Hz)	CENAPRED	Enero, 1995
PPT	Tetexcaloc	Ladera Sur	3300	18.9745	98.6241	Sismómetro triaxial (1 Hz)	CENAPRED	Mayo, 1996
PPX	Chipiquixtle	Arenales ladera SW	3980	19.0088	98.6566	Sismómetro triaxial (1 Hz)	CENAPRED, USGS	Octubre, 1994

\* No se encuentra en operación por el momento

**Tabla 1.3** Características de las estaciones del volcán Popocatepetl cuyos datos fueron utilizados (Tomado de <http://www.cenapred.unam.mx/mvolcan.html>).

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

# ESTACIONES DE LA RED DE MONITOREO DEL VOLCAN POPOCATEPETL

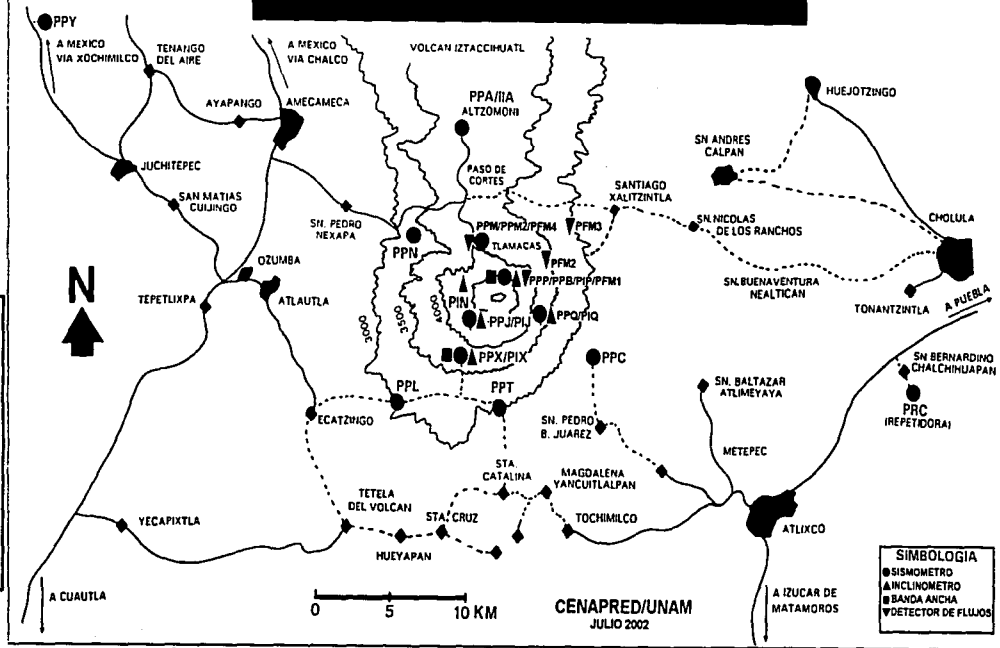


Fig. 1.6. Red de Monitoreo del Volcán Popocatepetl (Cortesía de Javier Ortiz C.)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

1. INTRODUCCIÓN

## 1. INTRODUCCIÓN

---

En los siguientes capítulos se presenta una descripción del método empleado en el procesamiento de los datos, así como el análisis y resultados de los mismos.

---

**CAPÍTULO 2**  
**ANÁLISIS DE EVENTOS SÍSMICOS AL**  
**ATRAVESAR EL EDIFICIO VOLCÁNICO**

---

**TESIS CON**  
**FALLA DE ORIGEN**

## 2. ANÁLISIS DE EVENTOS SÍSMICOS AL ATRAVESAR EL EDIFICIO VOLCÁNICO

---

### 2.1 Selección de Eventos

Los datos para el cálculo de los tiempos relativos de viaje se obtuvieron de los sismogramas digitales procedentes de la Red de Observación Sísmica del Volcán Popocatepetl que son registrados de forma continua en el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

La primera selección de eventos telesísmicos y regionales consistió en escoger únicamente los eventos que no presentaran registros saturados para evitar que fuera difícil detectar el primer arribo de la onda P en los sismos con fases de carácter impulsivo, ya que, a pesar de que en este tipo de eventos es más clara la onda P, en la mayoría de ellos dicha onda no era de carácter emergente y no se podía visualizar porque presentaban saturación desde el principio. Como resultado se obtuvo un total de 210 sismos que van del 16 de Febrero de 1996 al 25 de Febrero de 2001. Para encontrar los eventos más convenientes fue necesario utilizar la herramienta de visualización para archivos almacenados con formato \*.DMX conocida como SUDSPLOT (Fig 2.1), que forma parte del software de PCSUDS, el cual sirve para almacenar datos sísmicos de forma digital (Banfill, 1999), ya que las herramientas que lo componen pueden utilizarse para establecer un sistema automático de localización e identificación de eventos sísmicos.

Por medio de una serie de comandos, en la herramienta SUDSPLOT se introdujeron los parámetros necesarios para desplegar solamente las trazas de las estaciones que correspondían a las componentes verticales (por ser en éstas donde puede observarse mejor la onda P) y una parte del registro compuesta por los primeros segundos de la onda con el propósito de tener una ampliación del área seleccionada y poder identificar el momento exacto en que se presenta la primera onda del sismo. Bajo este criterio, se hizo una nueva selección de los eventos. Se llegó a la conclusión de que 129 sismos eran adecuados para realizar el análisis (Tabla 2.1) por presentar una mejor definición de la onda P con tiempos de viaje que podían leerse con un grado de confianza razonable para cada una de las estaciones de la red que se encontraban operando al momento de ocurrir los sismos. Los parámetros de localización de estos eventos se obtuvieron del Servicio Sismológico Nacional y del N.E.I.S. (National Earthquake Information Service) del U.S. Geological Survey.

## 2. ANÁLISIS DE EVENTOS SÍSMICOS AL ATRAVESAR EL EDIFICIO VOLCÁNICO

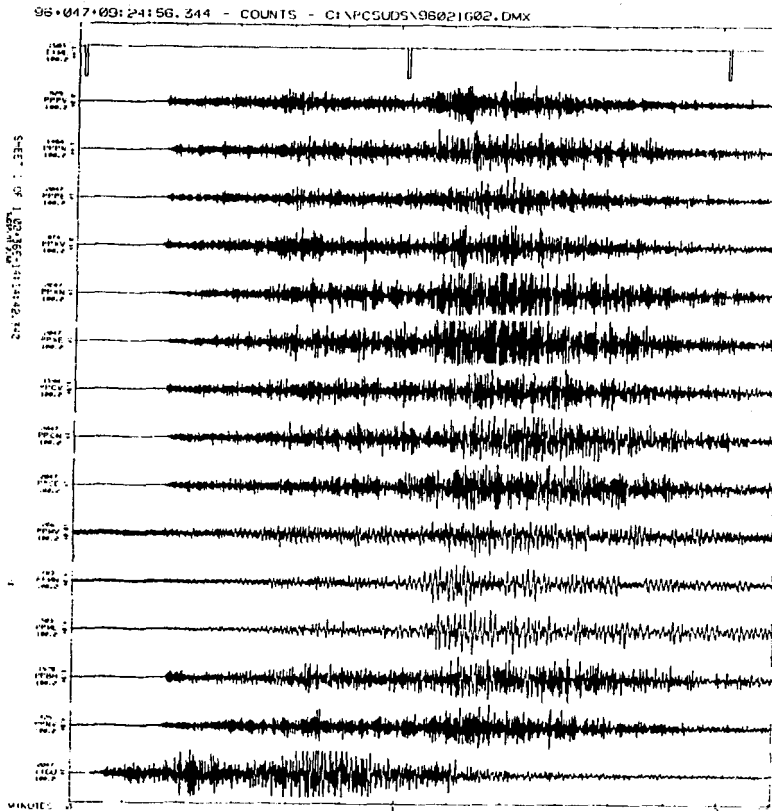


Fig. 2.1 Ejemplo de un evento regional utilizando la herramienta SUDSPLOT



## 2. ANÁLISIS DE EVENTOS SÍSMICOS AL ATRAVESAR EL EDIFICIO VOLCÁNICO

No. evento	Mag	Lat	Lon	Prof. (Km)	Fecha	Hora	Azimut	Angulo de Incidencia	Origen
1	4.5	15.91	-98.96	33	Feb 17, 1996	14:58:47.24	185.825	3.148	COSTA DE OAXACA
2	4.3	15.99	-94.13	33	Feb 18, 1996	00:57:18.67	124.73	5.435	GOLFO DE TEHUANTEPEC
3	5.7	16.09	-97.88	33	Feb 25, 1996	09:18:44.81	166.301	3.044	OAXACA
4	5.2	15.79	-98.28	5	Feb 25, 1996	14:28:21.09	174.115	3.269	COSTA DE OAXACA
5	4.7	16.04	-97.62	33	Mar 12, 1996	05:25:06.48	162.088	3.165	COSTA DE OAXACA
6	5.8	15.8	-97.2	33	Mar 19, 1996	17:13:34.24	156.982	3.512	COSTA DE OAXACA
7	5.3	15.77	-97.23	33	Mar 20, 1996	04:54:17.86	156.184	3.557	COSTA DE OAXACA
8	4.9	15.27	-98.13	33	Mar 22, 1996	10:30:56.25	172.734	3.803	COSTA DE OAXACA
9	4.7	17.11	-101.29	37	Mar 31, 1996	23:39:50.78	233.071	3.288	COSTA DE GUERRERO
10	4.4	17.1	-95.52	70	Abr 17, 1996	18:56:56.93	122.814	3.664	VERACRUZ-OAXACA
11	4.9	17.2	-101.3	10	Abr 18, 1996	22:17:15.95	234.478	3.244	COSTA DE GUERRERO
12	5.4	17.26	-101.18	26	Abr 23, 1996	06:54:35.59	234.105	3.637	COSTA DE GUERRERO
13	4.6	16.81	-100.23	7	May 8, 1996	01:25:27.76	214.589	2.746	COSTA DE GUERRERO
14	4.6	16.82	-100.25	1	May 8, 1996	08:28:08.03	215.043	2.75	COSTA DE GUERRERO
15	4.7	16.87	-100.27	15	May 8, 1996	13:33:03.96	215.989	2.722	COSTA DE GUERRERO
16	4.6	15.49	-91.88	219	May 17, 1996	05:55:53.77	117.824	7.625	GUATEMALA
17	5.1	17.33	-98.12	33	Abr 3, 1997	21:22:47.49	164.169	1.785	GUERRERO-OAXACA
18	4.9	11.76	-86.68	66	Abr 4, 1997	06:52:56.98	120.59	13.99	FRENTE COSTAS NICARAGUA
19	5.1	11.3	-86.63	35	Abr 7, 1997	04:30:38.11	122.067	14.32	FRENTE COSTAS NICARAGUA
20	4.1	18.09	-99.82	37	Abr 28, 1997	12:56:24.93	230.101	1.525	TAXCO-IGUALA
21	4.9	17.4	-94.68	131	Abr 29, 1997	02:23:53.41	113.009	4.275	CHIAPAS
22	3.7	18.1	-99.87	68	May 23, 1997	05:29:27.05	231.559	1.558	TAXCO-IGUALA
23	4.5	17.15	-92.66	121	Jun 1, 1997	12:11:18.93	107.693	6.26	TABASCO-CHIAPAS
24	4.7	17.2	-94.55	116	Jun 27, 1997	02:24:06.79	114.766	4.474	ISTMO DE TEHUANTEPEC
25	4.7	16.87	-100.07	22	Ago 18, 1997	23:44:53.39	212.51	2.606	COSTA DE GUERRERO
26	4.5	16	-100.49	12	Ago 19, 1997	18:27:57.22	210.564	3.565	COSTA DE GUERRERO
27	4.7	15.74	-93.13	67	Sep 8, 1997	20:53:30.78	121.332	6.412	COSTA DE CHIAPAS
28	3.7	16.66	-99.54	3	Sep 22, 1997	09:55:20.23	200.172	2.549	COSTA DE GUERRERO
29	4.5	17.13	-100.05	21	Oct 31, 1997	12:09:55.79	215.494	3.382	GUERRERO
30	5.5	14.26	-91.26	7	Dic 4, 1997	14:58:56.38	123.008	8.783	GUATEMALA
31	3.9	17.88	-98.93	22	Dic 11, 1997	03:10:59.56	193.905	2.678	GUERRERO-OAXACA
32	6.3	15.05	-91.87	20	Ene 10, 1998	08:22:42.23	120.677	7.848	CHIAPAS-GUATEMALA
33	4.5	15.91	-92.81	159	Feb 13, 1998	08:05:08.78	118.534	6.607	COSTA DE CHIAPAS
34	4.4	17.21	-101.34	14	Feb 22, 1998	22:32:21.84	235.035	3.272	COSTA DE GUERRERO
35	5.5	13.55	-93.45	34	Mar 13, 1998	05:26:26.62	137.094	7.768	COSTA MEXICO -GUATEMALA
36	4.8	17	-94	160	Mar 16, 1998	00:29:15.30	114.153	5.058	ISTMO DE TEHUANTEPEC
37	4.2	17.35	-99.52	6	May 15, 1998	09:17:41.10	206.754	1.912	GUERRERO
38	5.1	16.27	-93.82	35	Jun 9, 1998	02:11:08.91	120.241	5.611	CHIAPAS
39	5.2	16.83	-100.12	5	Jul 5, 1998	19:55:50.60	212.931	2.667	COSTA DE GUERRERO
40	5.4	16.97	-100.46	5	Jul 12, 1998	08:12:13.95	220.358	2.765	COSTA DE GUERRERO
41	4.1	17.58	-99.92	94	Jul 16, 1998	14:04:21.67	220.216	1.95	GUERRERO
42	4.8	14.75	-90.7	226	Jul 31, 1998	06:14:22.22	118.297	9.014	GUATEMALA
43	4.4	17.98	-100.27	32	Ago 5, 1998	16:50:28.92	235.987	1.955	GUERRERO
44	4.5	16.9	-100.23	5	Ago 9, 1998	16:18:50.70	215.689	2.674	COSTA DE GUERRERO
45	4.3	17.07	-99.81	37	Ago 24, 1998	19:54:15.37	209.873	2.298	GUERRERO
46	4	16.78	-98.79	18	Sep 26, 1998	14:31:54.54	183.925	2.267	COSTA GUERRERO-OAXACA
47	4.5	15.77	-94.15	6	Oct 7, 1998	17:06:20.50	126.748	5.545	GOLFO DE TEHUANTEPEC

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## 2. ANÁLISIS DE EVENTOS SÍSMICOS AL ATRAVESAR EL EDIFICIO VOLCÁNICO

