

INFORMES

TÉCNICOS

## INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL

ENRIQUE GUEVARA ORTÍZ  
ROBERTO QUAAS WEPPEN  
GILBERTO CASTELÁN PESQUINA  
JAVIER ORTÍZ GONZÁLEZ  
JAZMÍN VÁZQUEZ LEÓN  
CÉSAR MORQUECHO ZAMARRIPA  
ANA MARÍA ALARCÓN FERREIRA  
ALICIA MARTÍNEZ BRINGAS  
ANGEL GÓMEZ VÁZQUEZ  
GERMÁN ESPITIA SÁNCHEZ  
PAULINO ALONSO RIVERA  
LUCIO CÁRDENAS GONZÁLEZ

DIRECCIÓN  
DE  
INSTRUMENTACIÓN  
Y CÓMPUTO



CENAPRED  
MÉXICO

SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN

Miguel Ángel Osorio Chong  
SECRETARIO DE GOBERNACIÓN

Luis Felipe Puente Espinosa  
COORDINADOR NACIONAL  
DE PROTECCIÓN CIVIL

Dr. Carlos M. Valdés González  
DIRECTOR GENERAL DEL  
CENTRO NACIONAL DE  
PREVENCIÓN DE DESASTRES

1ª edición, diciembre 2003

Versión Electrónica 2014

©SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN

Abraham González Núm. 48,  
Col. Juárez, Deleg. Cuauhtémoc,  
C.P. 06699, México, D.F.

©CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES

Av. Delfín Madrigal Núm. 665,  
Col. Pedregal de Santo Domingo,  
Deleg. Coyoacán, C.P.04360, México, D.F.

Teléfonos:

(55) 54 24 61 00

(55) 56 06 98 37

Fax: (55) 56 06 16 08

e-mail: [editor@cenapred.unam.mx](mailto:editor@cenapred.unam.mx)

[www.cenapred.gob.mx](http://www.cenapred.gob.mx)

©Autores: Enrique Guevara Ortiz, Roberto Quaas Weppen, Gilberto Castelán Pescina, Javier Ortiz González,  
Jazmín Vázquez León, César Morquecho Zamarripa, Ana María Alarcón Ferreira, Alicia Martínez Bringas,  
Ángel Gómez Vázquez, Germán Espitia Sánchez, Paulino Alonso Rivera y Lucio Cárdenas González

ISBN: 970-628-733-7

Revisor: Roberto Quaas Weppen

Edición: Enrique Guevara Ortiz, Gilberto Castelán Pescina, Jazmín Vázquez León y Jorge Fuentes

Portada: Demetrio Vázquez Sánchez

Derechos reservados conforme a la ley

IMPRESO EN MÉXICO. *PRINTED IN MEXICO*

Distribución Nacional e Internacional: Centro Nacional de Prevención de Desastres

EL CONTENIDO DE ESTE DOCUMENTO ES EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DE LOS AUTORES

INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL  
VOLCÁN POPOCATÉPETL

Enrique Guevara Ortiz  
Roberto Quaas Weppen  
Gilberto Castelán Pescina  
Javier Ortiz González  
Jazmín Vázquez León  
César Morquecho Zamarripa  
Ana María Alarcón Ferreira  
Alicia Martínez Bringas  
Ángel Gómez Vázquez  
Germán Espitia Sánchez  
Paulino Alonso Rivera  
Lucio Cárdenas González

Dirección de Instrumentación y Cómputo

Noviembre, 2003

# INDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>RESUMEN</b> .....   | <b>5</b>  |
| <b>I. ANTECEDENTES</b> .....   | <b>7</b>  |
| 1.1 INTRODUCCIÓN.....  | 7         |
| 1.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....  | 8         |
| 1.3 HISTORIA ERUPTIVA DEL VOLCÁN POPOCATÉPTL.....  | 9         |
| 1.4 RESUMEN DE LA ACTIVIDAD DEL VOLCÁN POPOCATEPETL<br>DE DICIEMBRE DE 1994 A OCTUBRE DE 2003..... | 10        |
| <b>II. INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL VOLCÁN</b> .....  | <b>15</b> |
| 2.1 TIPOS DE MONITOREO E INSTRUMENTACIÓN DE VOLCANES.....  | 15        |
| 2.1.1 Monitoreo visual.....  | 16        |
| 2.1.2 Monitoreo sísmico.....   | 16        |
| 2.1.3 Monitoreo geodésico.....   | 17        |
| 2.1.4 Monitoreo geoquímico.....  | 18        |
| 2.1.5 Otras técnicas y tipos de monitoreo.....   | 19        |
| 2.2 INSTRUMENTACIÓN DEL VOLCÁN POPOCATÉPTL.....  | 19        |
| <b>III. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO Y VIGILANCIA<br/>DEL VOLCÁN POPOCATÉPTL</b> .....     | <b>23</b> |
| 3.1 INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA.....   | 24        |
| 3.1.1 Estaciones sísmicas de periodo corto.....  | 25        |
| 3.1.2 Componentes de las estaciones sísmicas con telemetría.....                                   | 28        |
| 3.1.3 Estaciones sísmicas de Banda Ancha.....  | 31        |
| 3.2 INSTRUMENTACIÓN GEODÉSICA.....   | 32        |
| 3.2.1 Estación inclinométrica.....   | 32        |
| 3.3 INSTRUMENTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA Y DE DETECCIÓN<br>DE FLUJOS.....                            | 34        |
| 3.4 MONITOREO GEOQUÍMICO.....  | 36        |
| 3.5 MONITOREO VISUAL.....  | 37        |
| 3.6 MONITOREO FOTOGRAMÉTRICO.....  | 39        |
| 3.7 MONITOREO SATELITAL.....   | 39        |
| 3.8 SENSOR INFRASÓNICO Y TÉRMICO.....  | 41        |
| <b>IV. PUESTO CENTRAL DE REGISTRO</b> .....  | <b>43</b> |
| 4.1 RED DE COMPUTADORAS PARA EL MONITOREO Y<br>PROCESAMIENTO.....                                  | 45        |
| 4.1.1 Periodo corto.....   | 46        |
| 4.1.2 Banda Ancha.....   | 47        |
| 4.1.3 Imagen.....  | 47        |
| 4.1.4 Tambor digital.....  | 48        |
| 4.1.5 Porky.....   | 48        |
| 4.1.6 Earthworm.....   | 49        |
| 4.1.7 RSAM.....  | 50        |
| 4.1.8 Gráficos.....  | 51        |
| 4.1.9 Alarmod.....   | 52        |
| 4.1.10 BOB2000.....  | 52        |
| 4.1.11 Cámara Térmica.....   | 54        |
| 4.1.12 EDM TEMOHUANI.....  | 54        |
| <b>V. MECANISMOS DE COMUNICACIÓN, DIFUSIÓN Y ALERTAMIENTO</b> .....                                | <b>57</b> |
| 5.1 DIFUSIÓN DE LA INFORMACIÓN.....  | 59        |
| 5.2.1 Semáforo de Alerta Volcánica.....  | 60        |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 5.2.2      | POPOBIP .....   | 61        |
| 5.2.3      | Página WEB en Internet .....                                | 62        |
| 5.2.4      | POPOTEL .....   | 64        |
| 5.2.5      | Publicaciones .....   | 64        |
| 5.2.6      | Capacitación .....  | 65        |
| <b>VI.</b> | <b>ALGUNOS RESULTADOS .....</b>                             | <b>67</b> |
|            | CONCLUSIONES .....  | 73        |
|            | RECONOCIMIENTOS .....                                       | 75        |
|            | <b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>                                   | <b>77</b> |
|            | <b>ANEXO 1</b>  |           |
|            | <b>FICHAS TÉCNICAS DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO .....</b> | <b>79</b> |

## **RESUMEN**

Dado el número de volcanes activos en México y que algunos de ellos tienen un potencial importante de erupción, es fundamental establecer oportunamente sistemas de vigilancia y monitoreo que permitan detectar cualquier variación que indique una fase eruptiva y con ello se ponga el peligro a la población cercana. Muestra de esto, es el sistema de monitoreo del volcán Popocatépetl, que actualmente está constituido por 12 estaciones remotas y un Puesto Central de Registro PCR localizado en las instalaciones del CENAPRED. La actividad sísmica y fumarólica registrada en el volcán Popocatépetl a lo largo de 1993 y 1994 concluyó en la noche del 21 de diciembre de 1994 cuando lanzó un gran fumarola de ceniza y dio inicio a una nueva etapa de actividad, la cual continúa hasta la fecha. En el presente trabajo se describen aspectos generales del volcán, la instrumentación y las técnicas de observación empleadas así como los sistemas de registro y procesamiento de la información.

## **ABSTRACT**

Given the great number of active volcanoes in Mexico, some of them with an important eruptive potential, it is fundamental to establish surveillance and monitoring systems which would allow timely detection of any variation or unrest which would indicate the onset of an eruptive phase that could endanger the population near the volcano. For this purpose a monitoring system has been implemented at Popocatepetl volcano, which is comprised of 12 remote stations and a Central Recording Station (PCR) at CENAPRED. The seismic and fumarolic activity registered at the Popocatépetl volcano along 1993 and 1994 finished the night of December 21<sup>st</sup>, 1994, when a great fumarole of ash was thrown into the atmosphere, beginning a new episode of activity which continues as of today. This document describes general aspects of the volcano, its instrumentation and techniques used for observation, as well as the recording and data processing.

# I ANTECEDENTES

## 1.1 INTRODUCCIÓN

México se encuentra situado en una región con importante actividad volcánica. De los 3000 volcanes que aproximadamente tiene el país, 14 son considerados activos. Las tierras de origen volcánico son fértiles, de buen clima y con agua abundante, por lo que ha contribuido a que muchas poblaciones se hayan establecido cerca y en los alrededores de los volcanes. Lo anterior hace evidente que existe un alto riesgo asociado, el cual irá aumentando con el continuo crecimiento de la población y de las áreas urbanas. México ha vivido experiencias recientes de volcanes que han presentado fases eruptivas importantes, algunas con consecuencias lamentables. Por ejemplo los volcanes: Parícutín que hizo erupción en 1943, el Chichón en 1982, el Tacaná en 1986 y el volcán de Colima, el cual ha tenido episodios de gran actividad en los últimos años. La experiencia mas reciente se vivió en diciembre de 2000 cuando el volcán Popocatepetl pasó de una fase de moderada actividad a un estado de gran intensidad sísmica, fumarólica y lanzamiento de fragmentos incandescentes relacionados con la destrucción de un domo formado en su interior.

Estas experiencias ponen de manifiesto la importancia de adquirir una percepción del riesgo y aprender a convivir con los volcanes activos. Gracias a los avances tecnológicos es posible ahora conocer con anticipación el incremento de la actividad de un volcán, a través de una serie de instrumentos y dispositivos que permiten medir y registrar sus manifestaciones físicas. Ejemplo de ello es el sistema de monitoreo del volcán Popocatepetl.

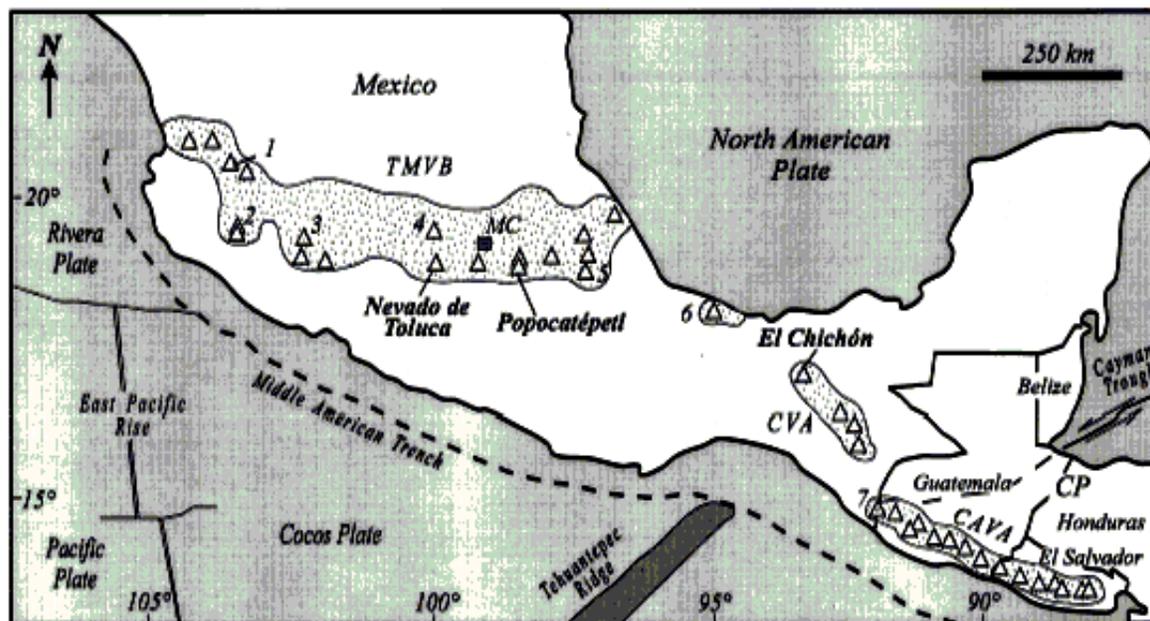
Como un esfuerzo conjunto del Centro Nacional de Prevención de Desastres, del Instituto de Geofísica de la UNAM, y con una estrecha colaboración con el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), se estableció en los últimos años un complejo sistema de observación telemétrico con una central de adquisición y procesamiento de datos. Este sistema ha permitido dar seguimiento a la actividad reciente del volcán, aportando elementos indispensables para el alertamiento y la toma de decisiones. El objetivo del presente trabajo es describir este sistema, los tipos y métodos de monitoreo empleados, la instrumentación y las experiencias en la observación y registro de la actividad del volcán.



**Figura 1.1** Al fondo el Popocatepetl emitiendo una leve fumarola

## 1.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El Popocatépetl ( Del náhuatl: **popoca**, humo y **tépetl**, montaña: “Montaña que humea”) forma parte del Sistema Volcánico Transversal<sup>1</sup> (figura 1.2), en la cual se encuentran localizados los principales volcanes en México.



**Figura 1.2 Eje Neovolcánico o Sistema Volcánico Transversal**  
(Tomado de Armienta et al., 2000)

El Popocatépetl, también conocido como El Pico de Anáhuac, Don Gregorio, Don Goyo o simplemente El Popo. Se localiza 19.02° N y 98.62° W, en la intersección de los Estados de México, Morelos y Puebla. Este volcán es la segunda cima más alta del país con 5,452 m de altura.

Cerca del volcán Popocatépetl, se ubican grandes centros poblacionales como la Ciudad de México y la Ciudad de Puebla, localizadas a 60 y 40 km del volcán respectivamente. Asimismo en un radio de 100 km alrededor del volcán vive cerca de una cuarta parte de la población de México.

<sup>1</sup>Eje Volcánico Transversal, dicho sistema está incluido en la región centro sur del país; se extiende entre los 19° y 21° latitud norte en las que se encuentran los picos más elevados del país, partiendo de los volcanes de Colima y Nayarit, hasta la sección de la Sierra Nevada donde destacan el *Popocatépetl* ( 5,452 m.) y el *Iztaccíhuatl* (5,326 m.), así como el *Pico de Orizaba* (5,700 m.). También son importantes en esta cordillera volcánica *El Nevado de Toluca*, *El Cofre de Perote* y *La Malinche*

### 1.3 HISTORIA ERUPTIVA DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL

El Popocatépetl es un estratovolcán andesítico con una gran historia eruptiva en los últimos 23,000 años (Siebe et al, 1995). Hasta el momento se sabe que su actividad volcánica ha variado desde erupciones efusivas, con la emisión de derrames de lava, hasta erupciones de tipo explosivo que han provocado el derrumbe parcial del edificio, con la generación de diversos materiales volcánicos. En la tabla 1.1 se resume la historia eruptiva del volcán Popocatépetl.

**Tabla 1.1 Historia Eruptiva del volcán Popocatépetl**

| <b>Año</b>    | <b>Breve historia del Volcán Popocatépetl</b>  |
|---------------|--|
| 23,000a       | Gran erupción tipo Sta. Helena destruye el edificio volcánico previo   |
| 14,000a       | Gran erupción pliniana produce lluvias de cenizas y pómez sobre el valle de México   |
| 14,000-5,000a | Ocurren varias erupciones menores y al menos cuatro grandes erupciones   |
| 3,000 b       | Erupción Grande  |
| 200 b         | Erupción Grande  |
| 800 c         | Erupción Grande  |
| 800 c-        | Después de la última erupción explosiva, la actividad del Popocatépetl ha sido moderada. A lo largo de los últimos 1200 años se han presentado numerosos episodios de actividad muy similares al actual. Algunos de ellos están documentados |
| 1354 c        | Erupción menor   |
| 1363 c        | Fumarolas  |
| 1512 c        | Fumarolas  |
| 1519 c        | Fumarolas  |
| 1530 c        | Erupción moderada  |
| 1539-1549 c   | Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez   |
| 1571c         | Emisiones de ceniza  |
| 1592 c        | Fumarolas y emisiones de ceniza  |
| 1642 c        | Fumarolas y emisiones de ceniza  |
| 1663 c        | <b>Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez</b>  |
| 1664 c        | Emisiones de ceniza  |
| 1665 c        | Emisiones de ceniza  |
| 1697 c        | Fumarolas  |
| 1720 c        | Erupción leve y actividad fumarólica   |
| 1804 c        | Fumarolas Leves  |
| 1919-1927 c   | Erupción Moderada. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez. Se forma un pequeño domo de lava en el fondo del cráter.   |
| 1994-         | Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez. Formación de domos de lava en el fondo del cráter  |

(Tomada de <http://www.cenapred.unam.mx/mvolcan.html>)

## 1.4 RESUMEN DE LA ACTIVIDAD DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL DE DICIEMBRE DE 1994 A OCTUBRE DE 2003

Después de cerca de 70 años de quietud, el Volcán Popocatepetl, inició una nueva fase de actividad el 21 de Diciembre de 1994, después de haber aumentado su actividad sísmica y fumarólica a partir de 1993. En ese día se produjo una importante emisión de ceniza, así como un incremento en la actividad sísmica, que promovió la evacuación de las poblaciones más vulnerables en los sectores Este y Noreste del volcán.

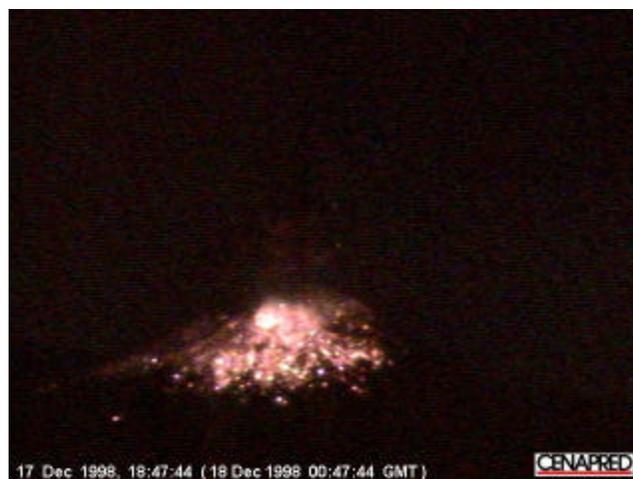
Durante 1995, la actividad del volcán fue fluctuante, aunque podría considerarse un periodo de poca actividad. A partir de marzo 1996 el volcán inició un nuevo episodio de actividad con nuevas emisiones de ceniza, asociadas a la formación y crecimiento de un domo de lava en el interior del cráter. Algunas explosiones relacionadas con esta actividad ocurrieron durante este periodo, siendo la de mayor importancia la ocurrida el 30 de abril de 1996, en la cual fallecieron 5 alpinistas que, sin observar las indicaciones, subieron al volcán. El domo siguió creciendo a una tasa moderada hasta julio de 1996, cuando paulatinamente comenzó a decrecer. A partir de septiembre de ese mismo año, las exhalaciones fueron de carácter más explosivo y continuaron durante todo el año, y siguieron durante el primer semestre del 1997.



**Figura 1.3 Domo de lava en el interior del cráter observado en 1997**

El 30 de junio de 1997, se presentó uno de los eventos explosivos más grandes en este periodo. Se estima que la intensidad de la erupción alcanzó el índice de explosividad (VEI) de 2 a 3, que condujo, por recomendación del Comité Científico, que el color del semáforo de alerta volcánica se pusiera por varias horas en color rojo, es decir, en máximo nivel de alertamiento, pero sin iniciar ninguna evacuación. El evento inició con una serie de eventos volcano-tectónicos y posteriormente señales de tremor indicando la emisión de importantes cantidades de ceniza y salida de fragmentos. En poco tiempo la columna de ceniza generada alcanzó 8 kilómetros de altura que al ser dispersada por los vientos provocó la caída de ceniza en muchos poblados alrededor del volcán, incluyendo la Ciudad de México, donde fue necesario cerrar el Aeropuerto por cerca de 12 horas debido a la ceniza depositada en las pistas. En lugares cercanos al volcán, como en Paso de Cortés, se observaron fragmentos de pómez de hasta 10 cm. Posteriormente fueron observadas evidencias de caída de clastos en la partes altas del volcán y algunos flujos de lodo fueron reportados en el poblado de Xalitzintla a 12 km al noreste del volcán, generados por las intensas lluvias registradas.

Posterior a este evento y hasta el primer semestre del año 2000, el volcán mostró actividad relacionada con varios procesos de crecimiento y destrucción de domos de lava. Durante este tiempo hubo periodos de poca actividad y otros en los cuales se registraron emisiones de ceniza y actividad explosiva. En particular se registraron algunos eventos explosivos en enero de 1998 y en especial durante noviembre y diciembre de ese mismo año, cuando se registraron más de 15 explosiones con emisiones de ceniza y fragmentos incandescentes, provocando algunas de ellas algunos incendios en la zona de los pastizales. Durante 1999 se registraron algunos eventos explosivos en marzo, abril y finales de año. Durante este año también se observaron algunos pequeños flujos de lodo ocasionados por la fusión de nieve y hielo del glaciar sin causar ningún daño.



**Figura 1.4 Explosión registrada el 17 de diciembre de 1998**

A partir de septiembre de 2000 y hasta los primeros días de diciembre, la actividad del volcán fue incrementándose. Se registró un aumento en la intensidad y número de las exhalaciones, algunas de ellas de mayor duración y con emisiones importantes de ceniza. Se registró también un incremento en el número de sismos volcanotectónicos, particularmente durante noviembre cuando ocurrieron 27 eventos de magnitudes entre 2.0 y 3.1. Las señales de tremor fueron incrementándose en amplitud y duración y se relacionaron con el proceso de formación y crecimiento de un nuevo domo de lava iniciado en octubre. Este incremento en la actividad motivó a las autoridades a modificar el semáforo de alerta volcánica a Amarillo Fase 3.

Los días 12 al 15 de diciembre se incrementó el número de exhalaciones hasta 200 por día, muchas de ellas con emisiones de ceniza que alcanzaban entre los 5 y 6 km de altura sobre el volcán. Por la noche era posible observar incandescencia en el cráter y la emisión de algunos fragmentos incandescentes. El día 15 de diciembre inicia el volcán una etapa de gran actividad, se registraron señales de tremor armónico continuo y amplitudes de saturación de los instrumentos en todas las estaciones de monitoreo, incluyendo las más lejanas. Los demás parámetros mostraron también valores nunca antes registrados, deformaciones en el volcán de hasta 200 microradianes.

Inició así la más grande erupción en términos de liberación de energía desde 1994. Durante los días posteriores estuvieron alternándose periodos de completa calma con señales sísmicas totalmente saturadas por cerca de 14 horas de tremor armónico, aunadas con emisiones importantes de ceniza. Este comportamiento permitió establecer un modelo de carga y descarga de energía para pronosticar el siguiente episodio de actividad. Así, después de un periodo de tres días de relativa calma, el 18 de diciembre por la tarde una nueva erupción comenzó. Las erupciones del 18 y 19 de diciembre, aunque con una relativa baja explosividad, pero de duración larga, lanzaron grandes cantidades de fragmentos incandescentes en los flancos del volcán, alcanzando distancias máximas entre 5 y 6 km del cráter.

Se pudo confirmar a través de fotografías aéreas que la actividad estaba relacionada con el crecimiento del mayor domo de lava observado hasta el día de hoy. La tasa de emisión se estimó en cerca de 200 metros cúbicos por segundo provocando el crecimiento del domo en pocos días hasta alcanzar un volumen estimado entre 15 y 19 millones de metros cúbicos.



**Figuras 1.5 y 1.6 Actividad del volcán Popocatepetl en diciembre de 2000**



**Figura 1.7 Emisión de ceniza el día 19 de diciembre de 2000**

Después del día 19 de diciembre, la actividad bajó considerablemente y el siguiente período de actividad esperado para el día 23 de diciembre, con base en el modelo, no ocurrió indicando que la tasa de suministro de magma había cambiado. Lo que se piensa que fue la primera explosión de destrucción del domo, ocurrió el 24 de diciembre, lanzando fragmentos incandescentes a distancias de 2.5 km del volcán y produciendo una columna de ceniza de aproximadamente unos 5 km sobre el cráter. Cuando la naturaleza y tamaño del episodio quedaron bien establecidos al igual que los límites de la actividad futura esperada, se recomendó la reducción del radio de seguridad a 12 km. No hay pueblos localizados dentro de este radio, y la gente que había sido evacuada pudo regresar a sus casas. (tomado de Valdés, et al, 2001)

La actividad del volcán Popocatepetl disminuyó considerablemente en enero de 2001, comparada con la actividad de diciembre del 2000. El siguiente evento importante ocurrió hasta el día 22 de enero del 2001, cuando se registró un evento explosivo con salida de material incandescente, importantes cantidades de ceniza que generaron una columna de 8 km de altura sobre el nivel de cráter, y la generación de flujos de ceniza (piroclásticos) que descendieron por varias de las cañadas del volcán, sin alcanzar población alguna (Figura 1.8 y 1.9). Este evento se asoció con un índice de explosividad volcánica VEI = 3-4.



**Figuras 1.8 y 1.9 Evento del 22 de enero de 2002, visto desde Altzomoni y la Ciudad de México, respectivamente**

Después de este último evento y hasta febrero de 2003, la actividad del volcán ha sido fluctuante. Ha habido periodos de baja actividad y otros en los que se han registrado emisiones de ceniza y algunas explosiones con lanzamiento de fragmentos incandescentes en las cercanías del volcán. Esta actividad estuvo relacionada con varios procesos de crecimiento y destrucción de pequeños domos de lava en el interior del cráter. Cabe resaltar la actividad registrada en febrero de 2003 con la ocurrencia de una secuencia de eventos explosivos con emisiones de ceniza y fragmentos incandescentes, provocando algunos de ellos incendios en la zona de pastizales (figura 1.10).



**Figura 1.10 Explosión registrada el 22 de febrero de 2003**

Para el 30 de abril se observó que el último domo formado había sido parcialmente destruido y para finales de junio había sido desalojado por completo, dejando un cráter de 70 a 80 metros bajo el nivel del piso del cráter principal. La actividad relacionada con estos procesos de formación y destrucción de domos de lava, y la acumulada en años pasados, ha elevado el nivel o cota del piso del cráter a una altura ubicada a pocas decenas de metros por debajo del nivel mínimo del labio inferior del cráter, en el sector Este del volcán (figura 1.11).



**Figura 1.11 Condiciones del interior del cráter en abril de 2003**

El mes de julio se caracterizó por actividad moderada de probable origen freático. Durante ese mes se registraron algunas explosiones de pequeña a moderada intensidad destacando en particular la del día 19 de julio (figura 1.12) que provocó una densa columna de ceniza dispersándose al Noroeste del volcán, lo que provocó caída de ceniza en algunos sectores de la Ciudad de México.