48	4.2	16.17	-93.88	84	Oct 23,1998	09:47:44.01	121.656	5.548	CHIAPAS
49	4.4	17.32	-101.2	30	Nov 11,1998	09:35:17.78	235.247	3.094	COSTA DE GUERRERO
50	4.3	15.99	-98.28	5	Nov 17,1998	19:36:55.16	173.739	3.071	COSTA DE OAXACA
51	4.6	15.96	-96.7	44	Nov 21,1998	06:44:47.72	148.877	3.634	COSTA DE OAXACA
52	4.5	16.85	-95.6	112	Feb 17,1999	18:44:39.83	126.784	3.737	OAXACA
53	4.2	16.99	-99.6	12	Mar 21,1999	20:45:50.30	204.41	2.269	COSTA DE GUERRERO
54	4.7	15.48	-97.73	15	Abr 1,1999	23:26:09.23	166.325	3.672	COSTA DE OAXACA
55	6.7	18.25	-97.49	99	Jun 15,1999	20:42:29.78	126.087	1.386	LIMITE PUEBLA-OAXACA
56	4.5	18.52	-97.58	60	Jun 15,1999	21:52:02.23	117.543	1.17	LIMITE PUEBLA-OAXACA
57	3.7	18.4	-97.81	94	Jun 17,1999	04:27:11.39	129.481	1.039	LIMITE PUEBLA-OAXACA
58	3.6	17.85	-98.16	84	Jun 21,1999	01:12:51.67	159.485	1.279	GUERRERO-OAXACA
59	7	15.7	-91.49	87	Jul 11,1999	14:16:51.81	115.026	7.881	GUATEMALA
60	4.7	15.91	-98.6	15	Jul 12,1999	02:49:27.78	179.507	3.131	COSTA GUERRERO-OAXACA
61	4.8	16.06	-98.48	5	Jul 13,1999	21:50:13.97	177.267	2.984	COSTA GUERRERO-OAXACA
62	4.3	15.82	-98.69	15	Ago 11,1999	04:40:48.03	181.062	3.221	COSTA DE OAXACA
63	3.9	18.03	-98.25	60	Ago 13,1999	22:53:12.06	160.424	1.079	PUEBLA-MORELOS
64	4.7	16.17	-94.44	60	Ago 14,1999	11:08:42.51	125.077	5.077	ISTMO DE TEHUANTEPEC
65	6.7	9.22	-84.05	33	Ago 20,1999	10:53:53.35	122.815	17.577	COSTA RICA
66	4.1	15.3	-99.37	31	Sep 4,1999	17:41:47.57	190.842	3.814	COSTA DE GUERRERO
67	4.4	17.66	-98.26	60	Sep 8,1999	00:42:50.71	165.749	1.429	GUERRERO-OAXACA
68	4	17.69	-98.27	40	Sep 8,1999	05:04:51.99	165.828	1.397	GUERRERO-OAXACA
69	4.4	15.75	-92.27	265	Sep 13,1999	05:46:50.78	117.498	7.159	COSTA DE CHIAPAS
70	4.5	16.1	-100.55	10	Sep 25,2000	09:54:24.64	212.217	3.51	COSTA DE GUERRERO
71	4.9	15.54	-100.67	10	Sep 25,2000	18:10:42.06	209.422	4.05	COSTA DE GUERRERO
72	4.1	16.25	-98.38	4	Sep 27,2000	17:53:34.58	175.122	2.8	COSTA GUERRERO-OAXACA
73	4.4	15.65	-96.23	5	Sep 29,2000	15:07:38.49	145.616	3.39	COSTA DE OAXACA
74	4.3	17.14	-94.35	211	Sep 30,2000	21:59:26.61	114.381	4.69	ISTMO DE TEHUANTEPEC
75	4.6	16.12	-98.35	5	Oct 4,2000	03:10:17.28	174.773	2.93	COSTA GUERRERO-OAXACA
76	4.1	16.12	-98.26	5	Oct 4,2000	05:15:53.41	173.095	2.94	COSTA GUERRERO-OAXACA
77	4.8	13.72	-91.75	18	Oct 6,2000	14:46:17.86	127.867	8.69	COSTA DE GUATEMALA
78	3.8	16.06	-99.07	23	Oct 12,2000	02:43:59.30	188.114	3.01	COSTA DE GUERRERO
79	4.3	15.69	-99.3	52	Oct 16,2000	23:11:27.76	190.936	3.42	COSTA DE GUERRERO
80	5.4	15.81	-92.44	138	Oct 17,2000	20:02:21.72	117.737	6.98	COSTA DE CHIAPAS
81	3.8	16.86	-99.9	35	Oct 26,2000	20:09:12.49	209.219	2.53	COSTA DE GUERRERO
82	4.2	18.03	-95.31	83	Nov 9,2000	23:50:46.70	107.287	3.47	SUR DE VERACRUZ
83	3.9	18.95	-96.89	16	Nov 10,2000	07:24:39.54	92.893	1.74	VERACRUZ-OAXACA
84	4	16.35	-98.49	30	Nov 12,2000	19:00:11.27	177.182	2.69	COSTA GUERRERO-OAXACA
85	3.8	17.81	-100.62	56	Nov 30,2000	05:44:37.04	237.235	2.34	GUERRERO
86	4.4	15.92	-98.43	13	Dic 3,2000	20:45:58.97	176.507	3.13	COSTA DE OAXACA
87	4.4	16.64	-101.27	20	Dic 25,2000	01:09:06.22	226.738	3.57	COSTA DE GUERRERO
88	4.3	16.91	-96.42	59	Dic 30,2000	07:51:33.98	135.073	3.07	OAXACA
89	4.2	17.75	-94.68	70	Ene 7,2001	19:37:31.91	108.387	4.15	ISTMO DE TEHUANTEPEC
90	5	15.36	-93.27	13	Ene 9,2001	01:47:49.33	124.907	6.5	COSTA DE CHIAPAS
91	4.2	17.62	-100.55	57	Ene 10,2001	04:03:00.72	232.388	2.39	GUERRERO
92	4.1	16.2	-99.35	12	Ene 12,2001	00:45:27.40	193.725	2.93	COSTA DE GUERRERO
93	7.6	12.84	-88.79	39	Ene 13,2001	17:36:12.55	121.812	11.63	FUERA COSTAS CENTROAMERICA
94	4.6	12.06	-88.82	33	Ene 14,2001	11:12:00.20	125.054	12.04	FUERA COSTAS CENTROAMERICA
95	5.4	12.96	-88.84	33	Ene 14,2001	22:44:29.15	121.446	11.52	FUERA COSTAS CENTROAMERICA
96	5.1	12.83	-88.78	33	Ene 14,2001	22:50:35.88	121.827	11.65	FUERA COSTAS CENTROAMERICA
97	5	12.68	-88.74	33	Ene 15,2001	00:25:35.78	122.338	11.76	FUERA COSTAS CENTROAMERICA
98	4.7	12.78	-89.04	33	Ene 15,2001	00:52:50.85	122.784	11.45	FUERA COSTAS CENTROAMERICA

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## 2. ANÁLISIS DE EVENTOS SÍSMICOS AL ATRAVESAR EL EDIFICIO VOLCÁNICO

99	5	13.29	-88.9	33	Ene 15,2001	05:11:48.21	120.183	11.29	FUERA COSTAS CENTROAMERICA
100	5.2	12.7	-88.63	33	Ene 15,2001	12:22:50.13	121.947	11.84	FUERA COSTAS CENTROAMERICA
101	5.1	12.77	-88.75	33	Ene 16,2001	08:24:52.21	121.993	11.69	FUERA COSTAS CENTROAMERICA
102	5.7	12.78	-88.71	33	Ene 16,2001	11:00:58.54	121.839	11.72	FUERA COSTAS CENTROAMERICA
103	4.9	12.69	-88.95	33	Ene 16,2001	11:27:10.22	122.898	11.57	FUERA COSTAS CENTROAMERICA
104	4.9	13.89	-91.51	33	Ene 16,2001	18:49:57.87	125.984	8.78	FRENTE COSTAS GUATEMALA
105	4.4	12.16	-88.75	33	Ene 16,2001	23:35:29.67	124.459	12.03	FUERA COSTAS CENTROAMERICA
106	4.9	12.99	-88.91	33	Ene 17,2001	01:42:56.10	121.516	11.45	FUERA COSTAS CENTROAMERICA
107	4.6	13.04	-89.14	33	Ene 17,2001	21:08:17.34	121.162	11.22	EL SALVADOR
108	5.7	15.35	-92.78	96	Ene 19,2001	01:14:31.43	122.561	6.91	FRONTERA MEXICO-GUATEMALA
109	4.4	16.55	-99.42	20	Ene 19,2001	05:25:46.07	196.964	2.61	COSTA DE GUERRERO
110	5.7	13.92	-90.98	120	Ene 23,2001	05:25:47.28	123.79	9.19	FRENTE COSTAS GUATEMALA
111	4.5	17.46	-94.51	154	Ene 24,2001	16:10:46.68	111.359	4.41	ISTMO DE TEHUANTEPEC
112	5.3	12.67	-88.79	33	Ene 25,2001	10:31:33.85	122.521	11.72	FUERA COSTAS CENTROAMERICA
113	5	15.98	-97.96	84	Ene 26,2001	14:20:23.17	168.142	3.13	COSTA DE OAXACA
114	4.1	17.34	-101.46	34	Ene 27,2001	21:23:11.28	238.143	3.3	COSTA DE GUERRERO
115	5.2	16.03	-95.93	55.7	Feb 2, 2001	08:13:21.90	139.076	11.32	EL SALVADOR
116	4.3	15.63	-96.07	10	Feb 3,2001	14:32:47.25	144.014	4.26	COSTA DE OAXACA
117	4.5	13.09	-88.89	33	Feb 4,2001	09:28:23.21	121.028	90.46	EL SALVADOR
118	4.4	16.03	-95.93	16	Feb 5, 2001	02:03:33.20	139.076	4.04	OAXACA
119	4.2	17.98	-100.41	55	Feb 6,2001	09:46:10.38	238.157	2.07	GUERRERO
120	5.4	13.16	-89.01	64	Feb 7,2001	10:25:47.89	121.064	11.26	EL SALVADOR
121	3.7	16.71	-98.76	28	Feb 12,2001	04:08:22.51	183.105	2.33	COSTA GUERRERO-OAXACA
122	6.6	13.64	-88.94	13	Feb 13,2001	14:24:43.28	118.719	11.09	EL SALVADOR
123	4.3	18.02	-95.38	85	Feb 16,2001	08:59:52.87	107.824	3.4	SUR DE VERACRUZ
124	5	12.98	-88.9	22	Feb 17,2001	01:20:12.31	121.53	11.46	FUERA COSTAS CENTROAMERICA
125	4.7	15.4	-96.04	8	Feb 19,2001	19:49:06.82	145.435	4.38	COSTA DE OAXACA
126	4.7	15.53	-96.22	8	Feb 20,2001	09:40:49.11	146.416	4.26	COSTA DE OAXACA
127	5.3	17.46	-83.53	33	Feb 22,2001	08:06:29.89	93.879	15.18	NORTE DE HONDURAS
128	4.1	18.06	-99.86	64	Feb 23,2001	07:23:39.877	230.164	1.58	TAXCO-IGUALA
129	3.8	17.05	-98.68	164	Feb 24,2001	14:27:04.87	181.431	1.99	GUERRERO-OAXACA

**Tabla 2.1.** Información de los eventos telismicos y regionales

Para cada sismo fue necesario identificar las estaciones involucradas en su registro. Se escogieron las estaciones cuya componente vertical era registrada de forma clara.

ESTADÍSTICA CON  
**FALLA DE ORIGEN**

## 2.2 Procesamiento de Datos

Una vez establecidos los eventos y las estaciones que se iban a estudiar, fue necesario obtener la distancia epicentral ( $\Delta$ ) por evento, que se define como la distancia que separa al epicentro de cada estación :

$$\Delta = (\theta - \theta')^2 + (\phi - \phi')^2 \operatorname{sen}^2 \frac{1}{2}(\theta + \theta') \quad (2)$$

donde  $\phi$  corresponde a las coordenadas de longitud del epicentro,  $\phi'$  son las coordenadas de longitud de la  $i$ -ésima estación que registra el evento,  $\theta$  son las coordenadas de latitud del epicentro y  $\theta'$  corresponde a las coordenadas de latitud de la estación.

Estos valores, junto con la profundidad de los sismos, fueron usados para completar la fase inicial del procesamiento de los eventos, que consiste en la obtención de los tiempos de viaje que permitirán realizar posteriormente el cálculo de los residuales.

### 2.2.1 Cálculo de Residuales Relativos y Absolutos

Los tiempos de viaje relativos necesarios para llevar a cabo el análisis de los eventos sísmicos fueron calculados en computadora por medio de un programa que permite obtener el valor teórico de las tablas modificadas con el modelo de Tierra de Herrin (1968) para los tiempos de viaje de la primera onda en un evento telesísmico o regional que viaja del foco a la superficie. En otras palabras, es el cálculo para el tiempo de viaje estimado de una onda P como una función de distancia y profundidad focal.

## 2. ANÁLISIS DE EVENTOS SÍSMICOS AL ATRAVESAR EL EDIFICIO VOLCÁNICO

Los residuales absolutos se obtienen por medio de la siguiente ecuación (Foley, 1992):

$$R_i^j = T_{ij}^{obj} - T_{ij}^t, \quad (3)$$

Donde  $R_i^j$  es el residual absoluto de la tabla de Herrin para la  $i$ -ésima estación y el  $j$ -ésimo evento. Cada residual absoluto está compuesto por la sustracción del tiempo teórico a través del modelo de referencia ( $T_{ij}^t$ ) al tiempo registrado (o tiempo observado) en el archivo \*.DMX ( $T_{ij}^{obj}$ ).

Se entiende por *tiempo teórico* al compuesto por: (1) el tiempo de inicio del evento (según el N.E.I.S. y el Servicio Sismológico Nacional) y (2) el tiempo de viaje obtenido según el modelo de Herrin para la  $i$ -ésima estación, mientras que el *tiempo observado* indica el momento en que la onda P del  $j$ -ésimo evento es registrada por la  $i$ -ésima estación. Éste es sometido a una corrección por reloj con el propósito de obtener el tiempo exacto de llegada de la onda a la estación. Para realizar esta corrección fue necesario utilizar el software conocido como PICK'EM. Este programa ofrece la posibilidad de seleccionar manualmente el tiempo de arribo de las ondas P y S. Fue posible cotejar el tiempo registrado por el evento con las marcas de tiempo en el registro colocando uno de los indicadores sobre dichas marcas. De esta forma se obtuvo el tiempo total en segundos del desfase. Aunque la diferencia es muy pequeña, debe efectuarse la corrección, ya que podría afectar el cálculo de los residuales al asumir tiempos de arribo que no corresponden con los reales.

Los residuales absolutos no son de gran utilidad en estudios locales, ya que contienen: contribuciones de estructuras en la corteza y el manto superior bajo la estación que registra el evento, efectos asociados con diferencias de elevación entre estaciones, contribuciones debidas a errores en la localización de los sismos, errores en los tiempos de origen y efectos debido a la estructura del subsuelo bajo la fuente sísmica y a lo largo de la trayectoria de propagación de las ondas. En resumen, los residuales absolutos son una medida de error en el cálculo del hipocentro y de cuánto difiere la velocidad en la onda P real a la velocidad del modelo de Herrin a lo largo de las trayectorias de viaje de miles de kilómetros en el manto. Para corregir estos

## 2. ANÁLISIS DE EVENTOS SÍSMICOS AL ATRAVESAR EL EDIFICIO VOLCÁNICO

efectos, se calcularon los residuales relativos de P ( $RR_{ij}$ ) por medio de la sustracción que se realiza a cada residual absoluto de las estaciones que registran el  $j$ -ésimo evento y que está compuesta por el promedio de éstos:

$$RR_{ij} = R_{ij}'' - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{ij}'' , \quad (4)$$

donde  $N$  es el número de estaciones en el evento  $j$ .

Si  $RR_{ij}$  es positivo, es posible que haya ocurrido un retraso en alguna parte de la trayectoria del hipocentro a la  $i$ -ésima estación de acuerdo a la trayectoria del rayo a la estación de referencia. Un residual negativo indica un arribo que sucede antes de lo esperado, pues el manto inferior se considera homogéneo en una escala de pocos kilómetros, así que es razonable asumir que la mayor parte de la contribución a los residuales relativos de una red local está dada por las diferencias de velocidad de la corteza o el manto superior bajo las estaciones (Steeple, 1976).

### 2.2.2 Separación en el procesamiento de eventos tomando en cuenta cambios en la actividad volcánica.

Con objeto de facilitar el procesamiento de los sismos, éstos fueron separados tomando como referencia un marco de tiempo razonable. Se realizó un análisis para cada año por considerarse la opción más adecuada, pues tenía una cantidad suficiente de eventos que permitían muestrear el comportamiento de los rayos cubriendo un rango de acimut muy amplio.

Se elaboraron mapas de contornos correspondientes a los años 1996, 1997, 1998, 1999, 2000 y principios del 2001. Para cada año, se realizaron tres gráficas (sujetas a la existencia de eventos en acimut de las regiones noreste y noroeste) con una sección cada una. Las secciones estaban compuestas por rangos de acimut de 0 a 90 grados, de 90 a 270 grados y finalmente, de 270 a 360 grados. Se elaboró una gráfica más, que comprendía los eventos de todos los años que tuvieran incidencia casi vertical. Este estudio no mostró resultados concretos que pudieran estar asociados con la actividad volcánica

## 2. ANÁLISIS DE EVENTOS SÍSMICOS AL ATRAVESAR EL EDIFICIO VOLCÁNICO

ocurrida entre 1996 y 2001. La causa principal radica en que la selección de tiempo (análisis por años) no fue la más apropiada, debido a que, en el transcurso de un año, los niveles de actividad pueden o no incrementarse de acuerdo a los fenómenos que lleguen a presentarse en el interior del volcán. Por ejemplo, en un período de un año se llegaron a identificar hasta tres etapas (Etapas 6, 7 y 8 en 1997) con diferentes características entre sí por ser fases que involucran esfuerzos compresivos y movimiento de material, entre otros. Las gráficas no mostraban resultados contundentes asociados a las fases de actividad del volcán, sino una combinación de las mismas. Por esta razón se optó por buscar otro criterio al dividir los eventos, esta vez, tomando en consideración los períodos de tiempo de las diferentes etapas eruptivas que se han presentado en el volcán.

Las fases en que se ha clasificado el reciente periodo de actividad volcánica del Popocatepetl son catorce (Tabla 1.1). Se sabe que la primera etapa comienza en Enero de 1992 (Valdés, 2003). Sin embargo, el análisis de este trabajo abarca solamente de la etapa 5 a la 14. La explicación radica en que al momento de comenzar la actividad no se encontraba instalada la red sísmica que actualmente monitorea el estado del volcán. En 1992, las estaciones ubicadas en Tlamacas (PPM) y Altzomoni (IIA) eran las únicas existentes que podían registrar eventos sísmicos cerca del volcán (Quaas, 1996), por lo tanto, no es posible realizar un estudio con dos estaciones localizadas al norte y noroeste del volcán ya que no son suficientes para determinar una cobertura (a pesar de la cantidad de sismos existentes entre los años 1992 y 1996) que permita realizar un análisis sobre los efectos en las trayectorias de los rayos cuando atraviesan el edificio volcánico.

En cada fase eruptiva se contó con un mínimo de 6 estaciones que registraron los eventos:

### *Etapa 5*

Estaciones:

PPB, PPC, PPM, PPN, PPP, PPX.

### *Etapa 6*

Estaciones:

PPA, PPB, PPC, PPM, PPN, PPP, PPQ, PPT, PPX.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 2. ANÁLISIS DE EVENTOS SÍSMICOS AL ATRAVESAR EL EDIFICIO VOLCÁNICO

---

---

### *Etapa 7*

Estaciones:

PPA, PPC, PPJ, PPM, PPN, PPP, PPQ, PPT, PPX.

### *Etapa 8*

Estaciones:

PPA, PPB, PPC, PPJ, PPM, PPP, PPQ, PPT, PPX.

### *Etapa 10*

Estaciones:

PPC, PPJ, PPP, PPQ, PPT, PPX.

### *Etapa 11*

Estaciones:

PPC, PPJ, PPP, PPQ, PPT, PPX.

### *Etapa 12*

Estaciones:

PPC, PPJ, PPM, PPP, PPQ, PPT.

### *Etapa 13*

Estaciones:

PPC, PPJ, PPM, PPP, PPQ, PPT, PPX.

### *Etapa 14*

Estaciones:

PPC, PPJ, PPM, PPP, PPQ, PPT, PPX.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Para el análisis por etapas se utilizó nuevamente el criterio de elaborar tres secciones de partición del acimut ( $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$ ,  $90.01^{\circ}$ - $270^{\circ}$  y  $270.01^{\circ}$ - $360^{\circ}$ ). Sin embargo, las gráficas con un rango de acimut de 0 a 90 grados solamente se presentaban en 2 fases (Etapas 6 y 11) a causa de la escasez de sismos en esa zona. Lo mismo ocurrió para las gráficas de la zona comprendida entre 270 a 360 grados, donde los eventos, aún presentes en todas las etapas, no eran suficientes para realizar una interpretación confiable. Por lo tanto, se optó por excluir ambas regiones del análisis. La sección que había sido construida con un acimut de 90 a 270 grados contaba con sismos provenientes en su mayoría de las costas de Guerrero y Oaxaca. A pesar de tener una gran cantidad de eventos, la sección no era lo suficientemente clara para obtener una interpretación confiable por involucrar sismos contenidos en un rango



## 2. ANÁLISIS DE EVENTOS SÍSMICOS AL ATRAVESAR EL EDIFICIO VOLCÁNICO

---

muy amplio de acimut, originando una gráfica con trayectorias cruzadas dentro de una misma sección, así que fue necesario realizar una división para obtener gráficas más claras en donde fuera posible observar los cambios que sufre el volcán durante las diferentes etapas tomando dos direcciones como referencia.

En esta división los eventos fueron agrupados en dos secciones: la Sección 1 que comprende los sismos cuyo epicentro está localizado entre 90 y 150 grados y la Sección 2, que contiene los eventos con acimut que va de 150 a 240 grados. Este rango de acimut es el más apropiado para realizar el estudio debido a que la mayoría de los eventos se originan al sudeste y sudoeste con un acimut que va desde 90 a 240 grados (Fig. 2.2)

En el siguiente capítulo se presentan las gráficas que se obtuvieron en este análisis, así como la forma en que éstas fueron elaboradas.

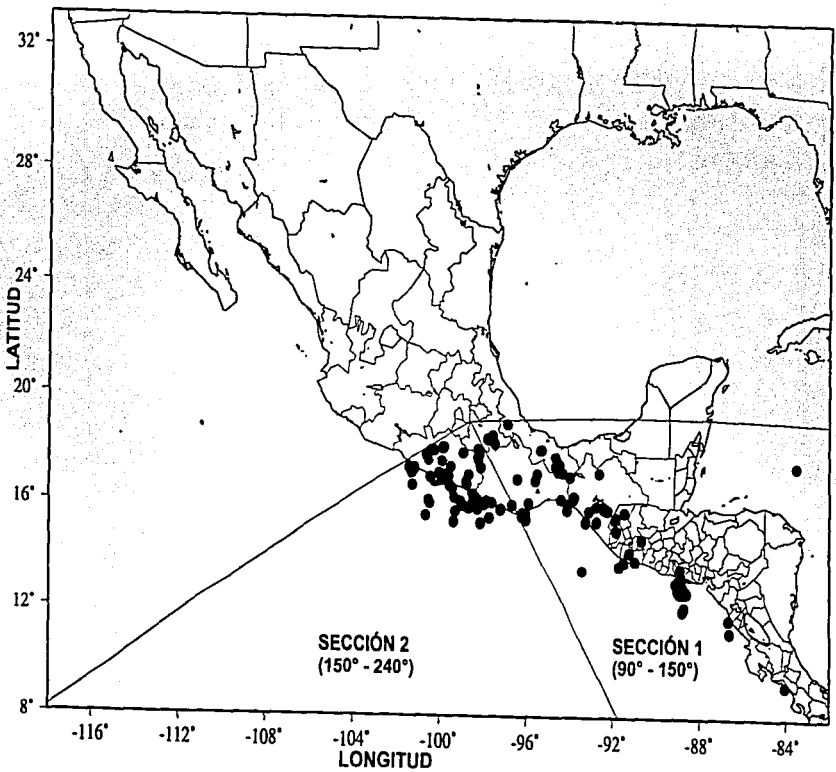


Fig. 2.2. Mapa de los 129 eventos telúsmicos y regionales separados por secciones

---

CAPÍTULO 3  
GRÁFICAS

---

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Los resultados de los residuales relativos se presentan en forma de gráficas para las etapas de actividad del volcán, elaborados por computadora con ayuda de la versión 7.0 del software que permite elaborar mapas y gráficas de superficies en tres dimensiones o bien secciones en dos dimensiones de las mismas, entre otras aplicaciones de gran utilidad y recibe el nombre de SURFER. En estas gráficas se presenta un mapa de contornos (Figs. 4.1a - 4.18a) de retrasos y adelantos que se elaboró por medio de la interpolación (por sección) del promedio de los residuales obtenidos para cada estación y etapa. La interpolación se realizó con el método Kriging (Apéndice C), que consiste en un conjunto de rutinas de regresión lineal, donde el parámetro a interpolar puede ser tratado como una variable regional. Inicialmente se probaron diferentes métodos de interpolación, tales como el método por Regresión Polinomial, por Mínima Curvatura, por Distancia Inversa a una Potencia, por Triangulación por Interpolación Lineal, por el método Modificado de Shepard, y, finalmente, por el método de Vecindad Natural. Todos ellos disponibles en el software antes mencionado. Sin embargo, los resultados no fueron satisfactorios, ya que los criterios de convergencia de estos métodos generaban gráficas incompletas por la interrupción abrupta del cálculo.

Del mismo modo, se graficó un mapa de curvas de nivel que representa la estructura del volcán. Estas variaciones de altitud pueden distinguirse fácilmente por medio de la escala de grises que se utilizó para dicho fin, donde los tonos más oscuros corresponden a elevaciones menores y los más claros a elevaciones mayores. Las estaciones que registraron los eventos de la etapa a la que pertenece la gráfica también fueron añadidas con el fin de tener presente su ubicación y observar de forma clara los efectos de las trayectorias de las ondas de los sismos a medida que pasan por cada estación.

La figura situada en la parte inferior izquierda, (Figs. 4.1b-4.18b) contiene los epicentros que pertenecen a los sismos utilizados para el análisis de cada sección y etapa. Los epicentros, localizados de acuerdo a sus coordenadas de longitud y latitud, están representados con círculos de color negro. Del mismo modo, el volcán Popocatépetl se representa como un triángulo.

Estas gráficas hacen más evidente a simple vista la localización de los eventos, la distancia a la que éstos se encuentran con respecto al volcán y la dirección de los frentes de onda que pasan por las estaciones en cada fase.

Debajo de las gráficas de localización de epicentros de los eventos regionales y telesísmicos con respecto al volcán, se presenta un perfil elaborado para la Sección 1 en todas las fases con dirección SE – NW y un ángulo constante de  $55^\circ$  con respecto a la horizontal en sentido horario. Está compuesto por: (1) Estaciones cercanas al perfil cuya proporción de distancia en la separación de una a otra es la misma que se observa en la gráfica principal y (2) los valores del promedio de los residuales relativos que se obtuvo por estación para cada etapa. Como complemento del perfil, se construyó una tabla con los mismos valores y estaciones. Las flechas colocadas a la derecha indican la dirección ideal de avance ideal del frente de la onda P para los eventos incluidos en esta sección.

Para la Sección 2 se elaboró un perfil con características similares a las del realizado para la Sección 1. En este caso, se escogió la dirección S-N por las cuatro estaciones presentes en casi todas las etapas que mantienen esta alineación. Para esta sección también se incluyó una tabla que contiene los mismos valores.

El propósito de que se realizaran perfiles (Figs. 4.1c – 4.18c) con estas características y sus correspondientes tablas (Tablas 4.1 – 4.18) fue de facilitar la visualización de las variaciones en los tiempos de viaje de los primeros arribos a medida que las ondas pasan por las estaciones.

Es importante recordar que la Sección 1 está compuesta por todos los eventos con epicentros dentro de un rango de acimut que va de  $90$  a  $150$  grados, mientras que los eventos que van de  $150$  a  $240$  grados pertenecen a la Sección 2.

Finalmente, en la parte inferior derecha se presenta una gráfica de localización de eventos sísmicos procedentes del volcán (Valdés, 2003) (Figs. 4.1d – 4.18d) ocurridos durante cada etapa que permite comprender y asociar la actividad local con las variaciones que se presentan en los valores de los residuales.

ETAPA 5 "FASE DE LA PRIMERA CONSTRUCCIÓN DEL DOMO" (4 Marzo - Septiembre, 1996)  
SECCIÓN 1 (90° - 150°)

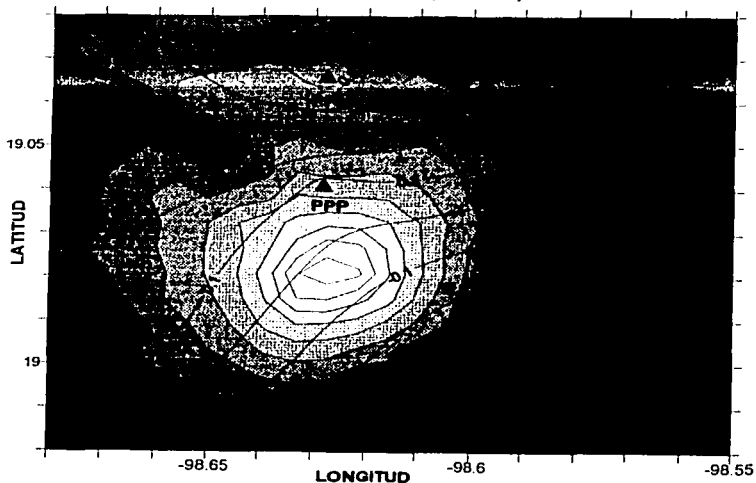


Fig 4.1a. Mapa de contornos de residuales relativos

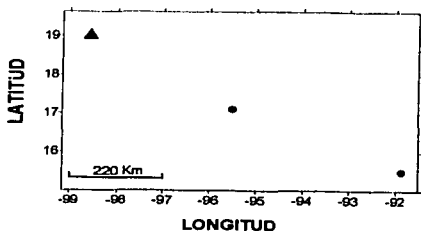


Fig 4.1b. Localización de epicentros con respecto al volcán

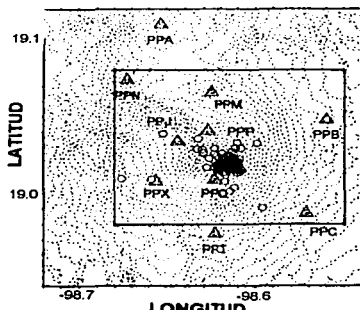


Fig 4.1d. Localización epicentral de eventos ocurridos en el volcán durante la Etapa 5 (Valdés 2003)

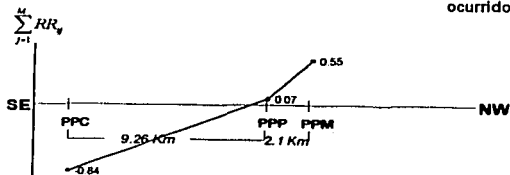


Fig. 4.1c. Perfil con estaciones y residuales

ETAPA 5	
NW	
PPM	0.55
PPP	0.07
PPC	-0.84
SE	

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Tabla 4.1. Residuales y estaciones del perfil

ETAPA 5 "FASE DE LA PRIMERA CONSTRUCCIÓN DEL DOMO" (4 Marzo - Septiembre, 1996)  
SECCIÓN 2 (150° - 240°)

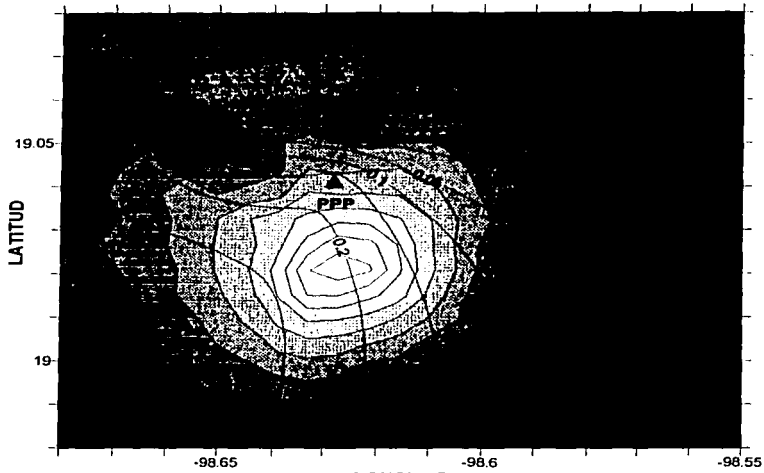


Fig 4.2a. Mapa de contornos de residuales relativos

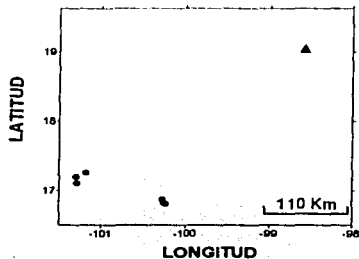


Fig 4.2b. Localización de epicentros con respecto al volcán

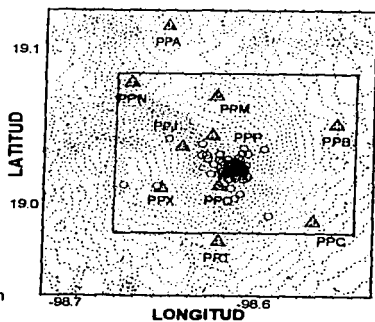


Fig 4.2d. Localización epicentral de eventos ocurridos en el volcán durante la Etapa 5 (Valdés 2003)

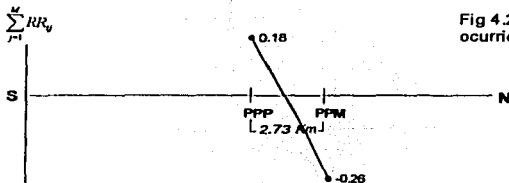


Fig. 4.2c. Perfil con estaciones y residuales

ETAPA 5	
N	-0.26
PPP	0.18
S	

Fig. 4.2a. Residuales y estaciones del perfil

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

ETAPA 6 "FASE DE ACTIVIDAD CUASI-ESTATICA DE PULSOS" (Octubre, 1996 - 18 Agosto, 1997)  
SECCIÓN 1 (90° - 150°)

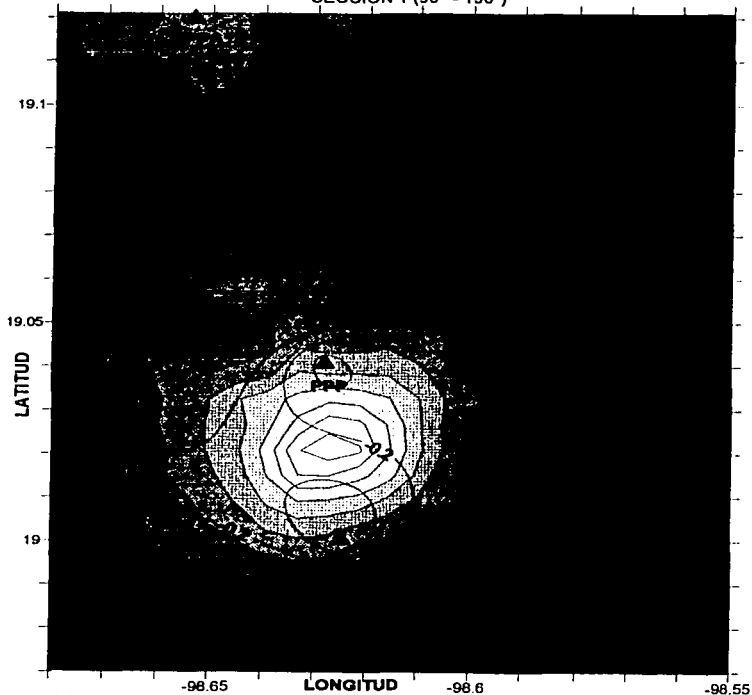


Fig 4.3a. Mapa de contornos de residuales relativos

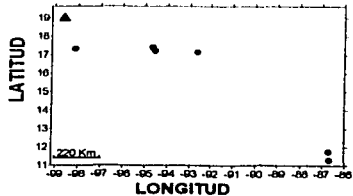


Fig 4.3b. Localización de epicentros con respecto al volcán

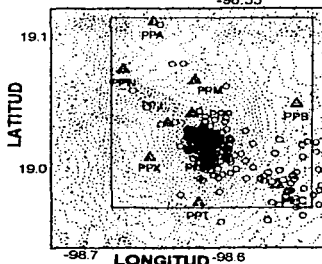


Fig 4.3d. Localización epicentral de eventos ocurridos en el volcán durante la Etapa 6 (Valdés 2003)

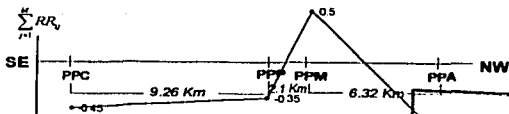


Fig. 4.3c. Perfil con estaciones y residuales

ANÁLISIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ETAPA 6	
NW	0.69
PPA	-0.69
PPM	0.5
PPP	-0.35
PPC	-0.45
SE	

Tabla 3. Residuales y estaciones del perfil



ETAPA 6 "FASE DE ACTIVIDAD CUASI-ESTÁTICA DE PULSOS" (Octubre, 1996 - 18 Agosto, 1997)  
SECCIÓN 2 (150° - 240°)