**Figura 1.12 Explosión registrada el 19 de julio de 2003 que provocó caída de ceniza en la Ciudad de México**

En términos generales de julio a octubre de 2003 la actividad del volcán ha ido disminuyendo gradualmente. En este periodo se registró pequeña actividad explosiva durante el mes de agosto, se ha registrado poca actividad sísmica y el número de exhalaciones se ha reducido a unas cuantas por día y todas de baja intensidad. El monitoreo de deformación y geoquímica en este periodo igualmente no ha mostrado cambios significativos. Esta actividad indica que hasta el momento no hay evidencias de ascenso de magma, ni de formación de un nuevo domo, sin embargo el sistema de monitoreo se mantiene en forma permanente para dar seguimiento a la actividad del volcán. Hasta octubre del 2003 el semáforo de alerta volcánica se mantiene en Amarillo Fase 2.

## II INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL VOLCÁN

### 2.1 TIPOS DE MONITOREO E INSTRUMENTACIÓN DE VOLCANES

Al mismo tiempo que los volcanes pueden tener efectos benéficos, también pueden tener efectos destructivos sobre la población que vive en sus cercanías, tales como emisiones de lava, flujos piroclásticos, caída de cenizas, gases tóxicos, flujos de lodo, avalanchas, etc. Adicionalmente las columnas volcánicas inyectadas a la atmósfera contienen ceniza y aerosoles que pueden ocasionar daños a la aeronavegación.

Sin embargo la mayoría de las erupciones vienen precedidas de cambios geofísicos y/o geoquímicos que pueden ser detectados y medidos. De tal forma que para percibir y evaluar el estado de actividad y riesgo asociado a un volcán es necesaria la observación y vigilancia sistemática de sus manifestaciones físicas como: movimientos del terreno, temblores, deformaciones, cambios en la composición química de gases y manantiales, variaciones de temperatura, cambios magnéticos, etc.

La vigilancia de un volcán consiste entonces, en la observación continua y permanente mediante diversos métodos visuales e instrumentales, con la finalidad de detectar oportunamente cambios en su actividad y de ser posible, anticipar alguna condición anómala precursora de un proceso eruptivo que permita el alertamiento temprano y la puesta en marcha de los planes operativos previamente establecidos.



**Figura 2.1 Actividades relacionadas con el monitoreo y vigilancia volcánica**

De acuerdo con lo anterior, la vigilancia de un volcán implica las siguientes actividades:

Diseñar y establecer sistemas de instrumentación y métodos de observación de acuerdo con las características y condiciones del volcán

Monitorear y evaluar su actividad en forma continua y sistemática

Reconocer oportunamente e interpretar los cambios observados de su actividad

Establecer sistemas de alertamiento

Establecer mecanismos de comunicación a autoridades y población.

Entre los tipos de monitoreo y vigilancia comúnmente utilizados en un volcán se encuentran la vigilancia visual, el monitoreo sísmico, el monitoreo geodésico y el monitoreo geoquímico.

### 2.1.1 Monitoreo visual

Consiste en la detección por medios visuales y registros frecuentes de cambios apreciables en un volcán y sus alrededores, como pueden ser: emanaciones de gases y cenizas, deformaciones, derrumbes, deslaves, fracturas, flujos de lodo, actividad magmática, o cualquier otra manifestación visible ligada a su actividad. Este monitoreo se lleva a cabo mediante observaciones a simple vista o con ayuda de binoculares, vuelos de reconocimiento, con registros fotográficos, y cámaras de video, entre otros.

Estas apreciaciones generalmente constituyen indicadores cualitativos, sin embargo llevadas a cabo en forma sistemática pueden proporcionar información importante y útil para complementar el monitoreo instrumental e incluso para el diseño e instalación de redes de monitoreo.



*Figura 2.2 Vuelo en helicóptero al volcán Popocatepetl*

### 2.1.2 Monitoreo sísmico

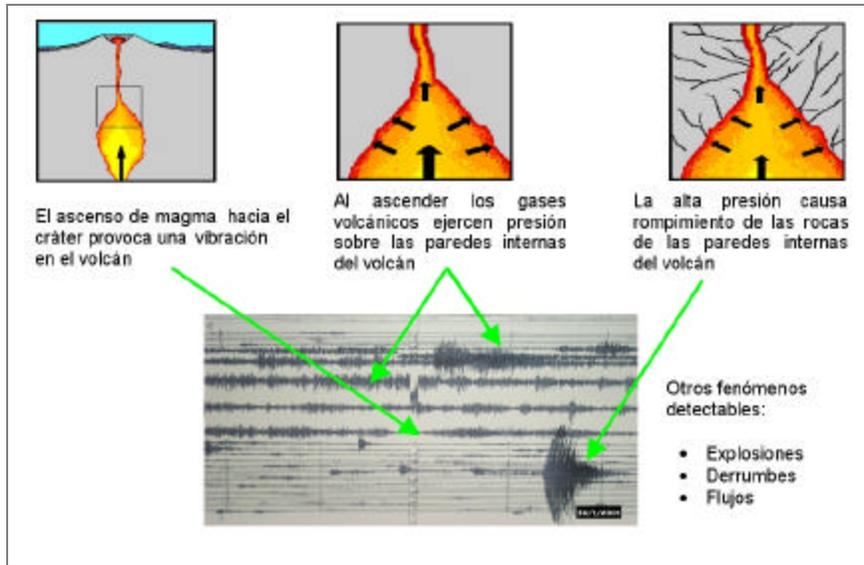
El monitoreo sísmico consiste en la medición local o remota de la actividad microsísmica y en general, de movimientos en la superficie del edificio volcánico. Estas vibraciones o movimientos se producen por diferentes procesos en el interior de los volcanes. Entre algunas de las causas se encuentran fracturamientos de las paredes internas del volcán o provocados por cambios de presión. También se pueden generar estas vibraciones por el movimiento mismo del magma o la salida de gases y materiales volcánicos. Con base a la experiencia es posible identificar y clasificar los registros sísmicos o sismogramas asociados a diferentes procesos o mecanismos. Asimismo, el número de eventos, su magnitud, su localización y algunas otras características, permite localizar la fuente de energía e inferir la estructura interior del volcán, así como cambios en la misma. Debido a su amplia utilización y los avances tecnológicos, el monitoreo sísmico es uno de los principales métodos para la vigilancia de volcanes y para la evaluación de su actividad, asimismo ha proporcionado la base para muchos pronósticos exitosos de erupciones.

Para llevar a cabo el monitoreo sísmico se emplean generalmente sismómetros y/o geófonos distribuidos sobre y en los alrededores del volcán. Para localizar con precisión el epicentro de los sismos y su profundidad es necesario instalar una red sísmica de por lo menos 4 estaciones, preferentemente que alguno de ellos sean de tres componentes. Existen una gran variedad de estos instrumentos dependiendo de su tecnología, medio de registro y respuesta. Es común el empleo de sismómetros de periodo corto, o aunque más costosos, sensores de mayor rango dinámico y definición en un amplio rango de frecuencias como los sismómetros de banda ancha.

Existen diversos tipos de instrumentos sísmicos, de sistemas de registro y telemetría, así como de procesamiento y análisis de los datos. La mayoría de los sismómetros utilizados son electromagnéticos, los cuales contienen transductores internos que convierten el movimiento del terreno en una señal eléctrica, proporcional a la velocidad del movimiento. Esta señal es luego amplificada y acondicionada para ser almacenadas localmente o enviadas por telemetría ya sea en forma analógica o digital a un puesto de registro para contar con información en tiempo real.



**Figura 2.3 Sismómetro triaxial (CMG-40T)**



**Figura 2.4 Ejemplo de registros sísmicos y su interpretación**

### 2.1.3 Monitoreo geodésico

El monitoreo geodésico consiste en la medición de cambios morfológicos de un volcán o deformaciones que sufre el edificio volcánico. Este tipo de monitoreo, es otra de las técnicas utilizadas con frecuencia para el seguimiento de la actividad volcánica y también con buenos resultados en el pronóstico de erupciones. Las deformaciones son producidas generalmente por ajustes de la superficie del volcán en respuesta a los movimientos y presión del magma en su interior o a consecuencia de los esfuerzos ejercidos desde el interior del volcán.

Los movimientos del suelo asociados a la deformación son, por lo general, muy pequeños. Además los efectos superficiales, como las variaciones por temperatura, la presencia de acuíferos y especialmente de

glaciaciones en el edificio volcánico, pueden provocar efectos superiores a los debidos por la actividad volcánica. Por estas razones, para medir deformaciones, cambios en las pendientes del volcán o inclinaciones, se emplean técnicas precisas a través de instrumentos especiales. Las mediciones pueden realizarse a través de métodos geodésicos convencionales (nivelación, triangulación, trilateración, inclinometría seca, etc.) o por otros métodos electrónicos, siendo los instrumentos más usados: inclinómetros, distanciómetros y más recientemente, el empleo de receptores de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS).



**Figura 2.5 Inclinómetro de burbuja**

#### **2.1.4 Monitoreo geoquímico**

Todos los sistemas volcánicos tienen zonas de contacto con agua y fluidos que interactúan con el material magmático. Asimismo, un aporte, movimiento o cambios del sistema magmático pueden resultar en el escape de gases hacia la atmósfera. Estos efectos aparecen como cambios químicos que pueden medirse en la superficie del volcán. Por tanto, este tipo de monitoreo se refiere al análisis químico de gases, cenizas, agua de manantiales y otros productos volcánicos, así como la medición de cambios en la temperatura, tasa de emisión de gases, pH, etc. Los resultados de este tipo de monitoreo resultan de suma utilidad para reconocer diversos aspectos relacionados con el origen y evolución de los cuerpos magmáticos.

Una de las técnicas empleadas para el análisis de gases es la utilización de métodos espectrométricos, los cuales consisten en analizar el espectro de emisión (o absorción) del gas e identificar así los diferentes elementos que lo componen. Un ejemplo es la medida del flujo de  $\text{SO}_2$  utilizando un espectrómetro de correlación "COSPEC", para conocer en forma remota el flujo de este gas en una pluma volcánica. Otro de los equipos empleados es el LICOR, utilizado para determinar los niveles de  $\text{CO}_2$  también en la pluma volcánica.



**Figura 2.6 Vuelo para medición de  $\text{SO}_2$  con el COSPEC**

### 2.1.5 Otras técnicas y tipos de monitoreo

Adicionalmente a los tipos de monitoreo descritos, existen instrumentos para detectar y medir otra serie de manifestaciones físicas en los volcanes. Ejemplos de estos pueden mencionarse los gravímetros y magnetómetros para la medición de variaciones en los campos gravitacional, geomagnético y geoelectrónico provocados por cambios en la temperatura o en el equilibrio de masas de agua, gas, roca sólida y componentes magmáticos que constituyen el sistema volcánico.

Asimismo resulta importante la implementación de sistemas de detección y alertamiento de ciertos productos volcánicos, como pueden ser detectores de flujos de lodo o lahares. Después de las erupciones del volcán Santa Elena (Washington, USA) en 1980 y el Nevado de Ruiz (Colombia) en 1985, se empezó a brindar especial atención a este fenómeno que constituye, sin duda, uno de los fenómenos volcánicos más devastadores. Una vez formados los lahares pueden recorrer apreciables distancias que dependen, básicamente, del desnivel entre el punto de origen y en el que agotan su energía cinética. Durante el tránsito, los cambios de la pendiente del cauce influyen sensiblemente sobre la velocidad y la turbulencia y, por lo tanto, controlan la capacidad de arrastrar o depositar los sólidos en suspensión.

Con el lanzamiento de nuevos satélites cada año, las técnicas de percepción remota han incrementado la capacidad de los científicos para el monitoreo de volcanes. Para este propósito, la percepción remota consiste en la utilización de sensores satelitales para la detección de la energía electromagnética absorbida, reflejada o radiada, por la superficie de un volcán o por el material lanzado en una nube eruptiva. Diferentes sensores son usados para medir las longitudes de onda de la energía que se encuentra más allá del rango de visión humana, por ejemplo ultravioleta, infrarrojo y microondas. Entre las aplicaciones del monitoreo satelital se incluyen la detección y seguimiento de nubes de cenizas y aerosoles. En particular resulta de suma utilidad en virtud del daño que pueden causar las cenizas principalmente a la aeronavegación. Otras aplicaciones de esta técnica son la medición de emisiones de bióxido de azufre y la detección de puntos calientes.

Otros sensores útiles son por ejemplo radiómetros, cámaras térmicas, sensores de presión, mediciones hidrometeorológicas, sensores sónicos e infrasónicos.

Todas las técnicas y tipos de monitoreo descritos, así como la correlación entre los diferentes parámetros, además de contribuir a la evaluación de la actividad de un volcán y la elaboración de pronósticos, proporcionan información valiosa que permite estudiar y entender mejor el comportamiento de un volcán activo.

## 2.2 INSTRUMENTACIÓN DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL

Los primeros síntomas de reactivación del volcán Popocatepetl, después de un periodo de quietud de casi 70 años, como se observó en la cronología descritas en el capítulo 1, se empezaron a detectar en 1993 gracias a los registros de dos estaciones sísmicas instaladas cerca del volcán: Altzomoni (IIA) y Tlamacas (PPM), operadas por el Instituto de Ingeniería y el Instituto de Geofísica respectivamente. Al surgir evidencias claras de la actividad del Popocatepetl y ante la falta de estaciones de observación que permitieran el estudio y localización de los eventos sísmicos, la tarea de diseñar e instrumentar una red de monitoreo del volcán Popocatepetl le fue encomendada al CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres).

Los trabajos de ampliación de la instrumentación se iniciaron a principios de 1994 con la instalación de dos estaciones sísmicas adicionales: Chipiquixtle (PPX), localizada en el costado Suroeste del volcán y la estación de Colibrí (PPC), en el costado Suroeste. La emergencia volcánica registrada en diciembre de 1994 motivó a tomar acciones inmediatas para reforzar y complementar la red de observación y monitoreo. Con el apoyo de los Institutos de Geofísica y de Ingeniería de la UNAM, y el Cascades Volcano Observatory del US Geological Survey, así como la participación de múltiples autoridades e instituciones, se comenzó la integración de lo que actualmente es el Sistema de Monitoreo y Alertamiento del Volcán Popocatepetl.

A lo largo de casi ya 10 años de operación se han ido adicionando diversos instrumentos y sensores para medir diferentes parámetros físicos del volcán. Esta instrumentación ha permitido evaluar la actividad del volcán, así como la elaboración de pronósticos. Gracias al sistema, se ha proporcionado información oportuna a las autoridades y población en general sobre las condiciones de riesgo del volcán Popocatepetl, llevando incluso a la evacuación de ciertos sectores de la población cercana al volcán en dos ocasiones, cuando el volcán mostró un incremento importante en su actividad.



**Figura 2.7 Primera estación sísmica del CENAPRED (PPX) y personal que participó en su instalación en 1994**

La red de monitoreo del Popocatepetl actualmente está compuesta por 12 estaciones localizadas en las laderas circundantes del volcán, en sitios con altitudes de hasta 4300m y a 1.5 km del cráter. La instrumentación consta de 7 sismómetros de periodo corto (2 con sensores verticales y 5 triaxiales), 2 sismómetros triaxiales de banda ancha; 4 inclinómetros biaxiales para medir deformación; una cámara de video controlada en forma remota desde el CENAPRED con enlace de microondas; 3 detectores de flujo en el costado norte del volcán; un radar doppler meteorológico (actualmente dañado); una cámara térmica infrarroja, un sensor infrasónico, un radiómetro y diversos equipos para mediciones geodésicas, análisis químicos, determinación de las concentraciones de gases  $SO_2$  y  $CO_2$ .

Más de 60 señales de telemetría son transmitidas en forma continua hacia el puesto central de registro y procesamiento el cual está localizado en el CENAPRED. Allí se reciben todas las señales y mediante una extensa red de computadoras, la actividad es monitoreada y procesada las 24 horas del día.



**Figura 2.8. Puesto Central de Procesamiento y Registro del CENAPRED**

Al detectarse cualquier incremento anormal de la actividad sísmica del volcán, se acciona una alarma acústica y a través de un sistema de marcado automático se envían mensajes a teléfonos particulares, celulares y radio-localizadores del personal de guardia, indicando la intensidad de las señales en diferentes estaciones.

Del análisis de la información del volcán se derivan las recomendaciones relativas al nivel de alertamiento por el Comité Técnico Científico Asesor, integrado por investigadores de la UNAM, del CENAPRED y de otras instituciones. Mediante reportes especiales, autoridades del gobierno y de Protección Civil son informadas periódicamente acerca del nivel de actividad del volcán. Para el público en general se dispone de un buzón telefónico, el Poptel (5205-1036 y 01-800-123-5050), con mensajes sobre su estado de actividad, así como una página en Internet actualizada diariamente ([www.cenapred.unam.mx](http://www.cenapred.unam.mx)).

El CENAPRED se convirtió así en el centro de adquisición de información y evaluación de la actividad del volcán. El sistema de monitoreo forma parte integral de una serie de acciones llevadas a cabo por la Coordinación General de Protección Civil de la Secretaría de Gobernación, en coordinación con autoridades estatales de Protección Civil y diversas instituciones y dependencias. Se han implementado mecanismos de alertamiento y comunicación como el semáforo de alerta volcánica, mapas de peligros y planeación de emergencias, planes operativos y manuales de procedimientos, así como acciones para la difusión de la información y preparación de la población.

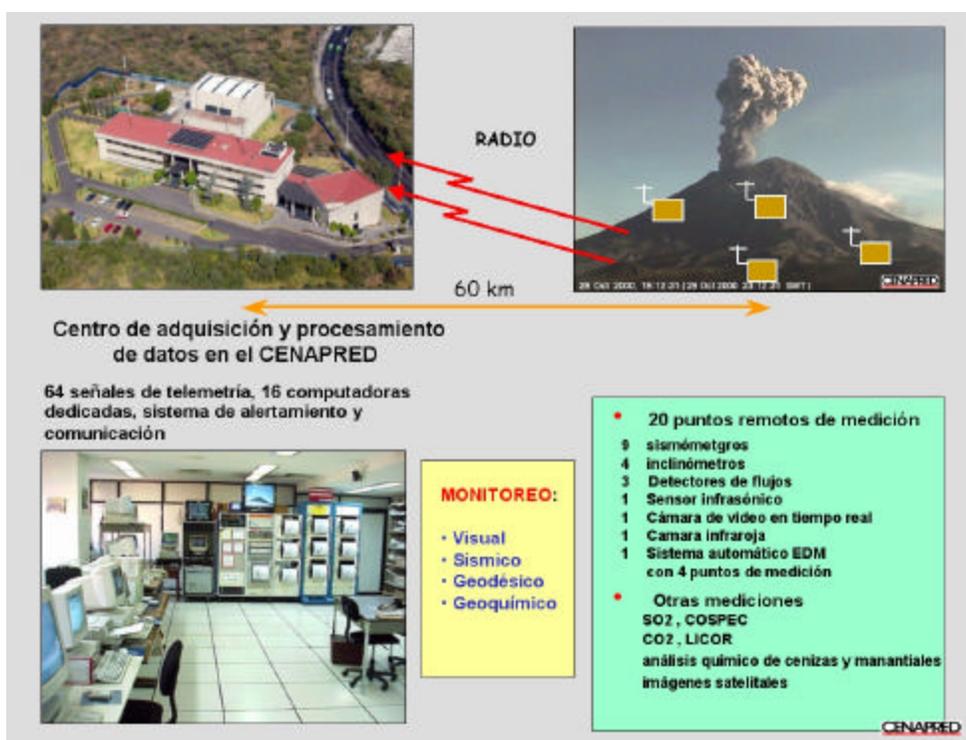


Figura 2.9 Sistema de monitoreo y vigilancia del volcán Popocatepetl



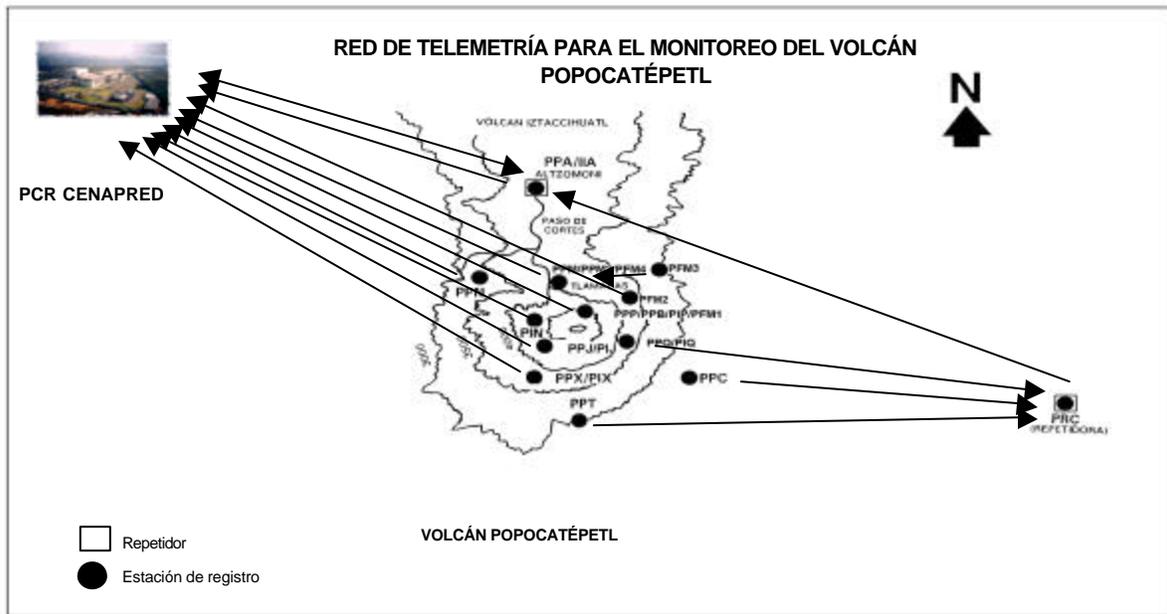


Figura 3.2. Red de telemetría para el monitoreo del volcán Popocatepetl

### 3.1 INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA

La red de observación sísmica del volcán Popocatepetl está actualmente conformada por 7 estaciones con sismómetros de periodo corto (1Hz) y 2 más con sismómetros de banda ancha. La mayoría de los sensores son triaxiales, es decir registran el movimiento del terreno en tres direcciones, una componente vertical y dos horizontales. Adicionalmente se cuenta con estaciones sísmicas regionales del Instituto de Ingeniería, UNAM y del propio CENAPRED que permiten discriminar entre la actividad sísmica propia del volcán y temblores lejanos que son registrados por la red del Popocatepetl.

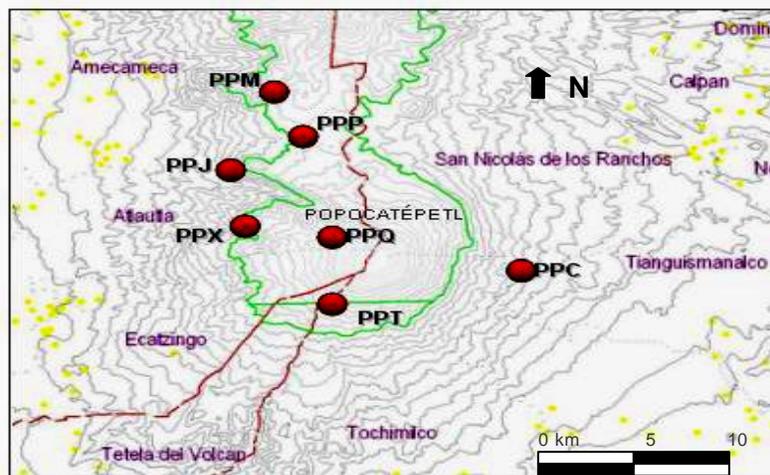


Figura 3.3. Distribución de las estaciones sísmicas del volcán Popocatepetl

### 3.1.1 Estaciones sísmicas de periodo corto

Las estaciones sismológicas de la red fueron básicamente colocadas y acondicionadas de dos maneras diferentes: una instalación permanente mediante una caseta especial de resguardo (Estación tipo A) y una instalación temporal en el campo de forma subterránea (Estación tipo B). El primer tipo de instalación se utilizó para las estaciones PPM, PPC, PPT, PPX, PPP. Un diagrama esquemático (figura 3.4) muestra este tipo de instalación. El resto de las estaciones, en particular las que se encuentran a mayores altitudes (PPJ y PPQ), se instalaron en forma subterránea en virtud de lo inaccesible y riesgoso de su ubicación y la dificultad que representaba subir los materiales y la construcción de una caseta formal. Cabe mencionar que estas estaciones se localizan a más de 4000 m de altura y a menos de 3 km del cráter.

Para las casetas del tipo A, se construyó una caseta de mampostería especial que protege los equipos contra vandalismo y del medio ambiente; sirve a su vez de protección y resguardo al personal que opera y mantiene las estaciones (figuras 3.5 y 3.6). Las casetas cuentan con una puerta metálica de acceso y pequeñas ventilas. Además algunas estaciones cuentan con una cerca de protección mediante malla ciclónica ahulada. El sismómetro o transductor que detecta la vibración del terreno se coloca sobre un pedestal rígido de concreto firmemente anclado a la roca en caso de existir o ligado al suelo mediante zapatas. Para evitar al máximo la transmisión de ruido que la estructura pueda inducir al sensor, el pedestal queda desligado físicamente de la cimentación de la caseta.

En cuanto a su instalación, en ambos tipos de casetas el equipo utilizado es el mismo (figura 3.7); esencialmente consta de tres elementos: sensor, acondicionador de señal y transmisor. A un lado del pedestal se encuentra el equipo de acondicionamiento de señal, el transmisor y las baterías de alimentación. Las celdas solares y una pequeña torre con la antena de transmisión quedan colocadas en el techo de la caseta.

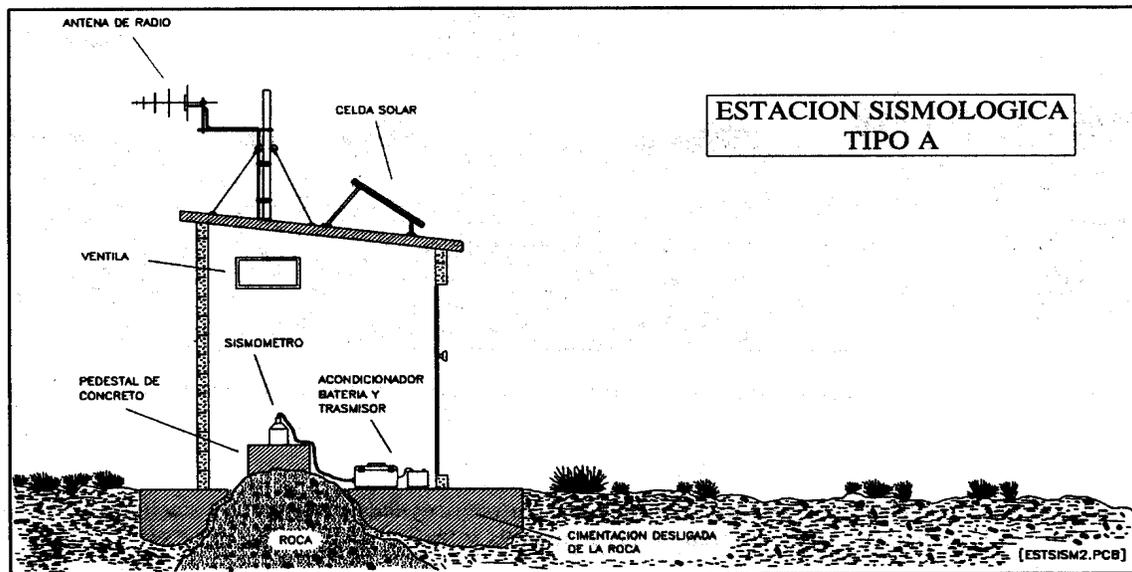
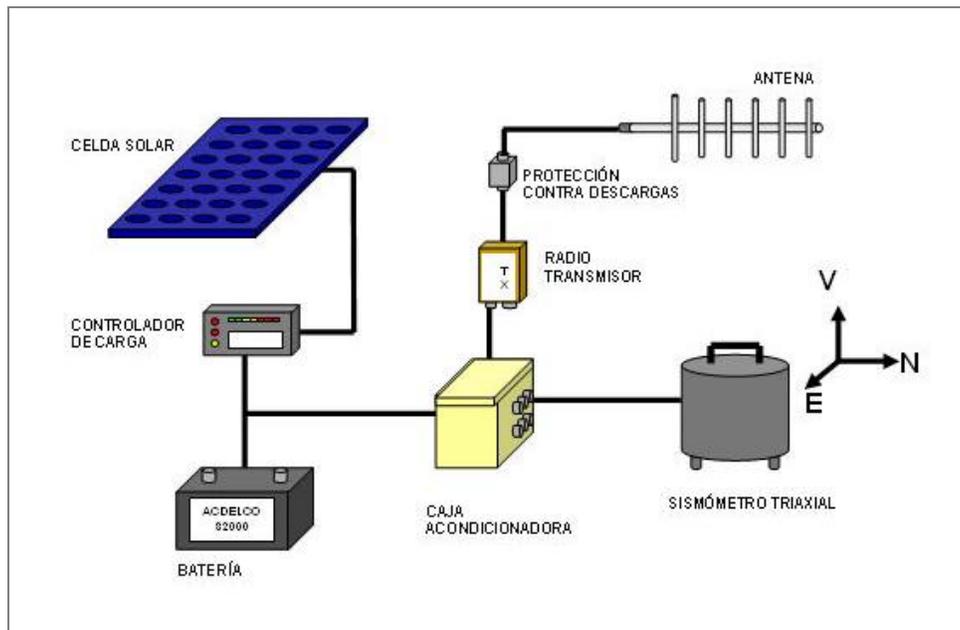


Figura 3.4 Caseta Tipo A



**Figura 3.5 y 3.6 Vista exterior e interior de la estación sísmica tipo A de Canario (PPP)**



**Figura 3.7 Elementos que componen una estación sísmica**

En cuanto a las estaciones del tipo B, el sismómetro, al igual que el equipo acondicionador, quedan enterrados a 1.5 metros de profundidad (figura 3.8). Este sensor es totalmente hermético, a prueba de agua y de acero inoxidable. El acondicionador, el trasmisor y la batería se protegen dentro de un contenedor de plástico y poliuretano, con un tubo de ventilación hacia la superficie. Al lado del contenedor se instala una pequeña torre tubular soportada mediante tres tirantes o sobre una base de concreto a la cual se sujetan las celdas solares y la antena para la transmisión de las señales. En algunas estaciones se instala una varilla de cobre para proteger la estación contra descargas de electricidad atmosférica.

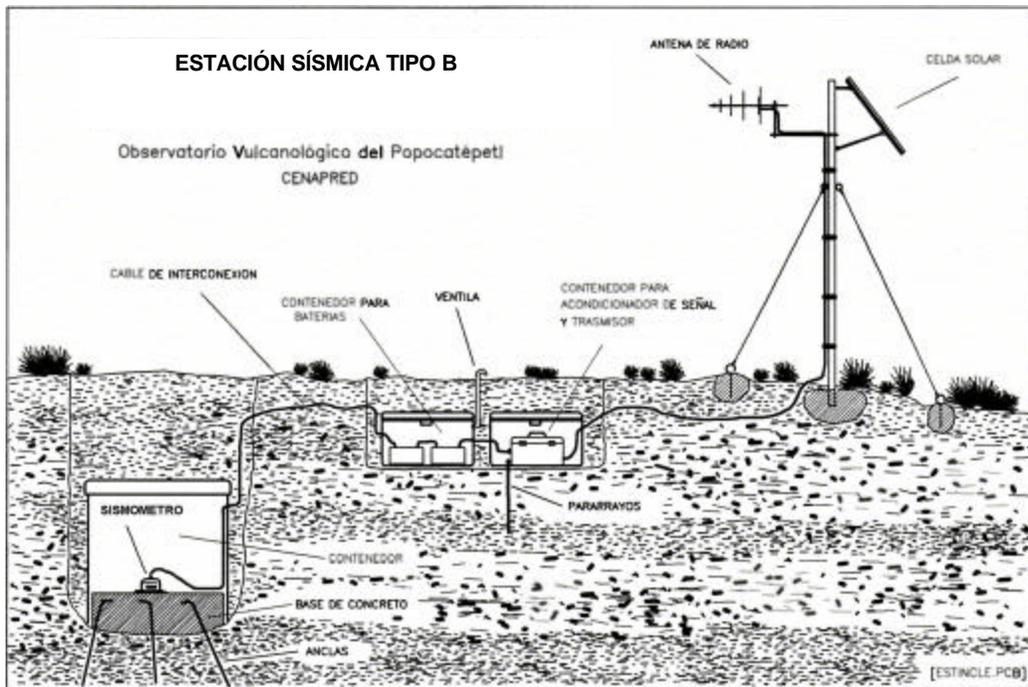


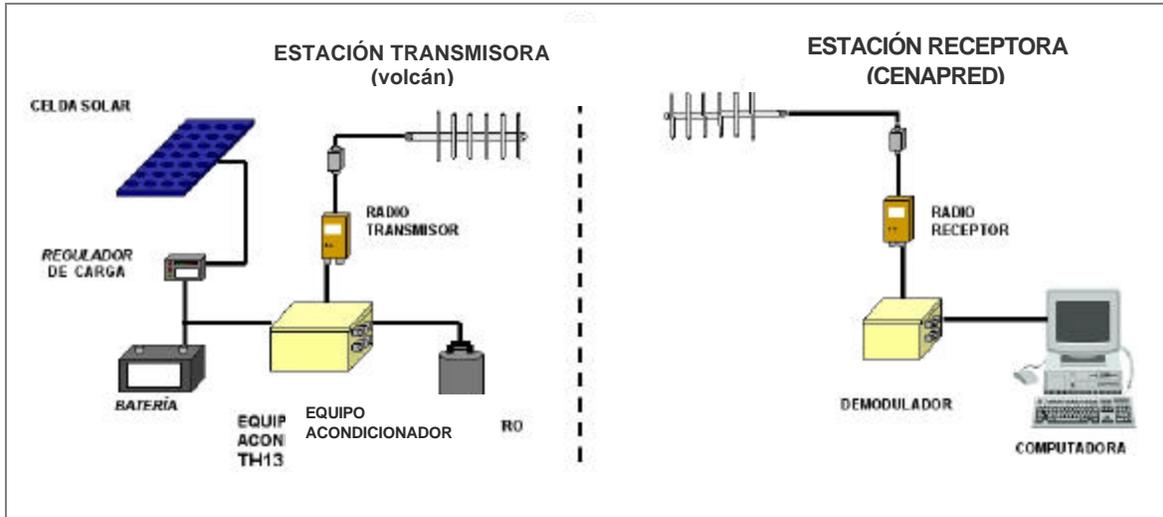
Figura 3.8 Estación sísmica tipo B



Figura 3.9 Estación sísmica de Juncos (PPJ)

### 3.1.2 Componentes de las estaciones sísmicas con telemetría

El diseño de una estación sísmica con telemetría es el mostrado en la figura 3.10



**Figura 3.10 Componentes de una estación sísmica con telemetría (transmisor y receptor)**

Con el esquema anterior, una estación sísmica con telemetría está compuesta en la parte transmisora por los siguientes elementos:

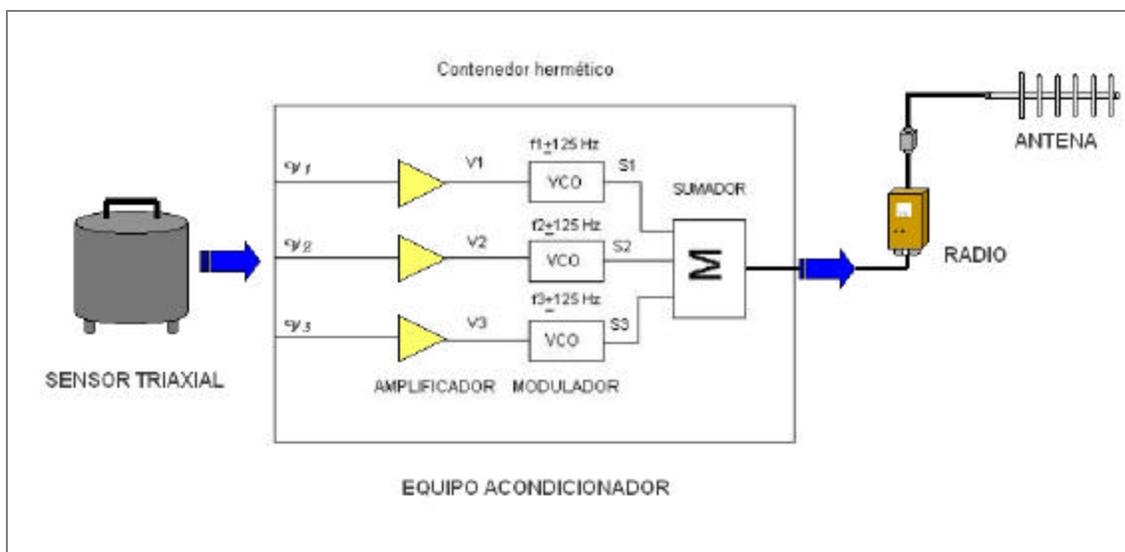
- Sismómetro uniaxial o triaxial
- Equipo acondicionador (modulador, filtro y amplificador)
- Sistema de alimentación (celdas solares, regulador de carga y batería)
- Antena y radio (transmisor VHF o UHF)

Las pequeñas vibraciones del terreno, provocadas por la actividad del volcán, son detectadas por el sismómetro, también llamado geófono o transductor de velocidad. En la instrumentación empleada para el volcán Popocatepetl los hay de dos tipos: uniaxiales y triaxiales. El primero se utiliza para detectar el movimiento en la dirección vertical y el segundo para detectar el movimiento tanto vertical como los movimientos horizontales, generalmente orientados Norte-Sur y Este-Oeste. Los sensores generan una señal de voltaje proporcional a la velocidad del movimiento del terreno ( $v_1, v_2, v_3$ ) (figura 3.11). Esta pequeña señal analógica pasa al acondicionador en donde es amplificada y filtrada ( $V_1, V_2, V_3$ ) y luego es utilizada para modular en frecuencia (FM) a una subportadora de audio de frecuencias  $f_1, f_2$  y  $f_3$  mediante los osciladores controlados por voltaje (VCO). Se producen así las señales moduladas en frecuencia  $S_1, S_2$  y  $S_3$ . De esta manera el voltaje de cada sensor es convertido a una señal en la banda audible, con frecuencia proporcional a la velocidad del terreno en una banda de  $\pm 125$  Hz alrededor de la frecuencia de la subportadora.

Una vez acondicionadas y moduladas las tres señales individualmente, se suman en amplitud mediante el sumador produciendo finalmente la señal multiplexada que es la que se transmite mediante un radio

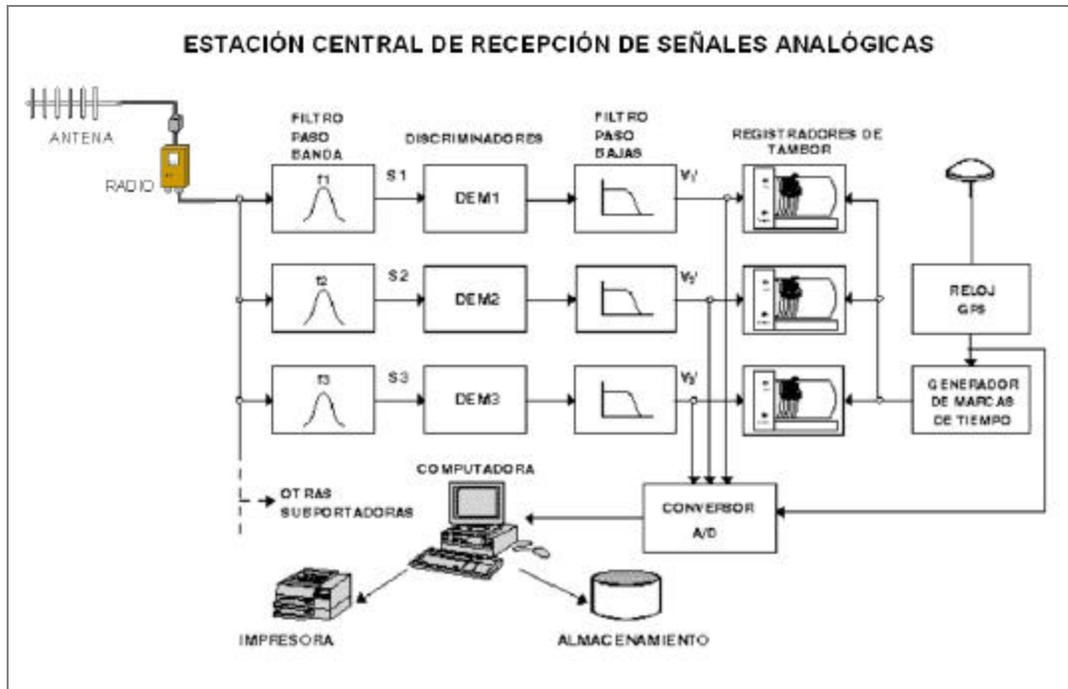
transmisor (calidad voz) que a su vez utiliza modulación en frecuencia al CENAPRED. De esta forma en una sola banda de voz (audio) se pueden codificar hasta 8 diferentes señales. Esta técnica se conoce como multiplexaje por división de frecuencia y es comúnmente utilizada en sistema de telemetría, ya que por estar modulada en frecuencia es inherentemente inmune a ruido que es inducido por amplitud.

Las radiofrecuencias empleadas en la red se encuentran en la banda de VHF y UHF y se transmiten con potencias de 0.1 a 2 watts dependiendo del sitio y la distancia del enlace. La alimentación en todas las estaciones es de 12 VCD mediante celdas solares y baterías automotrices en flotación. Esto garantiza una operación continua. El consumo típico de una estación es de 350 mA.



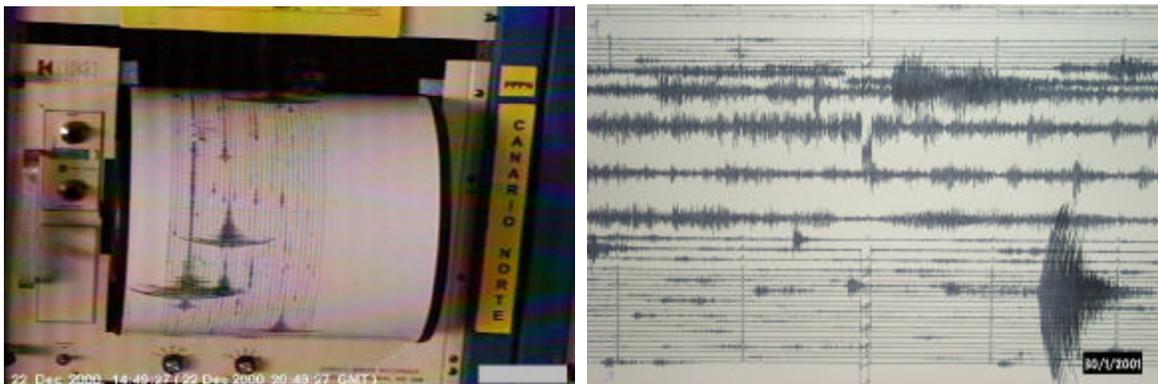
**Figura 3.11 Diagrama de bloques del equipo electrónico en una estación Sísmica con telemetría**

El equipo de recepción (figura 3.10) está formado por una antena, un radio receptor, un demodulador y una computadora tipo PC para el registro digital de los datos. En el puesto central de registro, el proceso de recuperación de las señales es el inverso al de la estación remota (figura 3.12). La señal multiplexada es detectada por el radio receptor y llevada a un banco de filtros pasa banda, sintonizados cada uno a la frecuencia de la subportadora ( $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ). De esta manera se separan (demultiplexan) y recuperan las señales individuales  $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$ , sumadas en la estación de campo. El siguiente paso es la demodulación de las señales codificadas en FM mediante los demoduladores DEM1, DEM2 y DEM3. Después de filtrarse se obtienen nuevamente las señales de voltaje  $V_1'$ ,  $V_2'$ ,  $V_3'$  cuyo valor es proporcional a la velocidad del movimiento del terreno registrada por el sismómetro en la estación de campo en el volcán.



**Figura 3.12** Diagrama a bloques del proceso de recepción

Para ser útiles, estas señales deben ser registradas y procesadas convenientemente. En el Puesto Central de Registro (PCR), estas señales se registran en graficadores continuos de tambor sobre papel, produciendo las gráficas amplitud-tiempo llamadas sismogramas (figura 3.13). Cada tambor se cubre con una tira de papel especial y gira a razón de una revolución cada 15 minutos. Un estilete con tinta accionado por un transductor mecánico, imprime la señal sobre el papel. Un tambor tiene típicamente una capacidad para registrar 24 horas de información sísmica. Además de las trazas de velocidad, se registra el tiempo mediante la superposición de marcas de referencia muy precisas cada minuto y cada hora, las cuales son generadas por un reloj GPS (sistema de posicionamiento global).



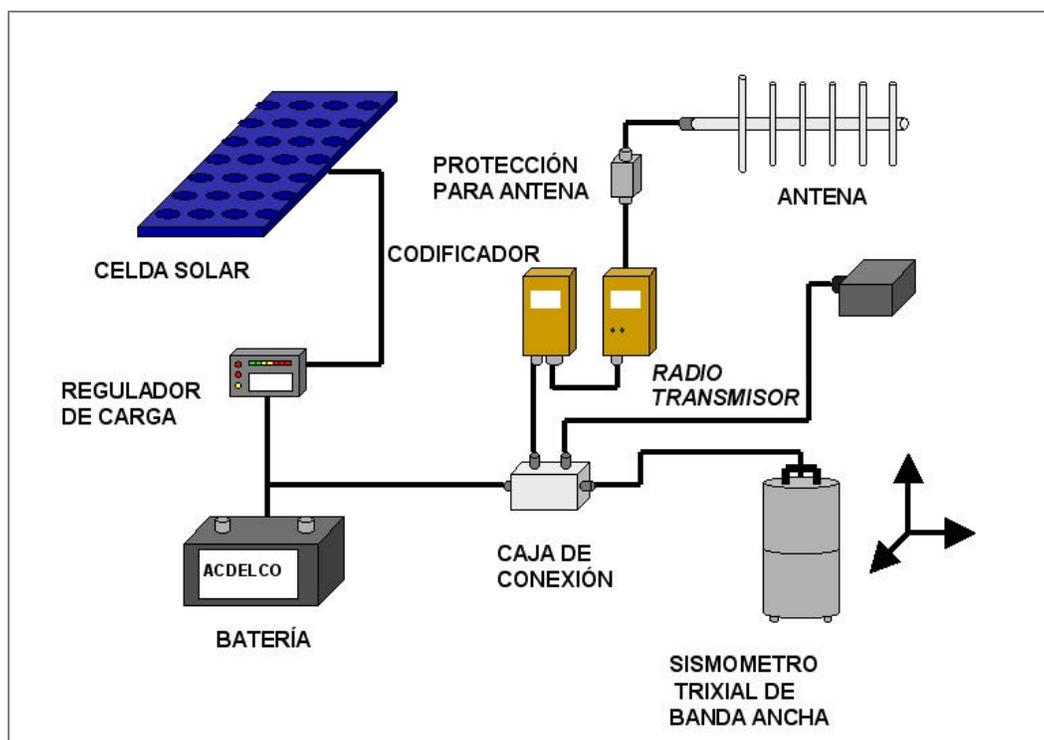
**Figura 3.13** Registrador de tambor y sismograma

### 3.1.3 Estaciones sísmicas de Banda Ancha

La instrumentación de las estaciones sísmicas de Banda Ancha constan de los siguientes equipos (figura 3.14):

- Un sensor triaxial CMG-40 el cual permite registrar ondas sísmicas en una amplia banda de frecuencias con una respuesta plana de 30 segundos hasta 100 Hz y movimientos en una amplia gama de magnitudes. Tiene capacidad para registrar pequeñas vibraciones, sismos locales, tremores, mareas, vientos, explosiones, exhalaciones, etc., hasta sismos regionales, sin problemas de saturación, esto en función de su amplio rango dinámico.
- Un codificador digital DE-10.
- Un radio T-45

Las señales del sensor de velocidad (sismómetro) son muestreadas en sitio en forma continua a 100 muestras por segundo (mps) a 16 bits por muestra, luego, convertidas a un formato digital y después de ser codificadas se transmiten al Puesto Central de Registro mediante telemetría digital. Todas las estaciones cuentan además con un reloj GPS que permite obtener una referencia de tiempo de alta precisión, la cual es almacenada junto con la información sísmica.



**Figura 3.14 Instrumentación de una estación de Banda Ancha**

### 3.2 INSTRUMENTACIÓN GEODÉSICA

Las técnicas utilizadas para medir la deformación del volcán Popocatepetl son tres: inclinometría, distanciometría y GPS (figura 3.15). Los inclinómetros permiten la medición de las variaciones de las pendientes de las laderas del volcán debidas a una deformación del edificio volcánico. Por su alta sensibilidad, permiten registrar cambios con precisión de milésimas de grado. Las cuatro estaciones instaladas utilizan sensores biaxiales de alta ganancia y uno uniaxial de baja ganancia.



**Figura 3.15 Instrumentos empleados para la medición de deformación: Inclinómetro (izquierda), distanciómetro electrónico (centro) y GPS (derecha)**

Como complemento de estos instrumentos, se cuenta también con una red geodésica (De la Cruz, et al., 1995). Para ello se instalaron alrededor del volcán y en las partes altas, espejos reflectores (prismas) para ser utilizados con distanciómetros láser y medir cambios de distancia desde ciertos puntos fijos de referencia. Este distanciómetro envía un rayo láser hacia el espejo el cual lo refleja hacia el aparato. El tiempo de trasmisión es proporcional a la distancia del equipo al reflector. Se obtienen así mediciones muy precisas de fracciones de milímetro.

Como un proyecto del Instituto de Geofísica se instaló en el año 2000 un sistema basado en la medición con distanciómetros electrónicos láser, que de manera automática permita monitorear continuamente la red geodésica y a su vez se obtener datos en tiempo casi real.

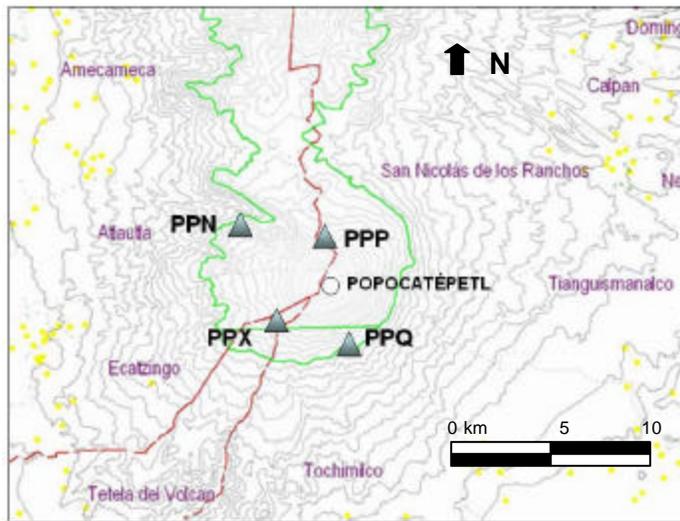
Adicionalmente, se llevan a cabo por parte del Instituto de Geofísica de la UNAM (Cabral et al.), mediciones de deformación con dos estaciones receptoras GPS (sistema de posicionamiento global), las cuales reciben las señales de diversos satélites geoestacionarios para definir su posición horizontal y vertical. Esta técnica consiste en la medición de distancias desde los satélites en órbita a las 2 estaciones receptoras instalados en puntos fijos en el volcán. Actualmente la exactitud teórica de esta técnica es de 1 ppm en dirección horizontal de 5-10 ppm en la vertical.

#### 3.2.1 Estación Inclinométrica

A partir de 1995 se comenzó la instalación de las estaciones inclinométricas hasta contar con 4 inclinómetros. La instrumentación fue proporcionada por el Observatorio Vulcanológico de los Cascades en Vancouver, Wa. del USGS y su distribución se muestra en la figura 3.16

La instrumentación consta de cinco partes: sensores, acondicionadores, transmisores, baterías y celdas solares. El sensor está compuesto por dos inclinómetros finos de alta resolución colocados en forma ortogonal con rango máximo de 500 microradianes (un microradián =  $5.73 \times 10^5$  grados) y una sensibilidad de 0.1 microradianes. Los inclinómetros por ser instrumentos muy sensibles, requieren de una instalación especial. Para ello se excava un pozo de 3m de profundidad y de 1.5 m de diámetro (figura 3.17), en cuyo fondo se cuela una base circular de concreto armado con anclas introducidas al suelo para darle mayor estabilidad.

Sobre la base se fija el instrumento, de manera que sus dos ejes perpendiculares X y Y queden orientados en forma radial al centro del volcán. Posteriormente se cubre la base con un contenedor metálico hecho de un barril de petróleo el cual tiene un orificio para los cables de interconexión. Antes de cubrir el contenedor con una tapa, se nivelan los inclinómetros a su posición de cero (horizontal) mediante tornillos especiales. El ajuste grueso se realiza mediante un nivel de burbuja de aire y el fino se logra midiendo eléctricamente la salida de los sensores. Una vez hecha la nivelación, se tapa el contenedor y se cubre completamente con tierra el pozo. Con este tipo de instalación subterránea se logra una buena estabilidad mecánica y también un mejor aislamiento térmico, que es fundamental en estas mediciones, ya que los instrumentos también son muy sensibles a variaciones de temperatura. Cabe mencionar que los inclinómetros además tienen integrado un termómetro que permite la correlación entre las variables de deformación y de temperatura. En ocasiones se llegan a registrar cambios aparentes de inclinación que sin embargo no son debidos a una deformación sino son producto de la contracción y dilatación del material por efectos térmicos.



**Figura 3.16** Distribución de estaciones inclinométricas



**Figura 3.17** Instalación de una estación inclinométrica

En forma similar a las estaciones sismológicas, los equipos para el acondicionamiento de las señales, de telemetría y baterías se instalan también en forma subterránea y protegidos dentro de contenedores de plástico y poliuretano. Para el soporte de la antena de transmisión y de la celda solar, se colocó un mástil tubular con tirantes.

La forma de operación de una estación inclinométrica es la siguiente; cada sensor proporciona un voltaje proporcional a la inclinación. Este se logra mediante una burbuja dentro de un electrolito que se desplaza entre dos electrodos. Estas señales son amplificadas, convertidas a señales digitales y luego codificadas y transmitidas por radio mediante modulación FSK a una velocidad de 300 bauds. La transmisión no es continua, sino que se envía a intervalos regulares predefinidos, por ejemplo cada 10 minutos, en forma de un paquete de datos. Este paquete contiene la información sobre los niveles de inclinación de los ejes X y Y del sensor biaxial, temperatura dentro del sensor y nivel de voltaje de la batería. Mediante esta técnica de transmisión intermitente se reduce considerablemente el consumo de energía y se puede integrar una red de estaciones de este tipo utilizando la misma frecuencia de radio. Por ser señales muy cortas y transmitidas intermitentemente cada 10 minutos aproximadamente, la probabilidad de que dos estaciones transmitan al mismo tiempo es muy baja y en caso dado sencillamente se desechan los datos de ese intervalo.

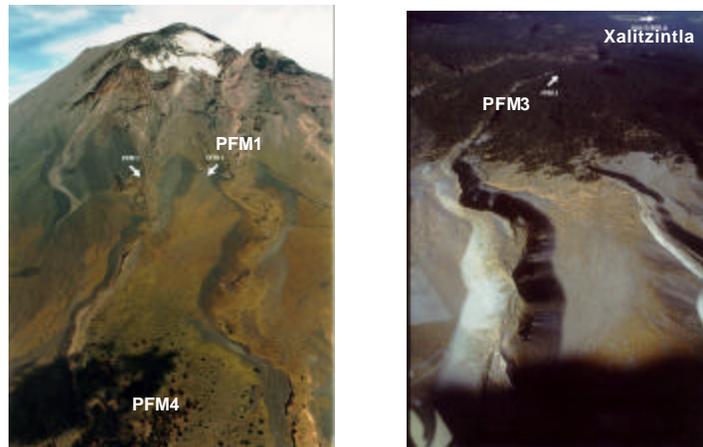
Respecto al equipo de recepción, éste es similar al descrito para los sismómetros, con excepción de que las señales son digitales y la salida del demodulador directamente se interconecta a una computadora vía su puerto serie RS-232.