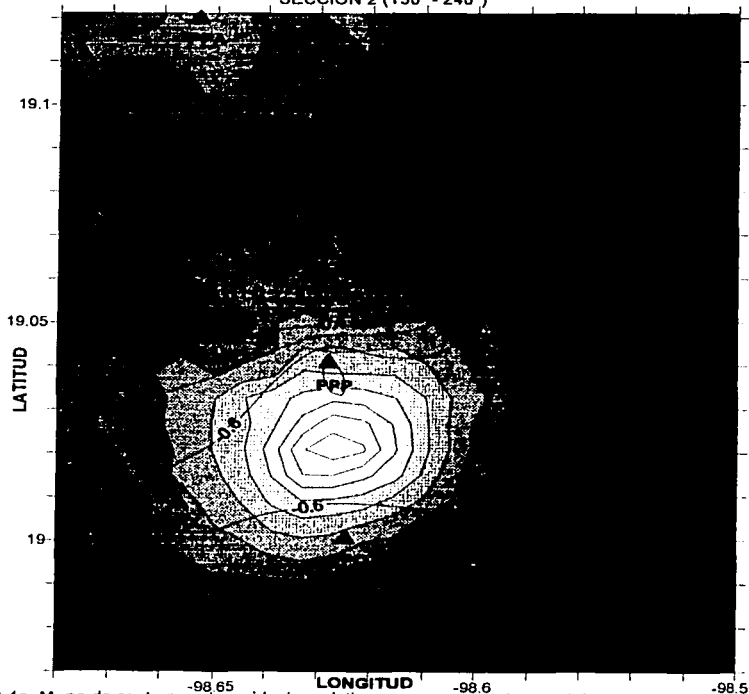


Fig 4.4a. Mapa de contornos de residuales relativos

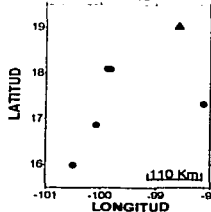


Fig 4.4b. Localización de epicentros con respecto al volcán

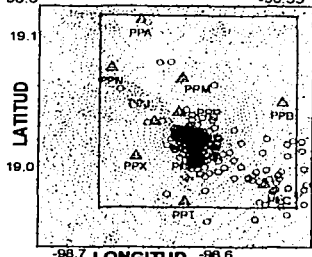


Fig 4.4d. Localización epicentral de eventos ocurridos en el volcán durante la Etapa 6 (Valdés 2003)

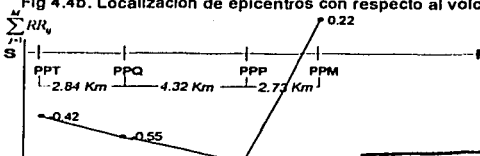


Fig. 4.4c. Perfil con estaciones y residuales

ETAPA 6

N	0.22
PPM	-0.71
PPQ	-0.55
PPT	-0.42
S	

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

ETAPA 7 "FASE DE FORMACION DEL DOMO" (19 Agosto - 24 Diciembre, 1997)  
SECCIÓN 1 (90° - 150°)

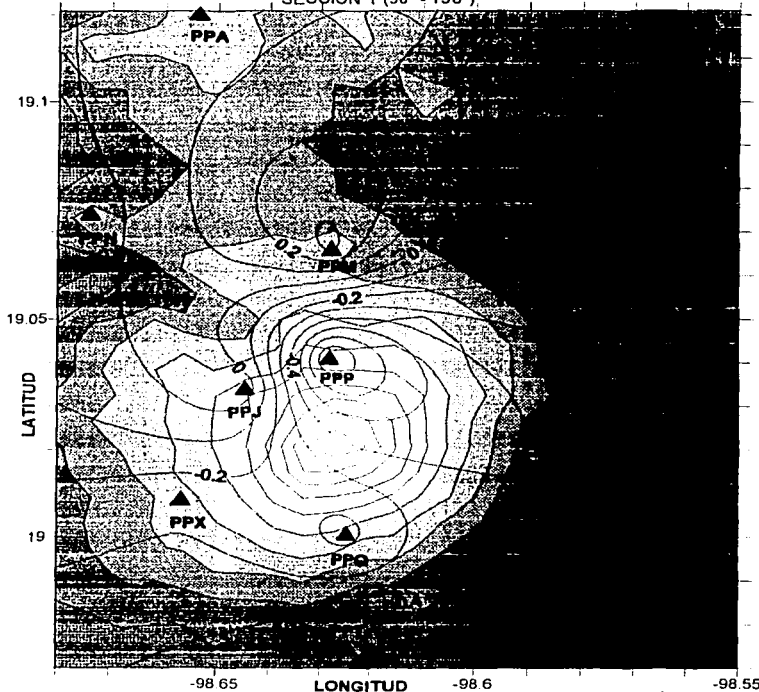


Fig 4.5a. Mapa de contornos de residuales relativos

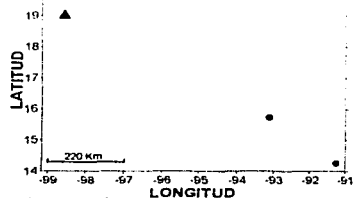


Fig 4.5b. Localización de epicentros con respecto al volcán

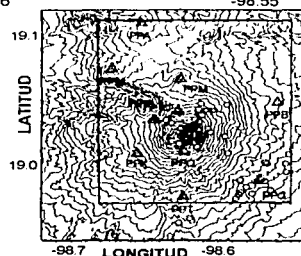


Fig 4.5d. Localización epicentral de eventos ocurridos en la Etapa 7 (Valdés 2003)

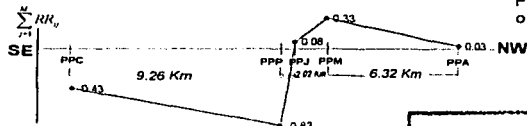


Fig. 4.5c. Perfil con estaciones y residuales

ETAPA 7	
NW	0.03
PPA	0.33
PPM	0.06
PPJ	-0.83
PPP	-0.83
PPC	-0.43

TEJINUCÁN  
FALLA DE ORIGEN

ETAPA 7 "FASE DE FORMACIÓN DEL DOMO" (19 Agosto - 24 Diciembre, 1997)  
SECCIÓN 2 (150° - 240°)

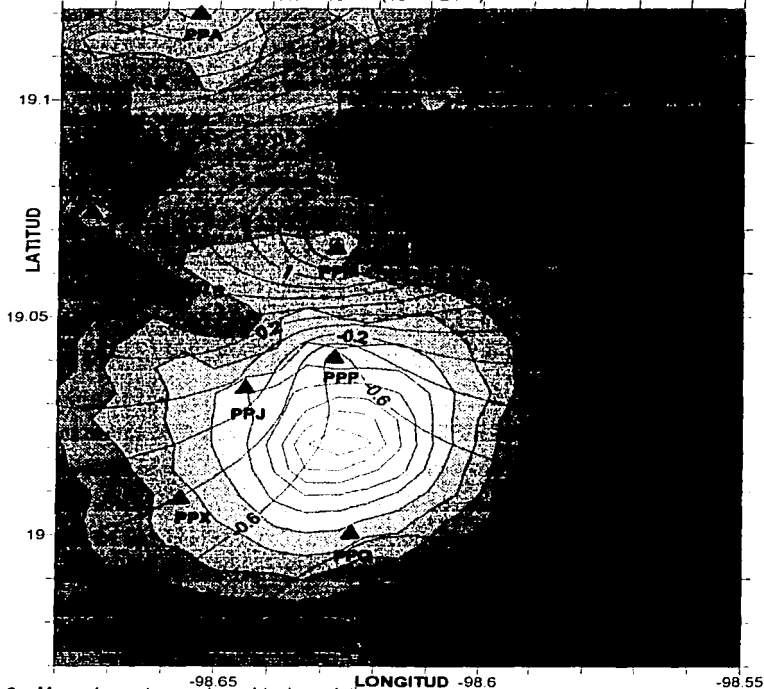


Fig 4.6a. Mapa de contornos de residuales relativos

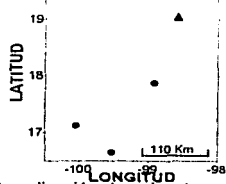


Fig 4.6b. Localización de epicentros con respecto al volcán

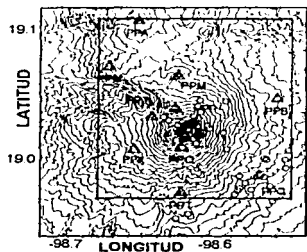


Fig 4.6d. Localización epicentral de eventos ocurridos en el volcán durante la Etapa 7 (Valdés 2003)

$$\sum_{i=1}^n RR_i$$

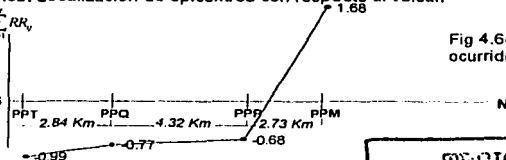


Fig. 4.6c. Perfil con estaciones y residuales

ETAPA 7

N	1.68
PPM	-0.68
PPP	-0.77
PPO	-0.77
PPT	-0.99
S	

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Residuales y estaciones del perfil

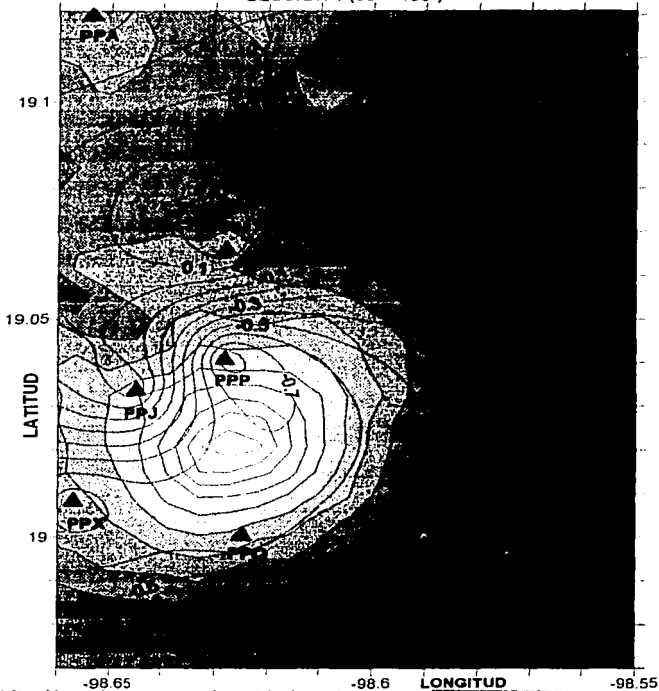


Fig 4.7a. Mapa de contornos de residuales relativos

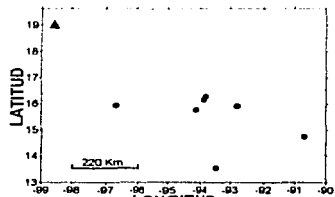


Fig 4.7b. Localización de epicentros con respecto al volcán

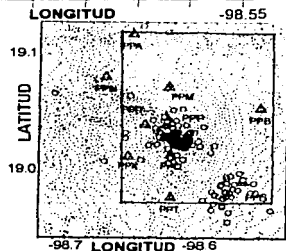


Fig 4.7d. Localización epicentral de eventos ocurridos en el volcán durante la Etapa 8 (Valdés 2003)

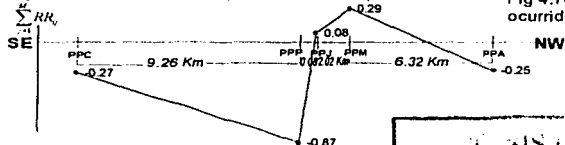


Fig. 4.7c. Perfil con estaciones y residuales

ETAPA 8	
NW	
PPA	-0.25
PPM	0.29
PPJ	0.08
PPP	-0.87
PPC	-0.27
SE	

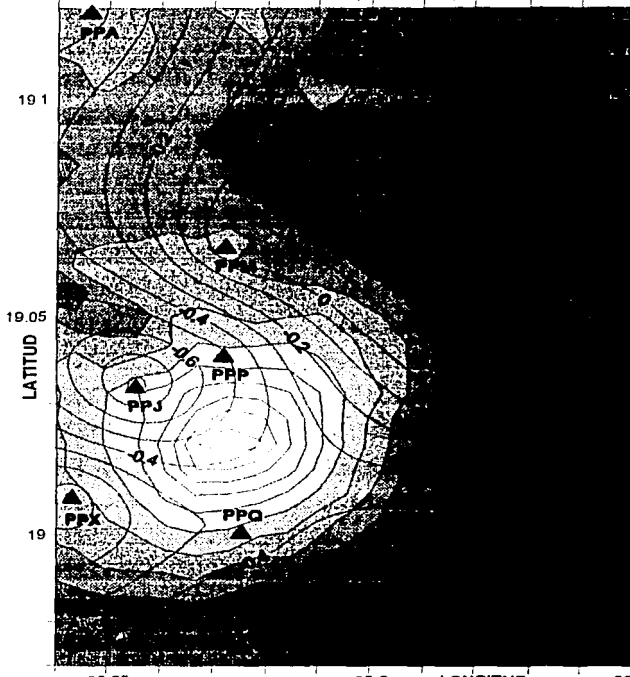


Fig. 4.8a. Mapa de contornos de residuales relativos

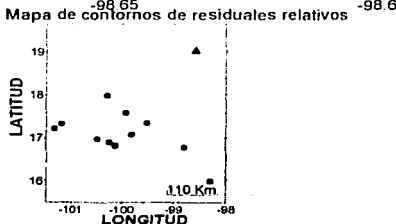


Fig. 4.8b. Localización de epicentros con respecto al volcán

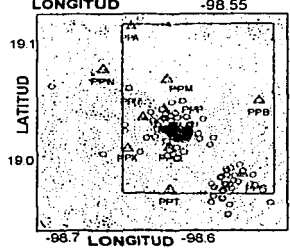


Fig. 4.8d. Localización epicentral de eventos ocurridos en el volcán durante la Etapa 8 (Valdés 2003)

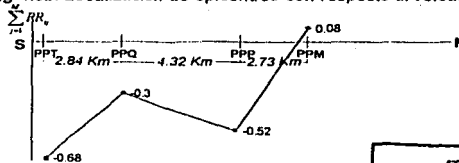


Fig. 4.8c. Perfil con estaciones y residuales

ETAPA 8	
N	0.08
PPM	-0.52
PPP	-0.30
PPQ	-0.52
PPT	-0.68
S	

48  
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ETAPA 10 "FASE POST-ERUPTIVA Y DE RELAJACIÓN" (4 Enero - 3 Septiembre, 1999)  
SECCIÓN 1 (90° - 150°)

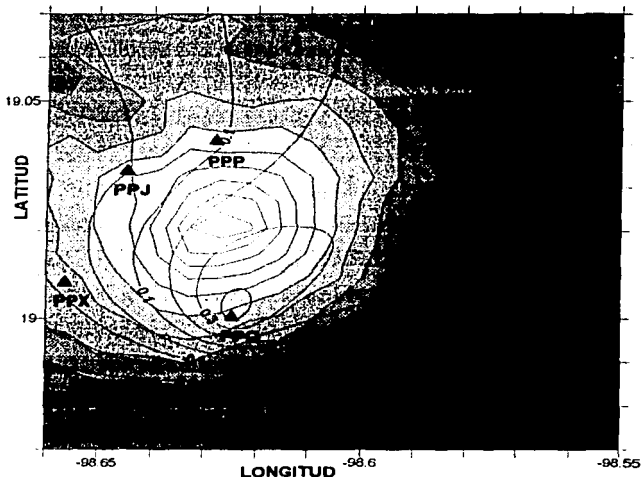


Fig 4.9a. Mapa de contornos de residuales relativos

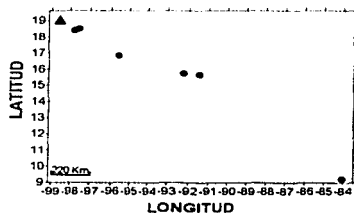


Fig 4.9b. Localización de epicentros con respecto al volcán

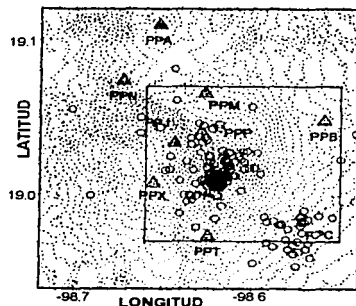


Fig 4.9d. Localización epicentral de eventos ocurridos en el volcán durante la Etapa 10 (Valdés 2003)

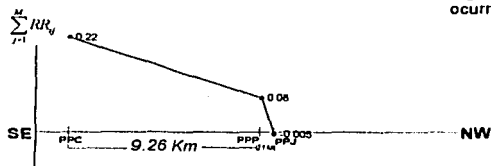


Fig. 4.9c. Perfil con estaciones y residuales

ETAPA 10	
NW	
PPJ	-0.005
PPP	0.08
PPC	0.22
SE	

Tabla 4.9. Residuales y estaciones del perfil

ETAPA 10 "FASE POST-ERUPTIVA Y DE RELAJACIÓN" (4 Enero - 3 Septiembre, 1999)  
SECCIÓN 2 (150° - 240°)

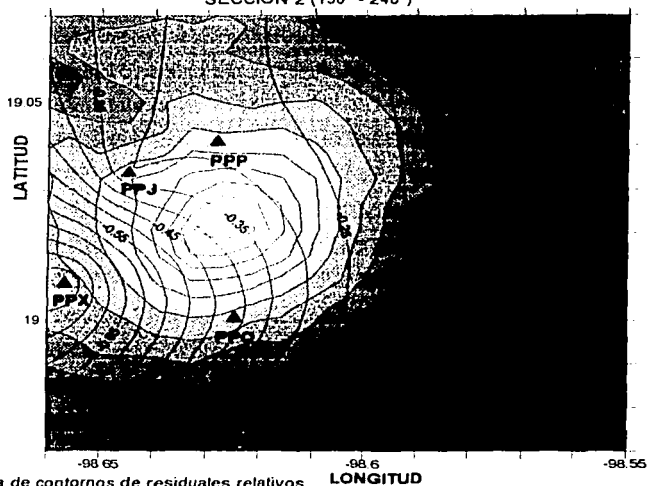


Fig 4.10a. Mapa de contornos de residuales relativos

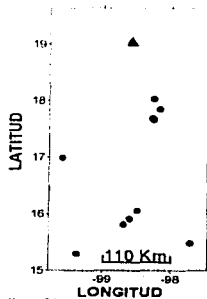


Fig 4.10b. Localización de epicentros con respecto al volcán

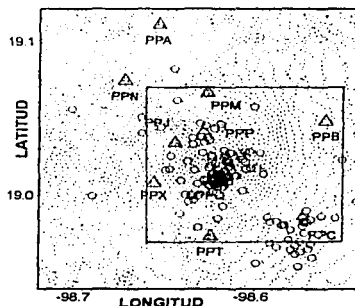


Fig 4.10d. Localización epicentral de eventos ocurridos en el volcán durante la Etapa 10 (Valdés 2003)

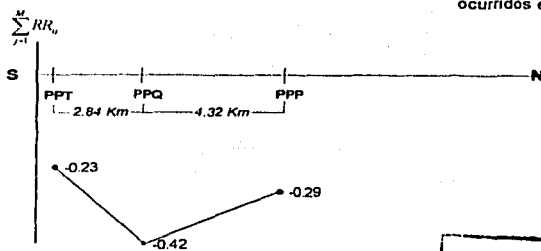


Fig. 4.10c. Perfil con estaciones y residuales

ETAPA 10	
N	
PPP	-0.29
PPQ	-0.42
PPT	-0.23
S	

Tabla 4.1. Residuales y estaciones del perfil

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ETAPA 11 "FASE DE RECARGA FALLIDA" (4 Septiembre, 1999 - 15 Septiembre, 2000)  
SECCIÓN 1 (90 - 150°)

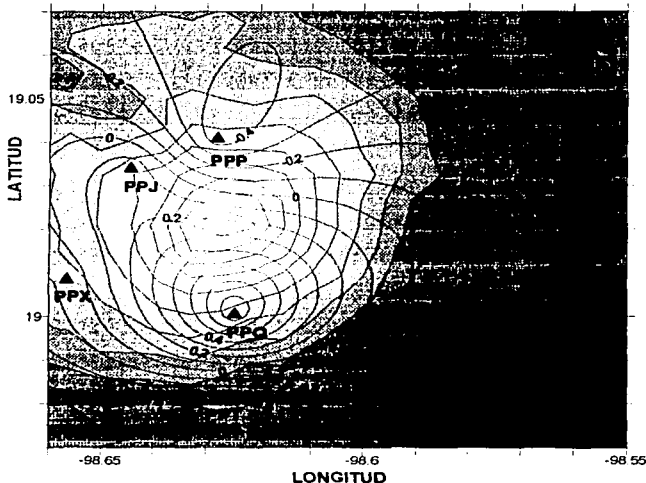


Fig 4.11a. Mapa de contornos de residuales relativos

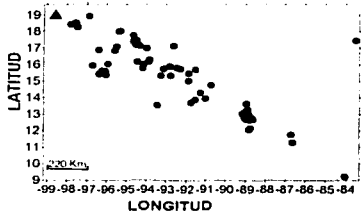


Fig 4.11b. Localización de epicentros con respecto al volcán

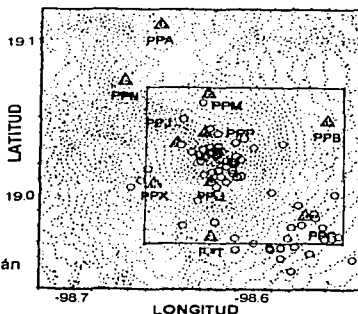


Fig 4.11d. Localización epicentral de eventos ocurridos en el volcán durante la Etapa 11 (Valdés 2003)

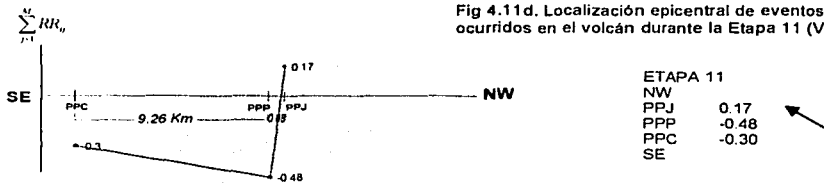


Fig. 4.11c. Perfil con estaciones y residuales

Tabla 4.11. Residuales y estaciones del perfil

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



ETAPA 11 "FASE DE RECARGA FALLIDA" (4 Septiembre, 1999 - 15 Septiembre, 2000)  
SECCIÓN 2 (150° - 240°)

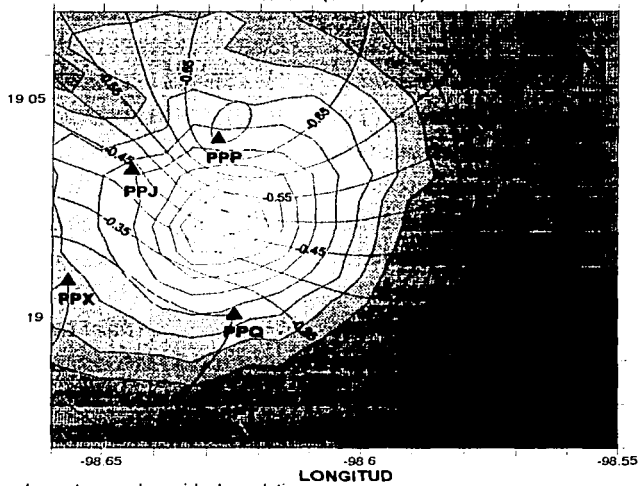


Fig 4.12a. Mapa de contornos de residuales relativos

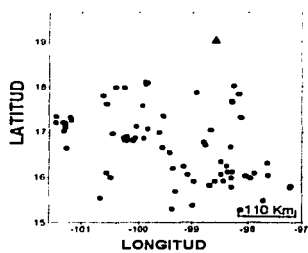


Fig 4.12b. Localización de epicentros con respecto al volcán

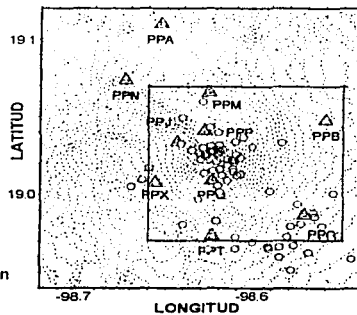


Fig 4.12d. Localización epicentral de eventos ocurridos en el volcán durante la Etapa 11 (Valdés 2003)

$$\sum_{i=1}^N RR_i$$

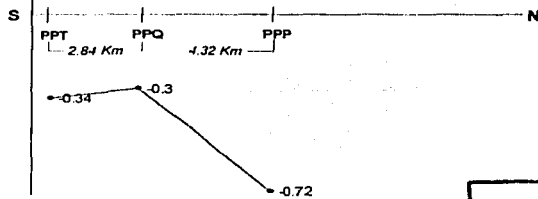


Fig. 4.12c. Perfil con estaciones y residuales

ETAPA 11

N	
PPP	-0.72
PPQ	-0.30
PPT	-0.34
S	

ETAPA 12 "FASE DE RECARGA" (16 Septiembre - 10 Diciembre, 2000)  
SECCIÓN 1 (90° - 150°)

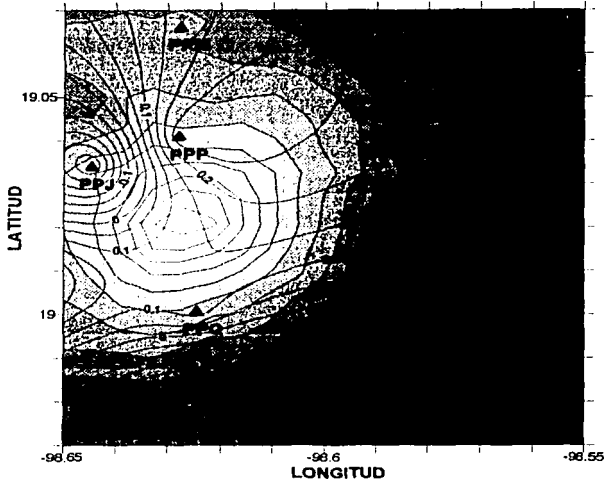


Fig 4.13a. Mapa de contornos de residuales relativos

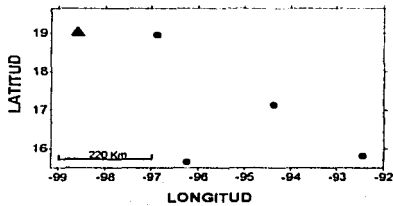


Fig 4.13b. Localización de epicentros con respecto al volcán

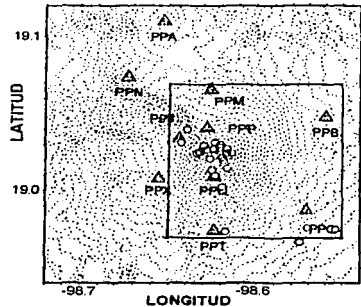


Fig 4.13d. Localización epicentral de eventos ocurridos en el volcán durante la Etapa 12 (Valdés 2003)

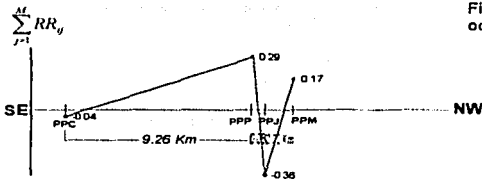


Fig. 4.13c. Perfil con estaciones y residuales

ETAPA 12	
NW	0.17
PPM	0.17
PPJ	-0.36
PPP	0.29
PPC	-0.04
SE	

Tabla 4.13. Residuales y estaciones del perfil

ETAPA 12 "FASE DE RECARGA" (16 Septiembre - 10 Diciembre, 2000)  
SECCIÓN 2 (150° - 240°)

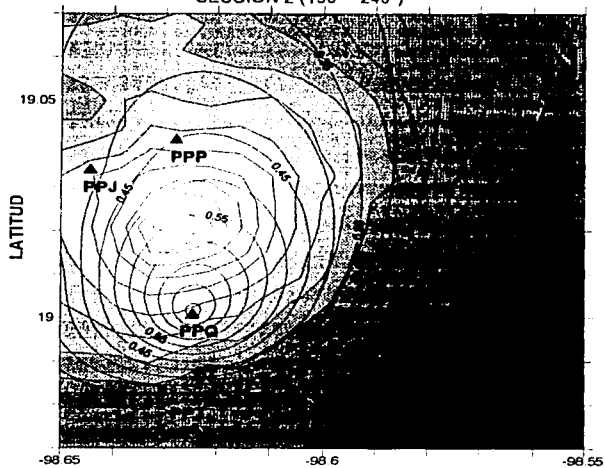


Fig 4.14a. Mapa de contornos de residuales relativos

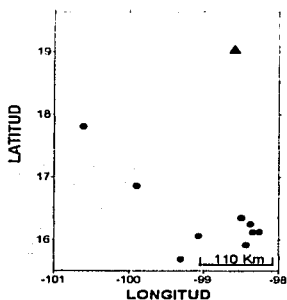


Fig 4.14b. Localización de epicentros con respecto al volcán

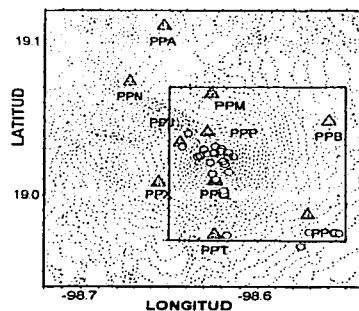
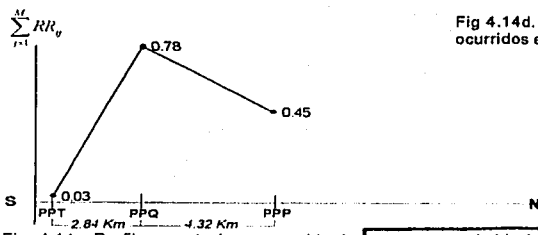


Fig 4.14d. Localización epicentral de eventos ocurridos en el volcán durante la Etapa 12 (Valdés 2003)



ETAPA 12

N	
PPP	0.45
PPQ	0.78
PPT	0.03
S	



Fig. 4.14c. Perfil con estaciones y residuales

Tabla 4.14. Residuales y estaciones del perfil

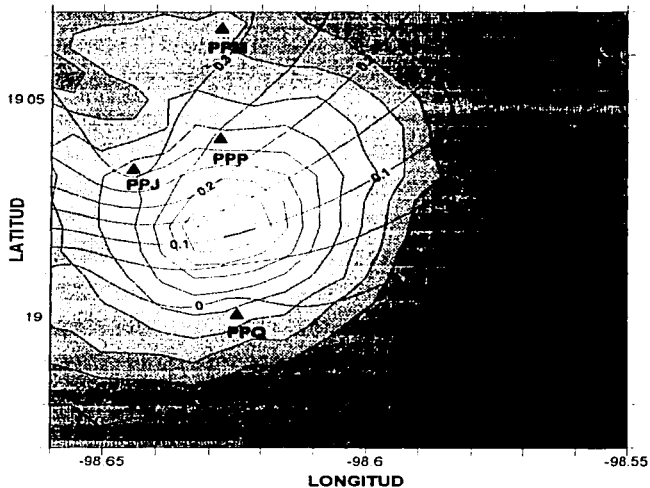


Fig 4.15a. Mapa de contornos de residuales relativos

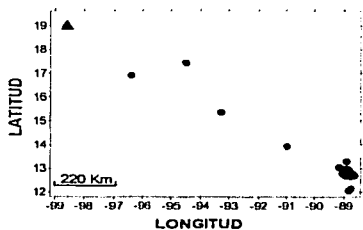


Fig 4.15b. Localización de epicentros con respecto al volcán

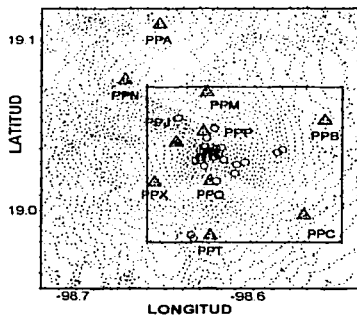


Fig 4.15d. Localización epicentral de eventos ocurridos en el volcán durante la Etapa 13 (Valdés 2003)

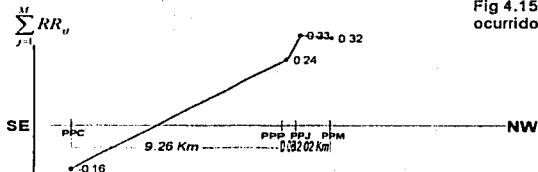


Fig. 4.15c. Perfil con estaciones y residuales

ETAPA 13

NW	0.32
PPM	0.33
PPJ	0.24
PPP	0.24
PPC	-0.16
SE	

Tabla 4.15. Residuales y estaciones del perfil

ETAPA 13 "RÁPIDO CRECIMIENTO DEL DOMO Y FASE ERUPTIVA INTENSA" (11 Diciembre, 2000 - 23 Enero, 2001)  
SECCIÓN 2 (150° - 240°)

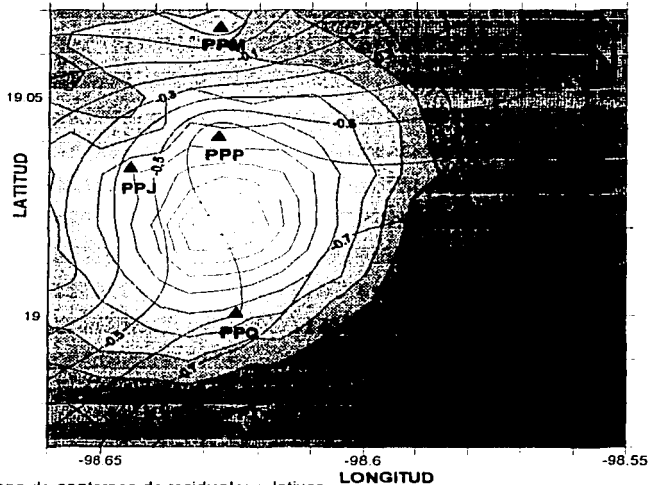


Fig 4.16a. Mapa de contornos de residuales relativos

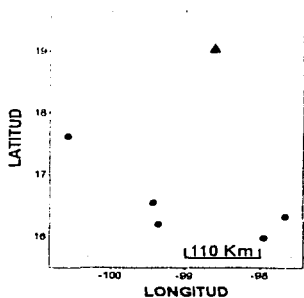


Fig 4.16b. Localización de epicentros con respecto al volcán

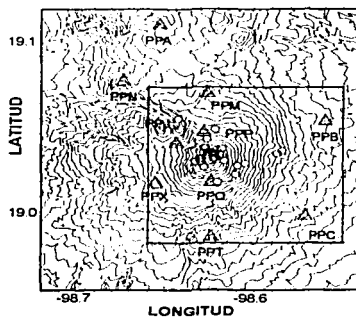


Fig 4.16d. Localización epicentral de eventos ocurridos en el volcán durante la Etapa 13 (Valdés 2003)

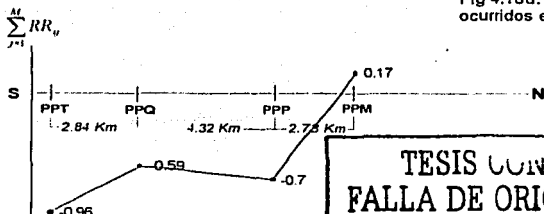


Fig. 4.16c. Perfil con estaciones y residuales

ETAPA 13	
N	0.17
PPM	-0.7
PPP	-0.59
PPQ	-0.96
PPT	-0.96
S	

Tabla 4.16. Residuales y estaciones del perfil

ETAPA 14 "FASE POST-ERUPTIVA Y DE PEQUEÑAS REPETICIONES DE CONSTRUCCIÓN DEL DOMO"  
 (24 Ene - 31 Dic, 2001)  
 SECCIÓN 1 (90° - 150°)