### **3.3 INSTRUMENTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA Y DE DETECCIÓN DE FLUJOS**

Como un proyecto conjunto del CENAPRED y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), se instaló a mediados de 1998 un sistema automático para la detección de flujos en la ladera norte del volcán. De acuerdo con diversos estudios de riesgo realizados, en esta ladera es posible que se generen lahares producidos, ya sea por una intensa precipitación pluvial durante la temporada de lluvia, o por la fundición parcial del glaciar durante una erupción del volcán. En ambos casos podrían producirse flujos de agua, ceniza y rocas que escurrirían por los cauces naturales a lo largo de la barrancas de Tenenepanco y la Espinera, que los conducirían en poco tiempo hacia poblaciones como Santiago Xalitzintla y San Nicolás de los Ranchos, ubicadas dentro del cauce en el estado de Puebla.

El sistema instalado en el Popocatepetl consiste de 2 estaciones de medición localizadas en la parte alta del volcán (PFM1 y PFM2), una para cada una de las barrancas que descienden del glaciar (figura 3.18). Una tercer estación se localiza en la confluencia de ambas barrancas aguas abajo (PFM3). Una estación repetidora, ubicada en el cerro Tlamacas (PFM4), recibe las señales y las envía por radio hacia el CENAPRED.

El sistema de detección instalado está basado en el monitoreo acústico de flujos (AFM por sus siglas en inglés). Un monitor acústico de flujo es básicamente un geófono (ó sismómetro) con una mayor sensibilidad a altas frecuencias. A diferencia de los sismómetros empleados para registrar la actividad sísmica de un volcán que son de menor frecuencia, un AFM tiene una respuesta en frecuencia de 10 Hz a 250 Hz. Las vibraciones de la tierra producto de un lahar o flujo de lodo están predominantemente en el rango de 30 a 80 Hz.



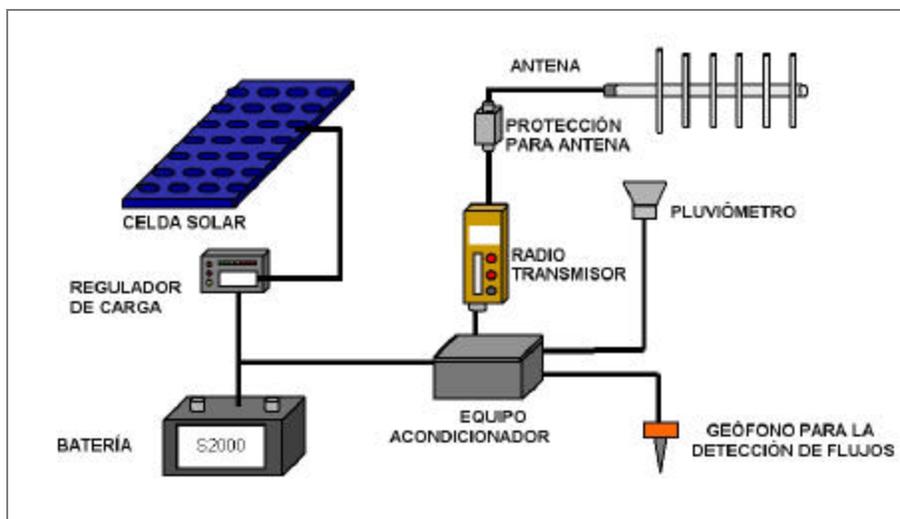
**Figura 3.18. Ubicación de las estaciones detectoras de flujos**



**Figura 3.19 Estación detectora de flujos PFM3**

Las estaciones cuentan con un adquisidor que acondiciona y registra la señal del geófono en formato digital y un sistema de transmisión de la información vía radio a un puesto central donde se encuentra a su vez, un sistema de alertamiento (figura 3.20). Adicionalmente las estaciones cuentan con un medidor de precipitación (pluviómetro). Para darle autonomía al sistema y proveerlo de energía se utilizó un banco de baterías y un panel solar.

Cada segundo el adquisidor hace un muestreo de la amplitud de la vibración detectada por el sensor y a intervalos regulares los datos son enviados al CENAPRED. Los datos recibidos, ya digitales son transferidos a una computadora que analiza la información, la cual activa en forma automática una alarma cuando la amplitud de la vibración sobrepasa los umbrales previamente establecidos.



**Figura 3.20 Componentes de una estación detectora de flujos**

### 3.4 MONITOREO GEOQUÍMICO

Referente al monitoreo geoquímico que realizan el CENAPRED y el Instituto de Geofísica de la UNAM, se llevan a cabo mediciones frecuentes de las concentraciones de los gases y análisis químico de cenizas y aguas de manantiales. Los gases actualmente monitoreados son el bióxido de azufre y bióxido de carbono. Las mediciones de bióxido de azufre se realizan regularmente una cada quince días por vía terrestre y eventualmente también por vía aérea, utilizando un espectrógrafo de correlación, COSPEC, como se describió en el capítulo 2. Las mediciones por vía terrestre consisten en colocar el instrumento en un vehículo y realizar transectos o cortes por debajo de la nube de gas para obtener el flujo de este a partir de las variaciones en la absorción vertical de la radiación ultravioleta, en la que el sol es la fuente de iluminación (Delgado et al.). Por vía aérea, el equipo se coloca en una aeronave y se realizan de igual forma cortes por debajo de la nube de gas. Para la medición del flujo de CO<sub>2</sub> se utiliza un analizador de gas (LICOR).



**Figura 3.21 y 3.22 Montaje del COSPEC sobre una aeronave para medición del flujo de SO<sub>2</sub> y vuelo realizado al Popocatepetl para medición del flujo de SO<sub>2</sub>**

Desde 1995 se realizan muestreos sistemáticos de los manantiales localizados en las faldas del volcán Popocatepetl, los cuales son analizados en el Laboratorio de Química Analítica del Instituto de Geofísica de la UNAM. De igual forma, las cenizas y material piroclástico emitido por el volcán son analizados en el mismo Instituto con el objeto de encontrar cualquier cambio significativo en su composición química. La concentración de sustancias como flúor, cloro, boro, y la relación entre ellas se ha asociado a diversos grados de contribución magmática. Esta información puede utilizarse para conocer si una erupción es de origen magmático o freático, o si existe aporte de nuevo material magmático al sistema volcánico.



**Figura 3.23 Toma de muestras de agua de manantiales en el volcán Popocatépetl**

### 3.5 MONITOREO VISUAL

Para la observación visual del volcán, desde 1995 se opera una cámara de video que muestra en forma continua la cara Norte del Popocatépetl (figuras 3.24 y 3.25). La cámara se encuentra ubicada aproximadamente a 11 km del volcán en el Cerro de Alzomoni en las faldas del volcán Iztaccíhuatl. La imagen de alta resolución obtenida se envía mediante un enlace de microondas (proporcionado por RTC, CEPROPIE) en forma continua al CENAPRED y permite confirmar visualmente, la ocurrencia de eventos volcánicos importantes, como son emisiones de ceniza, explosiones, fumarolas, flujos piroclásticos, así como determinar la dirección en que las emisiones son dirigidas y tener una estimación de su altura. Este sistema de vigilancia visual ha sido una herramienta indispensable para valorar la actividad externa del volcán día y noche, y correlacionarla con las demás señales de monitoreo.



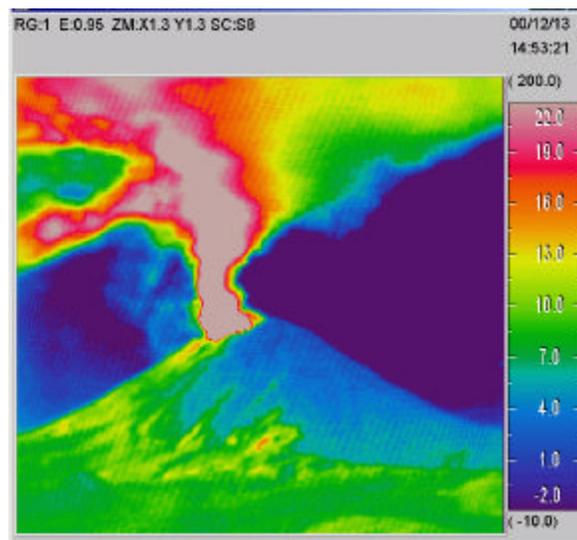
**Figura 3.24 Cámara de video-vigilancia del Popocatépetl y antena de microondas para transmisión**

En enero de 2001 este sistema de video-vigilancia se fortaleció con la instalación de una cámara que permite ser controlada a distancia desde el CENAPRED. A través de un enlace digital bidireccional se pueden realizar acercamientos y movimientos de la cámara. Por las características de la cámara también permite observar al volcán durante las noches. La imagen de video del volcán se recibe en un monitor y es almacenada mediante una videograbadora VHS y una videograbadora de tiempo lapsado las 24 horas. Posteriormente el video es revisado y se realiza un respaldo de los eventos importantes del volcán. Adicionalmente se realiza cada minuto una captura de la imagen y se presenta en la página Web del volcán en dos formatos: uno de alta resolución (640 x 480 píxeles) y uno de baja resolución (512 x 384 píxeles)



**Figura 3.25** Imágenes obtenidas con la cámara de video-vigilancia

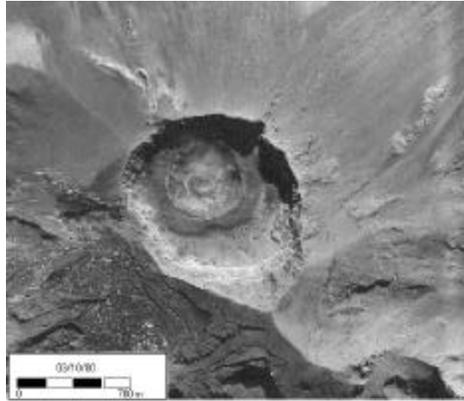
Para estudiar las características térmicas del edificio volcánico, la fumarola y columna de ceniza durante eventos eruptivos importantes, el Instituto de Geofísica de la UNAM y el CENAPRED, operan una cámara térmica instalada en la estación de Altzomoni. Esta cámara infrarroja especial captura imágenes térmicas que muestran la temperatura del flanco Norte del volcán y sus productos (figura 3.26). La cámara es controlada en forma remota desde el CENAPRED y sus imágenes son transmitidas a través de un enlace de alta velocidad proporcionado por TELMEX. De esta manera es posible observar y estudiar el volcán térmicamente a cualquier hora del día, inclusive de noche y comparar las imágenes simultáneamente con las obtenidas con la cámara de video instalada en el mismo sitio.



**Figura 3.26** Ejemplo de una imagen térmica de la actividad del 13 de diciembre del 2000

### 3.6 MONITOREO FOTOGRAMÉTRICO

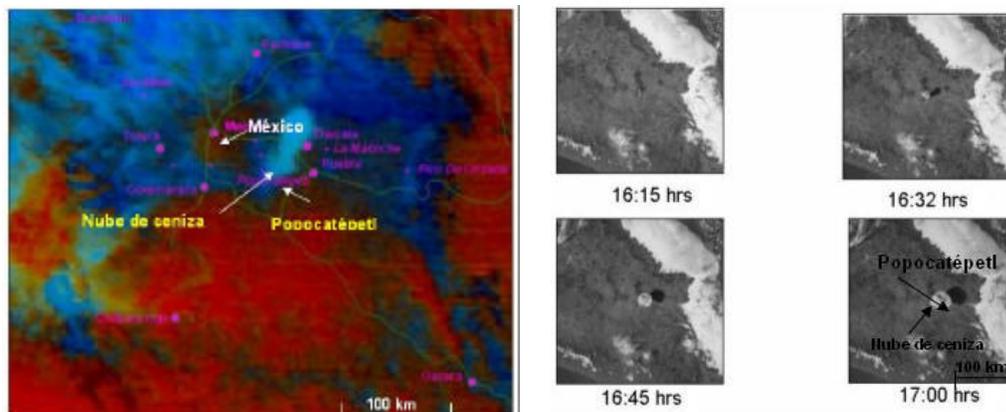
También, como parte importante, se cuenta con el apoyo de fotografías aéreas del volcán (figura 3.27) tomadas por la Dirección General de Carreteras Federales de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, que permiten hacer estudios de fotogrametría para observar la formación y volumen estimado de domos de lava en el interior del cráter. Asimismo permiten observar las condiciones morfológicas del volcán, que incluyen entre otros cambios en las laderas del volcán, restos de flujos, derrumbes y otros cambios morfológicos del volcán. Esta información, junto con la generada de los diferentes métodos de monitoreo implementados en el volcán Popocatepetl permiten conocer más sobre su comportamiento y dinámica de su actividad.



**Figura 3.27** Fotografía aérea tomada por la D.G.C.F., SCT

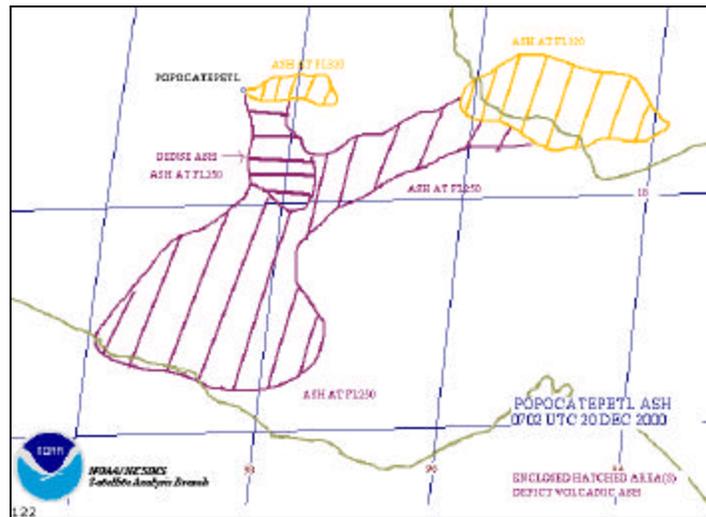
### 3.7 MONITOREO SATELITAL

Para dar seguimiento a las emisiones del volcán, se tienen disponibles a través de Internet, una serie de imágenes ya procesadas de diferentes satélites, que ha permitido, en la mayoría de las explosiones y exhalaciones dar seguimiento a las emisiones de ceniza (figura 3.28). Entre éstas, se encuentran disponibles las imágenes de los satélites geoestacionarios NOAA GOES 8 y GOES 10 procesadas en la Universidad de Hawai, las cuales son actualizadas cada 15 minutos. Esto permite una observación casi en tiempo real de puntos calientes y el movimiento de las nubes cuando las condiciones atmosféricas así lo permiten.



**Figura 3.28** Ejemplos de imágenes de Satélite GOES

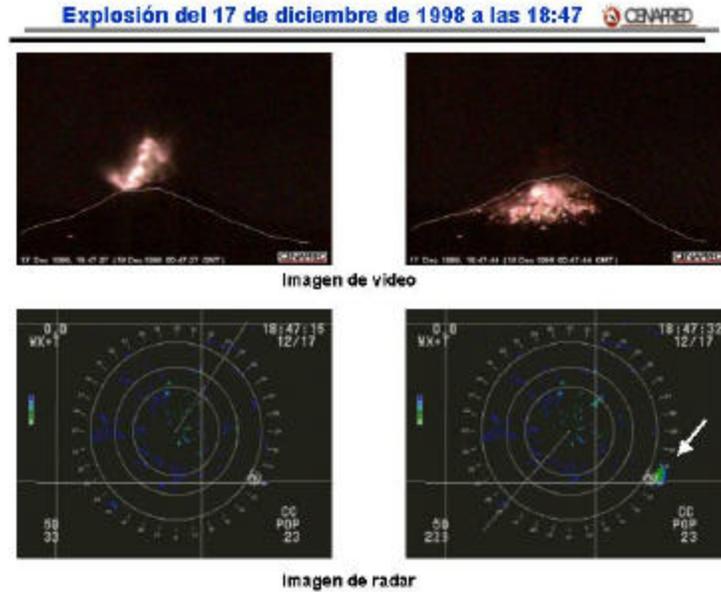
En forma complementaria a las imágenes de los satélites mencionados, se utilizan también imágenes satelitales de alta resolución, procesadas e interpretadas por el Centro Asesor de Cenizas Volcánicas de Washington (VAAC) que dan avisos y alertamientos sobre nubes volcánicas a la aeronavegación dentro del espacio aéreo en donde se encuentra el Popocatepetl (figura 3.29). Esta información se encuentra disponible a través de su página de Internet.



**Figura 3.29 Ejemplo de la dispersión de una nube de ceniza del Popocatepetl, proporcionada por el VAAC de Washington**

Para la vigilancia y seguimiento de cenizas volcánicas, se cuenta con el apoyo de personal de las Unidades Municipales de Protección Civil localizadas en poblaciones cercanas al volcán, como es el caso de la ciudad de Amecameca y también de destacamentos militares ubicados en la zona, los cuales, ante la ocurrencia de eventos del volcán y mediante radios o algún otro medio de comunicación, ponen al tanto al personal técnico y científico de guardia sobre lo que se percibe en las proximidades del volcán. Esta comunicación es fundamental dado que las condiciones meteorológicas del volcán en numerosas ocasiones y en determinadas épocas del año no permiten tener la imagen del volcán debido a la nubosidad.

Hasta noviembre de 2000 el CENAPRED contó con un radar Doppler ubicado en sus instalaciones que permitía detectar emisiones de ceniza o material expulsado por el volcán aún cuando no se tuviera confirmación visual. Dicho radar fue prestado por el Servicio Geológico Norteamericano (USGS) y se instaló en 1997. La mayoría de las veces que ocurrieron exhalaciones con expulsión de material sólido o cenizas abundantes fue posible detectar estas emisiones, convirtiéndose así en una importante herramienta para el alertamiento a las autoridades de aeronavegación (figura 3.30). Desafortunadamente el equipo sufrió un daño irreparable y debido a su alto costo no pudo ser reemplazado.



**Figura 3.30** Imagen de radar (imágenes inferiores) obtenida durante una explosión del Popocatepetl (imágenes superiores)

### 3.8 SENSOR INFRASÓNICO Y TÉRMICO

A finales del mes de septiembre de 2003 se instalaron 2 nuevos dispositivos de monitoreo conjuntamente con el Instituto de Vulcanología y Planetología de la Universidad de Hawai y el Instituto de Geofísica de la UNAM. El primer dispositivo es un sensor infrasónico (micrófono) y el segundo un sensor térmico. Ambos quedaron instalados en la estación de Tlamacas (PPM) ubicada al costado Norte del volcán y sus señales son enviadas al Puesto Central de Registro a través de un enlace de telemetría analógica.



**Figura 3.31** Sensor infrasónico instalado en el volcán Popocatepetl

El empleo de sensores infrasónicos en el monitoreo de volcanes permite diferenciar la sismicidad interna del volcán con la sismicidad asociada a la salida de gases. Con ellos, las señales de degasificación pueden ser mejor entendidas y también puede estimarse el tamaño de las explosiones, así como interpretar la energía sísmo-acústica (J.B. Johnson et al). Estos sensores infrasónicos proveen al sistema de monitoreo de una nueva

herramienta tanto para el análisis científico de la actividad volcánica como también una forma de evaluar el riesgo del volcán. Un sensor infrasónico detecta los cambios de presión provocados por una onda de sonidos de baja frecuencia, debajo de 20 Hz. Una de sus ventajas es que en la atmósfera se propagan únicamente ondas de compresión, por lo que es más sencillo analizarlas que las ondas sísmicas que además atraviesan la estructura del volcán y el suelo.

Para complementar la instrumentación y en particular, para detectar explosiones o emisiones del volcán, se instaló un radiómetro que permite detectar cambios en la temperatura de las emisiones de gas (figura 3.32). Este nuevo dispositivo contribuirá también a mejorar el conocimiento del volcán.



**Figura 3.32** Sensor térmico o radiómetro instalado en el volcán Popocatepetl

## IV PUESTO CENTRAL DE REGISTRO

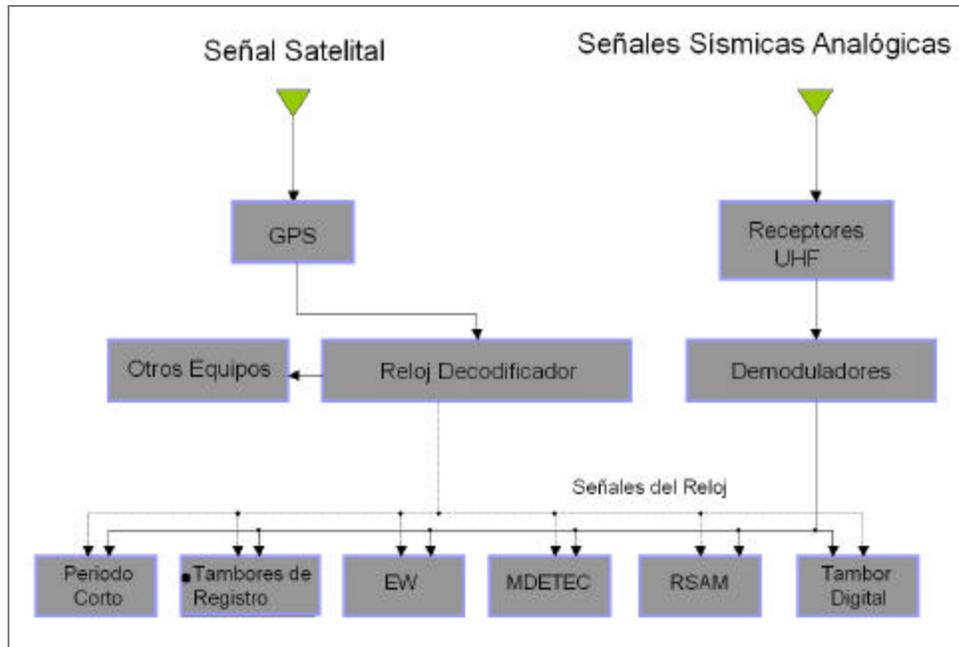
El Puesto Central de Registro (PCR), ubicado en las instalaciones del Centro Nacional de Prevención de Desastres, aproximadamente a 60 km del volcán Popocatepetl, es el lugar de recepción, adquisición, procesamiento y resguardo de las señales de telemetría de todas las estaciones remotas de medición y demás datos que conforman el sistema de monitoreo del mismo (figura 4.1). El PCR opera las 24 horas del día los 365 días del año recibiendo y procesando la mayoría de los datos en tiempo real. Como se describió en el capítulo anterior, el sistema de comunicaciones está compuesto por sistemas de telemetría, tanto digitales como analógicos, un enlace de microondas y un enlace digital dedicado tipo E1. A través de estas vías de comunicación se reciben los datos de sismicidad, deformación, imagen de video y la detección de flujos.



**Figura 4.1 Puesto Central de Registro del Sistema de Monitoreo del volcán Popocatepetl**

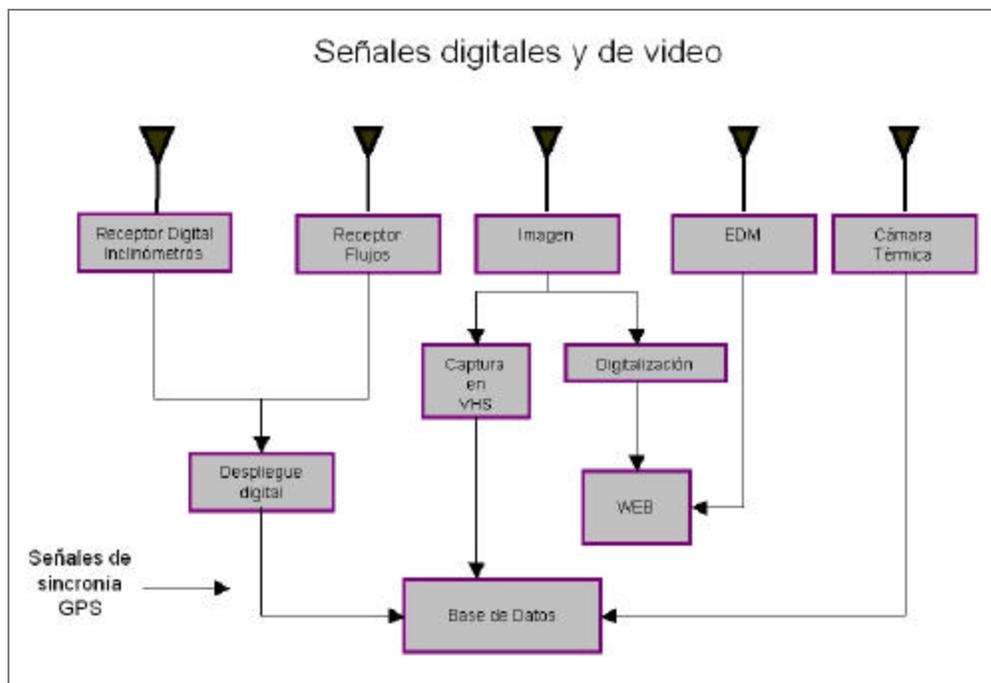
El Puesto Central de registro consta esencialmente de los siguientes componentes: un banco de radios receptores, equipos acondicionadores de señales, equipos para despliegue, visualización y graficación de los datos y una red de computadoras interconectadas para el procesamiento, análisis y alertamiento. Con esta infraestructura se reciben y procesan más de 60 señales de los diferentes sensores instalados en puntos estratégicos del volcán las cuales son desplegadas y procesadas en tiempo real.

La información de las estaciones sísmicas, cuya transmisión es analógica, se recibe a través de radios receptores UHF. Estas señales son demoduladas y acondicionadas con filtros paso baja, y graficadas en papel a través de registradores sísmicos tipo tambor. Al mismo tiempo las señales son procesadas por diferentes sistemas de adquisición donde son digitalizadas y procesadas para distintos propósitos para luego ser almacenadas (figura 4.2). Dicho sistema cuenta con una referencia de tiempo común para todas las señales, basado en un receptor GPS y un decodificador que proporciona la sincronización de todas las señales de monitoreo.



**Figura 4.2 Recepción analógica del sistema de monitoreo volcánico**

Las señales digitales que provienen del volcán son procesadas directamente por sus equipos receptores, que las despliegan y almacenan (figura 4.2).



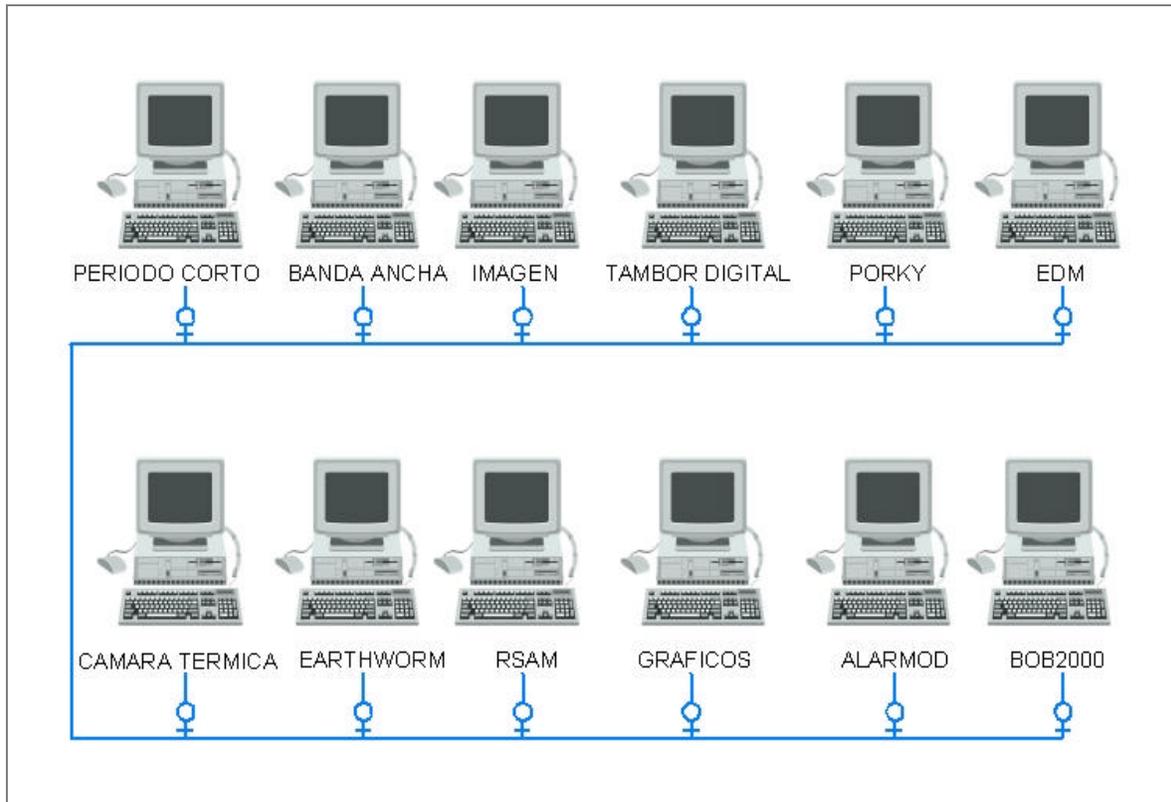
**Figura 4.3 Recepción y procesamiento digital de señales**

Desde 1994 el volcán cuenta con una base de datos integrada por: imágenes de video, sismogramas, CD's con información sísmica, información geodésica y visual, etc. Se pretende que ésta pueda próximamente ser consultada en tiempo real a través de Internet para mejorar considerablemente el tiempo de respuesta ante la presencia de un evento y consecuentemente la oportuna toma de decisiones por parte de las autoridades correspondientes.

#### 4.1 RED DE COMPUTADORAS PARA EL MONITOREO Y PROCESAMIENTO

El Puesto Central de Registro tiene 12 computadoras dedicadas exclusivamente a la recepción, procesamiento, análisis, visualización y almacenamiento de las señales provenientes del monitoreo del volcán (figura 4.4). Dichas señales son recibidas y analizadas en forma continua las 24 hrs. del día los 365 días del año.

A continuación se describe brevemente el funcionamiento de cada una de las computadoras que componen la red de Monitoreo y Alertamiento del Volcán Popocatepetl.



**Figura 4.4 Diagrama de la red de cómputo en el PCR**

#### 4.1.1 PERIODO CORTO

El equipo de registro y procesamiento sísmico denominado **PERIODO CORTO** consta de un digitalizador externo dedicado al procesamiento de 12 señales analógicas provenientes de la red de monitoreo sísmico del volcán. Con esta computadora se realiza la visualización y almacenamiento de las señales a través de dos programas independientes. El primero de ellos, denominado SCREAM, sirve para la adquisición y monitoreo en tiempo real de las señales de los sismómetros (Seismometer Configuration, Real time Acquisition and Monitoring), figura 4.5. Esta aplicación es usada para descomprimir, visualizar, imprimir y almacenar todas las señales sísmicas. El segundo programa es una utilería del paquete PCSUDS, llamada SUDSMAN, cuyo propósito es almacenar los datos sísmicos en un formato especial que es compatible con las diferentes aplicaciones de análisis y procesamiento que los investigadores del Centro y del Instituto de Geofísica emplean.

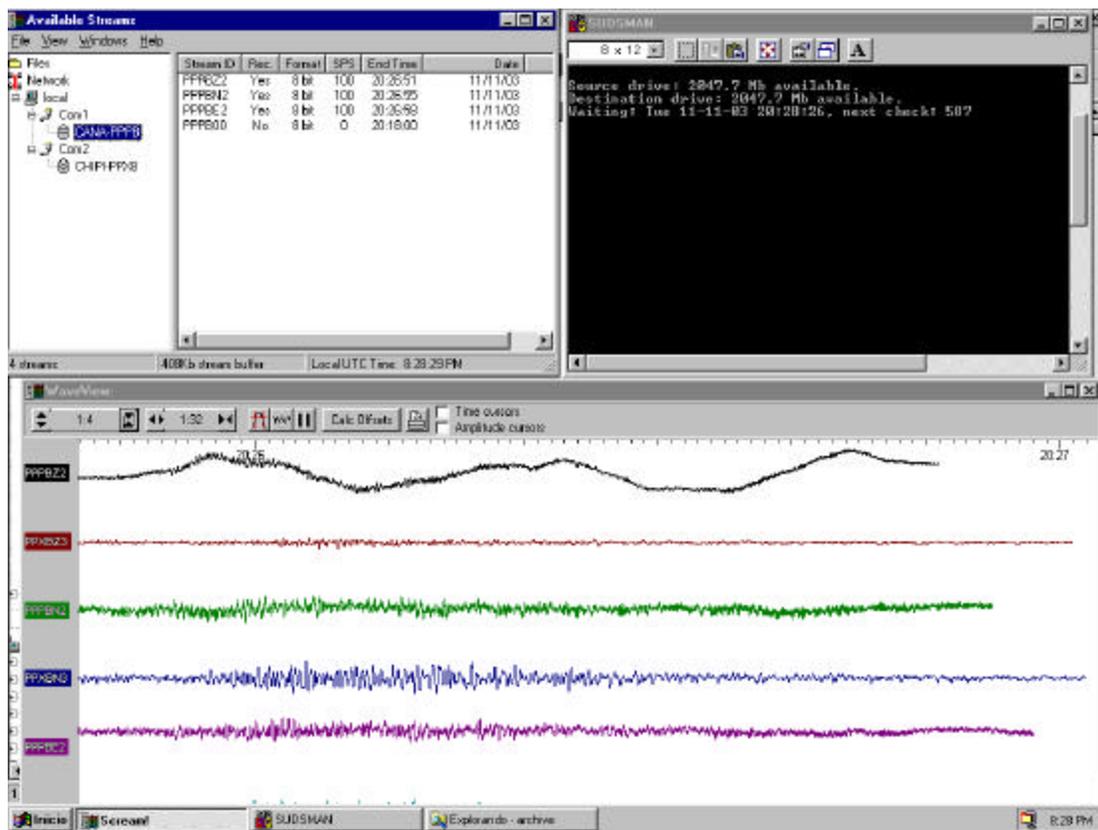


Figura 4.5 Aplicación SCREAM

#### 4.1.2 BANDA ANCHA

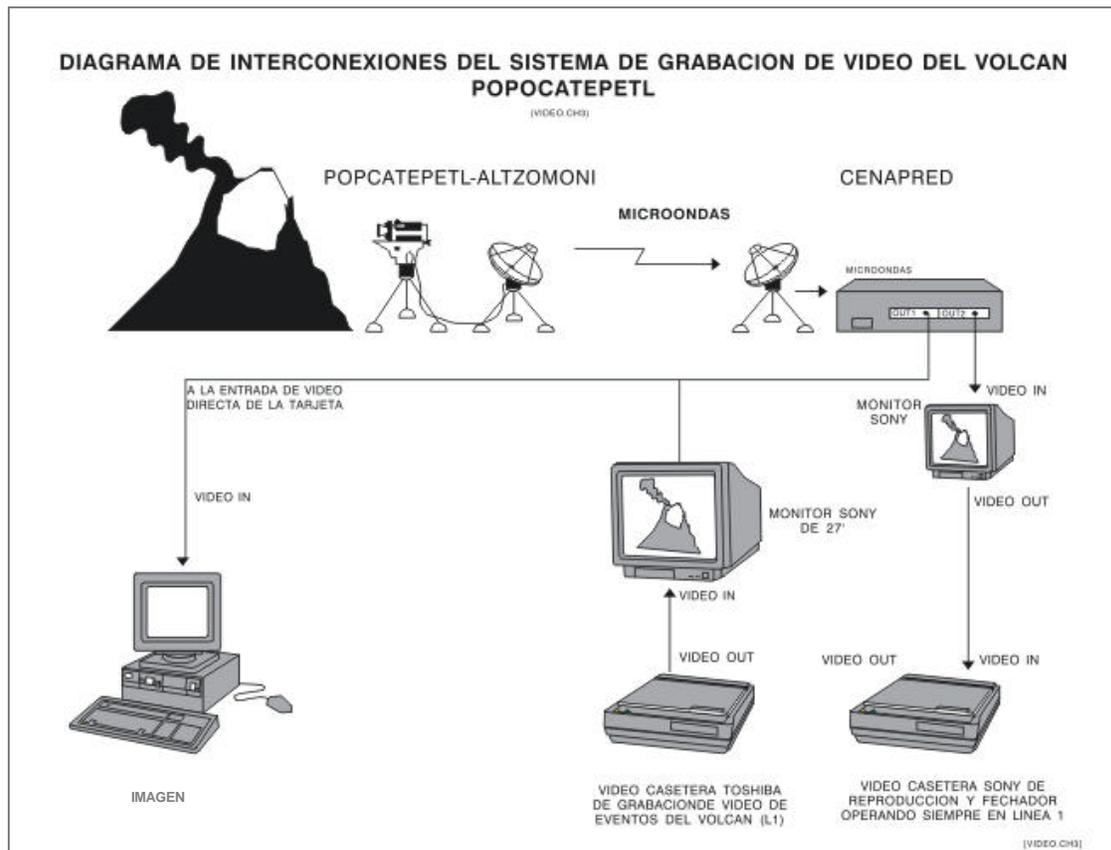
Este equipo, nombrado como **BANDA ANCHA**, adquiere la información sísmica proveniente de los sensores sísmicos triaxiales del mismo nombre, llamados así por el rango de operación con el cual trabajan (30 seg. a 50 Hz). Los programas para visualizar, imprimir y almacenar esta información son los mismos que utiliza **PERIODO CORTO** (SCREAM y SUDSMAN).

#### 4.1.3 IMAGEN

Para la observación visual del volcán Popocatepetl, desde 1995 se opera una cámara de video que muestra en forma continua la cara norte del mismo. Hacia finales de 1997 se instaló una computadora dedicada para la adquisición y almacenamiento de dicha imagen llamada **IMAGEN**. Esta es capturada aproximadamente cada 7 segundos con la finalidad de contar con un acervo digital de los eventos más importantes ocurridos (figura 4.6).

Además, esta aplicación permite mostrar a través de Internet una imagen que es actualizada minuto a minuto misma que puede ser consultada por autoridades, investigadores y público en general a través de la página del CENAPRED: <http://www.cenapred.unam.mx>.

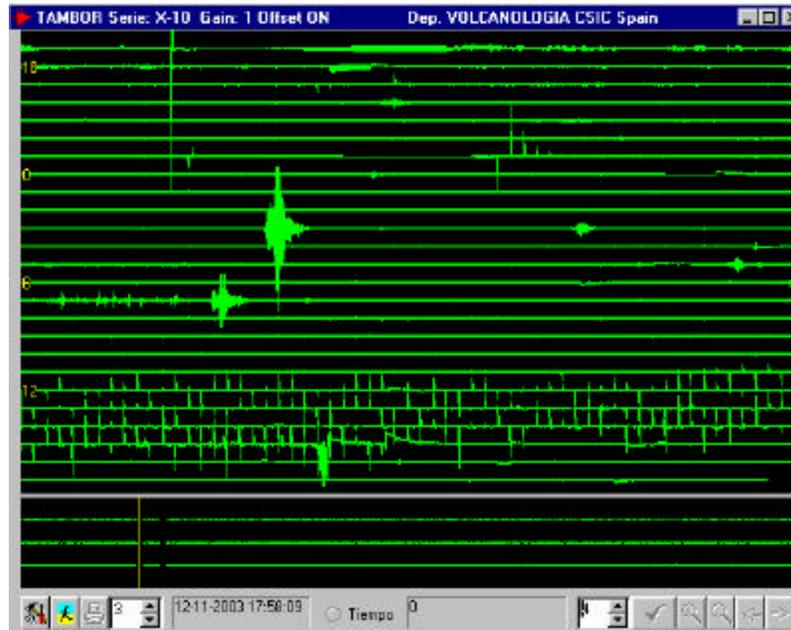
Adicionalmente se realiza el almacenamiento y visualización continuo en el laboratorio de monitoreo, a través de una videograbadora y un monitor de despliegue.



**Figura 4.6 Esquema para la captura de imágenes del volcán**

#### 4.1.4 TAMBOR DIGITAL

El sistema **TAMBOR DIGITAL** fue donado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas perteneciente al Museo Nacional de Ciencias Naturales de España en 1998. Este sistema de adquisición de señales sísmicas tiene como objetivo visualizar de forma digital las señales sísmicas en tiempo real y graficar las trazas acumuladas en 24 horas.



*Figura 4.7 Pantalla del TAMBOR DIGITAL*

#### 4.1.5 PORKY

La computadora designada como **PORKY** está dedicada a la adquisición, visualización y almacenamiento de los datos digitales provenientes de los inclinómetros y de los sensores de flujos. El programa utilizado fue donado por el Servicio Geológico de los EE.UU. (USGS). **PORKY** recibe datos a través de los puertos serie de la computadora y los despliega automáticamente en la pantalla. Los datos corresponden a tres señales: TILT (datos de inclinómetros), AFM (sensores acústicos de flujos) y SSAM (señales sísmicas espectrales).

Los datos recibidos en TILT son integrados por el número de estación, canal de muestreo y valor del dato, figura 4.8. Los canales de muestreo de este sistema pertenecen a los ejes X y Y del inclinómetro y el voltaje de la batería en la estación. Los datos de AFM proporcionan el número de estación, datos del geófono en alta y baja frecuencia, valores de batería y datos del pluviómetro. Este programa también permite mediante un algoritmo determinar alarmas con base en los valores registrados.

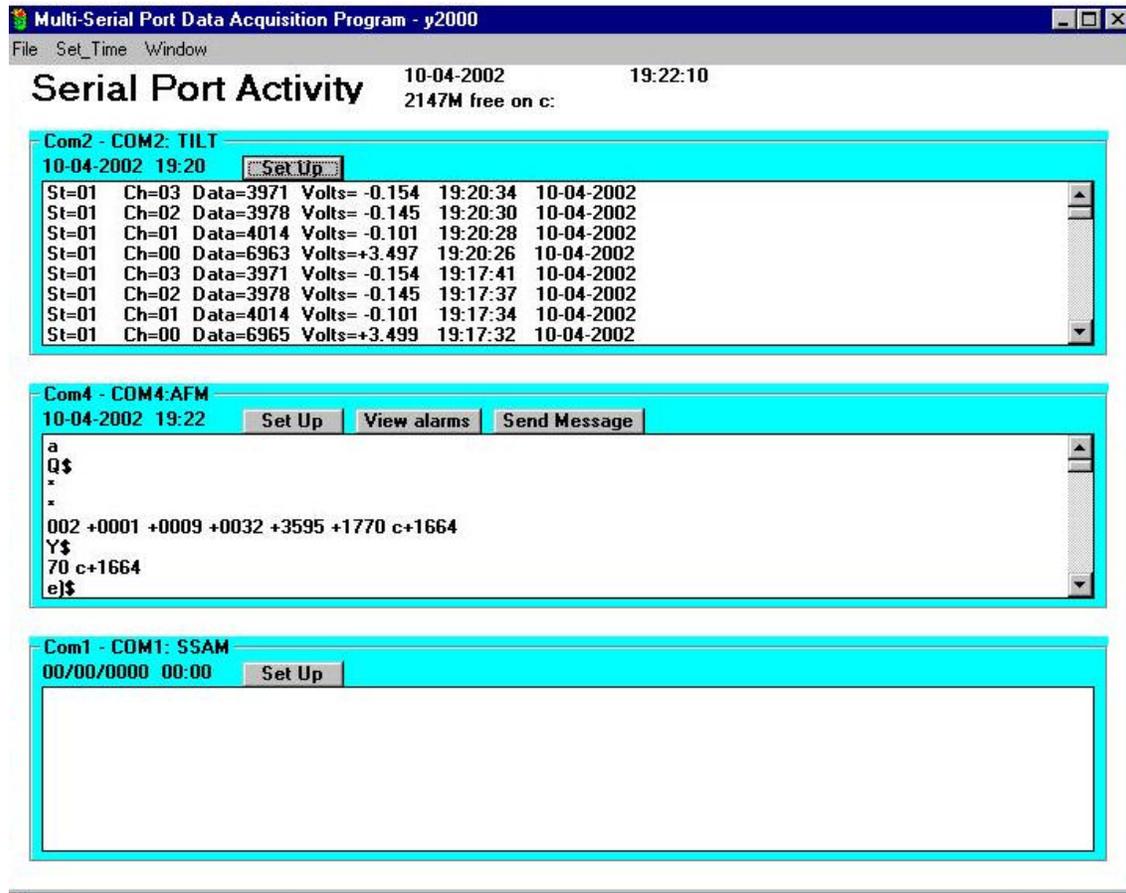


Figura 4.8 Programa PORKY desplegando datos de TILT, AFM y SSAM

#### 4.1.6 EARTHWORM

Es el sistema central del monitoreo del volcán Popocatepetl ya que es el equipo que integra la mayoría de las señales. La información que recibe es registrada, procesada y desplegada en forma continua. **EARTHWORM**, sistema implementado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), integra todas las señales sísmicas provenientes del volcán Popocatepetl y también del volcán Citlaltépetl, las señales de los inclinómetros y las señales de las estaciones detectoras de flujo del volcán Popocatepetl, entre otras.

El sistema consta de varios programas independientes llamados módulos y un programa principal ó maestro que se encarga del control de todos los módulos. Cada uno de estos módulos ejecuta en forma independiente una tarea específica, de manera que pueden crearse o quitarse módulos sin que se afecte el funcionamiento general del sistema. **EARTHWORM**, actualmente está trabajando sobre una plataforma de Windows XP, y está instalado en 2 servidores conectados en red. El primero de ellos se encarga de la adquisición de datos, mientras que el segundo es un espejo del primero y realiza las funciones de respaldo y distribución de la información.

**EARTHWORM** posee una interfaz gráfica de gran utilidad que muestra las trazas de las señales que se están adquiriendo en tiempo real y los espectros en frecuencia de las señales sísmicas, permitiendo así la fácil identificación de los tipos de eventos generados por el volcán (figura 4.9). Este tipo de análisis en tiempo real permite el envío automático de mensajes a radiocalizadores cuando la actividad del volcán rebasa ciertos umbrales predefinidos, alertando oportunamente a los investigadores y funcionarios.

El sistema ha operado desde mediados del año 2000 y desde entonces ha sido una herramienta de gran utilidad para el monitoreo del volcán Popocatepetl. La eficiencia y versatilidad que este sistema ha mostrado podría convertir a **EARTHWORM** en un estándar para la adquisición y el procesamiento de datos de redes de observación sísmica y de monitoreo de volcanes en general. De hecho se está utilizando ya para el volcán de Colima, el Pico de Orizaba y pronto también para el Chichonal y Tacaná.

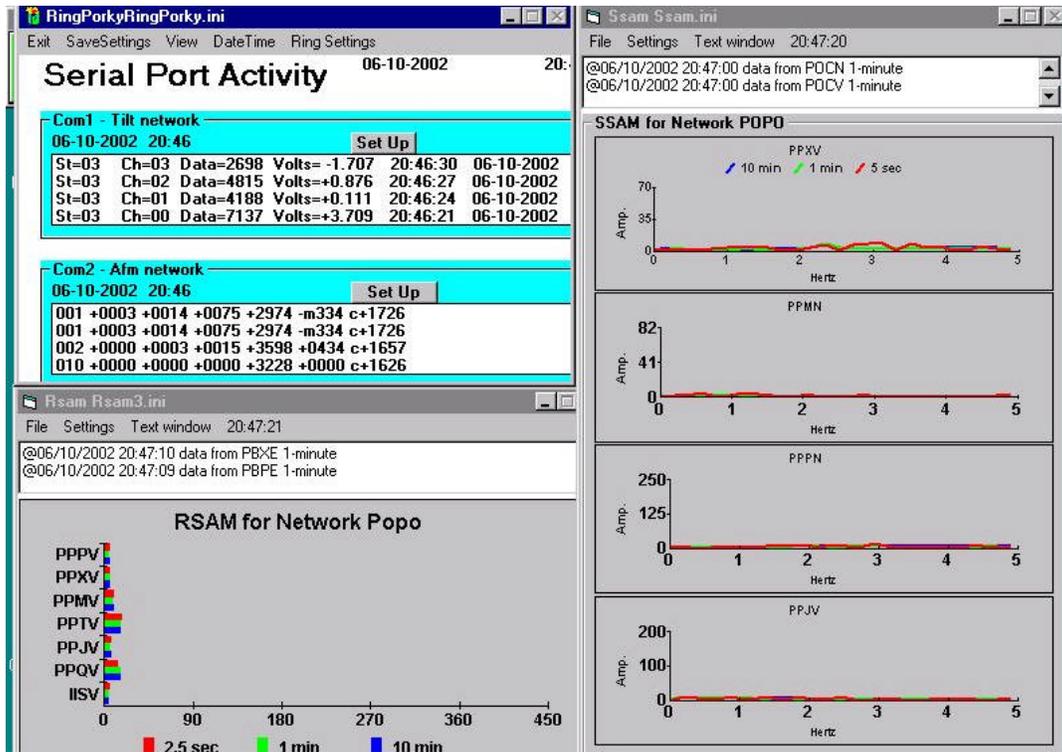


Figura 4.9 Programa EARTHWORM. Vista de tres módulos activos del sistema.

#### 4.1.7 RSAM

Un parámetro para el análisis y alertamiento en el sistema de monitoreo del volcán es el que se deriva de la medición en tiempo real de las amplitudes de las señales sísmicas (RSAM). Esta medición es desplegada en un monitor de una computadora, llamada **RSAM**, que indica los promedios del nivel de sismicidad registrado en cada estación. El despliegue de estas mediciones es mediante diagramas de barras como se muestra en la figura 4.10. A cada señal se le asocian 3 barras de distinto color: la superior indica el promedio de la amplitud de la sismicidad en un intervalo de 10 segundos, la intermedia el promedio en un minuto y la barra inferior el promedio calculado en 10 minutos. Este sistema permite tener una visión global y de forma continua de la actividad sísmica en conjunto.

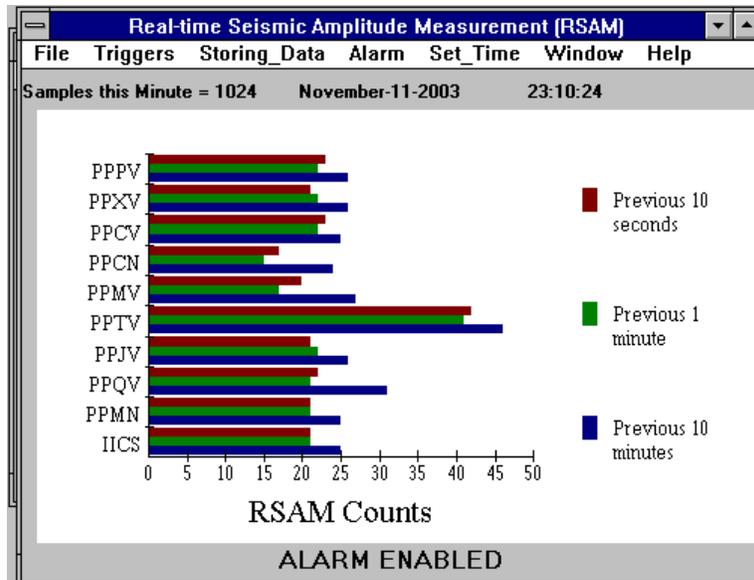


Figura 4.10 Pantalla principal de RSAM

#### 4.1.8 GRÁFICOS

Donado al CENAPRED también por el USGS, el sistema **GRÁFICOS** permite la observación visual de los datos provenientes de las estaciones inclinométricas y de flujos. La visualización de estos es en tiempo real por lo que permite interpretar de inmediato la actividad del volcán. El sistema funciona a través de dos programas comerciales denominados OmniServer y OPCSystems. El OmniServer es el encargado de recibir los datos mediante el puerto serial y además contiene la configuración de las estaciones y canales; el OPCSystems proporciona la interfaz gráfica mediante la cual es posible visualizar los datos (figura 4.11).

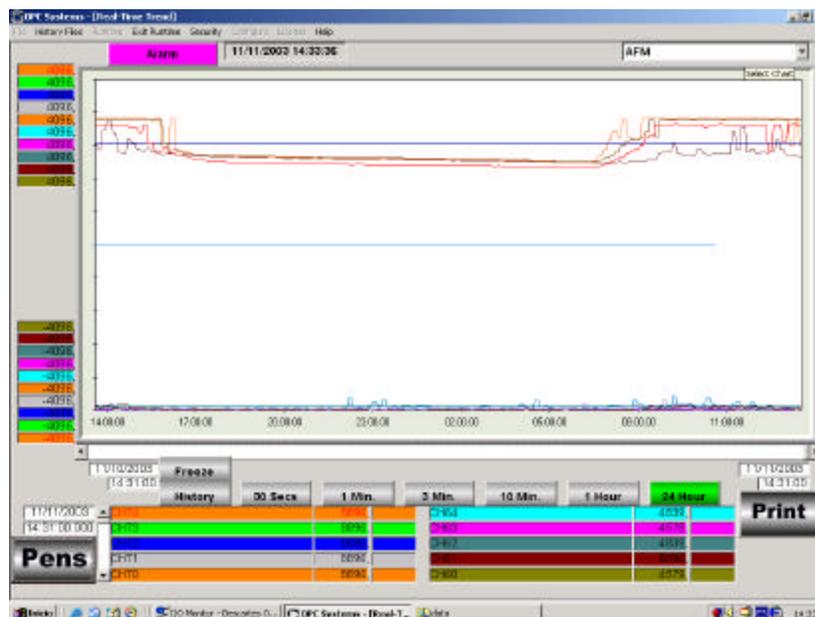
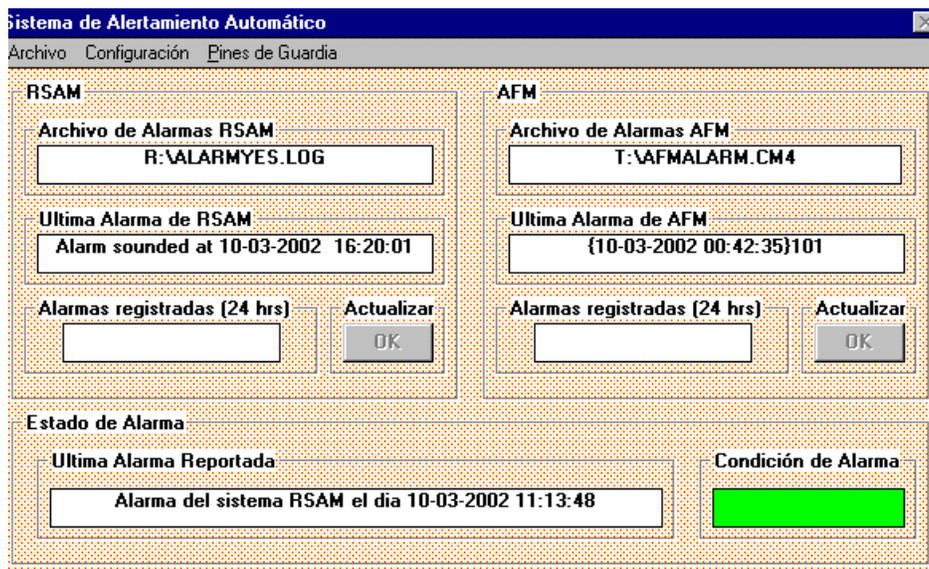


Figura 4.11 Pantalla principal de OPCSystems

#### 4.1.9 ALARMOD

En un sistema de monitoreo volcánico en tiempo real es indispensable contar con dispositivos que permitan de forma automática alertar a los encargados de vigilar la actividad del volcán cuando éste rebasa ciertos niveles preestablecidos. En el caso específico del volcán Popocatepetl, se requiere tener una estrecha y continua vigilancia durante las 24 horas del día. Para satisfacer esta necesidad, el sistema de monitoreo cuenta con un programa diseñado en CENAPRED para activar una alarma acústica y al mismo tiempo activar el envío de mensajes automáticos vía radiolocalizador al personal de guardia permanente. El nombre de esta aplicación y del equipo que lo realiza es **ALARMOD**. Este programa revisa constantemente ciertos parámetros de los equipos RSAM y AFM; si éstos reportan un cambio importante en la actividad del volcán, el programa envía el mensaje informando qué sistema activó la alarma y la fecha y hora de la ocurrencia del evento. La importancia de este sistema radica en la rapidez con la que el personal responsable del monitoreo es alertado y avisado, usualmente en menos de un minuto.