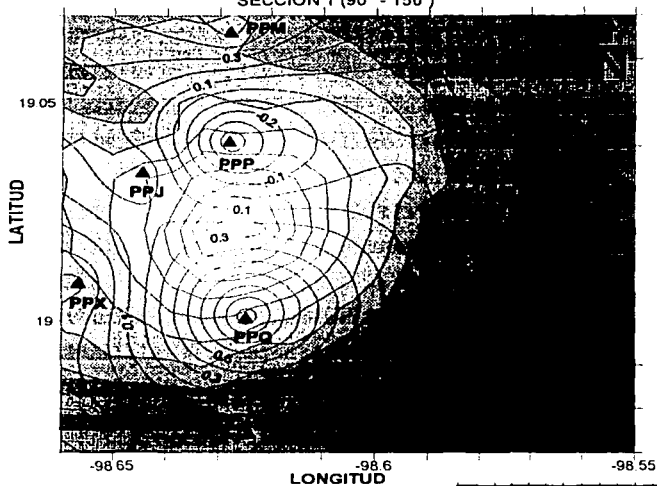


Fig 4.17a. Mapa de contornos de residuales relativos

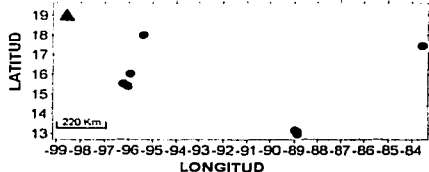


Fig 4.17b. Localización de epicentros con respecto al volcán

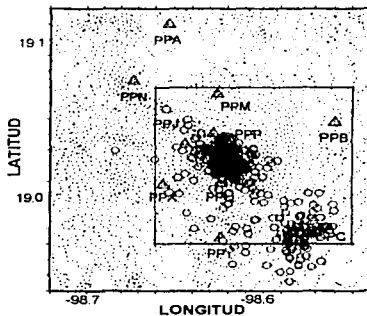


Fig 4.17d. Localización epicentral de eventos ocurridos en el volcán durante la Etapa 14 (Valdés 2003)

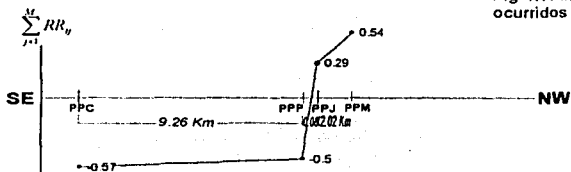


Fig. 4.17c. Perfil con estaciones y residuales

ETAPA 14	
NW	0.54
PPJ	0.29
PPP	-0.50
PPC	-0.57
SE	

Tabla 4.17. Residuales y estaciones del perfil

ETAPA 14 "FASE POST-ERUPTIVA Y DE PEQUEÑAS REPETICIONES DE CONSTRUCCIÓN DEL DOMO"  
 (24 Ene - 31 Dic, 2001)  
 SECCIÓN 2 (150° - 240°)

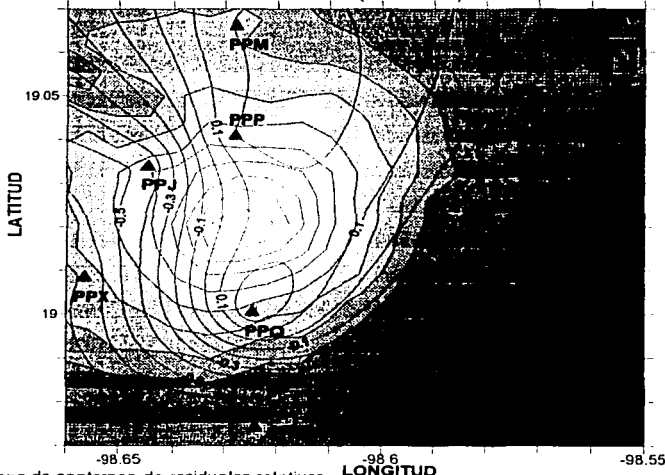


Fig 4.18a. Mapa de contornos de residuales relativos

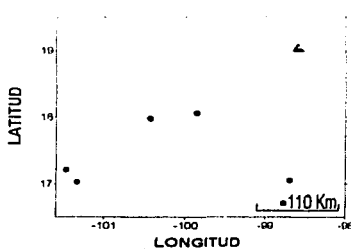


Fig 4.18b. Localización de epicentros con respecto al volcán

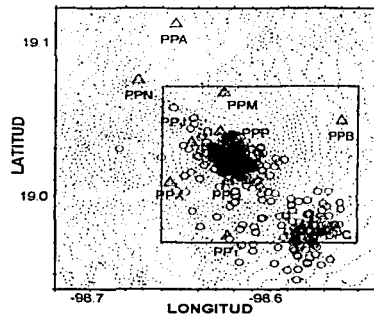


Fig 4.18d. Localización epicentral de eventos ocurridos en el volcán durante la Etapa 14 (Vaidés 2003)

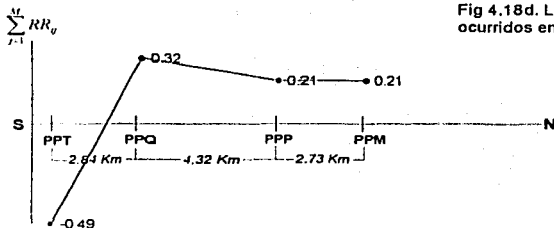


Fig. 4.18c. Perfil con estaciones y residuales

ETAPA 14	
N	0.21
PPN	0.21
PPP	0.21
PPQ	0.32
PPT	-0.49
S	

Tabla 4.18. Residuales y estaciones del perfil

---

**CAPÍTULO 4**  
**RESULTADOS**

---

ANÁLISIS CON  
**FALLA DE ORIGEN**



## 4.1 Análisis de las Gráficas

En la Etapa 5, la cual se caracteriza por acumulación de material y la primera formación del domo, se observa que el perfil (Fig. 4.1c), con dirección SE-NW de la región que involucra eventos sísmicos en un rango con acimut de 90 a 150 grados (Sección 1), los retrasos (residuales positivos) en los tiempos de viaje van aumentando a medida que pasa por las diferentes estaciones comprendidas en el perfil (PPC, PPP y PPM), logrando un retraso total de 1.39 s. En la sección cuyo acimut va de 150 a 240 grados (Sección 2) el perfil (Fig. 4.2c) con dirección S-N presenta un cambio de un residual positivo a uno negativo al pasar de la estación PPP a la estación PPM, lo cual implica que para este perfil y con los sismos provenientes de esta región no se presenta ningún retraso. Es probable que los retrasos que se observan en la región Oeste de la red (Figs. 4.1a y 4.2a) estén relacionados con presencia de material que asciende por los conductos y que se va acumulando en la parte superior del cráter, lo que se conoce como formación del domo. Esto ocasiona que la velocidad sea atenuada al pasar de un medio sólido a uno viscoso muy caliente y podría ser la razón por la cual se presenten residuales positivos sobre y alrededor del cráter. Posiblemente, el empuje del material ascendente genere presión hacia el Este del volcán. Esto implica que, en dicha región, se cierran los poros de la roca que conforma el edificio volcánico, ocasionando que las ondas viajen a través de un medio más homogéneo y que los tiempos de viaje no sufran retraso, generando residuales con valores negativos.

En la Etapa 6, conocida como de actividad cuasi-estática el perfil de la primera sección (Fig. 4.3c) involucra 4 estaciones (PPC, PPP, PPM y PPA). En las tres primeras se presenta un retraso total de 0.95 s. A partir de PPM a PPA se observa que los tiempos de viaje ya no sufren retraso, pues PPA presenta un residual negativo. En la segunda sección, el perfil (Fig. 4.4c) presenta residuales negativos que van en aumento conforme los tiempos de viaje son registrados en las estaciones PPT, PPQ y PPP. Se nota un cambio drástico de la estación PPP a PPM. En esta última el residual es positivo, lo que implica un retraso de forma rápida. Este comportamiento coincide con una etapa cuasi-cíclica que presenta estados de recarga (Valdés, 2003), también conocidos como de preparación e implican ascensión de magma. Sin embargo, dichos estados no llegan a concretarse y terminan generando eventos eruptivos que propician a su vez la salida de material. Los residuales negativos en la zona del cráter, así como al Norte, Sur y Este de la red (Figs. 4.3a y 4.4a)

podrían asociarse a la limpieza de los conductos como consecuencia de las emisiones continuas durante esta etapa. Es posible que los adelantos en los tiempos de viaje que se obtuvieron al SE de la red sean la consecuencia de un incremento de esfuerzos en la zona donde se ha sugerido una falla (De Cserna, 1987). El adelanto en los residuales que se observa en el área comprendida entre las estaciones PPQ y PPP se debe a esfuerzos de empuje generados por el material en ascenso, los cuales ocasionan que el material adyacente se compacte y sea más homogéneo. Sin embargo, no se registran retrasos en los tiempos de viaje para esta zona, posiblemente porque los conductos por donde pasa el magma son pequeños y por ende, no son detectados por el acimut de los eventos seleccionados para el estudio. Si el material ascendente se encontraba en una región más alta de la esperada, cabe la posibilidad de que éste no haya sido registrado. Nuevamente se presenta atenuación en la velocidad cerca de la estación PPM, probablemente a causa de las pequeñas fases de preparación contenidas en la presente etapa, donde los retrasos son la consecuencia del paso de las ondas por fracturas rellenas con material que asciende por los conductos. En las fases de relajación también se presentan retrasos en los tiempos de viaje y es posible que este comportamiento sea a causa de las fracturas que se encuentran rellenas por una mezcla gaseosa con fluido magmático.

En la Etapa 7 (fase de formación del domo) las dos primeras estaciones (PPC y PPP) del perfil correspondiente a la Sección 1 (Fig. 4.5c), presentan residuales negativos, ello indica que no hay retraso en esta área, el cual se hace presente de una forma brusca entre el área delimitada por las estaciones PPP y PPJ. Hacia PPM, el retraso de los tiempos de viaje continúa, pero no es tan grande ni tan rápido como en la región anterior. Durante el último tramo del perfil el comportamiento de los tiempos de viaje vuelve a cambiar, desapareciendo nuevamente algún comportamiento que pueda relacionarse con un retraso, a pesar de que el residual en PPA es positivo, aunque muy pequeño. El perfil de la Sección 2 (Fig. 4.6c) presenta residuales negativos en las tres primeras estaciones (PPT, PPQ y PPP). Sin embargo, la disminución de éstos indica un retraso, el cual se dispara enormemente hasta llegar a la última estación del perfil (PPM) y se obtiene finalmente un residual de hasta 1.68 s. En esta etapa los residuales positivos, que implican retrasos en los tiempos de viaje, están concentrados al N de la red (Figs. 4.5a y 4.6a), en el área comprendida por las estaciones PPM, PPN y PPA. Este comportamiento sugiere movimiento de material caliente reciente que pasa a través de los conductos que alimentan al cráter en la parte Norte y Noroeste del volcán.

Esta región se considera como la más estable y es por esta razón que los cambios en los tiempos de viaje que pasan por dicha zona podrían estar relacionados con la presencia de material y no con fracturas o esfuerzos ocasionados por un reacomodo en la estructura del edificio. Los residuales negativos al SE de la red podrían estar asociados con actividad en la falla. Es posible que los arribos de los tiempos de viaje anticipados a los esperados sean entonces la consecuencia de esfuerzos compresionales en la región y éstos propician la reducción del espacio entre la falla, evitando que los tiempos de viaje sufran retraso al pasar por ésta.

Para el perfil de la Sección 1 (Fig. 4.7c) que corresponde a la Etapa 8, considerada como explosiva y de acumulación de energía, se pudo observar que los residuales negativos en las dos primeras estaciones (PPC y PPP) no presentan retraso alguno. Este comportamiento cambia para las estaciones siguientes, (PPP, PPJ y PPM) presentándose incluso residuales positivos, para luego regresar al comportamiento anterior en la región comprendida entre las estaciones PPM y PPA. En la Sección 2 el perfil (Fig. 4.8c) presenta residuales negativos en las 3 primeras estaciones (de un total de 4). Para el área comprendida entre PPT y PPQ (Figs. 4.7a y 4.8a) hay un ligero retraso en los tiempos de viaje, mientras que en el tramo de PPQ a PPP sucede lo contrario y vuelve a presentarse un retraso en el tramo siguiente (PPP a PPM), donde se observa un residual positivo. La presencia de residuales negativos podría sugerir que se trata de una etapa donde los continuos eventos explosivos durante esta fase traen como consecuencia la limpieza de los conductos. La ausencia de material caliente permite que los retrasos en esta área no sean considerables. Es probable que la existencia de éstos se deba al fluido intersticial o al magma que queda atrapado en pequeñas fracturas. Los residuales negativos en la región comprendida entre PPQ y PPM se debe al empuje de gas o material expulsado durante los eventos eruptivos que tuvieron lugar a lo largo de esta etapa y que genera esfuerzos compresivos en la región cercana al cráter.

No fue posible realizar el análisis de la Etapa 9 (Fase muy eruptiva) por la escasez de eventos durante la misma.

En la Etapa 10, puede observarse que en el perfil de la Sección 1 (Fig. 4.9c) no hay retrasos en ninguna de las 3 estaciones que conforman el perfil

(PPC, PPP y PPJ) y la ganancia en tiempo total es de 0.22 s. En el perfil correspondiente a la Sección 2 (Fig.4.10c), los residuales son negativos. En el área comprendida entre las estaciones PPT y PPQ no se observa retraso en los tiempos de viaje. Sin embargo, para el área de PPQ y PPP sí lo hay, aunque no es lo suficientemente grande para presentar residuales positivos. La etapa 10 se considera como una fase post-eruptiva y de relajación, la cual se relaciona con una distribución del estado de esfuerzos bajo el volcán. En ambas secciones (Figs. 4.9a y 4.10a) los residuales negativos sugieren cambios de esfuerzos a lo largo de los conductos o fracturas. Posiblemente el material se reacomoda y en algunos casos se compacta, lo que ocasiona que los espacios entre los poros y las fracturas se reduzcan y eviten retrasos en los tiempos de viaje.

Las dos primeras estaciones del perfil de la Sección 1 (Fig. 4.11c) para la Etapa 11 (Fase de recarga fallida) presentan un aumento en los residuales negativos (PPC y PPP). De la estación PPP a la estación PPJ se observa un cambio abrupto de un residual negativo a uno positivo, que denota la existencia de un retraso considerable para una distancia muy corta. El perfil de la Sección 2 (Fig. 4.12c) indica un ligero retraso en los tiempos de viaje de la estación PPT a la estación PPQ, pero se modifica el comportamiento a partir de esta última hasta PPP, debido a que el valor del residual de PPP es mayor que el anterior. Los adelantos en los tiempos de viaje (residuales negativos) al Norte y Este de la red (Figs. 4.11a y 4.12a) sugieren una etapa de preparación, donde magma y gases son empujados continuamente hacia la superficie generando esfuerzos compresionales en la estructura. Esto ocasionaría que el material se compactara alrededor, cerrándose los poros y fracturas en las rocas y creando un medio homogéneo donde los tiempos de viaje de las ondas que pasan por éste no sufran retrasos. Es probable también, que material caliente proveniente de la cámara magmática sea el causante de los retrasos en los residuales al sur del cráter.

Para la Etapa 12, que es una etapa de recarga, el perfil de la Sección 1 (Fig. 4.13c) fue elaborado con 4 estaciones (PPC, PPP, PPJ y PPM). En el primer tramo (de PPC a PPP) los tiempos de viaje sufren un retraso, el cual se recupera de forma rápida de PPP a PPJ, y se pierde nuevamente de PPJ a PPM casi tan rápido como se recupera. En esta etapa el perfil de la Sección 2 (Fig. 4.14c) presenta un comportamiento diferente a los observados en las etapas anteriores, ya que en esta Sección los residuales de las tres estaciones

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

involucradas son positivos. De PPT a PPQ el retraso total se considera importante por tener una variación de 0.75 s, mientras que, de PPQ a PPP se observa una recuperación en los tiempos de viaje, pero la variación total no es tan significativa como en el tramo anterior. Los retrasos de los tiempos de viaje (residuales positivos) al Norte de la red y al Sur del cráter del volcán (Figs. 4.13a y 4.14a) podrían explicar el comportamiento de una fase de recarga, la cual implica movimiento de material por los conductos. Se presenta además una concentración de esfuerzos de tipo compresional a lo largo de fracturas localizadas al Noreste de la red (Valdés, 2003) y es posible que dichos eventos sugieran inyección de magma hacia la superficie. Los efectos de material caliente al Sur y Sureste del edificio son evidentes en esta etapa con la presencia de residuales positivos en el área.

En la Etapa 13, clasificada como de rápido crecimiento del domo y fase eruptiva intensa, el perfil correspondiente a la Sección 1 (Fig. 4.15c) presenta un retraso total de 0.49 s iniciando en PPC con un residual negativo que cambia a positivo en las siguientes estaciones como consecuencia de la atenuación. En las últimas estaciones (de PPJ a PPM) se observa lo contrario. Sin embargo, la diferencia es de apenas 0.01 s. La Sección 2 presenta un perfil (Fig. 4.16c) con retraso entre los tramos que van de PPT a PPQ y de PPP a PPM (en la parte media del perfil, de PPQ a PPP, se recuperan los tiempos ligeramente). La producción de material y su rápido ascenso por los conductos implican un crecimiento rápido del domo. Nuevamente los residuales de los eventos seleccionados para esta etapa presentan retraso hacia el Norte de la red (Figs. 4.15a y 4.16a), aún cuando los valores de dichos residuales son negativos en la gráfica de contornos de la Sección 2. Cerca de la estación PPC se observan residuales cuyos valores negativos (en ambas secciones) podrían indicar la presencia de esfuerzos compresivos, los cuales se originan por la presión de la roca al sureste de la red y este comportamiento trae como consecuencia que el magma sea empujado hacia la superficie. Los mapas de contornos de residuales referentes a las Secciones 1 y 2 no muestran resultados en otras áreas de la red que puedan asociarse al comportamiento de la estructura con respecto a la actividad característica de esta etapa. Sin embargo, tiene sentido asumir para esta fase que el material reciente se encuentra muy cerca de la superficie y contribuye a la creación del domo. Por lo tanto, las trayectorias de los rayos no pasan por él.

Finalmente, para la Etapa 14 (Fase post-eruptiva y de pequeñas repeticiones de construcción del domo), en la Sección 1 se presentan retrasos durante todo el perfil (Fig. 4.17c). De esta forma, los residuales pasan de negativos (En PPC y PPP) a positivos (PPJ y PPM), logrando un retraso total de 0.66 s. En la Sección 2, el retraso en los tiempos de viaje sucede únicamente al inicio del perfil (Fig. 4.18c), es decir, en el tramo comprendido entre las estaciones PPT y PPQ. A partir de ésta, los tiempos se recuperan hasta 0.11 s. Se observa además que en la región comprendida entre las estaciones PPP y PPM no hay ningún cambio.