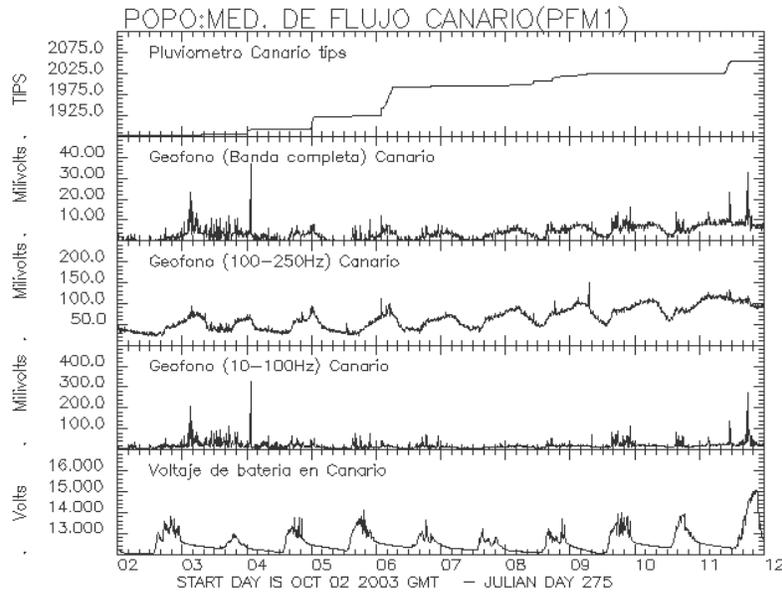


*Figura 4.12 Pantalla principal de ALARMOD*

#### 4.1.10 BOB2000

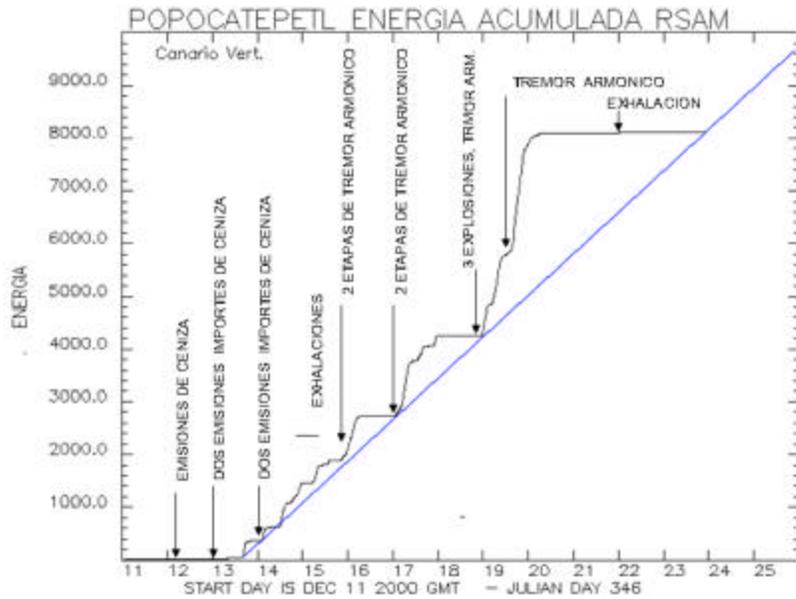
Para llevar a cabo el análisis y procesamiento de distintos datos relativos a la actividad del volcán se cuenta también con el sistema **BOB2000**, el cual alberga varias herramientas de análisis sísmico y de visualización. Destacan, las utilerías de PCSUDS para el análisis sísmico y un programa llamado **BOB**, desarrollado por T. Murray (1992b), que permite analizar los datos de las distintas estaciones de monitoreo.

En la figura 4.13 se muestra un ejemplo del tipo de gráficas que se obtienen a través del programa **BOB**. Los datos pertenecen a una estación de flujos llamada CANARIO (PPP), abarcando un periodo de 10 días. Muestran 5 trazas: la primera (de arriba abajo) corresponde al registro del pluviómetro instalado en dicha estación, la segunda traza corresponde al registro del geófono en la banda de 10Hz a los 250Hz, mientras que la tercera y cuarta corresponden al registro del geófono en dos rangos de 100Hz a 250Hz y el otro de 10Hz a 100Hz. La última traza muestra el comportamiento del voltaje en la batería que alimenta al equipo.



**Figura 4.13 Pantalla de BOB para la estación de flujos CANARIO (PFM1)**

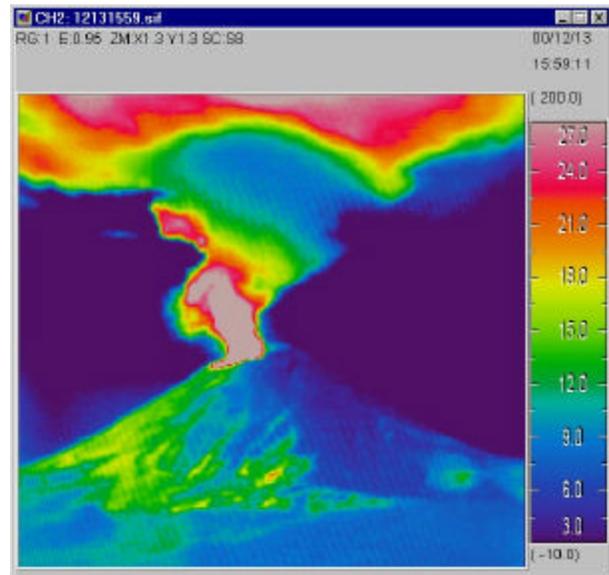
**BOB** permite escoger distintas señales sísmicas, de deformación, temperatura, voltaje de batería, energía sísmica, etc. y desplegarlos a diferentes escalas y escoger el intervalo de tiempo (horas, días, meses, años). La obtención de este gráfico y la consulta de las demás señales de la actividad del volcán, permiten a los responsables del monitoreo realizar las evaluaciones oportunas sobre la actividad del mismo, como fue el caso de la evaluación en la actividad del año 2000, a través del la evolución de la energía que presentaban el volcán se pudo estimar con anticipación la ocurrencia del evento explosivo ( figura 4.14).



**Figura 4.14 Comportamiento de energía del volcán (13-24 dic. 2000)**

#### 4.1.11 CÁMARA TÉRMICA

Con apoyo del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, se instaló en el Cerro de Alzomoni una cámara térmica infrarroja con la finalidad de apoyar el monitoreo del volcán. Esta cámara proporciona una imagen en la cual a través de una gama de colores se puede derivar la temperatura del edificio volcánico y de las fumarolas. La adquisición y procesamiento de la señal se lleva a cabo con una computadora llamada **CÁMARA TÉRMICA** instalada en la estación de monitoreo.



*Figura 4.15 Cámara térmica instalada en Alzomoni e imagen térmica de una exhalación*

#### 4.1.12 EDM TEMOHUANI

A partir de noviembre de 1999 se instaló en el Popocatepetl un sistema de adquisición remota para un distanciómetro electrónico EDM en tiempo casi-real que, por medio de un rayo láser, permite medir con gran precisión la distancia entre un punto de referencia ubicado al pie del cono volcánico y varios reflectores instalados en las partes altas del volcán. Este desarrollo involucra un sistema electromecánico controlado por una computadora, instalado en la estación TLAMACAS que permite la medición automatizada de todas las líneas que constituyen la red del flanco norte del volcán. Incluye un mecanismo capaz de dirigir el láser a una posición deseada y también puede buscarla por sí mismo a través de un algoritmo especialmente diseñado para ello. Los datos transmitidos son visualizados en el Puesto Centro de Registro gracias a un programa llamado **TEMOHUANI** desarrollado específicamente para este propósito.

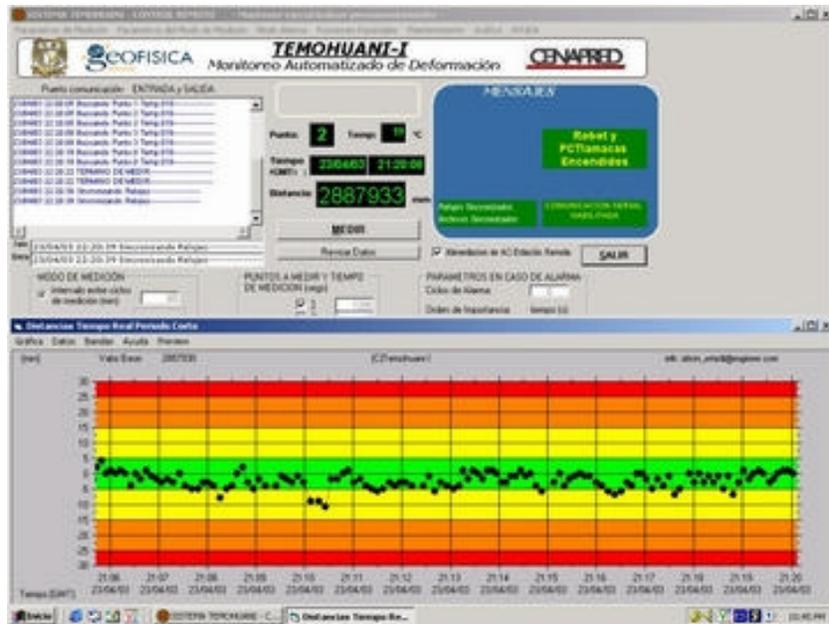
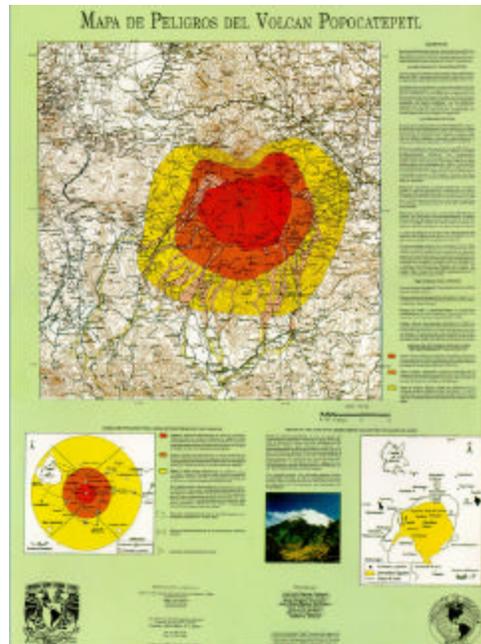


Figura 4.16 Sistema TEMOHUANI (EDM)

## V MECANISMOS DE COMUNICACIÓN, DIFUSIÓN Y ALERTAMIENTO

La mayoría de las erupciones vienen usualmente precedidas por cambios geofísicos y geoquímicos del volcán, cambios que pueden ser detectados con un sistema de monitoreo como el descrito. Sin embargo, una aspecto fundamental para que los alertamientos sean efectivos y el sistema de monitoreo cumpla su objetivo, es la implementación de mecanismos de comunicación y difusión de la información, tanto a las autoridades encargadas de la toma de decisiones, como a la población en general. Para ello se han elaborado procedimientos y mecanismos de coordinación entre los diferentes actores involucrados en el monitoreo del volcán, en la evaluación de su actividad, en la implementación de planes operativos, el manejo de crisis volcánicas y la difusión de la información. En particular estas actividades resultan relevantes para el volcán Popocatepetl en virtud de que cerca de 25 millones de habitantes viven en un radio de 100 km alrededor del volcán. Es así que el CENAPRED, a lo largo de casi ya 10 años de actividad del volcán, ha orientado sus esfuerzos, además de la instrumentación y vigilancia del volcán, al desarrollo de actividades de capacitación, difusión y el alertamiento.

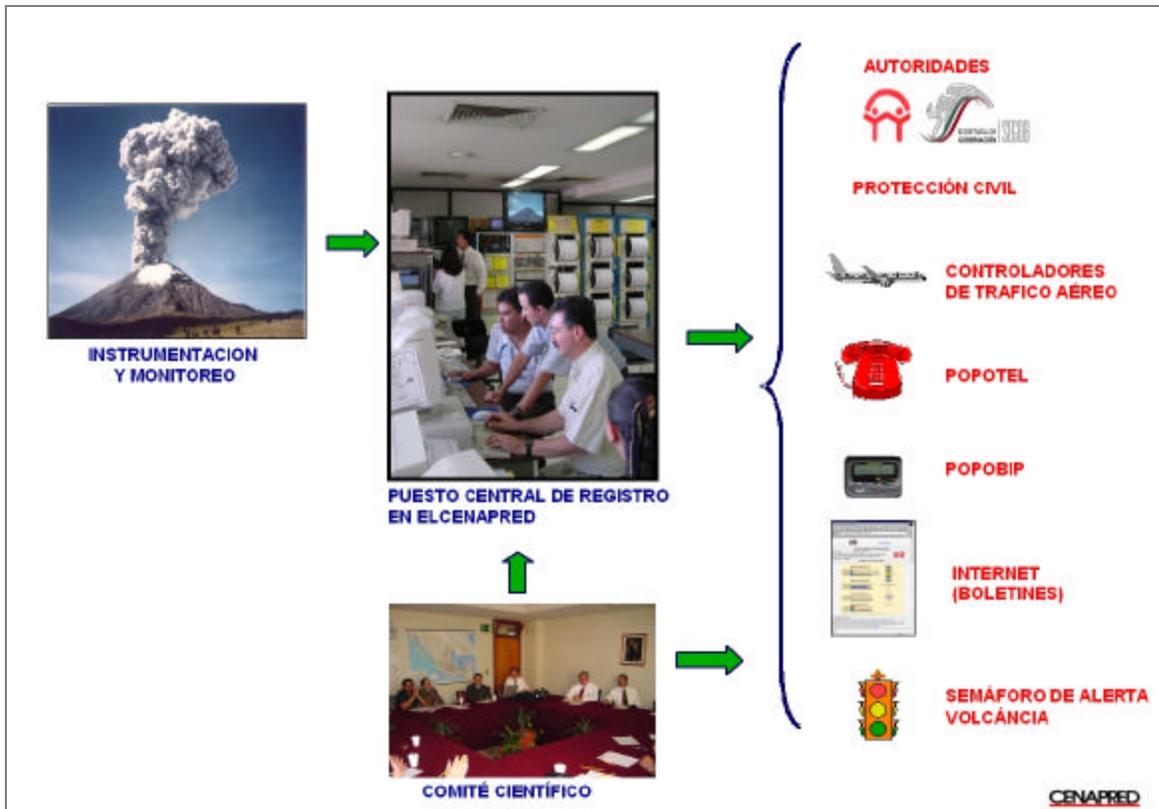
Uno de los primeros pasos y requisito esencial para la puesta en práctica de las acciones de protección civil, es contar con un diagnóstico de riesgos, es decir conocer las características del fenómeno perturbador y determinar la forma de como afectaría a las personas, la infraestructura y el entorno. Encaminado a cumplir este objetivo, investigadores del Instituto de Geofísica de la UNAM y algunos investigadores internacionales elaboraron el Mapa de Peligros del volcán Popocatepetl. Este mapa está basado en la información geológica disponible y considerando la extensión máxima de los depósitos de erupciones pasadas que se clasificaron en tres diferentes magnitudes (Macías et al., 1995) . Su objetivo es identificar los principales peligros volcánicos que amenazan a las poblaciones en los alrededores del Popocatepetl y su posible ocurrencia en el futuro. En una de las secciones del mapa se encuentran identificadas tres zonas correspondientes a diferentes niveles de peligro por flujos de materiales volcánicos y su probabilidad, asociada a erupciones grandes, medianas y pequeñas. Un segundo aspecto que cubre el mapa son las áreas probables de afectación por un derrumbe gigante y a flujos de gran extensión, y finalmente, las zonas de peligro por caída de materiales volcánicos.



**Figura 5.1 Mapa de Peligros del Volcán Popocatepetl**

El segundo paso consiste en detectar en forma oportuna señales indicativas del incremento de la actividad del volcán y de ser posible el riesgo asociado. Esto se logra con un sistema de monitoreo y vigilancia como el descrito en los capítulos anteriores y una adecuada interpretación de la información.

Un siguiente paso se refiere a la respuesta que deben dar las autoridades y la sociedad ante una posible crisis volcánica. Por ello es necesario definir primero, mecanismos de comunicación y alertamiento que permitan a las autoridades poner en práctica los planes operativos previamente establecidos y segundo, informar a la población sobre las condiciones del volcán de manera clara y sencilla, así como promover su preparación para que actúen eficazmente en caso de una emergencia.



**Figura 5.2 Esquema de los mecanismos de comunicación, difusión y alertamiento implementados para el volcán Popocatepetl.**

Como parte del sistema de monitoreo del volcán Popocatepetl se tiene un sistema de alertamiento automático el cual se acciona cada vez que la actividad sísmica rebasa un umbral establecido o se presenta una señal de detección de flujos. En estos casos el sistema activa una señal audible en el Puesto Central de Registro y también envía en forma automática un breve mensaje al radiolocalizador que tiene el personal de guardia en turno, indicándole que se presentó un evento volcánico. Al recibir este mensaje la persona de guardia recibirá la señal, ya sea en forma audible, si se encuentra en el CENAPRED, o a través de un radiolocalizador. Inmediatamente procederá a evaluar la situación basándose en las señales de los equipos de registro del CENAPRED o analizando la información vía Internet, en caso de estar fuera del centro. De ser necesario consultará con la persona de guardia suplente o con algún miembro del Comité Científico. Dependiendo del evento y su importancia decidirá si es necesario preparar y enviar un informe especial a las autoridades de Protección Civil y de la Secretaría de Gobernación. Cuando el evento produce alguna emisión de ceniza, se reporta de inmediato vía telefónica al SENEAM (Servicio a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano), para que se tomen las medidas correspondientes, en virtud de que la ceniza volcánica es un factor

de alto riesgo para la aeronavegación <sup>1</sup>. Además de alertar sobre el evento se indica, cuando es posible, la altura de la columna de ceniza y la dirección hacia donde se desplaza.



**Figura 5.3 Aspectos de los mecanismos de comunicación y coordinación de acciones: detección, notificación de la emergencia, toma de decisiones, puesta en marcha de acciones de protección a la población**

De manera permanente el personal responsable del monitoreo en CENAPRED, con el apoyo de especialistas de la UNAM, realiza una evaluación de la actividad del volcán. En caso de detectar un incremento importante en la actividad del volcán, el CENAPRED convoca a una reunión del Comité Científico Asesor y se informa a las autoridades de Protección Civil así como a los responsables de los planes operativos. En caso de actividad mayor, como la registrada en diciembre del 2000, se instala por parte de la Secretaría de Gobernación una mesa de mando en la que participan altos funcionarios de los gobiernos federales y estatales para la toma de decisiones basadas en la recomendaciones de los especialistas.

## 5.1 DIFUSIÓN DE LA INFORMACIÓN

Para la difusión de la información relacionada con la actividad del volcán se han implementado una serie de mecanismos, que permiten a autoridades y población conocer en forma oportuna el estado y el nivel de riesgo del volcán. A continuación se describen algunas de estas acciones:

<sup>1</sup> Las cenizas volcánicas del Popocatepetl y sus efectos para la aeronavegación e infraestructura aeroportuaria. Centro Nacional de Prevención de Desastres, SEGOB, Instituto de Geofísica, UNAM. 2001

### 5.2.1 Semáforo de Alerta Volcánica

La necesidad de contar con una forma sencilla y clara de comunicar el estado de actividad del volcán y sus peligros, motivó a diseñar un código de alertamiento al que se le ha denominado Semáforo de Alerta Volcánica. Este mecanismo presenta dos componentes. La primera está dirigida a las autoridades y se refiere a los fenómenos o escenarios posibles correspondientes a los diferentes niveles esperados de actividad del volcán y al correspondiente nivel de atención que deben mantener las autoridades de protección civil. La segunda componente se refiere al nivel de alerta o atención de la población (De la Cruz-Reyna S, 1995).

El semáforo emplea tres colores (verde, amarillo y rojo). El color verde corresponde a niveles normales de actividad del volcán y tiene dos fases. El color amarillo representa una condición de alerta y se compone de tres fases. Tanto el color verde como el amarillo corresponden a las etapas de prevención, es decir, llevar a cabo acciones necesarias para estar preparado en caso de presentarse una actividad mayor del volcán. El semáforo en color rojo tiene dos fases y representa una condición de alarma. Una reciente modificación al semáforo fue el hecho de que, para mejorar la precisión en las decisiones de Protección Civil, los colores y las fases del semáforo debían demarcarse sobre regiones bien definidas de acuerdo con el mapa de peligros volcánicos. Es decir, diferentes regiones del área de riesgo pueden estar en diferentes colores y fases con base a los escenarios de riesgo definidos.

Los planes operativos, así como los manuales de procedimientos, toman como base justamente el nivel de alertamiento del semáforo de alerta volcánica, a fin de tomar las acciones correspondientes a la actividad del volcán.

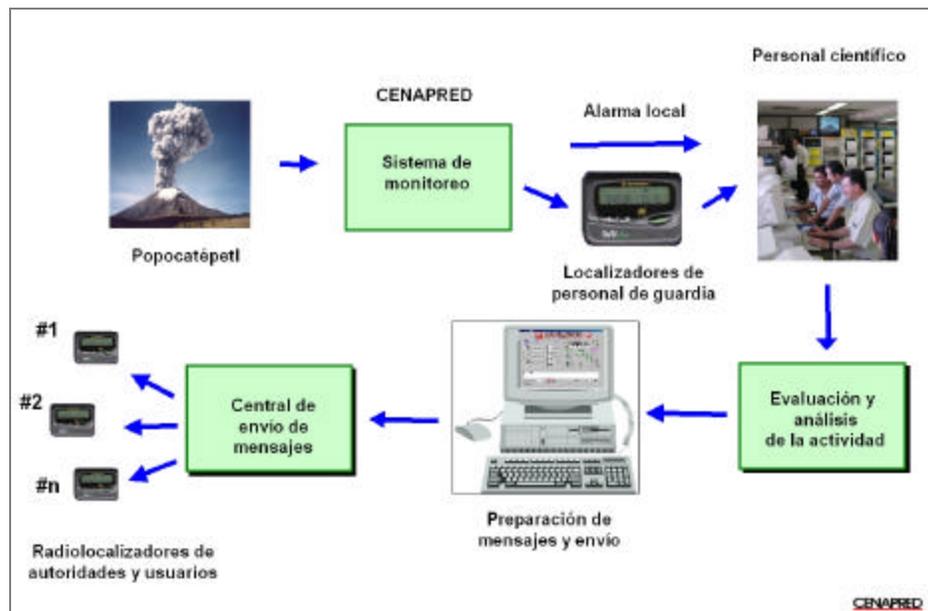


**Figura 5.4 El Semáforo de Alerta Volcánica**

### 5.2.2 POPOBIP

El objetivo de POPOBIP, un sistema de envío de mensajes de la actividad del volcán mediante radiolocalizadores, es alertar, en primera instancia, a los investigadores responsables de guardias permanentes sobre alguna actividad extraordinaria en el volcán, y una vez evaluada la situación, enviar rápidamente un mensaje descriptivo a las autoridades federales, militares, estatales y de Protección Civil (figura 5.5). Éstas contarán así con información de primera mano para actuar en caso de una situación de peligro. Los mensajes enviados incluyen una breve descripción de la actividad, las condiciones del semáforo de alerta volcánica, los posibles escenarios y las áreas de influencia de la actividad.

El sistema está basado en una computadora dedicada, a través de la cual se envía un mensaje vía correo electrónico o vía módem a varias compañías proveedoras de este servicio. El programa interactivo especialmente diseñado para esta aplicación permite generar y ensamblar el texto del mensaje en forma rápida y posteriormente transmitirlo automáticamente hacia la central de la empresa prestadora del servicio, quien se encargará de retransmitirlo a los usuarios inscritos (figura 5.6). El sistema cuenta con una base de datos de usuarios clasificados por categorías y puede fácilmente seleccionar al grupo de usuarios a quién se desea enviar la información.



**Figura 5.5 Esquema del funcionamiento del POPOBIP**

**Figura 5.6** Interfaz gráfica para el ensamblado de mensajes del POPOBIT

### 5.2.3 Página WEB en Internet

Una forma eficiente para difundir la información sobre el volcán y su actividad a un determinado sector de la población, ha sido la página WEB del CENAPRED (<http://www.cenapred.unam.mx>). En su sección de monitoreo volcánico, todos los días se publica a las 11:00 hrs un reporte de la actividad del volcán en las últimas 24 horas (figura 5.7). De manera gráfica se presenta el número de exhalaciones registradas, los niveles de sismicidad, deformación y de bióxido de azufre, además de algunas recomendaciones de seguridad y un pronóstico para las próximas horas. Cuando llega a presentarse algún evento importante en el volcán, la información es actualizada y ampliada poco tiempo después de ocurrido. Adicionalmente la página describe la historia eruptiva del volcán, el sistema de monitoreo, contiene un álbum fotográfico, el mapa de peligros e información diversa relacionada con el volcán y su actividad. Como se mencionó con anterioridad en la página se muestra permanentemente y en vivo una imagen del volcán la cual es actualizada cada minuto.

Una muestra de la importancia de la página es el número de accesos de los usuarios. En promedio se tienen 1000 accesos por día y durante las crisis volcánicas, este número se ha elevado considerablemente, como lo fue en diciembre de 2000, cuando el día 19 de diciembre se llegaron a registrar cerca de 200,000 accesos.

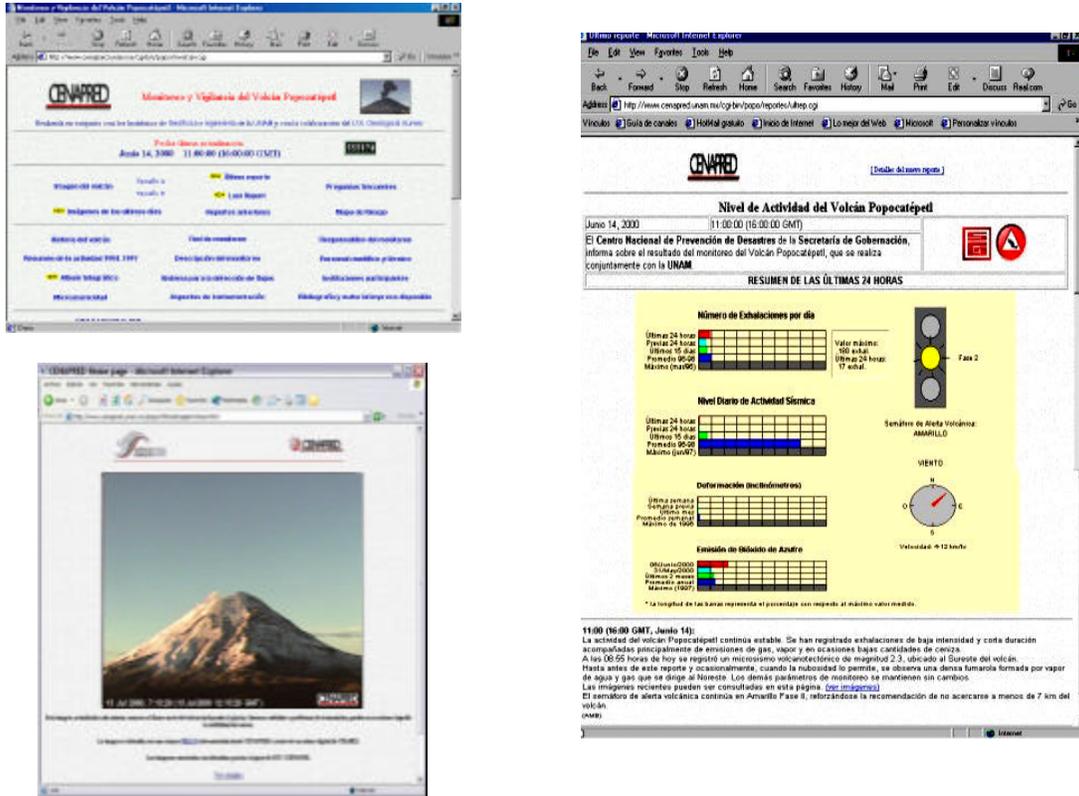


Figura 5.7 Página WEB del CENAPRED, sección de monitoreo volcánico

### 5.2.4 POPOTEL

El POPOTEL es un sistema de audio-respuesta para información al público en general sobre las condiciones de actividad del volcán. Esta información es actualizada diariamente a las 11:00 horas o, en caso de alguna actividad de importancia poco tiempo después de ocurrida. Este sistema, implementado por Teléfonos de México (TELMEX), cuenta con dos números telefónicos: desde el Distrito Federal el 5205-1036 y un número lada sin costo para el interior de la República 01-800-123-5050.