La Etapa 14 coincide con la destrucción del domo remanente de la etapa anterior. Posiblemente, los retrasos que se observan sobre el cráter y hacia el Sur del mismo (Figs. 4.17a y 4.18a) son a causa del material que está siendo expulsado durante el periodo inicial de esta Fase. No se cuenta con mucha información que permitiese un análisis a detalle del desarrollo completo de esta etapa, ya que los eventos estudiados corresponden exclusivamente al comienzo de la misma. Sin embargo, el comportamiento de los residuales, debido a la brevedad de tiempo que cubre el estudio de esta fase, permite suponer que el retraso presente hacia el Sureste del edificio volcánico se debe principalmente a la presencia de material viscoso caliente.

Una parte de las variaciones en los residuales de los tiempos de viaje obtenidos de los diferentes eventos sísmicos seleccionados para realizar el presente estudio en los perfiles de las Secciones 1 y 2 de cada una de las etapas de actividad del volcán, podría estar relacionada con la presencia o ausencia de material ya sea en los conductos o en zonas con espacios reducidos (poros o fracturas), con los cambios que sufre su estructura interna como consecuencia de estos procesos e inclusive, con los efectos, hacia la región Sur de la red, que podrían estar relacionados con acumulación de material caliente en la zona. Lo cual es visible al observar las gráficas del capítulo 3, donde los residuales presentan diferentes comportamientos durante las etapas de actividad que coinciden con eventos registrados en estudios anteriores sobre el volcán (Valdés, 2003).

Los mapas de contornos de las gráficas principales, con acimut que va de los 90 a los 150 grados y que fueron obtenidas por la interpolación de los residuales, mantienen un patrón constante durante las diferentes etapas de actividad volcánica hacia el sureste de la red que se manifiesta en forma de curvas cuya deformación principal tiene una orientación SE - NW y que pone

en evidencia la presencia de una falla ubicada en esta zona (De Cserna, 1987). Con respecto al comportamiento de los tiempos de viaje en la región suroeste del cráter, se observa que éstos sufren retrasos en etapas clasificadas como de recarga, de preparación para eventos eruptivos e inclusive, de movimiento de material. De igual forma, se obtuvieron residuales negativos para etapas que cumplen con características similares (fases de recarga). Esta ambigüedad en los resultados demuestra que la región SE del edificio volcánico es una zona muy inestable por estar sujeta a esfuerzos procedentes del volcán o por actividad tectónica externa que la modifican constantemente.

La zona NW del volcán es una zona más estable (la región Sur y Sureste presentan fallas (De Cserna, 1987) que son las causantes de reajustes continuos en el edificio volcánico). Por ello, se podría considerar como una zona susceptible a cambios en los valores de los residuales durante las etapas de actividad, los cuales podrían estar relacionados principalmente con el paso del material y gases a través de los conductos, ya sea por saturación o por limpieza de éstos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

---

**CAPÍTULO 5**  
**CONCLUSIONES**

---

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Por medio del análisis de residuales de tiempos de viaje calculados a partir de sismos regionales procedentes principalmente de las costas de Guerrero y Oaxaca y de telesismos con origen en las costas de Centroamérica, como El Salvador y Guatemala, fue posible diferenciar los procesos que se llevan a cabo en el interior del volcán durante los periodos de actividad que han sido registrados y ampliamente documentados por la Red de Monitoreo Volcánico a partir de 1996.

En el presente trabajo fue posible interpretar cambios que ocurren en el edificio volcánico durante cada fase de acuerdo al tipo de actividad observada al realizar una comparación con los valores de los residuales para cada etapa. De esta forma, se encontró que los cambios en la estructura interna del volcán Popocatepetl durante la etapa 8 se deben posiblemente a esfuerzos compresivos como consecuencia de la limpieza de los conductos, ya que esta etapa corresponde a una fase explosiva y de acumulación de energía. El gran contraste en los residuales negativos con residuales positivos de la etapa 5 se debe a la formación del domo durante esta fase. La etapa 6 se considera cuasi-cíclica por sus estados de recarga fallidos, que se ven reflejados en los cambios drásticos que sufren los residuales negativos. No todos los cambios en los residuales se relacionan con presencia de material. La Etapa 10 es un ejemplo de ello, ya que los valores de los residuales están relacionados con una distribución del estado de esfuerzos bajo el volcán, que implica un reacondo en la estructura, principalmente en la región más inestable. Del mismo modo, la gran diferencia de residuales, durante las etapas 11 (Fase de recarga fallida) y 12 (fase de recarga), se debe al movimiento continuo de gases y material (para la primera) y al ascenso y acumulación de magma por los conductos (para la segunda), como una forma de preparación para la fase eruptiva intensa (etapa 13) que tuvo lugar en diciembre de 2000 (Arámbula, 2002).

La respuesta de la estructura volcánica a estos y otros procesos se presenta claramente al sureste del edificio, donde los cambios en los residuales y las curvas obtenidas por la interpolación de los mismos muestran un comportamiento similar que pone en evidencia la presencia de una falla con dirección SE-NW. Este comportamiento puede observarse en las etapas 5, 6, 7, 13 y 14. Los procesos que se llevan a cabo en el volcán durante las otras etapas, como el enjambre de eventos volcano-tectónicos ocurrido en esta zona

durante la etapa 8 (Valdés, 2003), proporcionan información suficiente para corroborar la afirmación anterior.

Es posible que en las gráficas de las etapas restantes sea más difícil la visualización de la falla. Sin embargo, los retrasos que se encuentran presentes en las etapas 8, 10, 11 y 12 hacia el Sur y Sureste del edificio volcánico, nos hacen pensar que estos cambios no son exclusivos de la falla mencionada anteriormente y bien podría ser efecto de la presencia de material caliente viscoso que ocasiona variaciones en la velocidad de viaje de los mismos.

La tomografía Sísmica ha demostrado, una vez más, ser un método muy accesible que nos permite conocer con cierto detalle las características internas de un volcán, un campo geotérmico, una perforación o cualquier estructura a mayor profundidad, siempre y cuando se cuente con los medios para hacerlo. En el caso del volcán Popocatepetl, aún cuando se realizó únicamente el procedimiento inicial de tomografía, es decir, la obtención de residuales de tiempos de viaje, se observó con cada etapa que es de gran utilidad al ser considerada como una herramienta predictiva a largo plazo del estado y estructura del volcán, ya que variaciones importantes en los residuales durante cada una de las etapas de actividad son indicios de cambios internos en su estructura o de movimiento de material que deben tomarse en cuenta, como auxiliares, para definir si el edificio volcánico continua siendo estable pese a la actividad que es detectada con las técnicas que conforman el monitoreo volcánico. Esto nos permite tener una idea de la respuesta de la estructura a los diferentes eventos que tienen lugar en el volcán durante etapas que podrían considerarse como representativas de periodos de relajación o de recarga.

El número de estaciones disponible para el estudio fue suficiente para llevar a cabo este análisis con los residuales de tiempos de viaje y mostrar que se puede obtener información de los procesos ocurridos en el interior de la estructura volcánica a pesar de que este periodo no es representativo de los niveles máximos de actividad que podría alcanzar el Popocatepetl, pues el edificio permanece estable a pesar de los cambios que sufre en etapas que podrían considerarse de alto riesgo al comparar los valores de los residuales con la actividad presente en las fases 8, 10, 12 y 13. Sin embargo, la cantidad de estaciones no fue óptima para realizar un estudio más detallado, ya que la

cobertura del volcán es deficiente si se desea obtener una parametrización realista y confiable del volumen a estudiar.

Por esta razón, se propone realizar, a futuro, una tomografía sísmica más completa en el volcán, que consiste en una inversión de los tiempos de viaje utilizando métodos especiales de resolución de matrices con un modelo de n-capas según el método utilizado (ACH, Montecarlo, u otros) que permita obtener las variaciones de las velocidades con respecto a una malla compuesta por celdas (si el estudio se realiza en 2D) o bloques (para estudios de tipo 3D). Por medio de este estudio sería posible conocer las variaciones laterales y verticales de la velocidad de la onda sísmica durante su viaje por el interior del volcán, así como los límites, las dimensiones e inclusive, la evolución de la cámara magmática durante etapas futuras de actividad. La meta es conocer las perturbaciones (en forma de arribos con retraso o adelanto) que sufre la velocidad sísmica al pasar por el edificio volcánico a partir de una cantidad suficiente de tiempos de viaje obtenidos por una red con un mayor número de estaciones sobre y alrededor del volcán, para obtener información procedente de eventos sísmicos regionales y lejanos donde sea posible observar claros indicios de procesos internos que den origen a futuras etapas eruptivas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

---

APÉNDICE A

TIEMPOS DE VIAJE DE HERRIN

---

FALLA DE ORIGEN

# A. TIEMPOS DE VIAJE DE HERRIN

## NEAR EARTHQUAKE PHASES, FOCAL DEPTH AT 60 KILOMETERS

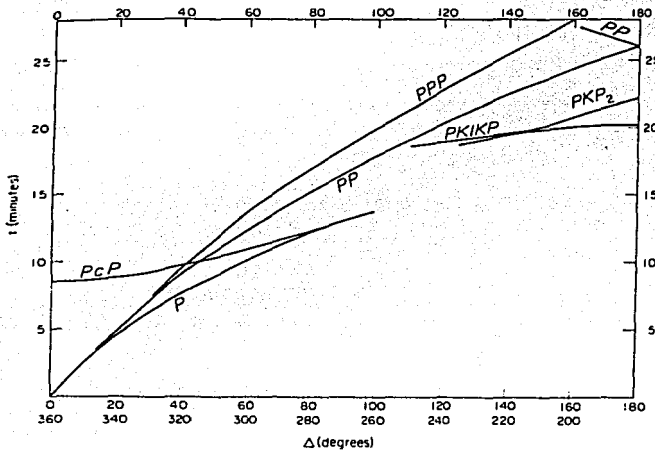
Δ°	P*		Pn	
	M	S	M	S
0.0	0	6.20		
0.1	0	6.44		
0.2	0	7.09		
0.3	0	8.06		
0.4	0	9.24		
0.5	0	10.57	0	10.97
0.6	0	11.98	0	11.94
0.7	0	13.46	0	13.32
0.8	0	14.98	0	14.69
0.9	0	16.53	0	16.06
1.0	0	18.10	0	17.43
1.1	0	19.68	0	18.81
1.2	0	21.27	0	20.18
1.3	0	22.87	0	21.55
1.4	0	24.48	0	22.92
1.5	0	26.09	0	24.30
1.6	0	27.71	0	25.67
1.7	0	29.33	0	27.04
1.8	0	30.95	0	28.41
1.9	0	32.58	0	29.79
2.0	0	34.20	0	31.16
2.1	0	35.83	0	32.53
2.2	0	37.46	0	33.90
2.3	0	39.09	0	35.27
2.4	0	40.72	0	36.64
2.5	0	42.35	0	38.01
2.6	0	43.98	0	39.38
2.7	0	45.61	0	40.76
2.8	0	47.25	0	42.13
2.9	0	48.88	0	43.50
3.0	0	50.51	0	44.87
3.1	0	52.15	0	46.24
3.2	0	53.78	0	47.61
3.3	0	55.42	0	48.98
3.4	0	57.05	0	50.35
3.5	0	58.69	0	51.72
3.6	1	0.32	0	53.09
3.7	1	1.96	0	54.46
3.8	1	3.60	0	55.83
3.9	1	5.23	0	57.20
4.0	1	6.87	0	58.57
4.1	1	8.51	0	59.94
4.2	1	10.14	1	1.31
4.3	1	11.78	1	2.68
4.4	1	13.42	1	4.05
4.5	1	15.05	1	5.42
4.6	1	16.69	1	6.79
4.7	1	18.33	1	8.16
4.8	1	19.96	1	9.53
4.9	1	21.60	1	10.90
5.0	1	23.24	1	12.26
5.1	1	24.88	1	13.63
5.2	1	26.51	1	15.00
5.3	1	28.15	1	16.37
5.4	1	29.79	1	17.74
5.5	1	31.43	1	19.10

Δ°	Pn	
	M	S
5.6	1	20.47
5.7	1	21.84
5.8	1	23.20
5.9	1	24.57
6.0	1	25.94
6.1	1	27.30
6.2	1	28.67
6.3	1	30.04
6.4	1	31.40
6.5	1	32.77
6.6	1	34.13
6.7	1	35.50
6.8	1	36.86
6.9	1	38.23
7.0	1	39.59
7.1	1	40.96
7.2	1	42.32
7.3	1	43.68
7.4	1	45.05
7.5	1	46.41
7.6	1	47.77
7.7	1	49.14
7.8	1	50.50
7.9	1	51.86
8.0	1	53.22
8.1	1	54.59
8.2	1	55.95
8.3	1	57.31
8.4	1	58.67
8.5	2	0.03
8.6	2	1.39
8.7	2	2.75
8.8	2	4.11
8.9	2	5.47
9.0	2	6.83
9.1	2	8.19
9.2	2	9.55
9.3	2	10.91
9.4	2	12.27
9.5	2	13.62
9.6	2	14.98
9.7	2	16.34
9.8	2	17.70
9.9	2	19.05
10.0	2	20.41
10.1	2	21.76
10.2	2	23.12
10.3	2	24.48
10.4	2	25.83
10.5	2	27.19
10.6	2	28.54
10.7	2	29.90
10.8	2	31.25
10.9	2	32.60
11.0	2	33.96

Extracto de las tablas de tiempos de viaje de Herrin (1968). Sismos con profundidad intermedia

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## A. TIEMPOS DE VIAJE DE HERRIN



Curvas de Tiempos de viaje de las Tablas Sismológicas de Herrin (2968)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

---

**APÉNDICE B**  
**ACTIVIDAD HISTÓRICA DEL**  
**POPOCATÉPETL**

---

**TESIS CON**  
**FALLA DE ORIGEN**

B. ACTIVIDAD HISTÓRICA DEL POPOCATÉPETL

HISTORIA ERUPTIVA DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL	
FECHA	TIPO DE ERUPCIÓN, EFECTOS Y DAÑOS
23000	Gran Erupción tipo Santa Helena destruye el edificio volcánico previo.
14000	Gran erupción pliniana produce lluvias de cenizas y pómez sobre el valle de México.
14000-5000	Ocurren varias erupciones menores y al menos cuatro grandes erupciones.
3114 A.C.	Erupción pliniana con emisión de nubes ardientes tipo San Vicente, formación de depósitos de piroclásticos hacia el sector norte, posibles derrames de lava poco fluida y generación de amplios lahares.
2999 A.C.	Erupción pliniana con emisión de nubes ardientes tipo San Vicente, formación de amplios depósitos de piroclásticos y posibles derrames de lava poco fluida.
800-215 A.C.	Erupción pliniana, formación de amplios depósitos de piroclásticos hacia el sector oriental, posibles derrames de lava poco fluida y generación de lahares.
751 D.C.	Erupción pliniana con emisión de nubes ardientes tipo San Vicente.
790 ± 175 D.C.	Erupción pliniana, formación de amplios depósitos de piroclásticos hacia el sector noreste, posibles derrames de lava poco fluida y generación de lahares.
1008	Explosiones muy violentas que dieron lugar a la formación de amplios depósitos de pómez.
1045	Erupción explosiva con emisión de gases. Cenizas y pómez.
1100	Erupción explosiva con emisión de gases. Cenizas y pómez.
1345-1347	Gran actividad explosiva acompañada de abundantes fumarolas, lluvia de ceniza y de material de pómez. Se ignora si hubo daños.
1354	Actividad explosiva acompañada de lluvia de ceniza y de material pómez. Se ignora si hubo daños.
1363	Actividad explosiva acompañada de lluvia de ceniza y de material pómez. Se ignora si hubo daños.
1440-1469	Actividad explosiva acompañada de lluvia de ceniza y de material pómez. Se ignora si hubo daños.
1488	Actividad consistente en emisión de gases y cenizas principalmente.
1504	Actividad consistente en emisión de gases y cenizas principalmente.
1512	Actividad consistente en emisión de gases y cenizas principalmente.
1518-1519	Actividad persistente con emisiones de pómez, lapilli y ceniza, además de grandes emisiones fumarólicas. Se ignora si hubo daños.
1523	Actividad consistente en emisión de gases y cenizas principalmente.
1528	Actividad persistente con emisiones de pómez, lapilli y ceniza, además de grandes emisiones fumarólicas. Se ignora si hubo daños.
1530	Actividad persistente con emisiones de pómez, lapilli y ceniza, además de grandes emisiones fumarólicas. Se ignora si hubo daños.
1539-1540	Gran erupción explosiva con abundante lluvia de ceniza. Posibles víctimas y destrucción de tierras cultivables.
1542	Numerosos episodios durante este periodo. Se ignora si hubo daños.
1548	Actividad explosiva acompañada de emisión de lava, ceniza y gases. Se