### 5.2.5 Publicaciones

Otra de las acciones orientadas a divulgar información a la población y disseminar medidas de preparación y autoprotección ha sido, por parte la Dirección de Difusión del CENAPRED, la elaboración de diversos productos editoriales relacionados con el volcán, como son publicaciones, folletos, fascículos, gacetas y entrevistas de los expertos en revistas nacionales e internacionales, así como la coordinación con los medios de comunicación.



**Figura 5.8 Publicaciones del CENAPRED relacionadas con el volcán Popocatépetl**

### 5.2.6 Capacitación

No menos importante ha sido la participación del personal técnico y científico del CENAPRED y de la UNAM en labores de capacitación de la población, ya sea a través de pláticas, reuniones con autoridades de protección civil en las zonas en riesgo, atención a medios, visitas guiadas al centro de escuelas y múltiples dependencias.

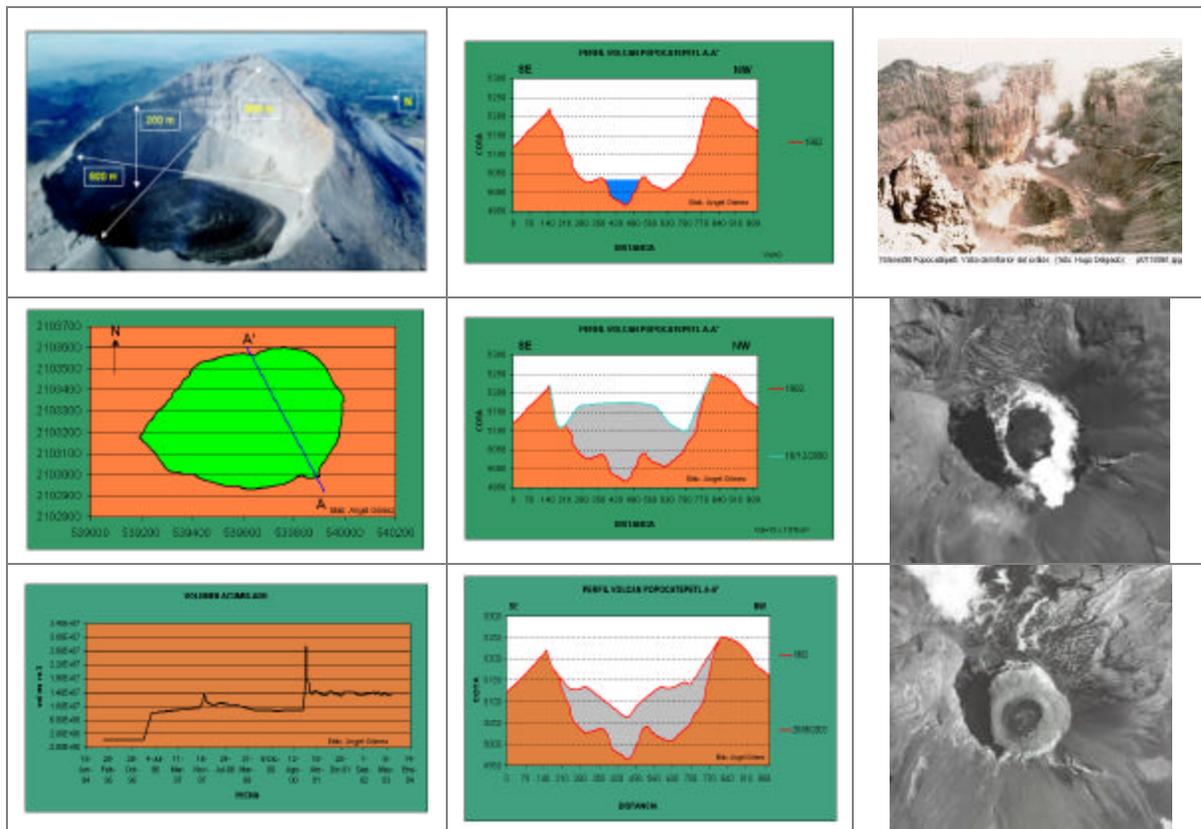


**Figura 5.9** *Labores de capacitación e información en poblados cercanos al volcán*

## VI ALGUNOS RESULTADOS

En este capítulo se muestran gráficamente algunos de los productos y resultados obtenidos con el sistema de monitoreo y vigilancia del volcán Popocatepetl. Su descripción y análisis son motivo de otra publicación, sin embargo se incluyen aquí para dar una idea del procesamiento que se lleva a cabo y de cómo esta información es utilizada para la elaboración de los pronósticos y recomendaciones que se han dado a lo largo de 10 años de actividad del volcán.

De marzo de 1996 a la fecha, el volcán Popocatepetl ha presentado una actividad efusiva alternada con eventos explosivos producidos por el emplazamiento de domos de lava en el interior de su cráter principal. Los estudios llevados a cabo para la interpretación de cambios registrados en los cuerpos de lava o domos, así como los cambios morfológicos en el piso del cráter, se basan en la cuantificación del material emitido lo que permite evaluar el crecimiento alcanzado en determinada fecha.



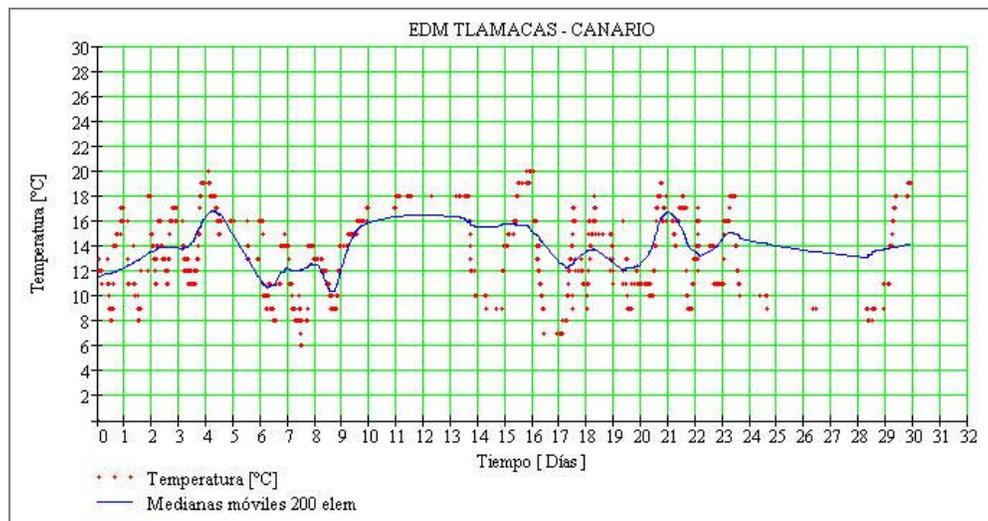
**Figura 6.1 Evaluación de la evolución de los domos de lava**

Del periodo de 1996 a 2003 en total se han formado y destruido 25 domos de diversos tamaños, el mayor de todos ellos es el que se formó en diciembre de 2000 que alcanzó 19 millones de metros cúbicos. La presencia de estos domos ha modificado la morfología del cráter, así como su profundidad, en la Figura 6.1, se observa un perfil representativo de la forma y tamaño del domo formado en diciembre de 2000, así como el volumen del material acumulado dentro del cráter de 1994 a junio de 2003 que es de  $1.06 \times 10^7 \text{ m}^3$ , lo que representa el 30% de la capacidad total del cráter.

También se representan los cambios en la morfología del piso del cráter de 1982 a junio de 2003, el cual ha presentado un aumento en su nivel base de aproximadamente 50 m en promedio (Gómez A., 2003).

La actividad volcánica generalmente va acompañada por deformaciones del terreno alrededor del volcán y puede ser provocada por diversas causas: intrusión, degasificación, enfriamiento, contracción, desplazamientos de magma, redistribución de cuerpos agua (sistema hidrotermal) o bien movimientos internos de flujos geotermales. Las máximas deformaciones casi siempre ocurren antes de una erupción, en el momento que la presión magmática aumenta. Estas deformaciones del terreno, asociadas a la actividad volcánica pueden algunas veces ser muy notables por lo que deben aplicarse métodos geodésicos para cuantificarlas. Para llevar un control de la deformación en el volcán Popocatepetl se realizan mediciones de EDM, así como de inclinómetros electrónicos permanentes. En la figura 6.2 se presenta una gráfica de deformación obtenida por EDM, donde se aprecian las variaciones con respecto al tiempo.

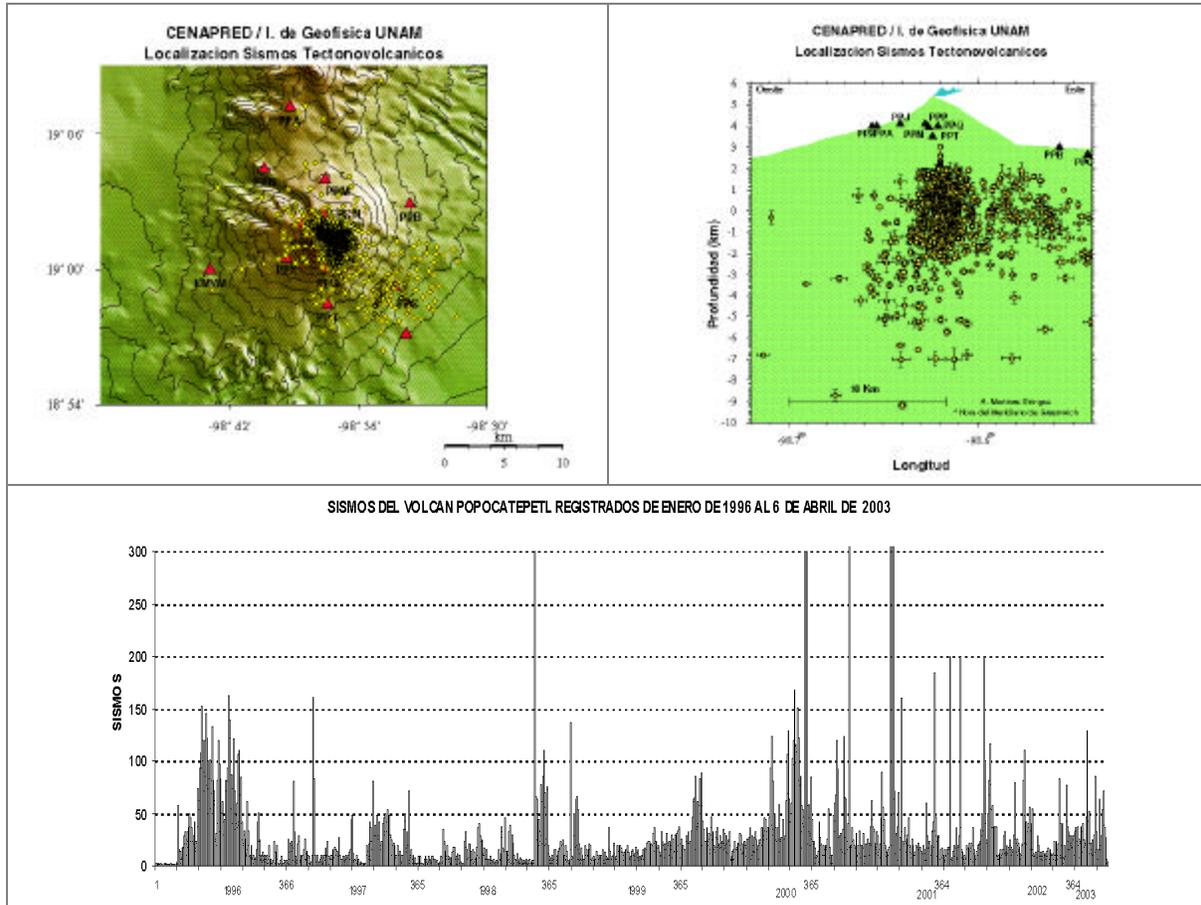
Durante la crisis eruptiva de diciembre de 2000, los largos episodios de señales sísmicas continuas produjeron deformaciones elásticas en el edificio volcánico y fueron detectadas por los inclinómetros como amplias oscilaciones. Las amplitudes de las oscilaciones producidas en los inclinómetros fueron de 100 microradianes en cada episodio, alcanzando valores pico a pico de 200 microradianes.



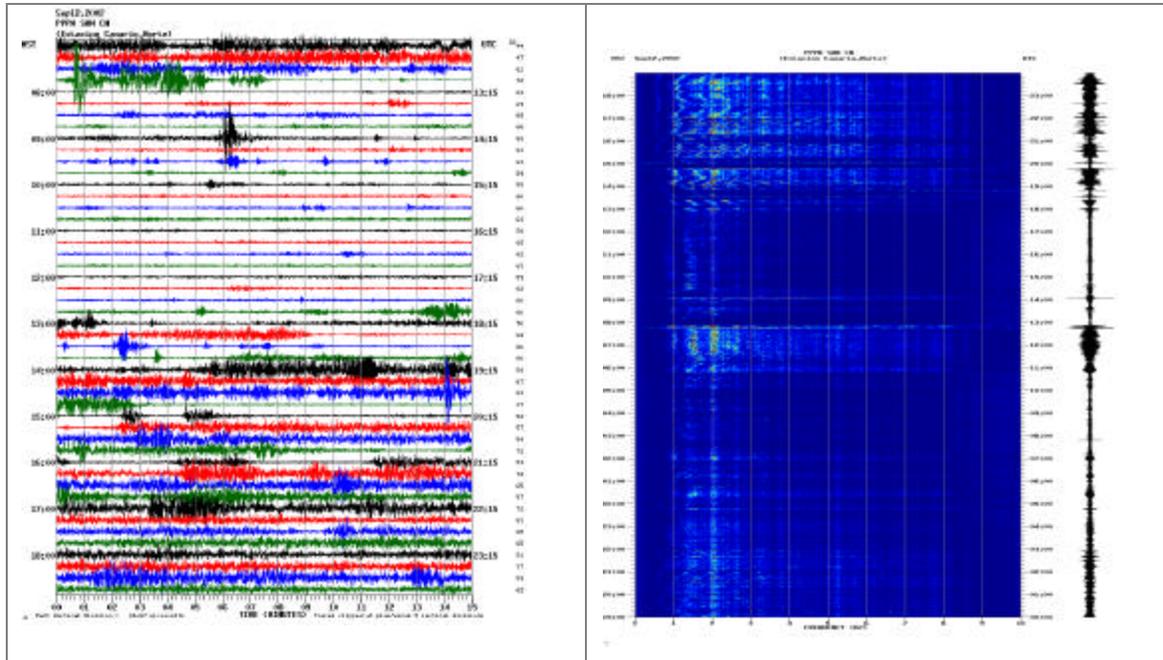
**Figura 6.2 Gráficas procesadas de deformación obtenidas con el EDM (De la Cruz et al.)**

La actividad sísmica en los volcanes es provocada por la acumulación de energía mecánica y térmica, así como por movimientos de magma y gases. La sismicidad es uno de los mejores parámetros para estimar cuantitativamente la actividad volcánica. Algunos volcanes han presentado actividad sísmica precursora en horas, días e inclusive años antes de una erupción. Se espera que el número de sismos incremente a medida que el magma se acumule en un reservorio somero. Es necesario el análisis inmediato de los datos sísmicos, para una detección temprana del inicio de un comportamiento anormal precursor de una posible actividad eruptiva. Durante este episodio eruptivo, iniciado en diciembre de 1994, se han registrado más de 1500 sismos tectonovolcánicos de magnitudes entre 1.5 y 3.8. En la figura 6.3 se presentan la distribución en superficie y en profundidad de los sismos volcanotectónicos y una gráfica que representa la distribución en tiempo de la sismicidad registrada en el Popocatepetl.

Asimismo, en la figura 6.4, se tiene un sismograma, que contiene las señales sísmicas registradas durante un periodo de 24 horas y su respectivo espectrograma, el cual permite conocer las características espectrales de las señales sísmicas. Con el contenido de frecuencias de las señales sísmicas obtenido por medio de este espectrograma, es posible diferenciar entre los diversos tipos de eventos sísmicos originados en el volcán y de este modo determinar el proceso que los origina.



**Figura 6.3 Sismicidad del volcán Popocatépetl (A. Martínez, C Valdés)**

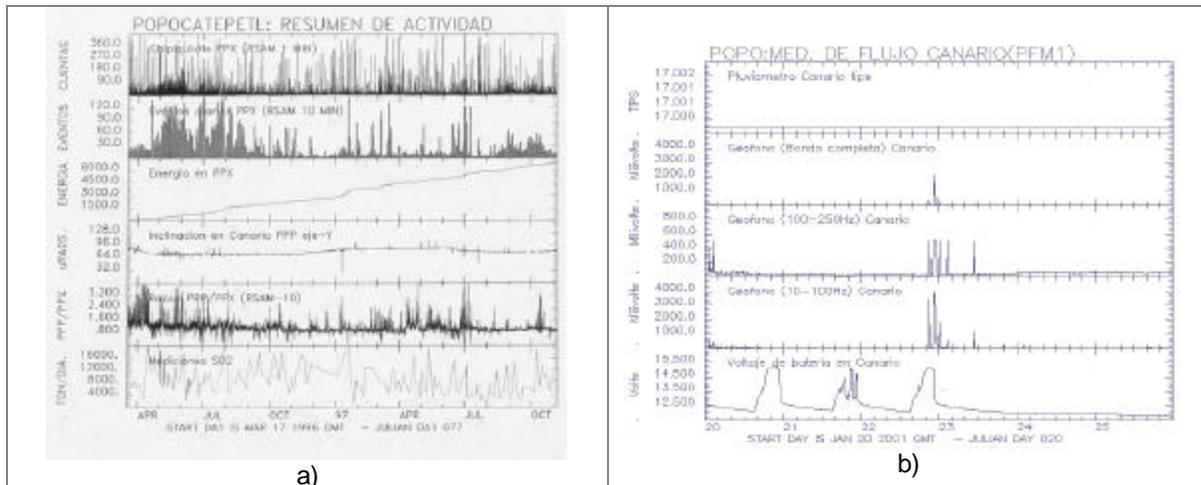


**Figura 6.4 Sismogramas y espectrogramas de la actividad del volcán**

El seguimiento de la actividad del volcán a través de todos los parámetros de monitoreo ha proporcionado una amplia base de datos. Esta base ha permitido, en muchas ocasiones, reconocer la actividad precursora y de este modo realizar el pronóstico de eventos importantes, como es el caso del evento eruptivo ocurrido el 18 de diciembre de 2000.

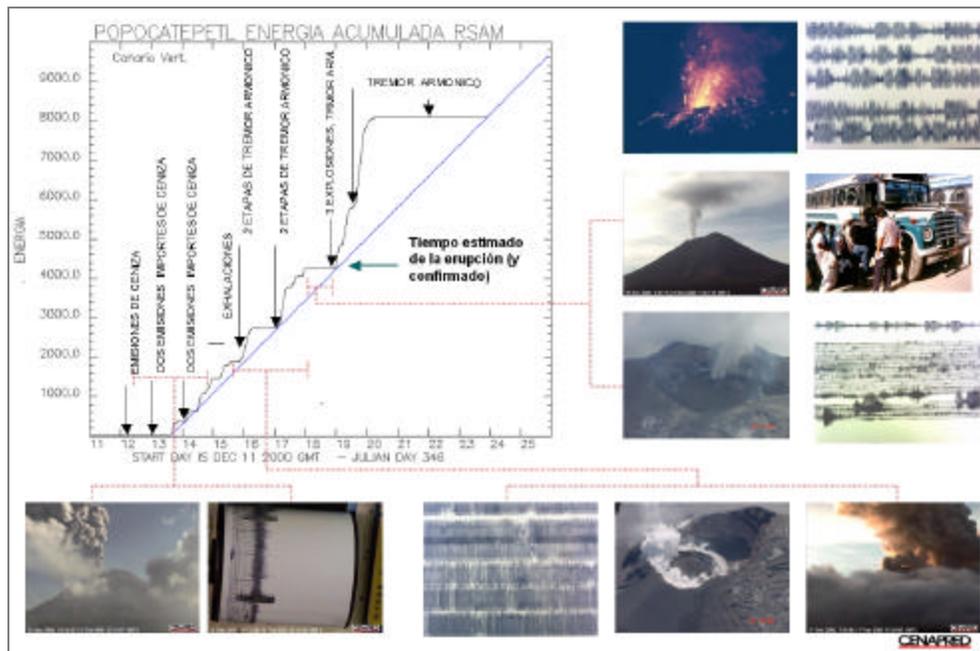
En la figura 6.5 se muestra una gráfica comparativa de algunos de los parámetros como son RSAM, energía acumulada, inclinaciones y mediciones de COSPEC. A través de este tipo de gráficas es posible al observar alguna anomalía en uno de los parámetros, correlacionarlo con los demás. Este tipo de comparaciones permite establecer el estado de actividad del volcán en un determinado lapso de tiempo.

Por otro lado, en la misma figura 6.5, se encuentra una gráfica de mediciones de flujo, mediante el cual se pudo detectar el lahar originado durante la erupción del 23 de enero de 2000. Este lahar se originó a partir de un flujo piroclástico que viajó 15 km a lo largo de una de las barrancas del flanco Norte del volcán, y en un momento dado de su trayectoria cambió a lahar, el cual alcanzó los 7 m de ancho por 0.5 m de alto, y finalmente se detuvo a 2 km de la población de Santiago Xalitlintla.



**Figura 6.5** Gráficas que muestran diversos parámetros de monitoreo: a) promedio de amplitudes sísmicas (RSAM), número de eventos registrados, energía acumulada, inclinación, mediciones de bióxido de azufre. b) detección de flujos: datos del pluviómetro, datos de flujos en diferentes bandas y voltaje de la baterías

Durante el episodio eruptivo de diciembre de 2000, el comportamiento de la actividad sísmica del volcán, consistió en episodios de quietud alternados con episodios de gran actividad que alcanzaban importantes amplitudes en las señales sísmicas, de tal manera que fue posible describirlo como un modelo de carga y descarga. Este comportamiento permitió utilizar el modelo de tiempo predecible de Shimazaki y Nagata (1980), y de esta forma estimar el inicio del siguiente episodio eruptivo ocurrido el 18 de diciembre el cual fue pronosticado con un día de anticipación (figura 6.6).



**Figura 6.6** Pronóstico de la actividad de energía basado en un modelo de liberación y acumulación de energía



## CONCLUSIONES

Con la participación y el apoyo de diversas instituciones y de un entusiasta y comprometido grupo de personas, se ha logrado poner en operación y mantener a lo largo de casi ya 10 años, una importante infraestructura de registro y monitoreo que permite la vigilancia continua del volcán Popocatépetl, así como la detección oportuna de cualquier cambio en su estado de actividad. El sistema de monitoreo y vigilancia del volcán Popocatépetl es sin duda uno de los observatorios más completos. Este sistema ya ha comprobado ser de gran eficacia y utilidad como sucedió durante la crisis de diciembre del 2000, la mayor en los últimos 70 años. La información que ha generado a la fecha y que seguirá proporcionando en el futuro será de muy valiosa para la investigación y seguramente permitirá entender cada vez mejor el fenómeno volcánico a fin de prevenir futuros desastres que este volcán pudiese provocar.

La experiencia adquirida con la instrumentación y el monitoreo del volcán Popocatépetl, han motivado realizar trabajos similares en otros volcanes activos del país, entre ellos, en el Tacaná, el Citlaltépetl, los cuales ya cuentan con 3 y 2 estaciones sísmicas, respectivamente. Además se está trabajando en la instrumentación del volcán Chichonal. Todo esto con la finalidad de estar preparados ante la posibilidad, aunque remota de que estos volcanes nuevamente se reactiven.



## RECONOCIMIENTOS

Sin lugar a duda el sistema de monitoreo del volcán Popocatepetl y los exitosos resultados obtenidos se deben gracias al esfuerzo de numeras personas, organizaciones e instituciones. A todos ellos se les hace un reconocimiento y un agradecimiento por contribuir a la prevención, en este caso, de alguna situación de riesgo del volcán Popocatepetl.

### • PERSONAS

#### Nacionales

Alejandra Arciniaga  
Alejandro Hernández  
Alejandro Mirano  
Alicia Martínez  
Alonso Flores  
Ana Lilian Martín  
Ana María Alarcón  
Ángel Vázquez  
Arturo Gascón  
Arturo Montalvo  
Bernabé Juárez  
Bertha López  
Carlos Gutiérrez  
Carlos Valdés  
Carmen Pimentel  
César Morquecho  
Claus Siebe  
Cynthia L. Vidal  
Edgar Mota  
Enrique Guevara  
Esteban Ramos  
Fernando Ballesteros  
Francisco Galicia  
Gerardo Carrasco  
Gerardo Jiménez  
Germán Espitia  
Gilberto Castelán  
Gloria Luz Ortíz  
Guillermo González P.  
Hidromiro Romero  
Hugo Delgado  
Jaime Urrutia  
Javier del Pino  
Javier González

Javier Ortíz  
Javier Pacheco  
Jazmín Vázquez  
Jorge Diaz  
Jorge Fuentes  
José Luis Macías  
José Luis Ortíz  
Juan José Gómez  
Juan Rosales  
Krisna Singh  
Laura Gaytán  
Lorenzo Sánchez  
Lucio Cárdenas  
Luz María Flores  
Marco Antonio Huerta  
Marcos Galicia  
Maria Aurora Armienta  
Martín Peña  
Miguel Ángel Franco  
Paulino Alonso  
Ramón Ruiz  
Raúl Arámbula  
Ricardo González  
Roberto Meli  
Roberto Quaas  
Rolando Valseca  
Salvador Medina  
Sergio Alcocer  
Servando de la Cruz  
Tomás Sánchez  
Ulises Errasti  
Verónica Totolhua  
Vicente Pérez

#### Extranjeras

Andrew Lockhart  
Carol Bryan  
Dan Dzurisin  
Dan Miller  
Izumi Yokoyama  
Jeff Johnson  
Jeff Marso  
John Ewert  
Marvin Couchman  
Ramón Ortíz  
Randall White  
Richard Hoblitt  
Robert Tilling  
Thomas Casadeval  
Thomas Murray

Asimismo se agradece a todo el personal del CENAPRED que ha apoyado en los momentos de crisis y durante las guardias en días festivos.

- **INSTITUCIONES GUBERNAMENTALES**

**SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN:**

Coordinación General de Protección Civil  
Dirección General de Protección Civil  
Dirección General de Radio, Televisión y Cinematografía

**UNIDADES ESTATALES DE PROTECCIÓN CIVIL:**

Estado de México, Puebla, Morelos, Distrito Federal y Tlaxcala

**SECRETARÍA DE LA DEFENSA NACIONAL**

**SECRETARÍA DE MARINA, ARMADA DE MÉXICO**

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES:**

Dirección General de Carreteras Federales  
Dirección General de Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano

**PROCURADURÍA GENERAL DE LA REPÚBLICA:**

Dirección General de Servicios Aéreos

**COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD**

**COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA:**

Servicio Meteorológico Nacional

- **MUNICIPIOS:**

En el Estado de México: Amecameca, Atlautla, Ecatzingo, Ozumba, Tepetlixpa, Ayapango, Tenango del Aire e Ixtapaluca

En el estado de Puebla: Atlixco, Santa Clara, San Nicolás de los Ranchos, San Juan Tianguismanalco, Tochimilco

En el estado de Morelos: Tetela del Volcán

- **INSTITUCIONES NO GUBERNAMENTALES**

**GRUPOS SOCIALES Y PRIVADOS:**

Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México  
Cruz Roja Mexicana  
Brigada de Rescate del Socorro Alpino de México  
Televisa  
Telmex  
Motorola  
Pelco

**COOPERACIÓN INTERNACIONAL:**

Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS)  
Volcano Disaster Assistance Program (VDAP)  
Cascades Volcano Observatory (CVO)  
Japan International Cooperation Agency (JICA)  
Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España  
Departamento de vulcanología (Museo Nacional de Ciencias Naturales)  
Universidad de Hawaii  
Embajada de Estados Unidos de América

## BIBLIOGRAFÍA

Armenta M.A., De la Cruz-Reyna S. and Macías J. L., 2000. Chemical characteristics of the crater lakes of Popocatepetl, El Chichon, and Nevado de Toluca volcanoes, Mexico, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 97, Issues 1-4, pp 105-125.

De la Cruz Reyna S., J.L. Quezada, C. Peña, O. Zepeda y T. Sánchez, 1995. Historia de la Actividad Reciente del Popocatepetl, en el libro "El Volcán Popocatepetl. Estudios Realizados Durante la crisis de 1994-1995", editores O. Zepeda y T. Sánchez, publicado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres y la Universidad Nacional Autónoma de México, pp 339.

De la Cruz-Reyna S., 1995, "PROPUESTA DE UN CÓDIGO DE ALERTA PARA POTENCIALES ERUPCIONES DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL", Secretaría de Gobernación, Sistema Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres, pp 08-10.

De la Cruz-Reyna S., 1996, Aspectos de Comunicación entre el Grupo Científico, las Autoridades de Protección Civil y la Población, "UN CÓDIGO DE ALERTA PARA EL MANEJO DE EMERGENCIAS ANTES Y DURANTE POTENCIALES ERUPCIONES DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL", en el libro "El Volcán Popocatepetl. Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994-1995", editores O. Zepeda y T. Sánchez, publicado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres y la Universidad Nacional Autónoma de México, pp 327-333.

De la Cruz – Reyna S., H. Nolasco E. Ramos, J.L. Degollado, F.J. Castillo, C. Velásquez A. Medrano, H. González, H. Romero y D.A. Castellanos. La Red Geodésica del Volcán Popocatepetl para el Monitoreo de la actividad Volcánica, en el libro "El Volcán Popocatepetl. Estudios Realizados Durante la crisis de 1994-1995", editores O. Zepeda y T. Sánchez, publicado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres y la Universidad Nacional Autónoma de México, pp 339.

De la Cruz-Reyna S., Quaas R., Meli R., 2000. "MANAGEMENT OF VOLCANIC CRISIS", *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press pp 1199-1214.

Delgado H., C. Siebe, 1994, "POPOCATEPETL (MEXICO): SEISMICITY, SO<sub>2</sub> FLUX, AND CRATER OBSERVATIONS REPORTED", *Global Volcanic Network Bulletin*, Núm. 4, Vol. 19, pp 09-10.

Errasti U., Juárez J., Huerta M., 2000. Diseño e implementación de un sistema automatizado para el monitoreo de deformaciones volcánicas en tiempo real. Tesis ingeniero mecánico. Facultad de Ingeniería UNAM.

Guevara E., Quaas R., Valdés C., De la Cruz S., 2001. Detección y seguimiento de nubes de ceniza. Las cenizas volcánicas del Popocatepetl y sus efectos para la aeronavegación e infraestructura aeroportuaria. CENAPRED, UNAM.

Johnson J.B., R.C. Aster, M.C. Ruiz, S.D. Malone, 2003. Interpretation and utility of infrasonic records from erupting volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 121.

Macías J.L., Carrasco G., Siebe C., 1995. Capítulo III Riesgo y Mapeo. "ZONIFICACIÓN DE PELIGROS VOLCÁNICOS DEL POPOCATÉPETL", en el libro "El Volcán Popocatepetl. Estudios Realizados Durante la crisis de 1994-1995", editores O. Zepeda y T. Sánchez, publicado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres y la Universidad Nacional Autónoma de México, pp 79-90.

Monitoring Volcanoes: Techniques and Strategies Used by the Staff of the Cascades Volcano Observatory, 1980-90. U.S. Geological Survey.

Quaas R., Guevara E., González R., Ramos E., De la Cruz S., 2001. Monitoreo volcánico: Instrumentación y Métodos de Vigilancia., en el libro "El Volcán Popocatepetl. Estudios Realizados Durante la crisis de 1994-

1995”, editores O. Zepeda y T. Sánchez, publicado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres y la Universidad Nacional Autónoma de México.

Quaas R., Guevara E., De la Cruz S., Valdés C., Castelán G., 2001. Sistema de Monitoreo y Vigilancia del Volcán Popocatepetl . Las cenizas volcánicas del Popocatepetl y sus efectos para la aeronavegación e infraestructura aeroportuaria. CENAPRED, UNAM.

Quaas R., R. González, E. Guevara, E. Nava, H. Mijares, 1995, "INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL", Memorias del X Congreso de Instrumentación, Sociedad Mexicana de Instrumentación, A.C., Xalapa, Ver, México, pp 155-159, septiembre.

Quaas R., E. Guevara, R. González, S. de la Cruz-Reyna, E. Ramos, 1994, "INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA PARA EL MONITOREO DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL. PROPUESTA INICIAL CON EL DISEÑO DE CONFIGURACIÓN PRELIMINAR DEL SISTEMA", Informe, Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Ramos E., S. de la Cruz-Reyna, R. Quaas, E. Guevara, R. González, 1994, "DISEÑO Y TRABAJO DE CAMPO PARA INSTALAR LA RED DE VIGILANCIA Y MONITOREO EN EL VOLCÁN POPOCATÉPETL", GEOS, órgano informativo de la Unión Geofísica Mexicana, Época II, Vol. 14, Núm. 5.

Siebe C., Abrams M., Macías J.L, “DERRUMBRES GIGANTES, DEPOSITOS DE AVALANCHA DE ESCOMBROS Y EDAD DEL ACTUAL CONO DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL”, en el libro “El Volcán Popocatepetl. Estudios Realizados Durante la crisis de 1994-1995”, editores O. Zepeda y T. Sánchez publicado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres y la Universidad Nacional Autónoma de México.

Tilling R., 1993. Monitoring Active volcanoes. U.S. Geological Survey, Department of interior.

Valdés C., De la Cruz S., Martínez A., Quaas R., Guevara E., 2001. Resumen de la actividad del volcán Popocatepetl de diciembre 1994 a mayo 2001. Las cenizas volcánicas del Popocatepetl y sus efectos para la aeronavegación e infraestructura aeroportuaria. CENAPRED, UNAM.

## ANEXO 1

### **FICHAS TÉCNICAS DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO VOLCÁNICO DEL POPOCATÉPETL**



## ESTACIONES DE MONITOREO DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL

| CLAVE | NOMBRE       | UBICACIÓN  | ALT<br>m.s.n.m | LAT °N   | LONG W   | INSTRUMENTACIÓN   | INSTITUCIÓN            |
|-------|--------------|--|----------------|----------|----------|---|------------------------|
| PCR   | CENAPRED     | México D.F.                                      | 2365           | 19.3151  | 99.1747  | ➤ Puesto central de recepción, registro, monitoreo y procesamiento de la información de la red  | CENAPRED-<br>UNAM-USGS |
| IIA   | ALTZOMONI    | Microondas Alzomoni                              | 4000           | 19.1204  | 98.6535  | ➤ Sismómetro uniaxial<br>➤ Repetidor<br>➤ Cámara infrarroja   | IDEI-UNAM              |
| PPM   | TLAMACAS     | Microondas Tlamacas                              | 3980           | 19.0663  | 98.6278  | ➤ Sismómetro triaxial<br>➤ Repetidor de señales sísmicas del Pico de Orizaba<br>➤ Repetidor de flujos<br>➤ Sensor sínico<br>➤ Sensor de temperatura<br>➤ Distanciómetro láser | IGF-UNAM<br>CENAPRED   |
| PPC   | COLIBRI      | NW de Sn. Pedro Benito Juárez                    | 2560           | 18.9870  | 98.5572  | ➤ Sismómetro triaxial 1 Hz  | CENAPRED               |
| PPP   | CANARIO      | Refugio el Canario                               | 4170           | 19.0412  | 98.6280  | ➤ Sismómetro de Banda ancha<br>➤ Inclínómetro biaxial<br>➤ Detector acústicos de flujo<br>➤ Pluviómetro   | CENAPRED               |
| PPJ   | LOS JUNCOS   | Base del Ventorrillo ladera NW                   | 4452           | 19.0342  | 98.6446  | ➤ Sismómetro triaxial   | CENAPRED               |
| PPT   | TETEXCALOC   | Ladera sur del volcán                            | 3300           | 18.9745  | 98.6241  | ➤ Sismómetro triaxial   | CENAPRED               |
| PPQ   | LOS CUERVOS  | Parte alta ladera sur del volcán                 | 4200           | 19.0009  | 98.6246  | ➤ Sismómetro triaxial<br>➤ Inclínómetro biaxial   | CENAPRED               |
| IIB   | CALO         | Cerro Calo Chalchihuapan                         | 2500           | 18.9641  | 98.3448  | ➤ Repetidor   | IDEI-UNAM<br>CENAPRED  |
| PPX   | CHIPIQUIXTLE | Arenales ladera SW                               | 3980           | 19.0088  | 98.6566  | ➤ Sismómetro de Banda ancha<br>➤ Inclínómetro biaxial   | CENAPRED               |
| PIN   | NEXPAYANTLA  | Loma SW de Tlamacas                              | 3846           | 19.065   | 98.6355  | ➤ Inclínómetro biaxial  | CENAPRED               |
| PFM2  | ZORZAL       | Barranca de La Espinera                          | 3985           | 19.0502  | 98.640   | ➤ Detector acústicos de flujo<br>➤ Pluviómetro  | CENAPRED               |
| PFM3  | UNIÓN        | Unión de las barrancas La Espinera y Tenenepanco | 3693           | 19.0681  | 98.6122  | ➤ Detector acústicos de flujo<br>➤ Pluviómetro  | CENAPRED               |
| POH   | HALCON       | Ladera norte del volcán Citlaltépetl             | 4150           | 19.06889 | 97.28026 | ➤ Sismómetro uniaxial   | CENAPRED-<br>CCTUV     |

# ESTACIONES DE LA RED DE MONITOREO DEL VOLCAN POPOCATEPETL



## ESTACIONES DE MONITOREO DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL

| Estación   | Clave | Localización      | Coordenas geográficas                        | Altitud (msnm) | Equipos   | Fecha de instalación | Institución responsable |
|--|-------|-------------------|--|----------------|---|----------------------|-------------------------|
| Tlamacas   | PPM   | Cerro de Tlamacas | Latitud: 19.0663° N<br>Longitud : 98.6278° W | 3980           | <p><b>Sísmico:</b><br/>Sismómetro triaxial: Mark L-4C-3D de 1 Hz<br/>Acondicionador: TH13 Kinematics<br/>Telemetría analógica: portadora 402.700MHz<br/>Subportadoras: N 1080 Hz, E 1560 Hz, V 2040<br/>Equipo de transmisión: Monitron<br/>Potencia de transmisión : 1 Watt<br/>Sismómetro de Banda ancha: STS2</p> <p><b>Repetidor de flujos:</b><br/>Equipo de transmisión: Neulink RF-115</p> <p><b>Repetidor de señales sísmicas del volcán Citlaltépetl:</b><br/>Equipo sumador: JB12 Kinematics<br/>Telemetría analógica portadora: 420.8125 MHz<br/>Subportadoras: V 1700 Hz, V 680 Hz<br/>Equipo de transmisión: Monitron<br/>Potencia de transmisión : 1 Watt</p> <p><b>Sensor sónico (infrasónico):</b><br/>Telemetría analógica portadora: 438.025 MHz<br/>Subportadora: 1020 Hz</p> <p><b>Sensor de temperatura:</b><br/>Telemetría analógica portadora: 438.025 MHz<br/>Subportadora: 3060 Hz</p> | Sep-1994             | IGEOF                   |
|  |       |                   |  |                |   |                      | IGEOF                   |
|  |       |                   |  |                |   |                      | CENAPRED                |
|  |       |                   |  |                |   | Mar-1998             | CENAPRED                |
|  |       |                   |  |                |   | Oct-2003             | CENAPRED                |
|  |       |                   |  |                |   | Oct-2003             | CENAPRED                |



**Vista interior de la caseta de Tlmacas: a) sensor sísmico y acelerómetro, b) radios de telemetría c) y d) vista general de los equipos**

| Estación  | Clave | Localización                  | Coordenas geográficas                        | Altitud (msnm) | Equipos   | Fecha de instalación | Institución responsable |
|---|-------|-------------------------------|--|----------------|---|----------------------|-------------------------|
| Colibrí   | PPC   | NW de San Pedro Benito Juárez | Latitud: 18.9870° N<br>Longitud : 98.5572° W | 2650           | <p><b>Sísmico:</b></p> <p>Sismómetro triaxial: Mark L-4C-3D de 1 Hz<br/> Acondicionador: TH13 Kinematics<br/> Telemetría analógica: portadora 420.8625 MHz<br/> Subportadoras N 680 Hz, E 1020 Hz, V 1360 Hz<br/> Equipo de transmisión: Monitron<br/> Potencia de transmisión : 1 Watt</p> | Nov-1994             | CENAPRED                |
|  |       |                               |  |                |   |                      |                         |



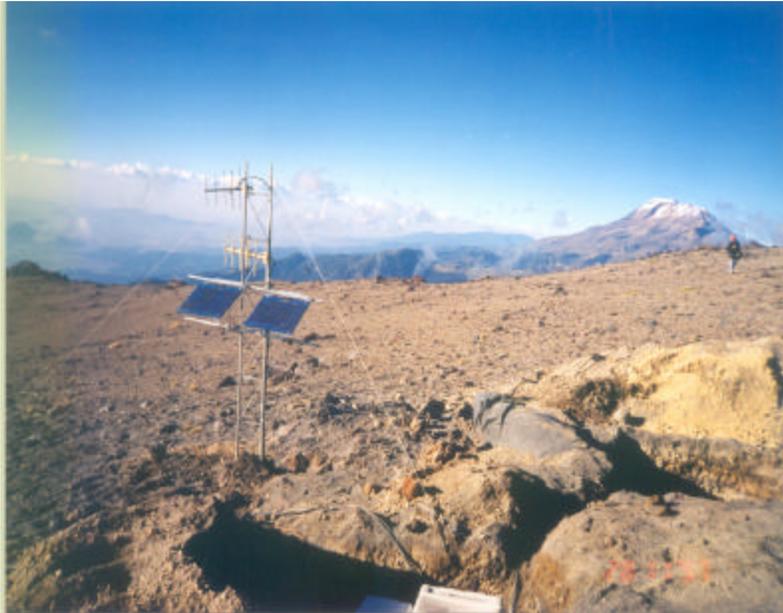
*Vista interior de la caseta de Colibri: a) equipo acondicionador, b) y c) sensor sísmico*

| Estación  | Clave | Localización                          | Coordenas geográficas                       | Altitud (msnm) | Equipos  | Fecha de instalación | Institución responsable |
|---|-------|---------------------------------------|---|----------------|--|----------------------|-------------------------|
| Canario   | PPP   | Refugio el Canario en el Popocatepetl | Latitud: 19.0412° N<br>Longitud : 98.6280°W | 4170           | <p><b>Sísmico:</b></p> <p>Sismómetro triaxial: Mark L-4C-3D de 1 Hz<br/>Acondicionador: TH13 Kinematics<br/>Telemetría analógica:<br/>portadora 422.1625 MHz<br/>subportadoras N 1700 Hz, E 2040 Hz, V 2380<br/>Equipo de transmisión: Monitron<br/>Potencia de transmisión : 2 Watts</p> <p><b>Sismometro de Banda ancha:</b></p> <p>Sensor: CMG-40 Guralp<br/>Codificador digital (Encoder): DE-10<br/>Telemetría portadora: 420.8875 MHz<br/>Equipo de transmisión: Monitron<br/>Potencia de transmisión : 2 Watt</p> <p><b>Deformación:</b></p> <p>Inclinómetro biaxial: 701-2A Applied Geomechanics<br/>Equipo acondicionador: USGS<br/>Equipo de transmisión: Motorola Handy Talkie 412.00 MHz<br/>Potencia de transmisión: 4 Watts</p> <p><b>Detector acústico de flujos:</b></p> <p>Geófono: 10 –250 Hz<br/>Acondicionador: USGS<br/>Equipo de transmisión: Neulink RF-115<br/>Pluviómetro<br/>Potencia de transmisión : 4 Watts</p> | Ene-1995             | CENAPRED                |
|  |       |                                       |   |                |  | Mar-1998             | CENAPRED                |
|   |       |                                       |   |                |  | Ene-1995             | CENAPRED                |
|   |       |                                       |   |                |  | Oct-1997             | CENAPRED                |
|   |       |                                       |   |                |  |                      |                         |



**Vista interior de la caseta de Canario: a) radios de telemetría, b) celdas solares  
c) antenas de comunicación y pluviómetro y d) equipo acondicionador**

| Estación | Clave | Localización                                    | Coordenadas geográficas                      | Altitud (msnm) | Equipos   | Fecha de instalación | Institución responsable |
|----------|-------|---|--|----------------|---|----------------------|-------------------------|
| Juncos   | PPJ   | Base del Ventorrillo ladera NW del Popocatépetl | Latitud: 19.0342° N<br>Longitud : 98.6446° W | 4452           | <p><b>Sísmico:</b></p> <p>Sismómetro triaxial: Mark L-4C-3D de 1 Hz<br/> Acondicionador: TH13 Kinometrics<br/> Telemetría analógica:<br/> Portadora: 420.8375 MHz<br/> Subportadoras N 1700 Hz, E 2040 Hz, V 2380<br/> Equipo de transmisión: Monitron<br/> Potencia de transmisión : 2 Watts</p> | Nov-1997             | CENAPRED                |



| Estación  | Clave | Localización                | Coordenadas geográficas                        | Altitud (msnm) | Equipos   | Fecha de instalación | Institución responsable |
|---|-------|-----------------------------|--|----------------|---|----------------------|-------------------------|
| Tetexcaloc  | PPT   | Ladera sur del Popocatepetl | Latitud: 18.9745 ° N<br>Longitud : 98.6241 ° W | 3300           | <p><b>Sísmico:</b></p> <p>Sismómetro triaxial: Mark L-4C-3D de 1 Hz<br/>                     Acondicionador: TH13 Kinematics<br/>                     Telemetría analógica:<br/>                     Portadora: 420.8125 MHz<br/>                     Subportadoras: N:2040 Hz, E:2360 Hz, V:2720<br/>                     Equipo de transmisión: Monitron<br/>                     Potencia de transmisión : 2 Watts</p> | May-1996             | CENAPRED                |
|  |       |                             |  |                |   |                      |                         |



*Vista interior de la caseta de Tetexcaloc: a) vista general de los equipos, b) equipo acondicionador y radios de telemetría*



| Estación  | Clave | Localización                      | Coordenadas geográficas                      | Altitud (msnm) | Equipos  | Fecha de instalación | Institución responsable |
|---|-------|-----------------------------------|--|----------------|--|----------------------|-------------------------|
| Caló  | IIB   | Cerro Calo, Chalchihuapan, Puebla | Latitud: 18.9641° N<br>Longitud : 98.3448° W | 2500           | <p><b>Repetidor de señales sísmicas de PPC, PPT y PPQ:</b></p> <p>Receptor: Equipo sumador J12 Kinematics<br/>Telemetría analógica portadora: 420.7875MHz<br/>Equipo de recepción: Monitron<br/>Potencia de transmisión: 2 Watts</p> <p><b>Repetidor de deformación de PPQ:</b><br/>Equipo de recepción: Motorola Handy Talkie<br/>410.000 MHz<br/>Potencia de transmisión : 4 Watts</p> | Dic-1996             | CENAPRED                |
|  |       |                                   |  |                |  |                      | CENAPRED                |

| Estación     | Clave | Localización                        | Coordenadas geográficas                      | Altitud (msnm) | Equipos  | Fecha de instalación | Institución responsable |
|--------------|-------|-------------------------------------|--|----------------|--|----------------------|-------------------------|
| Chipiquixtle | PPX   | Arenales ladera SW del Popocatepetl | Latitud: 19.0088° N<br>Longitud : 98.6566° W | 3980           | <p><b>Sísmico:</b></p> <p>Sismómetro triaxial: Mark L-4C-3D de 1 Hz<br/>Acondicionador: TH13 Kinematics<br/>Telemetría analógica:<br/>Portadora: 420.7375 MHz<br/>Subportadoras: N:680 Hz, E:1020 Hz, V:1360 Hz<br/>Equipo de transmisión: Monitron<br/>Potencia de transmisión : 2 Watts</p> <p><b>Sismómetro de Banda ancha:</b></p> <p>Sensor: CMG-40 Guralp<br/>Codificador digital: (Encoder) DE-10<br/>Telemetría portadora: 430.950 MHz<br/>Equipo de transmisión: Monitron<br/>Potencia de transmisión : 2 Watt</p> <p><b>Deformación:</b></p> <p>Inclinómetro biaxial: 701-2A Applied Geomechanics<br/>Equipo acondicionador: USGS<br/>Equipo de transmisión: Motorola Handy Talkie 412.00 MHz<br/>Potencia de transmisión: 4 Watts</p> | Oct-1994             | CENAPRED                |





*Vista interior de la caseta de Chipiquixtle: a) celdas solares, b) radios de telemetría y equipo acondicionador  
c) sensores sísmicos y d) receptor GPS*

| Estación  | Clave | Localización       | Coordenadas geográficas                       | Altitud (msnm) | Equipos  | Fecha de instalación | Institución responsable |
|---|-------|--------------------|---|----------------|--|----------------------|-------------------------|
| Altzomoni   | IIA   | Cerro de Altzomoni | Latitud: 19.1204 ° N<br>Longitud : 98.6535° W | 4000           | <b>Sísmico:</b><br>Sismómetro uniaxial:<br>Mark L-4C de 1 Hz<br>Acondicionador: IDEI<br>Telemetría analógica:<br>Portadora: 416.500 MHz<br>Subportadora: V 2380 Hz | Julio-1994           | IDEI                    |
|  |       |                    |   |                | <b>Video:</b><br>Cámara Pelco a color,<br>Modelo Esprit, Serie ES30C   | 1995                 | CENAPRED                |
|   |       |                    |   |                | <b>Cámara térmica:</b><br>Cámara de imágenes infrarrojas   | 1997                 | IGEOF<br>CENAPRED       |
|   |       |                    |   |                |  | 2000                 | CENAPRED                |
|   |       |                    |   |                |  | 1995                 | CENAPRED                |
|   |       |                    |   |                | <b>Repetidor de voz:</b><br><br><b>Repetidor de señales sísmicas provenientes Caló:</b><br>Telemetría analógica portadora: 449.625 MHz                             | 1997                 | TELMEX                  |
| <b>Enlace Digital E1 de Alta Velocidad</b>  |       |                    |   |                |  |                      |                         |



*Vista interior de la caseta de Altzomoni: a) cámara de video, b) y d) vista general de los equipos  
c) radios de telemetría*

| Estación  | Clave | Localización           | Coordenadas geográficas                      | Altitud (msnm) | Equipos  | Fecha de instalación | Institución responsable |
|---|-------|------------------------|--|----------------|--|----------------------|-------------------------|
| Nexpayantla   | PIN   | Loma al SW de Tlamacas | Latitud: 19.0465° N<br>Longitud : 98.6355° W | 4100           | <b>Deformación:</b><br>Inclímetro biaxial: 701-2A<br>Applied Geomechanics<br>Equipo acondicionador: USGS<br>Equipo de transmisión: Motorola<br>Handy Talkie 412.00 MHz<br>Potencia de transmisión: 4 Watts | Enero-1995           | CENAPRED                |
|  |       |                        |  |                |  |                      |                         |

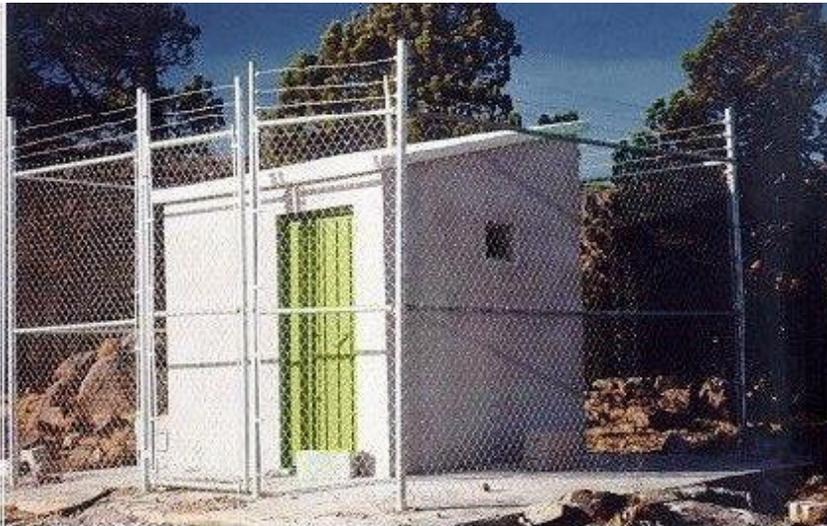
| Estación  | Clave | Localización                    | Coordenadas geográficas                     | Altitud (msnm) | Equipos  | Fecha de instalación | Institución responsable |
|---|-------|---------------------------------|---|----------------|--|----------------------|-------------------------|
| Zorzal  | PFM2  | Junto a la barranca La Espinera | Latitud: 19.0502° N<br>Longitud : 98.640° W | 3985           | <p><b>Detector acústico de flujos:</b></p> <p>Geófono: 10 –250 Hz<br/> Acondicionador: USGS<br/> Equipo de transmisión:<br/> Neulink RF-115<br/> Pluviómetro<br/> Potencia de transmisión :<br/> 4 Watts</p> | Agosto-1998          | CENAPRED                |
|  |       |                                 |   |                |  |                      |                         |

| Estación | Clave | Localización                                     | Coordenadas geográficas                     | Altitud (msnm) | Equipos   | Fecha de instalación | Institución responsable |
|----------|-------|--|---|----------------|---|----------------------|-------------------------|
| Unión    | PFM3  | Unión de las barrancas La Espinera y Tenenepanco | Latitud: 19.0681° N<br>Longitud: 98.6122° W | 3693           | <b>Detector acústico de flujos:</b><br><br>Geófono: 10–250 Hz<br>Acondicionador: USGS<br>Equipo de transmisión: Neulink RF-115<br>Pluviómetro<br>Potencia de transmisión: 4 Watts | Agosto-1998          | CENAPRED                |



## ESTACIONES DE MONITOREO DEL VOLCÁN CITLALTÉPETL

| Estación | Clave | Localización  | Coordenadas geográficas                        | Altitud (msnm) | Equipos  | Fecha de instalación | Institución responsable |
|----------|-------|---|--|----------------|--|----------------------|-------------------------|
| Halcón   | POH   | Ladera norte del volcán, límites de Puebla y Veracruz | Latitud: 19.06889 °N<br>Longitud: 97.28026 ° W | 4150 msnm      | <p><b>Sísmico:</b><br/>Sismómetro uniaxial: Mark L-4C de 1 Hz<br/>Acondicionador: TH11 Kinematics<br/>Telemetría analógica:<br/>Portadora: 415.9625 MHz<br/>Subportadora: V 1700 Hz<br/>Equipo de transmisión: Monitron<br/>Potencia de transmisión : 1 Watts</p> <p>Nota: Esta señal es utilizada para discriminar temblores regionales de los eventos del Popocatepetl</p> | Marzo-1998           | CENAPRED<br>OCTUV       |



20/ mar/98. Estación sísmica Halcón, Pico de Orizaba (foto: R. Quaas) e0320982.jp

**SEGOB**  
SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN



**SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN**  
**COORDINACIÓN NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL**  
**CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES**

Av. Delfín Madrigal No.665,  
Col. Pedregal de Sto. Domingo,  
Del. Coyoacán,  
México D.F., C.P. 04360

[www.cenapred.gob.mx](http://www.cenapred.gob.mx)  
[www.proteccioncivil.gob.mx](http://www.proteccioncivil.gob.mx)