B. ACTIVIDAD HISTÓRICA DEL POPOCATÉPETL

1571	ignora si hubo daños. Actividad persistente con grandes emisiones de gases y cenizas. Se ignora si hubo daños.
1580	Actividad persistente con grandes emisiones de gases y cenizas. Se ignora si hubo daños.
1590	Actividad persistente con grandes emisiones de gases y cenizas. Se ignora si hubo daños.
1592-1594	Actividad persistente con grandes emisiones de gases y cenizas. Se ignora si hubo daños.
1642	Actividad persistente con grandes emisiones de gases y cenizas. Se ignora si hubo daños.
1663-1664	Actividad consistente en emisión de gases y cenizas durante este periodo principalmente.
1665	Actividad persistente con grandes emisiones de gases y cenizas. Se ignora si hubo daños.
1666-1667	Actividad consistente en emisión de gases y cenizas durante este periodo principalmente.
1697	Actividad consistente en emisión de gases y cenizas principalmente.
1720	Erupción explosiva con abundante lluvia de cenizas, fumarolas y caída de pómez. Posibles víctimas y destrucción de tierra cultivable.
1802-1804	Actividad menor consistente principalmente de emisiones fumarólicas y de cenizas.
1827-1834	Actividad menor consistente principalmente de emisiones fumarólicas y de cenizas.
1852	Actividad menor consistente principalmente de emisiones fumarólicas y de cenizas.
Feb 9, 1919-1927	Actividad menor consistente en emisión de gases, escorias y cenizas. La actividad sísmica mostrada fue alta y hubo 15 víctimas en el interior del cráter al realizar trabajos de explotación de azufre en febrero de 1919. Hubo otra con dos heridos más al ocurrir una pequeña explosión al encontrarse una expedición en el borde del cráter el 25 de marzo de 1921.
Mar 12, 1993-1998	Aumento considerable de la actividad fumarólica y sísmica, que culmina con una crisis a las 01:31 hrs (tiempo local) del 21 de diciembre de 1994, al ocurrir cuatro explosiones seguidas por una emisión de cantidades moderadas de ceniza no juvenil y de considerables volúmenes de gases volcánicos. En esta ocasión, fue necesaria la evacuación de 20,000 personas en el estado de Puebla, además de establecerse la alerta amarilla a partir de esta fecha para los estados influenciados por el volcán: México, Morelos y Puebla. El 4 de Marzo de 1996, ocurrió otra crisis sísmica, que provocó la salida de más gases y cenizas, lo que fue en aumento hasta generar la salida de un domo escoriáceo en la parte interna del cráter a partir del 25 de marzo de 1996. El crecimiento de éste y el entrapamiento de gases aunado a la sísmicidad, provocó una pequeña explosión el 30 de abril de 1996 en la parte alta del mismo, generando una onda de choque y emisión de material escoriáceo de alta temperatura, gases y ceniza, los

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## B. ACTIVIDAD HISTÓRICA DEL POPOCATÉPETL

	<p>cuales viajaron al NE, detectándose material de hasta 3 cm de diámetro en la estación sísmica de Bonsai (PPB); de 0.5 cm en Santiago Xalitzintla, San Nicolás de los Ranchos y San Pedro Yancuictlalpan; de 3mm en San Andrés Calpan; y ceniza fina en las ciudades de Tlaxcala y Apizaco. Este último episodio, ocasionó la muerte de 5 alpinistas cerca del labio inferior del cráter. El domo continúa creciendo lenta pero paulatinamente y las explosiones han seguido ocurriendo con la consecuente expulsión de fragmentos de material de alta temperatura. Otra explosión de mayor intensidad fue la del 30 de junio de 1997, que expulsó material rocoso del domo cratérico, además de gases y cenizas que ascendieron unos 6 km por encima del cráter, produciendo una fina lluvia de ceniza en la ciudad de México. En esta ocasión se generaron dos pequeños flujos de lodo: uno al NE que llegó a Santiago Xalitzintla y otro hacia el NW en el Edo de México que avanzó sólo unos 3 km en la zona de arenales. Adicionalmente se han dado otras explosiones el 24 de diciembre de 1997, el 1 de enero, 21 de marzo, 21 y 27 de abril de 1998 con la consecuente emisión de material rocoso de alta temperatura, gases y cenizas.</p> <p>La explosión de 1998 dio lugar a la formación de un pequeño cono dentro del domo, de unos 250 m de diámetro por 60, de profundidad, además de generar una onda de choque que fue sentida en un radio de unos 15 km en la periferia del volcán.</p>
1999	<p>Explosiones moderadas. Caída de material incandescente en los flancos del volcán.</p>
Dic 2000	<p>Exhalaciones con ceniza, incandescencia en el cráter y salida de fragmentos calientes. El 18 y 19 de diciembre ocurren 3 etapas eruptivas con duración aproximada de media hora cada una, las cuales indican la etapa de destrucción de un domo de aproximadamente 19x16 m<sup>3</sup>, formado días antes. Días después ocurren explosiones asociadas a la destrucción del domo.</p>
2001	<p>El 21 de enero se produce una de las explosiones más grandes registradas hasta la fecha, produciendo una columna de ceniza de 10 km sobre el cráter y flujos piroclásticos que descendieron por 3 flancos del volcán.</p>

Actividad histórica del Popocatepetl (Modificado de De la Cruz y Ramos, 1995 y <http://www.cenapred.unam.mx/mvolcan.html>)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

---

APÉNDICE C

MÉTODO KRIGING DE

INTERPOLACIÓN

---

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## MÉTODO KRIGING DE INTERPOLACIÓN

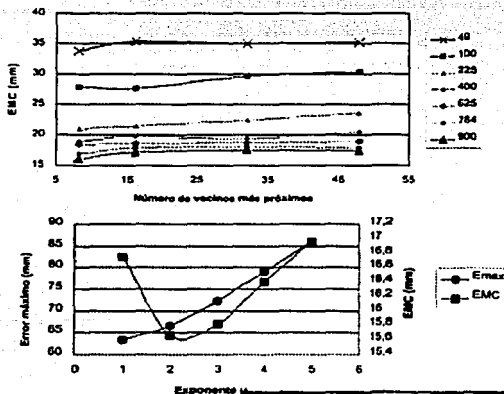
Kriging es un método que recibe el nombre de un minero sudafricano, D.G. Krige, que desarrolló la técnica en un intento de predecir reservas de mineral con gran precisión.

Kriging es un método de interpolación exacto y local que pondera el peso de cada punto muestral  $X_i$  en el valor interpolado en un punto no muestral  $X_0$  según una función estocástica de la distancia entre dichos puntos. Su fundamento conceptual deriva de la teoría de las variables regionalizadas, tratándose, en esencia, de un método geoestadístico consistente en la búsqueda de unos interpoladores óptimos que producen unos residuos insesgados y con mínima varianza (Carvajal et al., 1999).

La teoría de las variables regionalizadas asume que la variación espacial de una variable  $Z$ , por ejemplo la cota de un terreno, puede ser expresada como la suma de tres componentes (Burrough y McDonnell, 1998):

$$Z(x) = m(x) + \varepsilon'(x) + \varepsilon''$$

Donde  $m(x)$  representa la componente determinística que define la tendencia general de  $Z$ ,  $\varepsilon'(x)$  denota la componente estocástica, conocida como la variación de la variable regionalizada, y, por último,  $\varepsilon''$  engloba la componente residual o de error.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## C. MÉTODO KRIGING DE INTERPOLACIÓN

---

El método Kriging presenta una ventaja sustancial con respecto a otros interpoladores, pues permite, una vez seleccionado el semivariograma que mejor explica la variabilidad espacial de la cota del terreno  $Z$ , seleccionar el tipo de malla de muestreo y el número de puntos muestrales mínimo para obtener un error predeterminado en la estimación de la cota de cualquier otro punto de la superficie a interpolar.

Las rutinas Kriging implementadas están basadas en el código UNCERT desarrollado en la Escuela de Minas de Colorado. Este código se basa en las rutinas de la GSLIB (Geostatistical Software Library) publicadas por Deutsch y Journel (1992).

---

APÉNDICE D  
GLOSARIO

---

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- **Conducto.** Senda en forma de tubo para el transporte de magma que evoluciona por canales preferentes.
- **Domo.** Acumulación redondeada y empinada de lava que sobresale de un volcán, sobre y alrededor de la salida.
- **Erupción Pliniana.** Erupción violenta y explosiva que arroja grandes volúmenes de téfra, con columnas de hasta 45 Km de altura.
- **Estación Sísmica.** Conjunto de instrumentos, incluyendo un sismómetro (enterrado), cables, baterías, amplificadores, radios y antenas ubicados en un entorno cerrado.
- **Estratovolcán.** Volcán de forma cónica formado por capas alternas de flujos de lava y rocas piroclásticas
- **LP.** Sismos de periodo largo. Eventos con bajas frecuencias. Se piensa que su origen se debe al flujo de gases presurizados a lo largo de fracturas, lo cual genera una resonancia en éstas.
- **Magma.** Mezcla compleja compuesta por roca fundida con o sin sólidos cristalinos suspendidos y gases disueltos (volátiles).
- **Pluma.** Mezcla de partículas volcánicas, gases y aire producidas principalmente por erupciones explosivas.
- **PPA.** Estación Altzomoni
- **PPB.** Estación Bonsai
- **PPC.** Estación Colibrí
- **PPJ.** Estación Juncos
- **PPM.** Estación Tlamacas
- **PPN.** Estación Lomo del Negro
- **PPP.** Estación Canario

- **PPQ.** Estación Los Cuervos
- **PPT.** Estación Tetexcaloc
- **PPX.** Estación Chipiquixtle
- **Red Sísmica.** Conjunto de estaciones sísmicas colocadas en una región con el objeto de detectar y localizar sismos.
- **Tremor Volcánico.** Señal continua de la vibración del terreno en volcanes activos con una duración de minutos a días o más y frecuencias dominantes de 1-5 Hz. Se interpreta como el paso o ascenso de soluciones (roca líquida, gases, vapor de agua, etc.) en el interior del edificio volcánico.
- **VT. Volcano-tectónico.** Sismos generados en el interior de un volcán como consecuencia de fracturamiento y fallamiento de la roca debido a esfuerzos inducidos por procesos volcánicos

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA



---

## REFERENCIAS

---

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- Achauer U, Evans JR, Stauber DA (1988) "High-Resolution Seismic Tomography of Compressional Wave Velocity Structure at Newberry Volcano, Oregon Cascade Range", *J Geophys Res*, 93: 10135-10147.
- Achauer U, Greene L, Evans JR, Iyer HM (1986) "Nature of the Magma Chamber Underlying the Mono Craters Area, Eastern California, as Determined From Teleseismic Travel Time Residuals", *J Geophys Res*, 91: 13873-13891.
- Aki K (1993) "Overview", *Seismic Tomography: Theory and Practice*, Edited by HM Iyer and K Hirahara, Chapman & Hall, London, 1-8
- Aloisi M, Cocina O, Neri G, Orecchio B, Privitera E (2002) "Seismic Tomography of the Crust Underneath the Etna Volcano, Sicily", *Phys Earth Planet Int*, 134: 139-155.
- 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, pp.127
- Banks NG, Tilling RI, Harlow DH, Ewert JW (1993), "Vigilancia Volcánica y Pronósticos a Corto Plazo", *Apuntes Para un Curso Breve Sobre Los Peligros Volcánicos, 2 y 3 Julio 1989*, Santa Fé, Nuevo México, E.U.A, editado por RI Tilling , WOVO, 51-82.
- Berryman JG (1990) "Lecture Notes on Nonlinear Inversion and Tomography", Presented at Earth Resources Laboratory, MIT, July 9-30. ([http://sepwww.stanford.edu/sep/berryman/lecture\\_notes.html](http://sepwww.stanford.edu/sep/berryman/lecture_notes.html)).
- Bolt BA (1980) "Eartquakes: A primer", WH Freeman & Co, San Francisco.
- Catchings RD, Mooney WD (1988) "Crustal Structure of East Central Oregon: Relation Between Newberry Volcano and Regional Crustal Structure", *J Geophys Res* 93: 10081-10094.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres.  
<http://www.cenapred.unam.mx>

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- Computed Axial Tomography (CAT) Scans  
*<http://www.colorado.edu/physics/2000/tomography/>*
- De Cserna Z (1987) "Estructura Geológica, Gravimetría, Sismicidad y Relaciones Neotectónicas Regionales de la Cuenca de México", *Boletín* No. 104 Instituto de Geología, UNAM, México D.F.
- De Gori P, Cimini GB, Chiarabba C, De Natale G, Troise C, Deschamps A (2001) "Teleismic Tomography of the Campanian Volcanic Area and Surrounding Apenninic Belt", *J Volc Geotherm Res*, 109: 55-75.
- De la Cruz-Reyna, Ramos E (1998) "Vulcanismo en México", *Volcanes: Fascículo 4*, editado por CENAPRED, México, 8-16.
- Doyle H (1995) "Seismology", John Wiley & Sons, England.
- Falsaperla S, Privitera E, Chouet B, Dawson P (2002) "Analysis of Long-Period Events Recorded at Mount Etna (Italy) in 1992, and Their Relationship to Eruptive Activity", *J Volc Geotherm Res* 114: 419-440.
- Fawcett JA, Clayton RW (1984) "Tomographic Reconstruction of Velocity Anomalies", *Bull Seis Soc Am*, 74: 2201-2219.
- Foley JE, Toksoz MN, Batini F (1992) "Three-Dimensional Inversion of Teleseismic Travel Time Residuals for Crust and Upper Mantle Velocity Structure in the Larderello Geothermal Field, Italy", *Volcanic Seismology*, edited by P Gasparini, R Scarpa, K Aki, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 359-389.
- Gubbins D (1990) "Seismology and Plate Tectonics", Cambridge University Press, Great Britain.
- Herrin E (1968) "Seismological tables of P-phases" *Bull Seism Soc Am* 58: 1193-1241.
- Herrin E, Tucker W, Taggart J, Gordon DW, Lordell JL (1968) "Estimation of Surface Focus P Travel Times", *Bull Seism Soc Am*, 58: 1273-1291.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- Ho-Liu P, Kanamori H, Clayton RW, "Applications of Attenuation Tomography to Imperial Valley and Coso-Indian Wells Region, Southern California", *J Geophys Res*, 93: 10501-10520.
- Iyer HM, Oppenheimer DH, Hitchcock T, Rolloff LN, Coakley JM (1981) "Large teleseismic P-wave delays in the Geysers Clear Lake geothermal area" *US Geol Surv Prof Pap* 1141: 97 – 116.
- Kennett BLN, Engdahl ER, (1991) "Travel Times for Global Earthquake Location and Phase Identification", *Geophys J. Int.*, 105: 429-465.
- Kulhánek O (1990) "Anatomy of Seismograms", Elsevier S.P.C, Amsterdam.
- Lay T, Wallace TC (1995) "Modern Global Seismology", Academic Press, USA.
- Lee WHK, Pereyra V (1993) "Mathematical Introduction to Seismic Tomography", *Seismic Tomography: Theory and Practice*, Chapman & Hall, London, p. 9
- Lomnitz C (1974) "Developments in Geotectonics 5: Global Tectonics and Earthquake Risk", American Elsevier Publishing Company, Amsterdam.
- McNutt SR (1996) "Seismic Monitoring and Eruption Forecasting of Volcanoes: A Review of the State of the Art and Case Histories", *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*, edited by Scarpa and Tilling, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 99-146.
- McNutt SR (2000) "Seismic Monitoring", *Encyclopedia of Volcanoes*, edited by Haraldur Sigurdsson, Academic Press, USA, 1095-1119
- Methods, Fallacies and Challenges in Seismic Tomography  
<http://www.scri.fsu.edu/newsletter/Supertimes/fall91/seismic/seismic.html>
- Método de Interpolación Kriging  
[http://www.ems-i.com/gms-help/Interpolation/Interpolation\\_Schemes/Kriging/Kriging.htm](http://www.ems-i.com/gms-help/Interpolation/Interpolation_Schemes/Kriging/Kriging.htm)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- Método de Interpolación Kriging  
*<http://www.mappinginteractivo.com/>*
- Nava A (1998) "Terremotos", FCE, Colección La Ciencia Para Todos, No. 34, FCE, Tercera Edición, México.
- PCSUDS  
*<http://www.banfill.net/suds/PC-SUDS.pdf>*
- Preliminary report on the geotechnical engineering aspects of the June 15 and June 21, 1999, México, earthquakes of the churches.  
*[http://nisee.berkeley.edu/mexico/geotech/central\\_mexico\\_earthquake.html](http://nisee.berkeley.edu/mexico/geotech/central_mexico_earthquake.html)*
- Quaa R, González R, Guevara E, Ramos E, De la Cruz-Reyna S (1996) "Monitoreo Volcánico: Instrumentación y Métodos de Vigilancia", *Volcán Popocatepetl: Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994-1995*, editado por CENAPRED y UNAM, México 1996, 25-76.
- Reasenberg P, Ellsworth W, Walter A (1980) "Teleseismic Evidence for a Low-Velocity Body Under the Coso Geothermal Area", *J Geophys Res* 85: 2471-2483.
- Rowe CA, Aster RC, Kyle PR, Dibble RR, Schlue JW (2000) "Seismic and acoustic observations at Mount Erebus Volcano, Eos Island, Antarctica, 1994-1998", *J Volc Geotherm Res*, 101: 105-128.
- Servicio Sismológico Nacional.  
*<http://www.ssn.unam.mx/>*
- Simon RB (1981) "Earthquake Interpretations: A Manual For Reading Seismograms", William Kaufmann Inc., Los Altos California.
- Sismo  
*<http://www.eeri.org/earthquakes/Reconn/Manzanillo/ManzanB.html>*
- Sismo  
*<http://www.eeri.org/earthquakes/Reconn/Ometepec/Ometepec.html>*

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- Stauber DA, Green SM, Iyer HM (1988) "Three-Dimensional P Velocity Structure of the Crust Below Newberry Volcano, Oregon", *J. Geophys Res.*, 93: 10095-10107.
- Steeples DW, Iyer HM (1976) "Low-Velocity Zone Under Long Valley as Determined From Teleseismic Events", *J Geophys Res* 81: 849-860.
- Valdés C, González G, Arciniega A, Guzmán M, Nava E, Gutiérrez C, Santoyo M (1996) "Sismicidad del Volcán Popocatepetl a Partir del 21 de Diciembre de 1994 al 30 Marzo de 1995", *Volcán Popocatepetl: Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994-1995*, editado por CENAPRED y UNAM, México, 129-138.
- Valdés C, (2003) "Seismicity Associated with the December 1994 – December 2002 Eruptive activity of Popocatepetl Volcano, Mexico: Insight into Physical Processes" (Documento en Elaboración.)
- Volcano-Monitoring Techniques  
<http://volcanoes.usgs.gov/About/What/Monitor/monitor.html>

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN