



03860

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

16

INSTITUTO DE GEOFÍSICA
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS FLUJOS LAHÁRICOS
ORIGINADOS DE ENERO DE 1999 A OCTUBRE
DE 2000 EN EL SECTOR NE DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MAESTRA EN CIENCIAS (VULCANOLOGÍA)

PRESENTA

BEATRIZ L OROPEZA VILLALOBOS

ASESOR: DR. HUGO DELGADO GRANADOS

MÉXICO, D.F.

MAYO DE 2001



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS FLUJOS
LAHÁRICOS ORIGINADOS DE ENERO DE 1999
A OCTUBRE DE 2000 EN EL SECTOR NE DEL
VOLCÁN POPOCATÉPETL

A mis amados padres

A mis queridas hermanas

A mis amigos Mario, David, Benjamín, Marek, Raúl, Ricardo y Jesús

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Hugo Delgado, por su instrucción y dirección acertada que hicieron posible la elaboración de la tesis.

A los doctores Claus Siebe, Gerardo Carrasco y Tomás Morales y al M. En I. Roberto Quas, por sus valiosos comentarios y correcciones que permitieron enriquecer la presente tesis.

Al CENAPRED, por la beca otorgada que permitió la elaboración del presente trabajo.

Al Dr. Carlos Valdés, jefe del área de Riesgo Volcánico y al personal del Centro Nacional de Prevención de Desastres, por su amable ayuda para recabar los datos de los detectores acústicos de flujo y la información visual de los flujos en el Popocatepetl.

Al Dr. Oscar Campos Enríquez, coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra, por sus valiosos comentarios e interés para la presentación de la tesis.

Al Dr. Juan Manuel Espíndola y al Dr. José Luis Macías, por la ayuda y comentarios.

Al personal del puesto militar de observación *Flujos3*, que amablemente me brindaron información y fotografías para la complementación de los datos.

A mis queridísimos padres y hermanas, que han confiado en mí y siempre me han apoyado y querido. También a mis sobrinitos por su alegría y cariño.

A mis queridos amigos de siempre: Mario, David, Benjamín y Jesús por su ayuda, pero principalmente por su cariño y apoyo. Así también al Dr. Raúl Cabrera y al Ing. Ricardo Vargas, a Marelita y a Beto, y a mi querido primo Ric por las mismas razones.

A Lucio Cárdenas, por proporcionarme fotografías y principalmente, por sus muestras de apoyo.

A mis amigos y compañeros del Departamento de Vulcanología: Karina, Liz, Beto, Charlie, Nacho, Abel, Pati, Miguel, Esther, Lilia, Isaac, Gabriel, Teresa, Bernardo, Renato, José Juan, José Luis, Marcos, Damiano, Virgilio, Hernando, Noé, Ricardo, Lucía, a la Sra. Esther y a mis amigos de otros departamentos: Carlitos, Adolfo Fer, José Carlos, Oscar, Erica, Memo y Manuel quienes siempre me alentaron al término de mi trabajo académico.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	1
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	
I.1 Antecedentes	2
I.2 Trabajos previos	3
I.3 Objetivos	4
I.4 Metodología	5
CAPITULO II LAHARES	
II.1 Introducción	6
II.2 Lahares	8
II.2.1 Definición	
II.2.2 Origen y ocurrencia	
II.2.3 Aporte de material sólido	
II.2.4 Aporte del agua	
II.2.5 Acreción y dilución	
II.2.6 Tamaño	
II.3 Flujos de escombros	11
II.3.1 Definición	
II.3.2 Porcentaje de contenido de partículas	
II.3.3 Características sedimentológicas y geomorfológicas	
II.4 Flujos hiperconcentrados	13
II.4.1 Definición	
II.4.2 Porcentaje de contenido de partículas	
II.4.3 Características sedimentológicas y geomorfológicas	
II.5 Casos históricos	16
II.5.1 Nevado del Ruiz, Colombia	
II.5.2 Monte Pinatubo, Filipinas	
CAPITULO III VOLCÁN POPOCATÉPETL	
III.1 Descripción y localización	19
III.2 Entorno geográfico	21
III.2.1 Clima y vegetación	
III.2.2 Hidrografía y precipitación pluvial	
III.2.3 Glaciares	
III.3 Entorno geológico	24
III.3.1 Geología	
III.3.2 Geomorfología	
III.4 Lahares	26
III.4.1 Lahares del Valle de Puebla	
III.4.2 Lahar de San Nicolás	
III.4.3 Lahar de Xalitzintla	

CAPITULO IV**INSTRUMENTACIÓN**

IV.1	Monitoreo del volcán Popocatépetl	30
IV.2.	Red de detectores acústicos de flujo (AFM)	30
IV.2.1	Otros sistemas de alertamiento para lahares	
IV.2.2	Ubicación del sistema AFM del Popocatépetl	
IV.3	Instrumentación de los AFM	35
IV.3.1	Características	
IV.3.2	Geófonos	
IV.3.3	Pluviómetros	
IV.3.4	Operación	
IV.4	Telemetría	38
IV.5	Archivos generados	40
IV.6	Experiencias con el sistema AFM en otros volcanes	42
IV.6.1	Redoubt, Alaska	
IV.6.2	Monte Pinatubo, Filipinas	

CAPÍTULO V**PREPROCESAMIENTO DE LOS DATOS**

V.1	Introducción	43
V.2	Lenguaje	43
V.3	Objetivos	44
V.4	Funcionamiento	44
V.5	Archivos de salida	47
V.6	Etapas de preprocesamiento	48
V.7	Eventos reconocidos	50

CAPÍTULO VI**CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE LOS FLUJOS LAHÁRICOS**

VI.1	Bitácora de datos	52
VI.1.1	Puesto militar de observación	
VI.1.2	Adquisición de datos	
VI.1.3	Bitácora 1999 y 2000	
VI.2	Análisis preliminar de los datos	54
VI.2.1	Datos totales	
VI.2.2	Distribución horaria	
VI.2.3	Distribución mensual	
VI.3	Eventos laháricos	56
VI.3.1	Banda de frecuencia de mejor detección	
VI.3.2	Clasificación de los eventos	
VI.3.3	Flujos no reconocidos	
VI.3.4	Eventos reconocidos	
VI.4	Parámetros estimados	61
VI.4.1	Magnitud	
VI.4.2	Flujo acústico	
VI.4.3	Velocidad del flujo	
VI.4.4	Descargas promedio	

CAPÍTULO VII	CORRELACIÓN DE DATOS E INTERPRETACIÓN	
VII.1	Correlación de amplitudes, velocidades, flujos acústicos y descargas	69
VII.2	Relación de eventos con las épocas del año	73
VII.3	Lahar del 24 de mayo del 2000	76
VII.3.1	Descripción	
VII.3.2	Análisis sedimentológico	
VII.3.3	Parámetros estadísticos	
VII.4	Implicaciones de riesgo	83
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		84
BIBLIOGRAFÍA		86
Apéndice 1	Modos de alerta reconocidos	
Apéndice 2	Bitácora de datos 1999 y 2000	
Apéndice 3	Análisis gráfico previo de datos	
Apéndice 4	Distribución horaria	
Apéndice 5	Distribución mensual	
Apéndice 6	Eventos de flujo reconocidos	
Apéndice 7	Gráficas de los eventos de flujo más importantes	

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

FIGURAS

Número	Página	Descripción
2.1	7	Tipos de flujo agua/sedimento basado en las proporciones relativas de sedimento y agua (modificado de Pierson y Costa, 1987)
2.2	15	Diagrama esquemático de mecanismos de soporte de sedimento y depósito (Smith y Lowe, 1991)
2.3	17	Lahar en Armero, Colombia
3.1	20	Ubicación del volcán Popocatepetl
3.2	23	Glaciares Ventorrillo y Noroccidental (Fotografía Lucio Cárdenas, abril de 1996))
3.3	23	Imagen infrarroja de los glaciares que muestra temperaturas mayores en la base del glaciar (septiembre de 1997)
3.4	27	Áreas afectadas por lahares (Tomada de Siebe et al., 1996a)
3.5	28	Depósito del lahar de San Nicolás soportado por matriz arenosa con clastos angulosos a subangulosos (Fotografía de A. González, octubre del 2000)
3.6	29	Depósitos del lahar de Xalitlitzintla del 1 de julio de 1997 cerca de la estación PFM3, mostrando la morfología del canal formado por el flujo lahárico. La persona de pié en la sección superior izquierda de la foto permite observar la escala (Fotografía H. Delgado, enero de 1998)
4.1	32	Ubicación de las estaciones AFM
4.2	33	Ubicación de las estaciones de detección de flujo PFM1 y PFM2 (Fotografía R. Quaas, CENAPRED)
4.3	34	Estación de detección de flujos PFM3 vista desde la estación PFM1 (Fotografía R. Quaas, CENAPRED)
4.4.	34	Localización de la repetidora Tlamacas (Fotografía R. Quaas, CENAPRED)
4.5	35	Equipamiento de una estación AFM (Cenapred, 2000)
4.6	36	Características físicas de una estación AFM en la cual se observa que es compacta y portátil (Fotografía CENAPRED)
4.7	38	Pluviómetro de la estación PFM2, Zorzal (Fotografía CENAPRED)
4.8	39	Central de adquisición y procesamiento de datos (Fotografía del CENAPRED)
5.1	44	Diagrama de árbol de los directorios de datos
5.2	51	Relación entre dinámica de un lahar y registro en el AFM
6.1	53	Obtención de datos del flujo en la barranca (Fotografía del puesto militar de observación <i>Flujos 3</i> , julio de 1999)
6.2	53	Escala vertical para estimar la profundidad de los flujos (Fotografía del puesto militar de observación <i>Flujos 3</i> , julio de 1999)
6.3	56	Rango de respuesta en frecuencias para AFM y sismómetros típicos (USGS, 2000)
6.4	61	Valores máximos de velocidad vertical de flujos reconocidos
6.5	65	Determinación de la distancia horizontal entre estaciones
6.6	65	Determinación de la distancia total recorrida entre cada estación
6.7	67	Elementos de un canal idealizado para el cálculo de la descarga
7.1	69	Amplitud máxima contra duración de los eventos reconocidos
7.2	70	Flujo acústico contra amplitud de la banda baja observada
7.3	71	Amplitud de la banda baja contra velocidad calculada

7.4	72	Amplitud de la banda baja contra descarga
7.5	73	Número de eventos en 1999 y temperatura media mensual en el Valle de México
7.6	74	Número de eventos en 2000 y temperatura media mensual en el Valle de México
7.7	75	Eventos de flujo y valores de lluvia durante 1999
7.8	75	Eventos de flujo y valores de lluvia durante 2000
7.9	76	Aspecto del volcán previo al evento lahárico del 24 de mayo del 2000 (Fotografía del CENAPRED)
7.10	77	Sección transversal del canal de la estación <i>Puesto Militar</i>
7.11	78	Distribución del tamaño de granos de la muestra PM-BF
7.12	79	Distribución del tamaño de granos de la muestra PM-C
7.13	79	Distribución del tamaño de granos de la muestra B-B
7.14	80	Distribución del tamaño de granos de la muestra B-C

TABLAS

Número	Página	Descripción
1	14	Comparación de características reológicas entre diferentes flujos de escombros volcánicos y agua
2	16	Casos históricos de lahares (modificado de Tilling y Beate, 1993)
3	22	<i>Precipitación pluvial media anual en la Sierra Nevada (CNA, 2000)</i>
4	58	Clasificación de los eventos detectados por el sistema de AFM
5	62	Flujo acústico y amplitud máxima de eventos de flujo
6	65	Distancia entre estaciones AFM
7	66	Velocidades de los flujos que presentan registro en la estación 3
8	68	Velocidades y descargas de flujo calculadas a partir de la información de la bitácora de datos
9	81	Parámetros estadísticos del evento del 24 de mayo del 2000

RESUMEN

La actividad actual del volcán Popocatepetl se ha manifestado de varias maneras. Entre ellas la ocurrencia de lahares, los cuales son mezclas de agua y sedimento de origen volcánico que fluyen por los cauces que se encuentran en las laderas del volcán. En los alrededores del volcán se han estudiado depósitos de lahares de gran tamaño, ocurridos en tiempos históricos y prehistóricos, pero no se había investigado sobre los eventos de flujo que ocurren actualmente.

En el presente trabajo se determinan los principales parámetros físicos asociados a los lahares ocurridos desde enero de 1999 hasta octubre del 2000: magnitud, flujo acústico, velocidad y descarga. Para ello se utilizaron los datos generados por el sistema de detectores acústicos de flujo (AFM) del CENAPRED instalados en la ladera NE del volcán Popocatepetl y por el puesto militar de observación ubicado en sitio estratégico en el volcán. Los resultados obtenidos muestran que los rangos de velocidad son menores a 3.5 m/s y las descargas máximas son menores a 3.1 m³/s, pero el valor promedio oscila alrededor de 0.5 m³/s. Estos valores señalan que los eventos laháricos actuales en el volcán son de magnitud pequeña.

Se determina que el origen del agua necesaria para la ocurrencia de estos flujos es producida por una combinación del deshielo de glaciares por temperaturas elevadas y lluvias intensas en el área, siendo la primera el aporte principal.

Finalmente, se determina que el nivel de riesgo asociado a estos lahares es bajo y consiste principalmente en riesgo de inundación pasiva de las poblaciones ubicadas en o cerca de los cauces de las barrancas que drenan el sector NE del volcán.

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

I.1 ANTECEDENTES

Los procesos volcánicos que en su inicio y movimiento involucran fragmentos sólidos y agua son considerados una fuente importante de peligro en las áreas circundantes a un volcán, junto con aquellos eventos de temperatura elevada, tal como los flujos de lava o piroclásticos. La evidencia geológica e histórica de su ocurrencia muestra que son eventos que pueden provocar daños importantes a la población y la infraestructura.

En las últimas décadas los investigadores, las autoridades y la población han coincidido en otorgar a estos eventos la importancia adecuada y actualmente se realizan diferentes estudios de los eventos de flujo provenientes de un volcán y se establecen sistemas para su detección.

Incluidos entre las mezclas de sedimento de origen volcánico y agua, se encuentran los lahares, que se distinguen de otros flujos por sus características reológicas, comportamiento y proporciones de material sólido y agua.

Un factor de riesgo asociado a los flujos laháricos es su impredecibilidad, ya que estos pueden ocurrir antes, durante o mucho después de una actividad volcánica importante. A diferencia de otros eventos volcánicos es posible predecir la trayectoria de los lahares, debido a que ésta es gobernada principalmente por las características topográficas del sitio. Es por esta razón que las poblaciones localizadas en los cauces de arroyos o en la base de los volcanes sean las más expuestas a ser afectadas en el caso de eventos laháricos de magnitud importante. Un estudio de la cantidad de material sólido disponible en el área fuente o origen y del posible aporte de agua auxilian en el cálculo aproximado del volumen de estos eventos.

Los lahares son fuerzas poderosas capaces de movilizar una gran cantidad de escombros, árboles, agua, etc. a través de distancias largas en un periodo de tiempo corto. Se comportan como un flujo de concreto que destruye e incorpora todo tipo de materiales a su paso.

México es un país con alto potencial de actividad volcánica, consecuencia de las condiciones geodinámicas del territorio nacional. Algunos de los volcanes del país presentan actividad histórica, tal como el Chichón, el Tacaná y el Popocatépetl, entre otros. La ubicación de este último, cercano a grandes centros poblacionales y la etapa de actividad actual lo convierten en un objeto importante de estudio e investigación.

Las características particulares que favorecen la formación de lahares en el Popocatépetl incluyen un volumen alto de ceniza depositada en las laderas por los eventos explosivos que han ocurrido en etapas eruptivas previas y en los últimos años de la etapa eruptiva actual; la ubicación geográfica del volcán, en una región en que las lluvias de verano pueden ser constantes e intensas y, finalmente, la existencia de un glaciar subtropical que cubre el flanco norte del volcán.

En la actualidad es frecuente el registro de lahares pequeños en las barrancas del volcán. Sin embargo existen escenarios de mayor magnitud que son necesarios estudiar con el fin de conocer mejor la dinámica de estos eventos, así como su ocurrencia,

alcance y posibles efectos. Es necesaria la caracterización física de lahares del presente periodo de actividad eruptiva para la toma de decisiones relacionadas a la mitigación de riesgo.

La investigación de estos eventos en el Popocatepetl, realizada por investigadores nacionales y extranjeros es relativamente reciente. Actualmente se hace necesario el estudio de la dinámica de flujo y caracterización física de lahares del presente periodo de actividad eruptiva.

La existencia de una red de detectores acústicos de flujo (AFM) instalada en las laderas del volcán permite la adquisición de datos para detectar los flujos volcánicos de manera eficiente. Relacionar los datos registrados con los diferentes tipos de lahares, su volumen y descarga auxiliará en la percepción de riesgo que ellos representan.

1.2 TRABAJOS PREVIOS

Investigaciones sobre mezclas saturadas de escombros de roca, lodo y agua provenientes de volcanes han sido realizadas hace largo tiempo. La primera definición formal de lahar para estos eventos corresponde a Van Bemmelen en 1949 (Fisher y Schmincke, 1984): Se denomina lahar a una brecha volcánica transportada por agua.

Un gran número de investigaciones han sido realizadas desde entonces, enfocadas a estudiar diversos aspectos de los lahares, tales como su clasificación, descripción en varios volcanes del mundo, sedimentología, efectos, dinámica de flujo, modelación y simulación, etc.

Investigaciones importantes realizadas para observar las características físicas de los lahares y su comportamiento dinámico son las de Takahashi (1978, 1980, 1981) e Iverson (1997). Smith y Lowe (1991) detallaron los procesos de transporte y depositación. La transición entre flujos tuvo un desarrollo exitoso en el trabajo de Pierson y Scott (1985) y Costa (1988) presenta un trabajo básico e indispensable para la clasificación de mezclas de escombros volcánicos y agua.

Un tratamiento matemático y simulaciones de lahares ocurridos en Japón han sido expuestos por Miyamoto y Suzuki (1991), Yamashita y Miyamoto (1992) y Mizuyama y Miyamoto (1992). Iverson (1997) ha realizado un profundo e interesante trabajo que muestra los resultados de simulaciones en canales confinados.

Existen estudios de la ocurrencia de lahares históricos y prehistóricos en sitios específicos como el muy estudiado caso del Monte Santa Elena. Scott (1988) realizó investigaciones sobre lahares prehistóricos, mientras que los lahares de 1980 fueron descritos y estudiados por Janda et al. (1988), Fink (1981), Pierson (1985), Mc Ewen y Malin (1989) y Waitt (1989). Otros eventos laháricos estudiados son aquellos eventos de gran magnitud del Nevado del Ruíz en 1985 por Mójica et al. (1985) y Naranjo et al. (1986).

Los trabajos realizados con los datos obtenidos de los detectores acústicos de flujo (AFM), principalmente en lahares de 1992 en el Monte Pinatubo, muestran la utilidad del sistema a través del estudio de los datos aportados por los instrumentos y puestos de observación. Sobre ello escriben Hadley y LaHusen (1995), LaHusen (1996), Marcial et al. (1996), Tuñgol y Regalado (1996) y Martínez et al. (1996).

En el caso del Popocatepetl, Siebe et al., (1996a,b) han estudiado lahares históricos y su afectación a zonas arqueológicas cercanas, mientras que Lozano y Carrasco (1997) estudiaron depósitos de lahares en el sector suroeste, Bursik et al. (1999) realizaron análisis y descripciones de un lahar ocurrido en julio de 1997, mientras que González et al. (1997) y González (2000) dirigen su atención principalmente al lahar de San Nicolás en el sector noreste del volcán.

Poco trabajo se ha dedicado para determinar las características físicas de lahares contemporáneos, al tiempo de su manifestación o sobre su modelación y simulación.

Adicionalmente se ha estudiado el posible impacto de los lahares en áreas circundantes (Ávalos, 1998) mediante un análisis de los peligros asociados a su ocurrencia en el Popocatepetl. García et al., (1995) realizaron un trabajo sobre la posible ocurrencia de un flujo en el sector oriente del volcán, Salgado et al. (1998) presentan un análisis topográfico e hidrográfico de la barranca de Huiloac en el Popocatepetl. Finalmente Ramos y Echavarría (1999) presentan una propuesta de implementación de obras civiles para mitigar riesgos por lahares en el Popocatepetl.

Quaas et al. (1999) han tratado aspectos instrumentales de los AFM del Popocatepetl en una descripción general del sistema de monitoreo del volcán; Castelán et al. (1999) enfocan su atención al sistema de detectores acústicos de flujos y Oropeza et al. (1999, 2000) estudian los datos obtenidos de los AFM instalados en el Popocatepetl para la caracterización de lahares.

1.3 OBJETIVOS

- ◆ Determinar características físicas de los lahares que ocurrieron en el periodo comprendido de enero de 1999 a octubre del 2000 en el Popocatepetl: descarga, velocidad, magnitud y flujo acústico.
- ◆ Clasificar el tipo de lahares que se produjeron bajo las condiciones de actividad volcánica prevalecientes en el periodo.
- ◆ Encontrar el rango de frecuencias de vibración del terreno en el que los lahares son mejor detectados por los sensores del sistema de AFM.
- ◆ Relacionar la ocurrencia de lahares con condiciones de lluvia intensa o con el deshielo de glaciares de acuerdo a datos pluviométricos y a evidencias de deshielo del glaciar.
- ◆ Encontrar el rango de frecuencias características de los lahares del Popocatepetl durante el periodo mencionado para identificarlos en el sistema de alerta del CENAPRED.

I.4 METODOLOGÍA

Para el cumplimiento de los objetivos anteriores se requiere la revisión de los mecanismos de generación, transporte y depósito de un lahar; el estudio generalizado del área en la cual se desea acotar el evento, en este caso el volcán Popocatepetl, y la comprensión del funcionamiento del sistema de adquisición de los datos necesarios por la red de detectores acústicos de flujo. A continuación se analiza la información generada por esta red. El análisis incluye una etapa de preprocesamiento y posteriormente la obtención de parámetros físicos que caracterizan el comportamiento de los eventos estudiados. En estas últimas dos etapas se realizan las siguientes actividades:

- Búsqueda de los eventos importantes mediante el preprocesamiento de los datos obtenidos de la red de detectores acústicos de flujo, para correlacionarlos con aquellos reportados por el puesto de observación militar instalado en la parte superior de la barranca.
- Graficación de la información para identificar la banda de frecuencia que refleja mejor la ocurrencia de eventos e identificar la amplitud de los eventos y su duración y así obtener la amplitud umbral para diferenciar entre eventos de lahar y corrientes de agua con sedimento.
- Cálculo del flujo acústico y descarga de flujo con los resultados del proceso anterior y con información reportada por el puesto militar de observación.
- Graficación de la amplitud de la señal de los AFM contra el flujo acústico, obtención de la curva de mejor ajuste y observación de las tendencias generales de los datos.
- Determinación de las velocidades promedio de lahares, a partir de su detección en dos de los sensores del sistema AFM.
- Análisis granulométrico de uno de los eventos recientes más importantes para determinar el tipo de flujo. Integración de estos resultados con datos de AFM.
- Análisis de ocurrencia de los datos en tiempo para relacionarlos con épocas de lluvias intensas o periodos de ablación glacial.

CAPÍTULO II

LAHARES

CAPÍTULO II LAHARES

II.1 INTRODUCCIÓN

Los flujos producidos en volcanes, que involucran material sólido de origen volcánico y agua son diferentes tanto en su composición como en su comportamiento. Según Pierson y Costa (1987) se dividen en torrentes o flujos de agua, lahares y avalanchas de escombros (Fig. 2.1).

Torrentes o flujos de agua

Flujos completamente turbulentos con concentración baja de sedimentos: El agua y los sedimentos son dos fases separadas y distintas. Esencialmente no presentan resistencia crítica o esfuerzo cortante y se pueden considerar un fluido newtoniano. Las cantidades de sedimento que transportan los torrentes se encuentran en el rango de 1-40% en peso o 0.4-20% en volumen (Costa, 1988). La turbulencia es el principal mecanismo de soporte de sedimento y el depósito ocurre principalmente por fracción (Pierson y Costa, 1987).

Lahares

Los lahares son flujos intermedios entre flujos de agua y avalanchas de escombros e incluyen a los flujos hiperconcentrados y a los flujos de escombros. Estos fenómenos involucran material sólido granular saturado que fluye bajo la fuerza debida a la atracción de la gravedad. Las fases sólida y líquida son inseparables y el comportamiento de flujo depende de ambas. Las características reológicas y fluidas son ampliamente controladas por la cantidad de finos (limo y arcilla) en el flujo.

Avalanchas de escombros

Las avalanchas de escombros son flujos granulares inerciales muy rápidos resultado del deslizamiento de grandes volúmenes de material (Pierson y Costa, 1987) por colapsos sectoriales de conos volcánicos estructuralmente inestables (Siebert, 1984). Estos eventos consisten en una gran masa de material sólido fragmentado, que presentan un régimen de flujo granular, donde el material sólido fluye muy rápido y con alto contenido de energía bajo la atracción de la gravedad y se encuentra controlado por fuerzas de impacto, inerciales, friccionales y colisión entre partículas (Bates y Jackson, 1987). Una característica de este flujo es que involucra material no saturado. El flujo granular consta de dos fases distintas, la fase sólida y la fluida. Esta última puede consistir en aire, gas volcánico, vapor o agua líquida. El porcentaje de material sólido es muy cercano al 100%, con contenido de agua de hasta 23% en volumen, el cual define el límite para lahares.

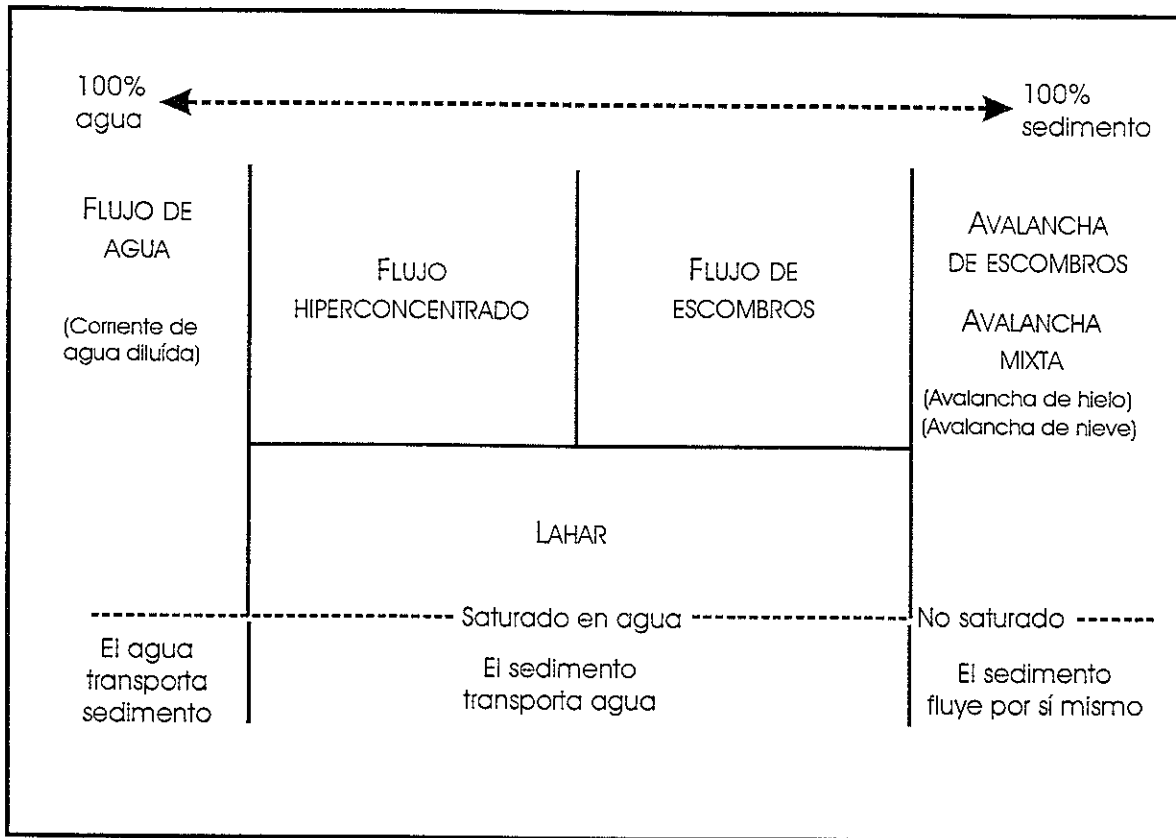


Fig. 2.1 Tipos de flujo agua/sedimento basado en las proporciones relativas de sedimento y agua (modificado de Pierson y Costa, 1987).

II.2 LAHARES

II.2.1 Definición

La definición más antigua se debe a Van Bemmelen (1949, en Fisher y Schmincke, 1984), que denomina lahar a una brecha volcánica transportada por agua. Sin embargo, de acuerdo a estudios de Pierson y Costa (1987), en los flujos de lahar es el sedimento el que transporta al agua, o en todo caso, son dos fases inseparables.

Takahashi (1981) menciona que los flujos de escombros son sinónimos de lahar, si este último ocurre en tiempos eruptivos y no distingue entre flujo de escombros y flujos hiperconcentrados. Considera a los flujos de escombros como un tipo de movimiento de sedimento subaéreo masivo, en el cual los granos se dispersan en el agua o colada de arcillas con la concentración menor que en acumulaciones estables de sedimento.

Con el afán de encontrar una definición concensada de este concepto, la Sociedad Geológica de América convocó a una conferencia donde se definió un lahar como una mezcla de escombros de roca y agua (aparte de un flujo de corriente normal) que fluyen rápidamente por las laderas de un volcán (Smith y Fritz, 1989). En este caso, la corriente normal se refiere a una corriente pluvial. Esta definición se refiere a un evento volcánico complejo, no necesariamente relacionado con una erupción e involucra uno o más procesos de flujo espacial y temporalmente variables. Sin embargo, no se refiere a los depósitos. Esta definición y la consideración de incluir a los flujos de escombros, flujos hiperconcentrados y la transición reológica entre ellos, serán utilizadas en el presente trabajo.

La división de los lahares en flujos de escombros y flujos hiperconcentrados está basada principalmente en una diferencia de comportamiento reológico (Tabla 1).

En términos generales, los lahares presentan un esfuerzo cortante medible y un régimen de flujo que, dependiendo del contenido de sedimento, puede variar de turbulento a laminar. El rango de concentración de sedimentos varía entre 40% en peso o 20% en volumen (Beverage y Culbertson, 1964) hasta 90% en peso o 77% en volumen. Las densidades de masa características de estos flujos varían entre 1.33 y 2.30 g/cm³ según Costa (1988) y entre 1.40 g/cm³ y 2.53 g/cm³ según Takahashi (1981). Estas densidades de masa son equivalentes a una concentración de volumen de material sólido de alrededor del 25 al 80% (Takahashi, 1981).

II.2.2 Origen y ocurrencia

Los lahares pueden dividirse en lahares de lluvia o lahares secundarios, que ocurren antes y después de las erupciones y se forman cuando la lluvia erosiona depósitos de fragmentos sueltos en las pendientes de un volcán, y en lahares primarios que resultan directamente de las erupciones cuando material volcánico de altas temperaturas funde hielo o nieve de las cimas del volcán.

Una clasificación similar incluye a los lahares primarios y secundarios. Los primeros se producen directamente en una erupción y los secundarios como consecuencia posterior a la actividad volcánica (Alexander, 1995).

Basado en la distribución del tamaño de sedimentos en los depósitos, los lahares se dividen en cohesivos, los cuales contienen más del 5% en peso de material de tamaño

menor a arcillas, que generalmente proviene de alteraciones hidrotermales de las rocas del volcán y no cohesivos, cuyo contenido de material de tamaño de arcilla es menor al 5% y sus implicaciones de riesgo son menores, ya que la distancia alcanzada por el flujo es menor a los lahares cohesivos (Scott, 1985).

Los lahares se asocian principalmente, pero no exclusivamente, a estratovolcanes de composición andesítica o dacítica, debido a que las características particulares de estos, tales como la altura promedio, la energía potencial asociada a ellos, el ángulo de inclinación de sus laderas, y el tipo de erupción explosiva que provee de material fragmentado, incrementan la posibilidad de ocurrencia de estos eventos. Además, muchos de estos volcanes están cubiertos por hielo o nieve que pueden aportar el agua suficiente para la generación de un lahar.

II.2.3 Aporte de material sólido

La producción de sedimento y las tasas de erosión en áreas volcánicas son muy altas, debido a los grandes volúmenes de sedimento granular suelto generados por procesos volcánicos (Smith y Lowe, 1991). Las partículas involucradas en los flujos pueden dividirse de acuerdo a su origen en partículas epiclásticas, las cuales provienen de rocas, volcánicas o no volcánicas, y que han sufrido alguna alteración física, y en partículas volcánicas primarias, las cuales se han formado directamente a partir de procesos volcánicos. De acuerdo a Fisher y Schmincke (1984), con excepción de los lahares relacionados a avalanchas de escombros, la mayoría de los fragmentos en los depósitos resultantes son de origen autoclástico o proclástico.

La variedad de materiales que pueden ser transportados por un flujo lahárico es amplia. Además de fragmentos líticos, de minerales individuales y de vidrio, es común encontrar en depósitos recientes restos de material orgánico, como troncos, pedazos de corteza de árboles, plantas y animales. En ocasiones puede transportar trozos de edificios o estructuras destruidos al paso del flujo. La aparición de alguno de estos elementos puede auxiliar en la determinación de la trayectoria y fuerza de estos eventos.

Una clasificación importante del material sólido removilizado y transportado por un flujo está relacionada al tamaño de grano. Lahares de gran tamaño pueden transportar bloques de roca de un tamaño mayor a 10 metros. La escala descendente es amplia e incluye bloques, grava, arena, limo y arcilla. En este punto muchos autores coinciden en que la distribución del tamaño de grano es un elemento clave para determinar el comportamiento, alcance y riesgo de un lahar.

II.2.4 Aporte del agua

El agua puede provenir de diferentes fuentes. Durante la temporada de mayor precipitación pluvial las lluvias torrenciales pueden inicialmente saturar el material depositado en las laderas, y a continuación provocar el desequilibrio que provoque el inicio del movimiento de la mezcla sedimento-agua. Este es considerado el principal factor para la ocurrencia de lahares.

En varios casos, la altura de muchos estratovolcanes provoca que sus cumbres se encuentren cubiertas de glaciares o nieve temporal y durante etapas eruptivas, la temperatura alta del material eyectado puede provocar que algún volumen de hielo o nieve sea fundido. Por otra parte, la radiación funde nieves temporales que en muchas ocasiones se forman en periodos cortos de frío intenso y humedad disponible y el agua resultante satura los depósitos de detritos.

Según Crandell et al. (1984) otras posibles fuentes de aporte de agua son el drenaje repentino de un lago cratérico, la entrada de flujos piroclásticos dentro de un río, el movimiento de un flujo de lava dentro de nieve o hielo o una avalancha de escombros saturada en agua.

II.2.5 Incorporación de material y dilución

Las transformaciones de flujo son los cambios en el comportamiento del flujo entre estados laminares y turbulentos. Las superficies de transformación resultado de la adición de fluido (*dilution*) o incorporación de sedimento (*bulking*) son comunes en los eventos laháricos.

El proceso de adición o incorporación de material o *bulking* ofrece la mejor explicación para la abundancia de clastos redondeados y la diversidad litológica de clastos que se incrementa (si es que hay variedad de material) conforme el flujo avanza pendiente abajo (Smith y Lowe, 1991).

La dilución ocurre cuando los flujos de escombros se mezclan con agua, comúnmente en la confluencia con corrientes permanentes o estanques y lagos. Los flujos hiperconcentrados son generados por la dilución de los flujos de escombros y éstos a su vez pueden provenir de la dilución de avalanchas de escombros (Fig. 2.2).

II.2.6 Tamaño

Existen áreas extensas de depósitos de lahares, de miles de kilómetros cuadrados, tal como en la parte central y norte de la Sierra Nevada (Curtis, 1954, en Fisher y Schmincke, 1984) donde lahares del Mioceno Tardío y Plioceno Temprano se extendieron por un área de aproximadamente 31,000 km².

Los flujos de escombros volcánicos pueden poseer volúmenes de flujo y descargas grandes que les permitan viajar distancias de decenas de kilómetros. Los eventos no cohesivos pueden transportar más de 10⁷ m³ de sedimento en periodos entre 3 y 9 horas y recorrer distancias de más 100 km a partir de la fuente (Smith y Lowe, 1991). Los depósitos de lahares pueden alcanzar decenas de metros de altura.

Las velocidades de flujo varían ampliamente, debido a las diferencias en el carácter de los escombros, así como a las diferencias de concentración y distribución del tamaño de granos. También influye la forma del curso de tránsito como el ancho del canal, pendiente, etc. Las velocidades observadas varían en un rango de 0.5 a 20 m/s (Takahashi, 1981).

Un lahar puede ejercer una fuerza de impacto enorme sobre los obstáculos que encuentra en su camino. En Japón, una roca de alrededor de 3000 toneladas fué transportada algunos kilómetros por un flujo de escombros (Takahashi, 1981).

El tamaño final del depósito es menor al del flujo, debido a que un porcentaje mayor al 20% en volumen corresponde al agua que es expulsada y desecada cuando el depósito empieza a consolidarse.

II.3 FLUJOS DE ESCOMBROS

II.3.1 Definición

Smith y Lowe (1991) definen a los flujos de escombros (debris flow) como el flujo de una mezcla pobre de sedimentos y agua que exhibe resistencia al esfuerzo, mientras que Iverson (1997) menciona que los flujos de escombros ocurren cuando la masa de sedimento pobremente clasificado, agitado y saturado con agua, desciende las laderas en respuesta a la fuerza gravitacional. Fisher y Schmincke (1984) mencionan que los flujos de escombros son fluidos no newtonianos que tienen una resistencia crítica. Tienen un comportamiento semejante al concreto húmedo, presentan una alta densidad de masa y exhiben la propiedad de resistencia, la cual influye ampliamente la textura final y las estructuras del depósito.

Existen otros criterios para aproximar una definición, los cuales enfatizan la concentración de sedimentos, distribución de tamaño de grano, velocidades de frente de flujo, esfuerzos cortantes y tasas de deformación y demás características reológicas (Tabla 1).

II.3.2 Porcentaje de contenido de partículas

Los sólidos pueden constituir entre el 70 y el 90% en peso, lo que equivale entre 47 y 77% en volumen de la masa del flujo. Las densidades de masa generalmente se encuentran en el rango de 1.80-2.30 g/cm³ para sedimentos típicos pobremente clasificados (Costa, 1988).

Fisher y Schmincke (1984) consideran que las concentraciones de sólidos en un flujo de escombros son 80% o más en peso, 60% o más en volumen, mientras que Araña y Ortiz (1984) mencionan que los flujos de escombros presentan un contenido menor al 50% de partículas materiales de tamaño de arena.

Aún cuando plantea una duda de la exactitud de las mediciones, Takahashi (1981) menciona que las densidades de los flujos de escombros, entendidos como lahares, caen en el rango de 1400 kg/m³ a 2530 kg/m³. Estas densidades de masa son equivalentes a una concentración de volumen de material sólido de alrededor del 25 al 80%.

II.3.3 Características sedimentológicas y geomorfológicas

Los flujos de escombros crean abanicos aluviales o abanicos de escombros en las faldas de los volcanes. Los depósitos consisten en una mezcla de partículas pobremente clasificadas (Takahashi, 1981) o una distribución uniforme de tamaños de arcilla a bloques. Los clastos más grandes son soportados por una matriz de arena, limo y arcilla, pero algunos depósitos de flujos de escombros pueden ser soportados por clastos si la matriz se drena (Costa, 1988). La característica distinguible de flujos de escombros no alterados es una matriz lodosa que envuelve partículas mayores.

Las estructuras sedimentarias, incluyendo la estratificación, son virtualmente inexistentes en los depósitos de flujos de escombros. Sin embargo, es posible determinar los contactos entre los diferentes flujos. Los depósitos de flujos de escombros tienen una clasificación que varía entre pobre y extremadamente pobre. Los coeficientes de clasificación de Trask varían entre 3.6 y 12.3 (Costa, 1988). Otras características texturales

que pueden ser útiles en la identificación de los depósitos de flujos de escombros son la curtosis positiva y la distribución bimodal de tamaño (Scott, 1971, en Costa, 1988).

Scott (1988) menciona que puede existir concentración de bloques en la parte superior del depósito, formando gradación inversa. Sin embargo, algunos presentan gradación normal. En flujos delgados y viscosos que tienen poco contenido de agua, los clastos mayores tienen una orientación aleatoria a través de los depósitos. En los flujos más fluidos y menos viscosos, las partículas pueden presentar una orientación pobre preferentemente paralela o perpendicular a la dirección de flujo (Mills, 1984). Adicionalmente, Scott (1985) propone características de barras de bloques y guijarros soportados por clastos que precipitaron en el flujo en sitios de pérdida rápida de energía, denominados "cola de ballena"; otra característica en la frontera son las capas basales (*sole layers*), definidas como las subcapas basales distintivas texturalmente de los lahares, las cuales permiten la correlación de los límites del lahar y por lo tanto, la reconstrucción de la sección transversal del flujo.

En términos generales, los flujos de escombros y sus depósitos no son muy diferentes de aquellos generados en ambientes no volcánicos y pueden ser identificados por las mismas características y estudiados por los mismos métodos (Smith, 1986).

Las características geomorfológicas de los flujos de escombros en canales abiertos son compiladas por Costa (1988):

1. Morro en forma lobular pronunciado en el frente del flujo, comúnmente conteniendo una gran concentración de clastos grandes
2. Leveés laterales de depósitos muy gruesos
3. Formación de prominencias debido al flujo en oleadas o pulsos
4. Concentración de las partículas más grandes hacia la superficie y bordes de los flujos
5. Formación de un tapón rígido no deformable en el centro del flujo y cizallamiento máximo concentrado en los frentes del flujo (Pierson y Scott, 1985)

II.4 FLUJOS HIPERCONCENTRADOS

II.4.1 Definición

Smith y Lowe (1991) definen al flujo hiperconcentrado como un flujo intermedio en naturaleza entre uno de agua turbulento y uno de escombros viscoso, generalmente laminar. Smith (1991) define un flujo hiperconcentrado como una mezcla fluida-sólida no newtoniana que posee o no esfuerzo cortante pequeño y que genera depósitos intermedios en naturaleza entre aquellos debidos a flujos de escombros y a flujos de corriente diluidas (Tabla 1).

Pierson y Costa (1987) han aplicado el término de corriente de flujo hiperconcentrado a flujos que tienen una concentración de sedimentos tal que comience a presentar una resistencia crítica para una concentración umbral de sedimento arriba de la cual la resistencia crítica es casi invariable. Esta concentración de sedimentos es variable y depende de la distribución de tamaño de granos de la mezcla y los tipos y abundancia de minerales arcillosos.

II.4.2 Porcentaje de contenido de partículas

Beverage y Culbertson (1964, en Smith y Lowe, 1991), al igual que Araña y Ortiz, definen el inicio del flujo hiperconcentrado con un contenido de partículas sólidas de 40% en peso. Las concentraciones de sedimento menores que estos porcentajes son comunes, pero los porcentajes mayores son inusuales. Los flujos hiperconcentrados son flujos de corriente que contienen grandes cantidades de sedimento (40 a 70% por peso, 20 a 47% por volumen) y densidades de masa en el rango general de 1.33 a 1.80 g/cm³. Los flujos hiperconcentrados poseen una resistencia cortante, pequeña pero medible, probablemente en el rango de 100 a 400 dinas/cm².

II.4.3 Características sedimentológicas y geomorfológicas

Los depósitos son más pobremente clasificados que los depósitos de torrente de agua de tamaño medio similar, con valores gráficos de clasificación de 1.1-1.6 ϕ (Costa, 1988). Estos depósitos generalmente presentan una estratificación horizontal pobremente desarrollada o son masivos con delgados lentes de grava, una estructura soportada por clastos no cohesiva y subunidades inversamente gradadas (Scott, 1985).

Los criterios deposicionales que propone Smith (1986, 1991), con base en el estudio de depósitos volcánicoásticos terciarios y cuaternarios son:

1. Los depósitos de tamaño de arena y de gránulos son masivos o exhiben estratificación cruda horizontal; la estratificación es más aparente en depósitos pumicíticos. Los estratos individuales pueden presentar gradación normal o inversa o no presentarla. Los depósitos generalmente exhiben gradación de distribución normal con estratificación mejor desarrollada en las partes de grano más fino o superiores. Los bloques de gran tamaño son comunes. Las partículas de baja densidad, como pómez o materia orgánica son concentradas en las partes superiores de la mayoría de los depósitos sin importar el tamaño de grano. No existe estratificación cruzada ni estructuras de socavación.
2. La grava que ha sido depositada por flujos hiperconcentrados generalmente aparece en unidades gradadas normalmente. Usualmente no presenta imbricación y se

caracteriza por la ausencia de lentes de arena intercalados o las capas típicas de las gravas de corrientes diluidas.

Estas observaciones sugieren que los flujos hiperconcentrados son suficientemente turbulentos para permitir depósito diferencial y desarrollo de capas gradadas (Smith, 1986).

Scott (1988) propone otras características para depósitos de flujo hiperconcentrados, basados en los estudios en valles cercanos a los volcanes de la cordillera de las Cascadas:

1. Los depósitos tienen siempre una distribución de tamaño de partículas en el rango de arenas a pedruzcos (pebbles). Generalmente son masivos o raramente estratificados burdamente y soportados por clastos. Puede ocurrir una gradación gruesa hacia la cola del flujo (coarse tail) y generalmente incluye la concentración de componentes de baja densidad hacia la base del depósito. Las sub-unidades de gradación inversa son definidas dentro de los depósitos.
2. Los flujos hiperconcentrados son flujos no cohesivos que depositan el sedimento en pulsos de materiales emplazados en masa.

Las observaciones y conclusiones de Smith (1986) se aplican generalmente a los flujos hiperconcentrados de baja concentración y son consistentes con las observaciones de turbulencia y estratificación de los depósitos asociados con un flujo hiperconcentrado observado directamente (Pierson y Scott, 1985). Las características que menciona Scott (1988) son más aplicables a flujos que se aproximan a flujos de escombros.

La evidencia geomorfológica originada por los flujos hiperconcentrados es muy semejante a la de torrentes (Scott, 1988):

1. Leevés marginales de clastos gruesos pobremente clasificados bordeando los canales.
2. Lóbulos terminales de frente pronunciado de sedimentos gruesos y pobremente clasificados en abanicos y canales.
3. Gran daño a la vegetación, incluyendo árboles grandes en la trayectoria directa del flujo, pero daño menor en los bordes del flujo y en gradientes suaves.
4. La presencia de un canal amplio de forma trapezoidal que tiene un radio amplitud/profundidad menor a 10.

		% peso de sólidos	% volumen de sólidos	Densidades de masa	Esfuerzo cortante
	Torrentes	1-40% (Costa, 1988)	0,4-20% (Costa, 1988)	1.01-1.33 g/cm ³	<100 dinas/cm ² (Mingfu et al, 1983)
LAHARES	Flujos hiperconcentrados	40-70%	20-47%	1.33-1.80% g/cm ³	100-400 dinas/cm ²
	Flujos de escombros	70-90% (Costa, 1988) >80% (Fisher y Schmincke)	47-77% (Costa, 1988) >60% (Fisher y Schmincke)	1.80-2.30 g/cm ³ (Costa, 1988)	>400 dinas/cm ²

Tabla 1 Comparación de características reológicas entre diferentes flujos de escombros volcánicos y agua.

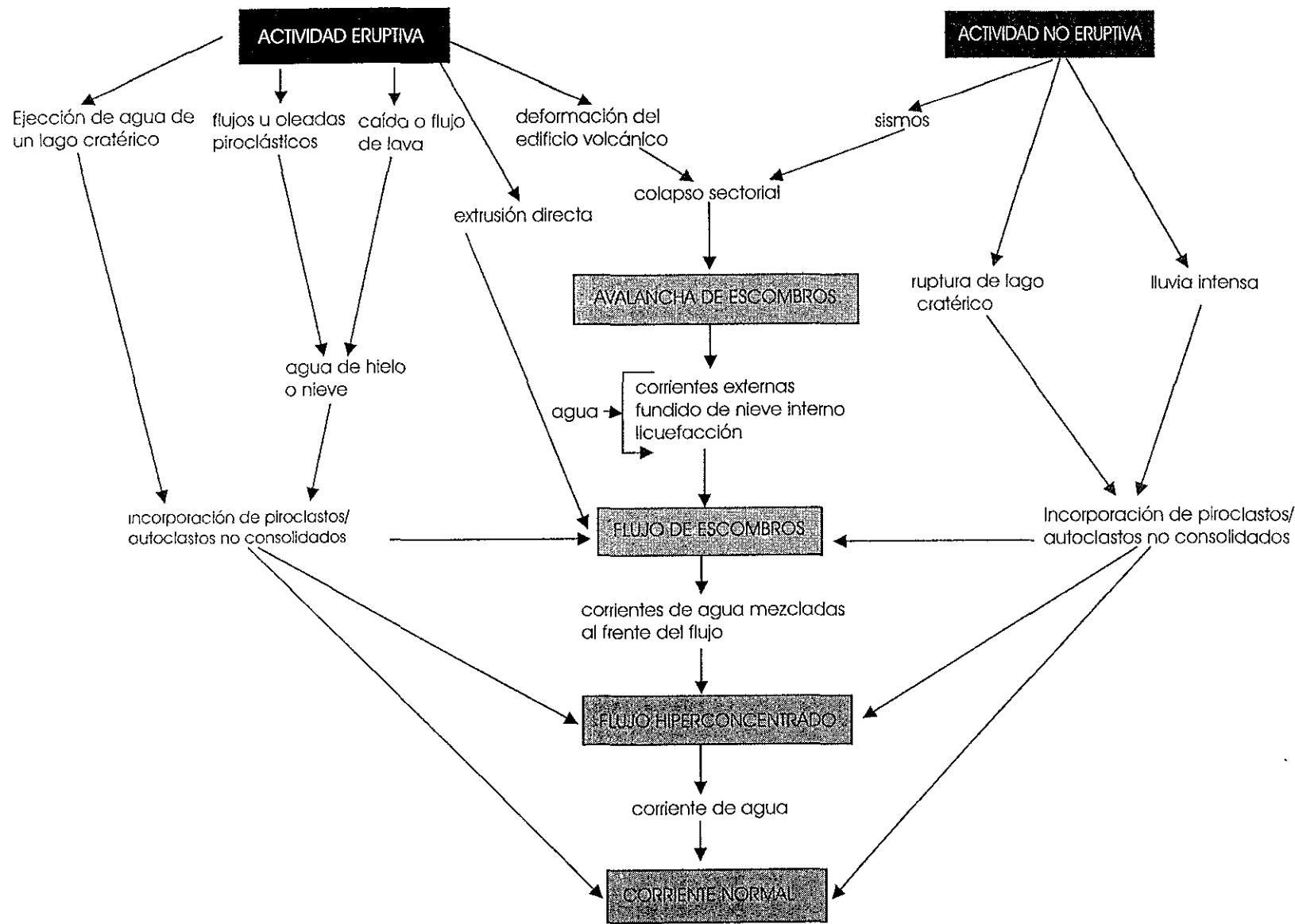


Fig. 2.2 Diagrama de relación y transición de flujos (Smith y Lowe, 1991)

II.5

CASOS HISTÓRICOS

Comparados con otros desastres naturales, incluyendo flujos piroclásticos y hambruna posteruptiva, los lahares han causado menor número de muertes. Sin embargo, el número de personas afectadas es mayor que el producido por flujos de lava o tsunamis (Tilling y Beate, 1993). La tabla 2 muestra el número de muertes (redondeado) producido por los principales eventos laháricos.

Volcán	País	Año	No. de muertes
Kelut	Indonesia	1586	10,000
Vesubio	Italia	1631	3,500
Awu	Indonesia	1711	3,200
Cotopaxi	Ecuador	1741	1,000
Monte Mayón	Filipinas	1814	1,200
Galunggung	Indonesia	1822	4,000
Nevado del Ruiz	Colombia	1845	1,000
Awu	Indonesia	1856	3,000
Cotopaxi	Ecuador	1877	1,000
Awu	Indonesia	1892	1,530
Kelut	Indonesia	1919	5,110
Nevado del Ruiz	Colombia	1985	>22,000
Pinatubo	Filipinas	1992	<1000

Tabla 2 Casos históricos de lahares (modificado de Tilling y Beate, 1993)

II.5.1 Nevado del Ruiz, Colombia

La erupción del 13 de noviembre de 1985 del Nevado del Ruiz en Colombia causó un gran desastre humano y económico, a pesar de no haber sido un evento volcánico importante.

Naranjo et al. (1986) relatan lo sucedido durante este evento: A las 9:09 p.m. del día mencionado comenzó la erupción explosiva principal que produjo una columna pliniana que se sostuvo por más de 20 minutos. La caída de tefra empezó alrededor de las 9:30, 20 Km. al norte y noreste del volcán y se intensificó alrededor de las 10:00 p.m. aunque cesó poco después de la media noche. Las cenizas cayeron hasta 80 Km. de distancia y ésta fue reconocida en un alcance de 400 km. al noreste del volcán. La dispersión de la tefra fue gobernada principalmente por vientos troposféricos. La estimación del volumen total eruptado fue de $3.9 \times 10^7 \text{ m}^3$. Considerando una densidad de masa de 900 kg/m^3 , el depósito total representa una masa total de $3.5 \times 10^{10} \text{ Kg}$.

Varios efectos fueron reconocidos relacionados a la erupción, como oleadas y flujos piroclásticos menores, pero los detalles son poco conocidos. Una oleada piroclástica que viajó alrededor de 2 km a través del glaciar destruyó el edificio del Refugio, en la ladera oeste del Nevado del Ruiz a una elevación de 4800 m. En el valle Azufrado, alrededor de 1 km al norte-noreste del cráter, la erupción depositó un pequeño flujo piroclástico, un depósito de oleada, caída de tefra y un depósito de lahar de 1m.

Tres lahares mayores derivaron a las tierras bajas alrededor del volcán, desde una elevación de la cima de alrededor de 4 km. En los cañones y valles de ríos pronunciados, los lahares fueron erosivos y dejaron depósitos insignificantes.

Un lahar en el río Guali del flanco norte del Nevado del Ruiz alcanzó las faldas del Mariquita a las 11:30 P.M. el 13 de noviembre y Honda a las 2 A.M. de la mañana siguiente, después de fluir 90 Km. Cuando el lahar Guali estuvo activo, cerca de Mariquita, superó más de 8 metros de espesor y 250 m de ancho. Debido a que fue altamente fluido, el lahar se extendió dejando un depósito, de 1 m en el centro del canal de flujo y de 0.5 m en el margen. Se calculó una velocidad mínima para este lahar de 28 Km/h, desde la fuente a Mariquita, asumiendo que fue iniciado en el momento de la explosión eruptiva. El lahar permaneció altamente destructivo en Honda, donde éste alcanzó 5 metros sobre el nivel normal del río Guali, destruyendo más de 20 casas y causando al menos dos muertes.

En el flanco este del volcán, el frente de flujo del lahar del valle Lagunillas se unió con otro lahar en el valle Azufrado, del flanco noreste del volcán. El lahar combinado inundó la población de Armero (Fig. 2.3) aproximadamente a las 11 P.M., y ocasionó la muerte de la mayoría de la población de 25,000 personas. En el eje principal del lahar y derecho al cañón de la Lagunilla, el depósito alcanzó de 3 a 4 metros y el depósito es marcadamente de grano grueso, con grandes bloques a lo largo del centro del flujo. El lahar Lagunillas-Azufrado fue un evento complejo y se produjo en dos o tres ondas, con una velocidad promedio de 38 Km/hr.

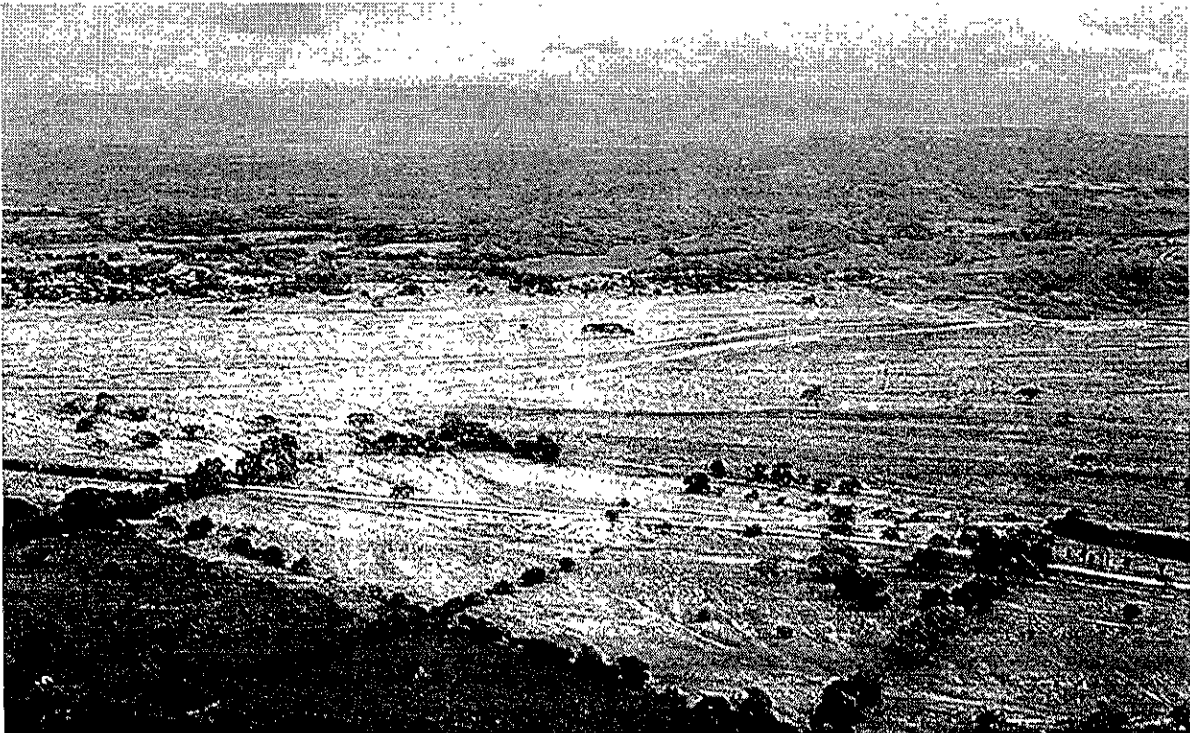


Fig. 2.3

Lahar en Armero, Colombia

II.5.2 Monte Pinatubo, Filipinas

La erupción del 15 de junio de 1991 en el Monte Pinatubo, que eyectó más de 5 km³ de material compuesto principalmente de gas, ceniza y pómez, fue la segunda erupción más grande del siglo pasado. La columna eruptiva alcanzó más de 35 km de altura y la cima del volcán se colapsó, creando una caldera de 2.5 km de largo. Los efectos más importantes fueron avalanchas de ceniza y gas, lahares de gran tamaño y una inmensa nube de cenizas.

Los depósitos de ceniza fueron removidos por las lluvias de monzones y tifones para formar lahares gigantes que han causado más destrucción que la erupción misma. En las siguientes cuatro estaciones de lluvia posteriores a 1991, los lahares acarrearón más de la mitad del material depositado en las laderas del volcán. El aporte de agua para los lahares son las lluvias en la zona del volcán, las cuales pueden ser muy intensas y acumular más de 2,000 mm al año, así como el rompimiento de lagos cratéricos temporales creados por interrupción del drenaje de los valles tributarios debido al depósito de material. Aunado a esto, en la zona no existe mucha vegetación porque ha sido enterrada o quemada por la erupción de 1991.

Anterior al comienzo de la actividad volcánica, cerca de un millón de personas vivían en los alrededores del volcán. En los siguientes meses los lahares inundaron el pueblo de Lourdes, aproximadamente a 20 km al noreste del Pinatubo. Desde la erupción los lahares han destruido las casas de más de cien mil personas en los alrededores del volcán. En el caso del río Pasing-Potrero, en el flanco este del volcán, se han formado y roto lagos en tres ocasiones creando lahares que han causado la muerte de docenas de personas.

Desde 1991 se han depositado más de 3 km³ de material. Durante las lluvias intensas los lahares pueden transportar y depositar millones de metros cúbicos en un sólo día. Cuando éstos alcanzan las tierras bajas del volcán, las velocidades promedio son de más de 30 km/h, 10 metros de profundidad y 100 metros de ancho y pueden transportar más de 1,000 metros cúbicos por segundo (Newhall et al., 1997). Ellos pueden acarrerar bloques, dañar puentes y destruir todo a su paso. Cuando los lahares alcanzan zonas de bajas pendientes se expanden y depositan el material transportado.

CAPÍTULO III

VOLCÁN POPOCATÉPETL

CAPITULO III VOLCÁN POPOCATÉPETL

III.1 LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN

El volcán Popocatepetl se ubica en la parte central del Cinturón Volcánico Transmexicano o Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) y se encuentra al final del sector sur de la cadena volcánica de tendencia N-S llamada Sierra Nevada que divide el valle de México al Oeste y el de Puebla al Este, esto es, en la región central de la República Mexicana y en el límite de los estados de México, Puebla y Morelos. Las coordenadas de localización geográfica son 19°01'30" N y 98°37'20" W. Dista aproximadamente 60 km al sureste de la Ciudad de México y 40 km al oeste de la Ciudad de Puebla (Fig. 3.1).

La altitud del Popocatepetl es de 5452 msnm y el área del edificio volcánico es de aproximadamente 500 km². El cono volcánico se eleva unos 2500 m en promedio sobre su base, con pendientes homogéneas de 25° a 28°, aunque en las porciones superiores son cercanas a 45°. En su cima se localiza un cráter de forma elipsoidal, cuyo eje mayor NW-SE se inclina hacia el E (Delgado et al., 1988). Su eje mayor es de 800 metros y el menor de 600 metros.

Este volcán tiene dos glaciares en el flanco norte: el del Ventorillo y el Noroccidental. Cuando las condiciones climáticas son propicias, una delgada capa de nieve se localiza en su cima. Se encuentra construido por una alta proporción de escombros de roca suelta y pobremente consolidada, producto de la actual etapa eruptiva y de erupciones recientes. Las laderas del volcán se encuentran afectadas por una cantidad importante de barrancas y cauces que constituyen el drenaje principal. Algunas de ellas comienzan en las partes inmediatas inferiores al glaciar, mientras que muchas se localizan a cotas inferiores.

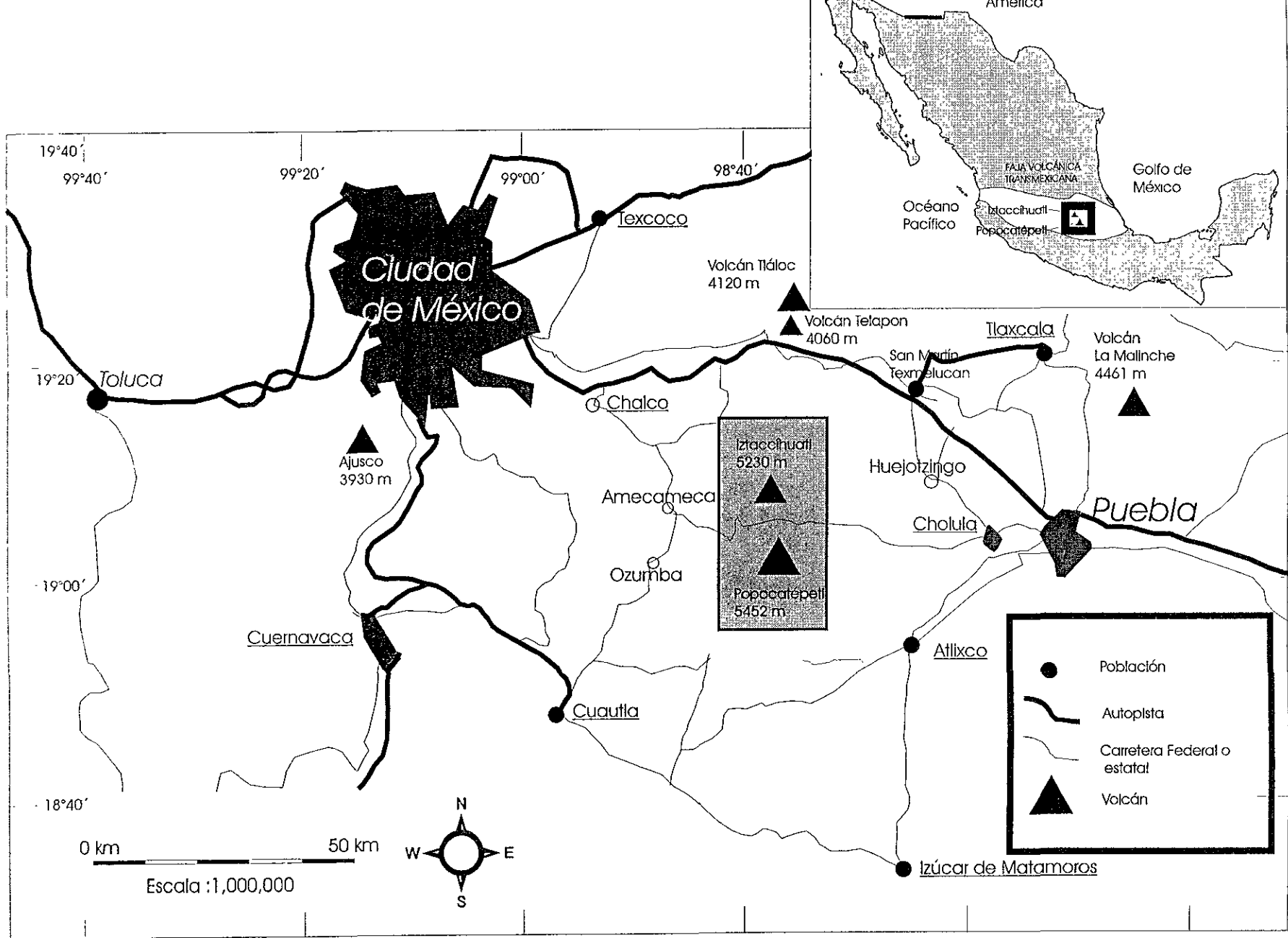


Figura 3.1 Ubicación del volcán Popocatepetl

III.2

ENTORNO GEOGRÁFICO

III.2.1 Clima y vegetación

En el área de la Sierra Nevada, de acuerdo a la Comisión de Estudios del Territorio Nacional (hoy INEGI), se localizan varios climas:

- Muy frío, con temperatura media anual menor a -2°C y la del mes más caliente menor a 0°C . Se encuentra en grandes altitudes, mayores a 4000 msnm y presenta las máximas precipitaciones pluviales durante el verano.
- Templado subhúmedo con lluvias en verano y temperatura máxima entre 7 y 22°C , localizado en la transición del clima frío de altura y las cimas de los valles que se encuentran en las inmediaciones de la Sierra Nevada, así como en las vertientes de la sierra, que es la mayor extensión del área. Este clima prevalece entre las cotas 2250 y 4000 msnm.
- Semicálido con temperatura media anual menor a 22°C y la del mes más frío mayor a 18°C , que se localiza en el extremo sureste y suroeste de la región considerada a partir de la cota 2250 msnm.

La vegetación en el área del volcán puede caracterizarse principalmente por su relación con la altitud, y a diferentes cotas se presentan varios factores que pueden variar ampliamente, tales como la temperatura, precipitación, humedad, viento, radiación solar y evaporación. Sin embargo, es posible generalizar el tipo de vegetación que ahí se encuentra (Fuentes, 1975):

- A partir de la altitud media de 5000 msnm ya no existen plantas vasculares. Entre esta cota y los 4300 msnm sólo existen plantas herbáceas. Descendiendo hasta 4000 msnm se localiza una zona de enebro y especies arbustivas bajas.
- La zona de especies mayores como los pinos, encinos y oyameles se encuentran bajo la cota 4000 msnm coexistiendo con especies de zacatón y arbustos. En algunos sitios es posible encontrar bosque de cedro blanco y ahuejotes.

III.2.2 Hidrografía y precipitación pluvial

El volcán Popocatepetl presenta un sistema de drenaje radial formado por corrientes superficiales de poco caudal, que en apariencia no reflejan la importancia hidrográfica de la zona.

Los principales escurrimientos del área nacen en las faldas de la Sierra Nevada y son de origen nival y pluvial, naciendo ahí varios ríos y manantiales. El coeficiente de escurrimiento en la cumbre es del 20 a 30%, en las laderas del 10 al 20% y del 5 al 10% en el final de las laderas (Quiroz, 1989).

Las aguas subterráneas están clasificadas en las unidades de material consolidado o roca y material no consolidado o suelo. En las cumbres y faldas del Popocatepetl y del Iztaccíhuatl, las rocas pueden funcionar como acuíferos con posibilidad alta y media (Quiroz, 1989).

La pluviosidad varía en función de la altitud: a partir del nivel del mar y a medida que la altitud aumenta, alcanzando un valor máximo que después decrece progresivamente. En las montañas suficientemente elevadas existe siempre un piso caracterizado por lluvias más abundantes y por tanto, de una gran nubosidad. A mayores

alturas la condensación y saturación del aire es más fácil. En las pendientes de las montañas el aire que asciende de las planicies vecinas alcanza su punto de saturación tanto más rápidamente en cuanto lleve mayor cantidad de vapor de agua.

La región climática en la cual se ubica el Popocatepetl es característica por lluvias abundantes durante el verano, desde junio a septiembre, y ocasionalmente se extiende la temporada hasta octubre. Durante el resto del año las lluvias son escasas, excepto cuando existe una afectación por algún fenómeno climático.

La información de la cantidad de lluvia, medida en milímetros en el poblado de San Pedro Nexapa, para el área de la Sierra Nevada es resumida en la tabla siguiente.

Mes	1998	1999	2000
Enero	23.9	0.0	0.0
Febrero	0.0	0.0	0.9
Marzo	0.0	8.5	10.5
Abril	0.0	21.3	11.5
Mayo	6.0	27.0	106.6
Junio	98.4	178.5	181.0
Julio	81.5	174.6	120.5
Agosto	217.0	160.9	163.4
Septiembre	252.5	73.9	99.8
Octubre	51.3	110.4	54.6
Noviembre	26.6	4.5	-
Diciembre	-	0.0	-

Tabla 3 Precipitación pluvial media anual en la Sierra Nevada (CNA,2000)

III.2.3 Glaciares

La acumulación de nieve estacional año tras año forma glaciares. Para tal efecto son necesarias las condiciones de mantenimiento de baja temperatura, la cual puede darse por la posición latitudinal lejana al Ecuador o por una gran altitud, mayor a 5000 msnm, en regiones subtropicales. La segunda condición es que el balance hídrico sea negativo, es decir, que haya más acumulación en la época de recarga que pérdida de agua en la época de ablación (Delgado y Brugman, 1995).

El cono volcánico del Popocatepetl muestra que la posición más favorable para el desarrollo de glaciares es la vertiente norte y que la topografía influye tanto para su formación como la exposición de las laderas. Los glaciares localizados en este volcán son del tipo volcánico de climas subtropicales, desarrollados solo en volcanes que alcanzan gran altitud. De acuerdo con los estudios de Lorenzo, (1964) se reconocen tres glaciares, sin embargo, trabajos posteriores de Delgado et al. (1986), reportan la existencia sólo de dos glaciares, el Noroccidental y del Ventorrillo, cuya área total en 1982 según las expediciones glaciológicas fue de 0.559 km². El glaciar Ventorrillo es el mayor de ellos, con una superficie total de 0.453 km², localizado desde 5380 a 4760 msnm (Delgado, 1996) y cuyo drenaje está dirigido al noreste, al estado de Puebla. Al occidente se localiza el glaciar noroccidental, situada su parte superior a 5400 msnm y la inferior a 5060 msnm y cuya superficie es de 0.106 km² (Delgado, 1996) y que drena hacia el occidente en el Estado de México (Fig. 3.2).

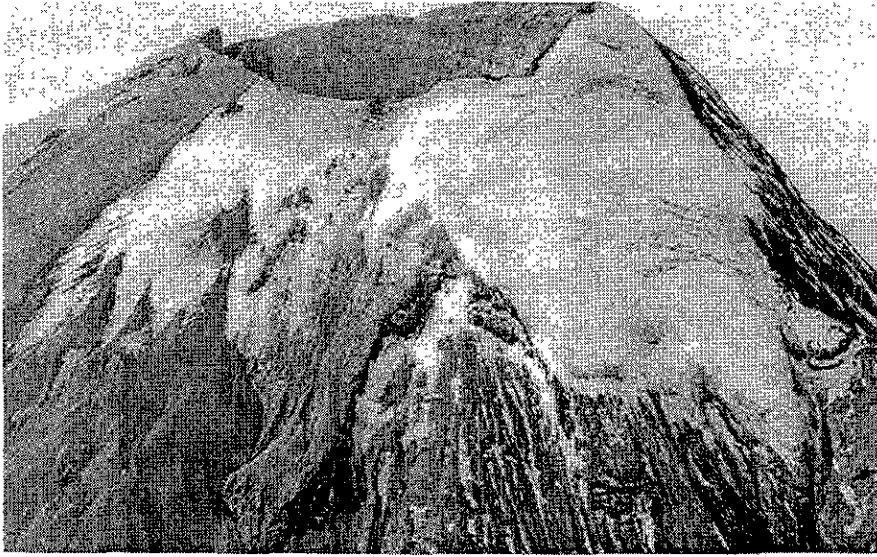


Fig. 3.2 Glaciares Ventorillo y Noroccidental (Fotografía Lucio Cárdenas, abril de 1996)

La generación de lahares por deshielo del glaciar es un evento probable en las actuales condiciones de actividad eruptiva del Popocatepetl, debido a la posible existencia de fuentes de emisión de gases bajo el glaciar observadas por el cambio de temperatura en imágenes infrarrojas recientes (Fig. 3.3).

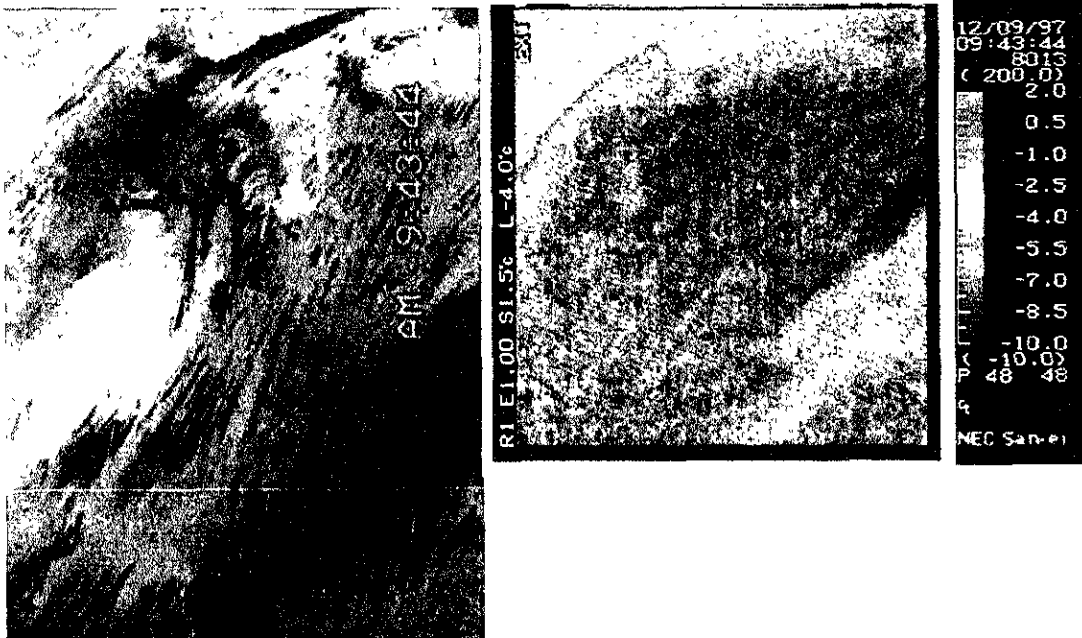


Fig. 3.3 Imagen infrarroja de los glaciares que muestra temperaturas mayores en la base del glaciar (septiembre de 1997)

III.3 ENTORNO GEOLÓGICO

III.3.1 Geología

Morán (1984) considera que la edificación del Popocatepetl puede considerarse como una de las fases terminales del vulcanismo de la cuenca de México posterior a la fase volcano-sedimentaria del Grupo Balsas del Terciario temprano, y a las fases volcánicas del Terciario Medio y Tardío.

El volcán Popocatepetl es un gran estratovolcán andesítico-dacítico (Siebe et al., 1997) construido en etapas alternantes de flujos de lava y piroclásticos que han continuado en tiempos históricos (Carrasco, 1985). Carrasco et al. (1986) consideran que está formado por una alternancia de lavas, brechas-tobas, piroclastos de caída libre y flujos de ceniza no consolidados, depósitos generalmente asociados a erupciones de tipo pliniano.

La estratigrafía del volcán consiste principalmente en dos formaciones (Carrasco et al., 1985) que comprenden en totalidad sus productos: Se trata de las formaciones Nexpayantla y Popocatepetl. La primera, considerada del Pleistoceno Temprano, consiste en lavas andesíticas que cambian a dacitas microlíticas con brechas y finalizando con lavas riodacíticas con algunos horizontes pumícticos. Después de la discordancia entre las dos formaciones se encuentra la formación Popocatepetl, la cual está formada por emisiones de andesita microlíticas con brechas esencialmente pumícticas, que en su parte superior van graduando a tobas de composición andesítica, mientras que las emisiones más recientes incluyen andesitas y dacitas porfídicas, así como depósitos piroclásticos tanto de caída libre como de flujos.

La composición química de los flujos de lava en el Popocatepetl es calci-alkalina, aspecto que permite asociar su origen a un margen continental activo. La geología del volcán es aparentemente simple: rocas volcánicas intermedias y félsicas, tobas en el piedemonte y depósitos lacustres, aluviales y volcánicos en la planicie de la base. Las rocas son del Pleistoceno (Delgado et al., 1988). Siebe et al. (1997) proponen que el basamento del área consiste en evaporitas, areniscas y limolitas del Cretácico que fueron plegadas durante el Terciario Temprano.

Estudios paleomagnéticos realizados en el complejo del volcán Popocatepetl han arrojado una edad menor a 0.73 Ma para todo el complejo volcánico (Carrasco et al., 1986); Siebe et al. (1995) han precisado la edad del cono actual del volcán, considerando que el último gran depósito de avalancha de escombros implícitamente indica su edad, que está determinada entre 22,000 y 23,665 años mediante el método de Carbono 14, realizado en un paleosuelo que subyace a los depósitos de la avalancha de escombros.

III.3.2 Geomorfología

Geomorfológicamente el Popocatepetl es un volcán joven, por lo cual forma valles aluviales de gran inclinación en las partes alta y media y en los valles fluviales y arroyos de menor inclinación de la parte media a la base (Garrido, 1980).

Los principales agentes niveladores de la superficie en esta zona son la gravedad, el hielo y el agua. El intemperismo, denudación, erosión y acumulación son los procesos principales que forman el relieve característico de esta área y actúan de manear

diferente en cada flanco del volcán.

Aún cuando la erosión se está produciendo con fuerte intensidad en las laderas superiores del Popocatepetl, éstas conservan su forma original, y se desarrollan un número importante de barrancos en una red radial donde ocasionalmente ocurren procesos gravitacionales. El escurrimiento fluvial intenso es un agente importante en la altitud de 4400 msnm y menores, donde la disección vertical y en plano en rocas volcánicas jóvenes poco consolidadas es una característica que marca una morfología diferente a la de alturas superiores (Lugo, 1984).

El Popocatepetl está cortado por una red radial de barrancos que, a excepción de la cañada de Nexpayantla, de 500 m de profundidad, son todavía pocos profundos, pero de gran dinámica. Esta nace como un gran circo de erosión en las faldas del Popocatepetl, a una altura aproximada entre los 3900 y 4900 msnm, y se desarrolla por aguas de deshielo, fuerte pendiente, precipitaciones pluviales intensas, presencia de material poco consolidado y un fuerte gradiente entre la cabecera y la planicie de piedemonte.

III.4 LAHARES

Varios autores han reportado la presencia de depósitos laháricos en los flancos del Popocatépetl:

Lozano y Carrasco (1997) han identificado un flujo de escombros de color ocre soportado por matriz limo-arcillosa de naturaleza aparentemente cohesiva, la cual contiene clastos de pómez color ocre y una diversidad de litologías. El depósito yace sobre un depósito de avalancha de escombros de aproximadamente 20,000 años. El depósito de flujo de escombros tiene una distancia de alcance mínimo de 46 km, cubre una superficie de al menos 200 km² y un volumen aproximado de 0.5 km³ que inundaron el área de Cuautla y Yecapixtla, Morelos.

Robin y Boudal (1987) reportaron la presencia de lahares asociados a flujos piroclásticos que fluyeron principalmente hacia el SW y W entre 5000 y 3800 años antes del presente y otros generados hace 1200 años por un evento explosivo tipo San Vicente que derritió un glaciar localizado en el flanco NE del volcán (Robin y Boudal, 1989).

En la etapa eruptiva actual han ocurrido varios eventos laháricos de menor tamaño, los cuales se relacionan con un proceso del deshielo de glaciar (Delgado et al., 2000) y con la precipitación pluvial.

III.4.1 Lahares del Valle de Puebla

En el volcán Popocatépetl han ocurrido diferentes erupciones plinianas de diferente magnitud. La mayoría de ellas produjeron al final grandes lahares que se dirigieron en diferentes direcciones alrededor del volcán y afectaron asentamientos humanos cuando estos ya existían. Siebe et al. (1996a, 1996b) describen ampliamente estas erupciones, su edad, los depósitos asociados y las afectaciones a poblaciones prehispánicas.

Una erupción pliniana en el volcán Popocatépetl, que fue fechada por método de radiocarbono entre 3195 ± 75 y 2830 ± 65 A.C. (Siebe et al., 1996a) y nombrada como una erupción pliniana Precerámica Superior provocó inicialmente una caída menor de ceniza, oleadas piroclásticas, caída de pómez asociada a la fase paroxísmica y finalmente otro flujo de ceniza. Parte del material eruptado que descansaba en los flancos del Popocatépetl y del Iztaccihuatl fue removilizado por lahares que se extendieron más de 50 km y alcanzaron lugares tan distantes al sur del volcán como Chalcatzingo, Cuautla e Izúcar (Fig. 3.4).

La secuencia eruptiva pliniana del Cerámico Inferior, fechada entre 800 ± 135 y 215 ± 65 A.C., comenzó con un depósito de caída y flujos de ceniza, sobreyacido por un depósito de caída de pómez asociado a la fase principal de la erupción, finalizando con el emplazamiento de flujo de ceniza y la removilización masiva por lahares, inundando extensas áreas hacia el sur. Al momento de la erupción el sitio contaba con ocupación humana, encontrándose vestigios de ello en el área de los depósitos.

La secuencia eruptiva pliniana Cerámica Superior fechada entre 675±60 y 1095±155 D.C. empieza con una caída menor de ceniza, flujos piroclásticos y pequeños lahares, seguido por un emplazamiento de oleadas. La fase principal de la erupción ocurre en tres pulsos plinianos produciendo depósitos de caída de pómez que fueron depositados en diferentes direcciones. Sobreyaciendo a esto se encuentra otra secuencia de flujos y caída de ceniza. Lahares producidos posteriores en el Popocatépetl e

Iztaccíhuatl inundaron principalmente la cuenca de Puebla y el valle de Atlixco.

Además de los peligros volcánicos asociados con oleadas piroclásticas, flujos de ceniza y caída de pómez, los grandes flujos de lava volcánicos alcanzaron la base de la gran pirámide de Cholula. La secuencia de lahares es de algunos metros de espesor y además de contener abundante pómez, se encuentran trozos de cerámica, objetos de obsidiana y carbón. La información geológica disponible sugiere que la ciudad y las áreas agrícolas a su alrededor fueron destruidas mayormente por lahares.

Los lahares inundaron prácticamente toda la cuenca de Puebla drenada por el río Atoyac y también afectaron de manera significativa los valles de Atlixco y Cuautla. Otros valles también fueron afectados, pero en menor grado. Las áreas afectadas quedaron completamente destruidas e inservibles para la agricultura por muchos años.

Otros sitios arqueológicos, como Cacaxtla, Xochitécatl y Totimihuacan también sufrieron los embates de los lahares. Estas ruinas están asentadas sobre pequeños cerros que sobresalen de las planicies del valle de Puebla, conformadas casi en su totalidad por depósitos de lahar. Los eventos que formaron tales depósitos afectaron construcciones, campos de cultivo y la vida de los habitantes durante su ocurrencia.

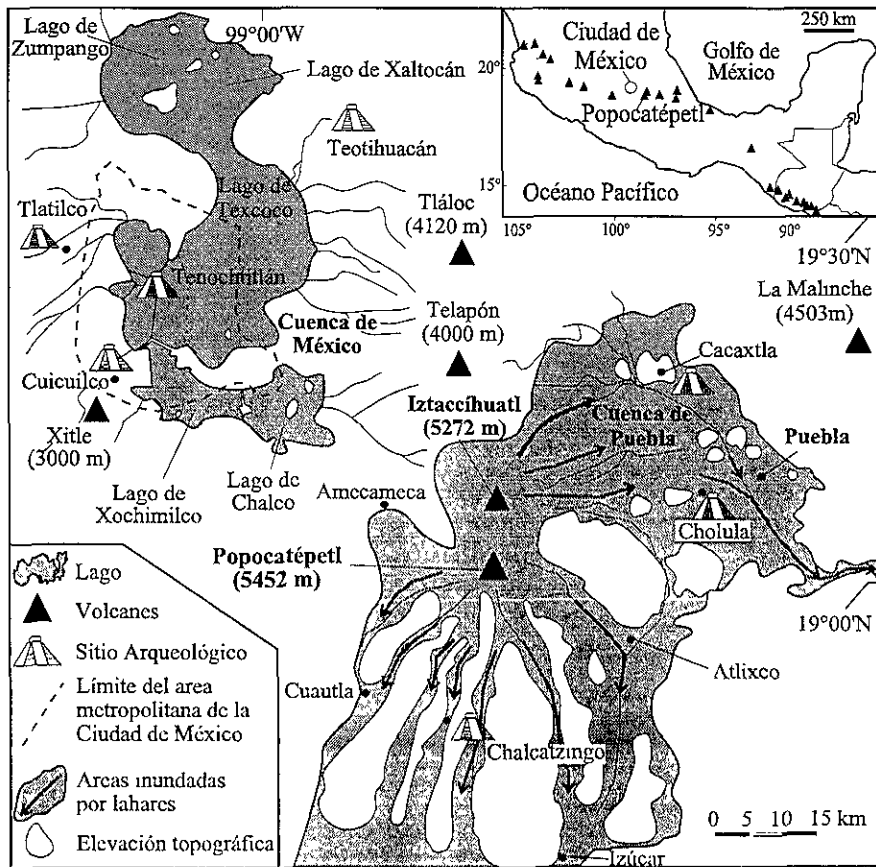


Fig. 3.4 Áreas afectadas por lahares (Tomada de Siebe et al., 1996a)

III.4.2 Lahar de San Nicolás

González et al. (1997) estudiaron el lahar de San Nicolás y concluyeron que se trata de un depósito de flujo de escombros distribuido a lo largo de los lechos de los ríos Alseseca y Nexapa, caracterizado por una litología uniforme no común en secuencias laháricas. El mapeo geológico y los estudios estratigráficos permiten reconstruir el siguiente escenario: hace aproximadamente 1300 años el cráter fue presumiblemente ocupado por lavas andesíticas que fueron destruidas por una erupción pliniana, produciendo el enorme cráter del Popocatepetl; el *blast* asociado con el inicio de la erupción barrió la vegetación y destruyó parte del glaciar. El flujo de escombros provocado por los productos de la explosión dirigida, mezclados con el agua glacial que estos productos derritieron, viajó más de 60 km corriente abajo afectando asentamientos humanos. El depósito relacionado consistió de tres capas cuyo contenido de clastos es dominado por andesitas gris oscuro provenientes del cráter, con contenido lítico homogéneo de clastos andesíticos y bloques en una matriz arenosa de composición similar (Delgado y González, 1994) (Fig. 3.5). Estudios paleomagnéticos indican que materiales incluidos dentro del flujo de escombros tuvieron temperaturas mayores a 150 °C durante el emplazamiento debido a la alta temperatura de los fragmentos de las lavas destruidas del interior del cráter.

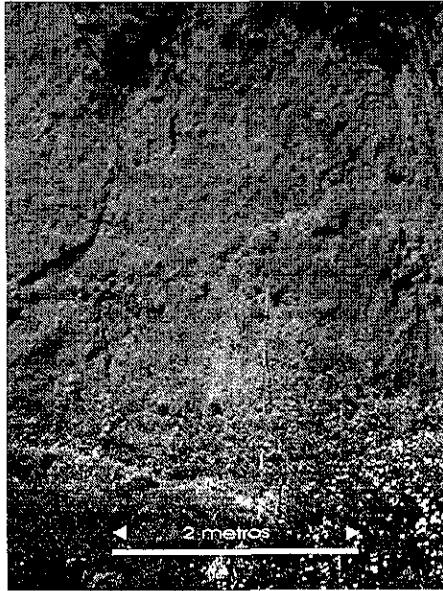


Fig. 3.5 Depósito del lahar de San Nicolás soportado por matriz arenosa con clastos angulosos a subangulosos (Fotografía de A. González, octubre del 2000)

El flujo recorrió la barranca que ocupan las poblaciones de Santiago Xalitzintla y San Nicolás de los Ranchos, se dirigió sobre el río hacia San Buenaventura Nealticán y continuó hacia San Jeronimo Tecuanipan.

III.4.3 Lahar de Xalitzintla

En la etapa eruptiva actual han ocurrido varios eventos laháricos pequeños, que han pasado desapercibidos por la población de los pueblos cercanos a los cauces del volcán. Sin embargo, a mediados de 1997 ocurrieron varios eventos de mayor tamaño, el más importante de ellos fue el del 1° de julio de 1997. Bursik et al. (en prensa) estudiaron este evento y lo resumen a continuación: Los depósitos de este flujo de escombros pueden ser seguidos 17 km bajo el canal de Alseseca desde el término del glaciar Ventorillo. La relación entre el flujo de escombros y el glaciar no es clara. Basado en su proximidad, sin embargo, es posible que al menos parte del agua que movilizó el flujo haya sido originada en el glaciar. Los depósitos pueden ser divididos en facies proximal (0-5 km), media (5-12 km) y distal (12-17 km), correspondiente a alcances separados en el flujo por sí mismo. El tirante del flujo fue de 8 m en el alcance proximal, 5 m en el medio y 0.8 m en el distal. La velocidad proximal del flujo fue de aproximadamente 20 m/s, obtenida con base en un modelo de superelevación en las paredes exteriores de un recodo del canal. El torrente erosionó y depositó en la zona proximal. Principalmente depositó materiales en *levees* en el alcance medio y un lóbulo terminal en la zona distal.

En las localidades más próximas, bajo un rompimiento prominente en la pendiente a 4000 m, se reduce el contenido de finos en los depósitos, soportados por clastos y con una matriz de arena media a gruesa. Los bloques dentro del depósito son mayores a 4 m de diámetro. En las localidades medias, los depósitos son soportados por matriz, con contenido significativo de componentes de tamaño del limo. Los bloques son mucho menos comunes que en la facies proximal, aunque los más grandes observados tienen un diámetro máximo de 2 m. En las facies distales, los depósitos rellenan el piso de un canal rectangular. En general, el depósito varía de gravas arenosas masivas soportadas por clastos a gravas arenosas soportadas por matriz o por clastos con una consistencia parecida al cemento (Fig. 3.6).



Fig. 3.6 Depósitos del lahar de Xalitzintla del 1 de julio de 1997 cerca de la estación PFM3, mostrando la morfología del canal formado por el flujo lahárico. La persona de pié en la sección superior izquierda de la foto permite observar la escala (Fotografía H. Delgado, enero de 1998)

CAPÍTULO IV
INSTRUMENTACIÓN

CAPÍTULO IV INSTRUMENTACIÓN

IV.1 MONITOREO DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL

El Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED, ha instalado una extensa red de instrumentación para el monitoreo y vigilancia de la actividad volcánica en diferentes aspectos, tal como la observación permanente del volcán en tiempo real a través de una cámara, el monitoreo sísmico realizado con 12 sismómetros analógicos y digitales, la medición de la cantidad de gases emitidos y la variación de la composición de los manantiales cercanos al volcán, el monitoreo de la deformación del edificio volcánico, la cámara infrarroja que observa las variaciones térmicas del volcán y su fumarola y, finalmente, la red de detectores acústicos de flujo.

IV.2 RED DE DETECTORES ACÚSTICOS DE FLUJO (AFM)

A finales de 1997 el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) instaló una red de detectores acústicos de flujo (AFM, Acoustic Flow Monitoring) diseñados y proporcionados por el Observatorio Volcánico Cascades (Cascades Volcano Observatory, CVO) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, United States Geological Survey).

Un prototipo experimental de este sistema de detectores acústicos de flujo fue instalado en 1989 y probado durante las erupciones del Monte Redoubt en Alaska (Brantley, 1990). Posteriormente el sistema de alertamiento de flujos en volcanes ha sido instalado y probado en otros volcanes en el mundo, incluyendo el Monte Santa Elena y Monte Rainier en Washington, Jiangjia Ravine en China, Cotopaxi en Ecuador, Unzen en Japón y Monte Pinatubo en Filipinas. En 1993 se realizaron revisiones al circuito original y fue creado un sistema más simple y eficiente (Hadley y Lahusen, 1995).

Previamente al sistema AFM, fueron utilizados sismómetros convencionales de 1 Hz en diversos volcanes, los cuales pueden registrar señales entre 1 y 10 Hz que pueden viajar a través de toda la estructura del volcán. Con estos equipos fue difícil localizar el canal exacto a lo largo del cual el lahar iba fluyendo. Algunos flujos de escombros se observaron con sismógrafos convencionales que fueron establecidos para detección de sismos. Sin embargo, debido a que los registros convencionales registran señales de tremor en el rango de 0.5 a 20 Hz, no pueden detectar las vibraciones más fuertes de flujos de escombros y torrentes, los cuales ocurren a frecuencias de 50 a 250 Hz, además no pueden distinguir los flujos de escombros de las otras fuentes de ruido persistente como viento, lluvia o actividad fumarólica (Lahusen, 1996). También han sido utilizadas tiras de alambre como detectores de flujo cuyo funcionamiento consistía en que éstas eran rotas al paso de un flujo violento, el cual interrumpía un circuito eléctrico acoplado a un sistema de alarma. Sin embargo, este sistema parecía presentar varios problemas, tales como vandalismo, rotura accidental, nula información después de la ruptura y necesidad de instalar un nuevo sistema después de cada flujo (Marcial et al., 1996).

IV.2.1 Otros sistemas de alertamiento para lahares

El monitoreo en tiempo real del nivel de la superficie de lagos cratéricos se utiliza para detectar cualquier caída en el nivel del lago que podría acompañar una repentina ruptura de la presa y un drenaje catastrófico. La medición es realizada con transductores electrónicos de presión. Los datos son transmitidos vía telemetría por radio a la estación base, cada determinado tiempo.

Este sistema es utilizado en el Monte Santa Elena, Washington y la señal es enviada cada 15 minutos al Observatorio Volcánico de las Cascadas. La caída del nivel mayor a 1.5 m provoca la activación de una alarma.

Las técnicas e instrumentación comúnmente usadas por los volcanólogos también pueden ser útiles en monitoreo hidrometeorológico. Las redes de sismómetros también pueden ser útiles en la detección y posible localización de flujos de agua-sedimento provenientes de los volcanes. Estudios de alta precisión, los cuales son usados para detectar deformaciones pre-eruptivas, podrían ser usadas también para detectar movimiento incipiente de grandes deslizamiento de bloques en las laderas del volcán. Las fotografías aéreas periódicas podrían mostrar cambios abruptos en el drenaje, las condiciones de capas de hielo o desarrollo de abultamientos que producirían un gran deslizamiento de material.

IV.2.2 Ubicación del sistema AFM del Popocatepetl

El sistema de detección automática de flujos que fue instalado en octubre de 1997 está conformado por una red de detectores acústicos de flujos (AFM) y pluviómetros asociados, instalados en las laderas del volcán Popocatepetl. Está constituido de 4 estaciones ubicadas de manera estratégica; dos de ellas en sitios cercanos a las barrancas que descienden del glaciar en el flanco N y NE del volcán. La tercera estación se localiza en el sitio donde las barrancas confluyen (Fig. 4.1). Finalmente existe una estación repetidora en Tlamacas, la cual recibe las señales de las anteriores y las envía telemetricamente vía radio al CENAPRED.

De acuerdo con la conformación topográfica del volcán, los lahares producidos por el deshielo podrían encauzarse en las barrancas Tenenepango y Espinera, ubicadas en el sector N-NE del volcán, las cuales aguas abajo se unen en un solo cauce, la barranca de Huiloac, que conduce a los poblados de Santiago Xalitzi y San Nicolás de los Ranchos, entre otros. En simulaciones por computadora con valores empíricos, el tiempo de arribo al primero de ellos sería aproximadamente de 20 a 30 minutos. Por las razones de riesgo mencionadas, la selección de las ubicaciones de las estaciones fue la siguiente:

- La primera estación, PFM1, nombrada Canario se localiza en el refugio del Canario en la ladera N del volcán. Está colocada a 4170 msnm de altitud, cercana a la barranca denominada Tenenepango y de coordenadas 19°02'37" N y 98°37'33" W (Fig. 4.2)
- PFM2 o Zorzal se localiza en la Barranca Espinera, a una altura de 3985 msnm y con coordenadas 19°02'55" N y 98°37'20" W (Fig. 4.2).
- La estación Unión, con clave PFM3, se localiza en la confluencia de las barrancas Espinera y Tenenepango, aguas abajo de las estaciones anteriores a 3693 msnm. Sus coordenadas son 19°03'50" N y 98°36'56" W (Fig. 4.3).

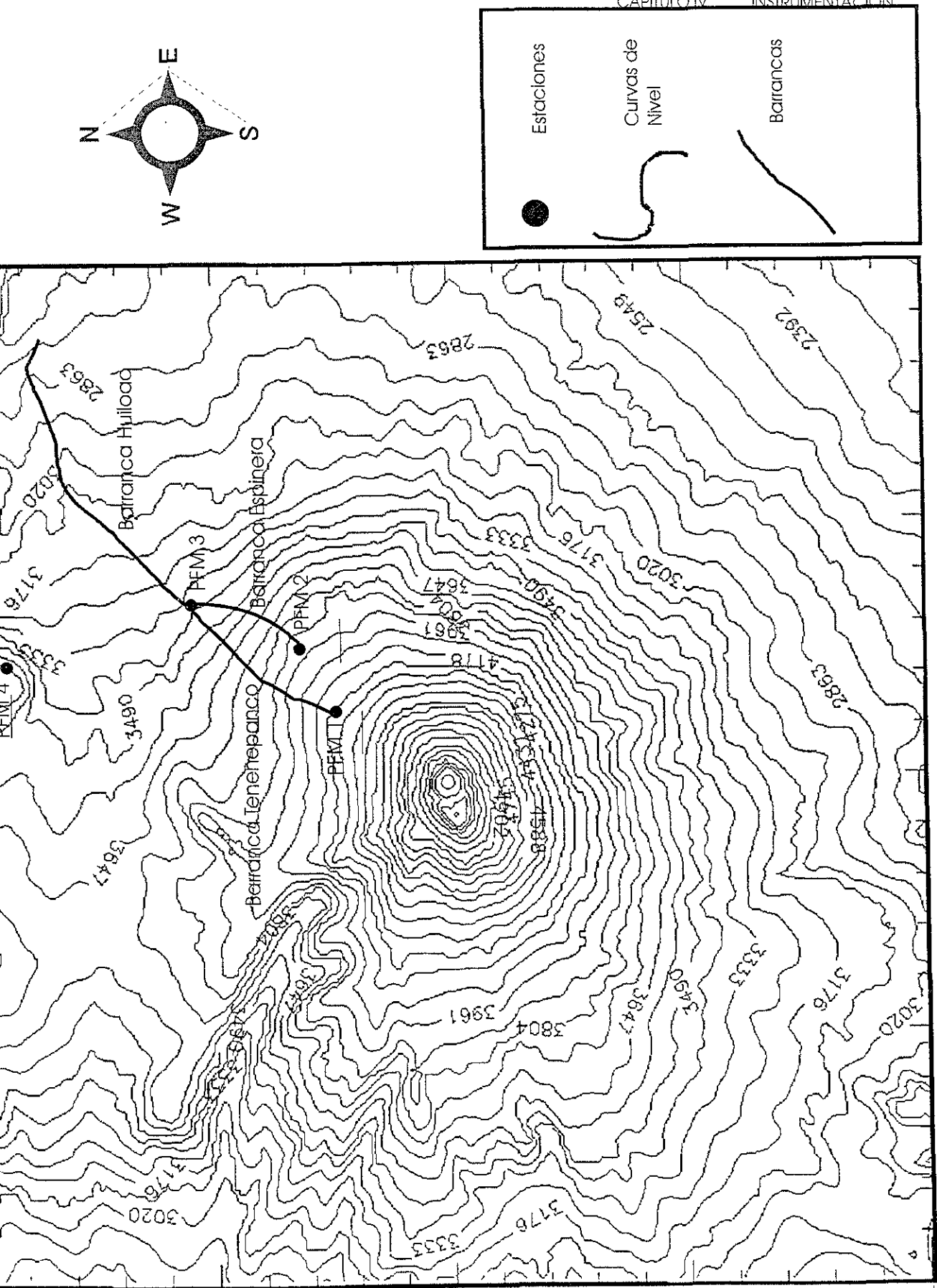


Fig. 4.1 Ubicación de las estaciones AFM

- Finalmente, la estación repetidora PFM4, denominada Tlamacas, se localiza en la estación de microondas del cerro Tlamacas a 3980 msnm de altitud y con coordenadas $19^{\circ}03'39''$ N y $98^{\circ}37'40''$ W (Fig. 4.4).

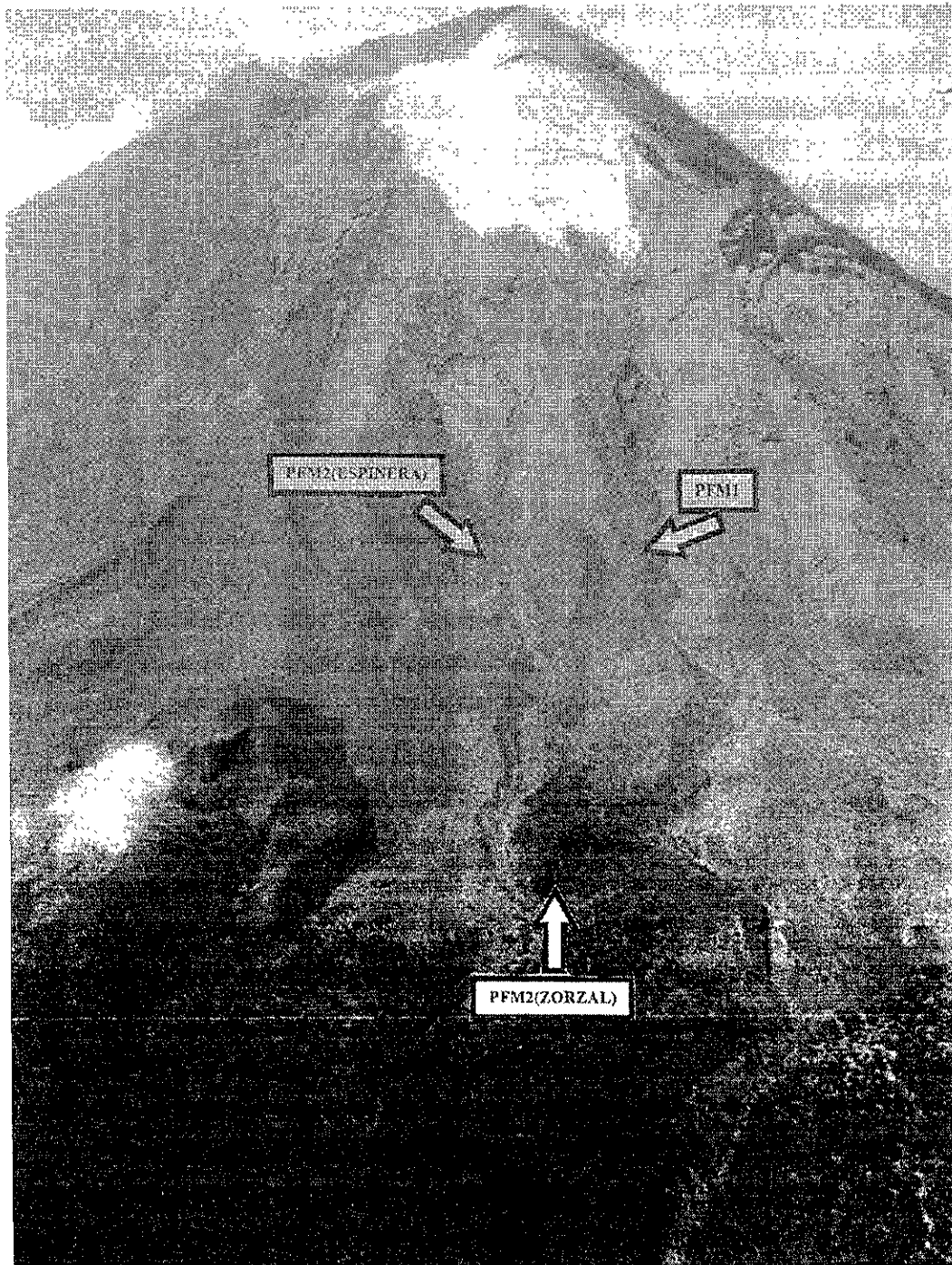


Fig. 4.2 Ubicación de las estaciones de detección de flujo PFM 1 y PFM 2 (Fotografía R. Quas, CENAPRED, mayo de 1996)

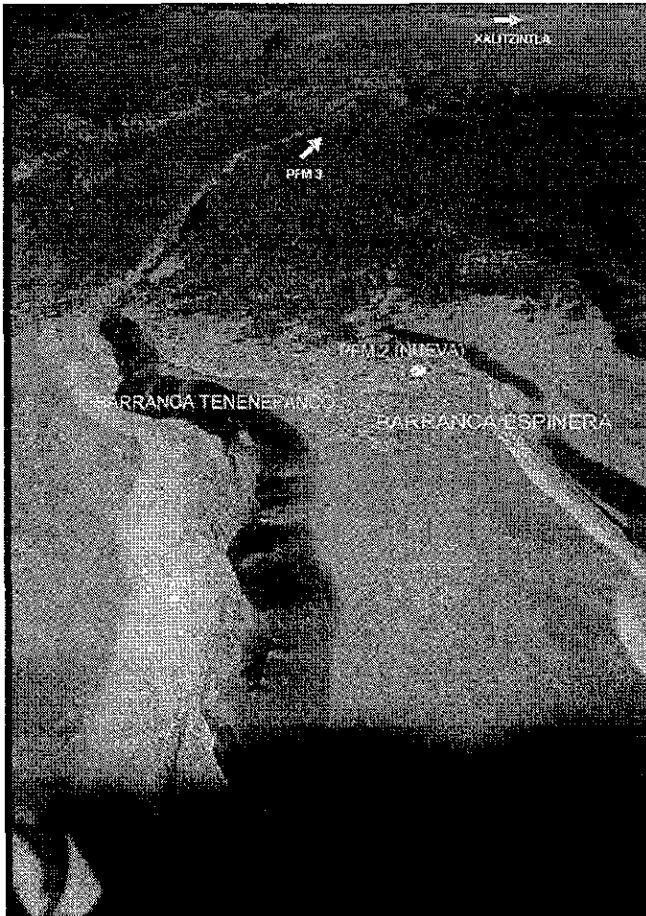


Fig. 4.3

Estación de detección de flujo PFM 3 vista desde la estación PFM 1
(Fotografía R. Quaas, CENAPRED, marzo de 1996)

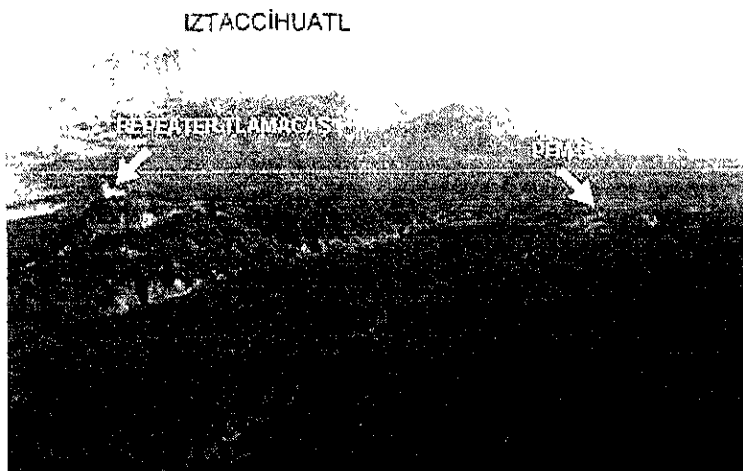


Fig. 4.4

Localización de la repetidora Tlamacas (Fotografía R. Quaas, CENAPRED,
septiembre de 1997)

IV.3 INSTRUMENTACIÓN DE LOS AFM

IV.3.1 Características

Cada estación consta de un sistema de medición de lluvia o pluviómetro, geófonos o sensores que funcionan como detectores sísmicos de flujo, circuitería de conexión, equipos de acondicionamiento y sistema de transmisión vía telemetría (Fig. 4.5).

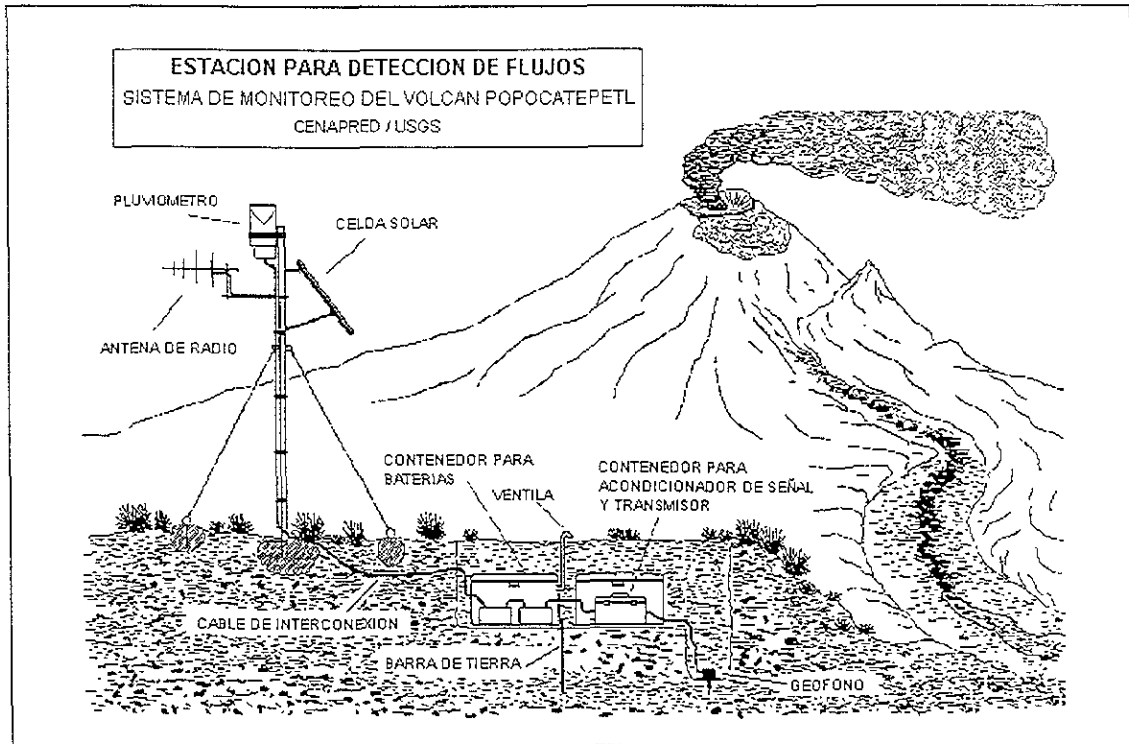


Fig. 4.5 Equipamiento de una estación de AFM (Cenapred, 2000)

El sistema AFM analiza la vibración del terreno y detecta lahares con base en su frecuencia, composición, amplitud y duración de la señal de vibración. Puede detectar incremento en las vibraciones del terreno algunos minutos (o algunos kilómetros) antes de que el flujo de escombros o el torrente de agua alcance la estación y continúa registrando la vibración a nivel del terreno hasta que la cola ha pasado. La velocidad de aproximación de los flujos puede ser determinada detectando los tiempos de llegada en sitios secuenciales de sensores a lo largo de los canales. Adicionalmente el monitoreo continuo del paso de flujos de escombros o torrentes de agua permite la estimación del volumen de agua y escombros que está pasando por una unidad de sensores (Lahusen, 1996).

El sistema de detectores acústicos es versátil y durable. Los sistemas AFM usan un método de no-contacto con el flujo para evitar mantenimiento repetitivo y peligroso de equipo después de cada flujo. El sistema es fácil de instalar, a prueba de agua, resistente y ha sido probado para operar en sitios remotos bajo condiciones extremas de humedad y temperatura (Hadley y Lahusen, 1995) (Fig. 4.6).

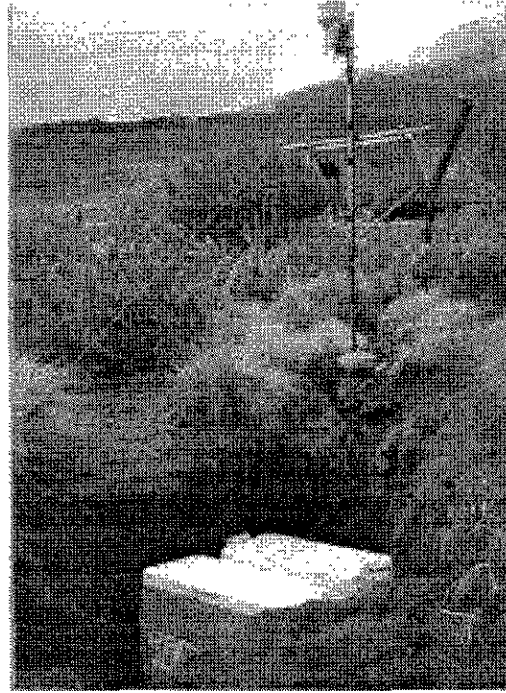


Fig. 4.6 Características físicas de la estación PFM2, Zorzal, en la cual se observa que es compacta y portátil (Fotografía CENAPRED)

IV.3.2 Geófonos

Los detectores acústicos de flujo usan geófonos de tipo exploración con el fin de detectar vibraciones causadas principalmente por corrientes, flujos de escombros, flujos hiperconcentrados y otras fuentes de frecuencia similar. Los datos son usados para la detección en tiempo real y alertamiento de lahares. Los geófonos tienen una respuesta de -3dB entre 10Hz y 300Hz y un rango dinámico aproximado de 3.8×10^{-3} cm/s de velocidad de crecimiento vertical. Las vibraciones son monitoreadas en tres bandas de frecuencia: Banda completa (10-300Hz), banda baja (10-100Hz) y banda alta (100-300Hz) (Marcial et al, 1996).

La mayoría de los flujos de escombros causan una vibración de terreno a una frecuencia pico entre 30 y 80 Hz, mientras los torrentes causan vibraciones con una frecuencia pico de más de 100 Hz (Lahusen, 1996) debido a los diferentes contenidos de material sólido, que afectan el comportamiento del flujo.

Un microprocesador mide la frecuencia de amplitud cada segundo y envía los datos a la estación base, una vez cada 10 minutos en modo normal. Si la señal en una banda de frecuencia rebasa cierto umbral establecido (ajustado para cada sitio) por más de 30 segundos el AFM envía inmediatamente un reporte con una bandera de alerta. Continúa enviando datos con esta bandera con intervalos de 1 minuto todo el tiempo que la señal sobrepase el umbral. Cuando la señal cae por debajo de este nivel el AFM reanuda su operación normal. La duración del disparo fue establecida para prevenir el registro de sismos volcánicos o tectónicos. Los geófonos fueron enterrados al menos un

metro para prevenir ruido proveniente del viento y de la lluvia y a una distancia que varía de 50 a 100 m del canal del flujo.

Cuando se grafican los datos del sistema AFM contra tiempo, definen una pseudográfica en la cual la intensidad de la señal es una aproximación de la descarga relativa, es decir, cuando mayor es la señal puede considerarse que la descarga es más grande respecto a aquellas de valor más bajo. Los AFM proveen suficientes datos antes y después del paso de un lahar por lo que la señal no requiere corroboración.

IV.3.3 Pluviómetros

Los pluviómetros, tipo balancín, cuentan la cantidad de lluvia en un tubo de interruptor magnético (Fig. 4.7). A través de un cono captan la lluvia y la vierten a un sistema basculante con dos recipientes calibrados. Cuando el peso del agua vertido en uno de los recipientes equivale a 1 ± 0.1 mm, el balancín descarga el agua del recipiente y pone en posición de recibir agua al segundo recipiente. El balancín está acoplado mecánicamente a un interruptor magnético que registra la descarga (Quass, comunicación personal). Esta señal se registra por un microprocesador que la envía cada 10 minutos o cada 10 mm, lo que suceda primero. La caída de lluvia es un valor acumulativo, proporcionado en pulgadas. Típicamente la caída de lluvia en los minutos u horas previos al lahar ha sido utilizada para el pronóstico (Marcial et al., 1996).

IV.3.4 Operación

El sistema AFM es una computadora de campo programada para analizar continuamente la amplitud, frecuencia y duración de las señales de vibración de los geófonos sensores. El sistema muestrea la señal de entrada y la transmite a una computadora en la estación base a intervalos regulares. Reportes inmediatos de datos son enviados si la señal indica que una actividad lahárica es detectada.

La unidad de microprocesamiento (MPU) continuamente compara la amplitud de la señal de la banda de frecuencia de 10-100Hz a un umbral almacenado en memoria. Si el nivel de la señal excede el umbral, se empieza a registrar el tiempo transcurrido que el nivel de entrada permanece sobre el umbral. Este tiempo es comparado con la duración almacenada en memoria. Si el tiempo transcurrido excede la duración entonces el AFM cambia a modo de alerta cuyo resultado es una transmisión inmediata que es abanderada para indicar una alerta. El AFM permanecerá en modo de alerta y continuará enviando datos abanderados a un intervalo de un minuto mientras la señal permanezca sobre el nivel umbral. El MPU regresará a su operación normal cuando el nivel de la señal sea menor que el umbral. El umbral, duración y banda de frecuencia son los parámetros operativos que definen el criterio para la detección de flujos. Estos parámetros pueden variar dependiendo del sitio de instrumentación y la sensibilidad deseada del sistema.

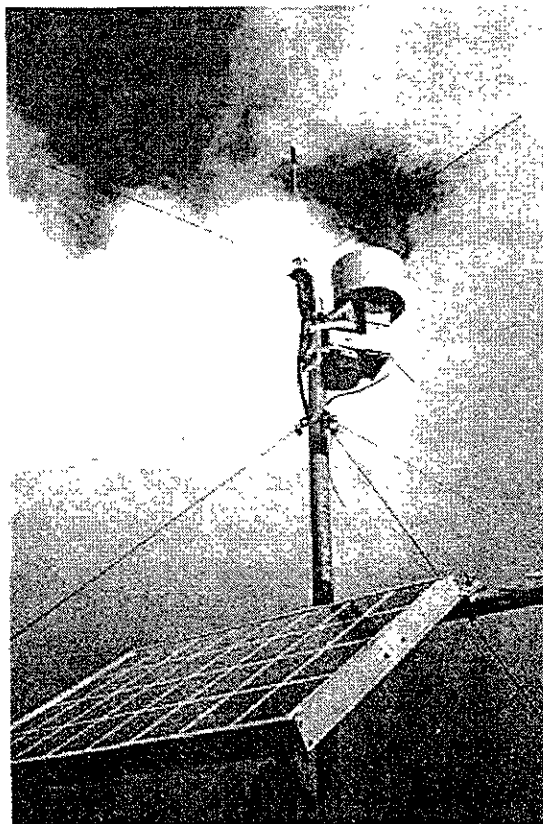


Fig. 4.7 Pluviómetro de la estación PFM 2, Zorzal (Fotografía CENAPRED)

IV.4 TELEMETRÍA

Todas las estaciones de la red son telemétricas, es decir, envían sus señales por medio de ondas de radio a una central ubicada en el CENAPRED, en donde se registran de forma continua y con una misma referencia de tiempo. Dado que se requiere línea de vista para enlazar por radio dos puntos, varias señales tuvieron que ser repetidas una o dos veces por estaciones retransmisoras, particularmente aquellas que están localizadas en la parte este y sureste del volcán (CENAPRED, 2000).

Un sistema de comunicación de radio bidireccional entre cada unidad de estación y la estación central, permite a los usuarios obtener datos e interrogar a los AFM en localidades remotas para obtener los datos actuales y modificar los parámetros operativos del sistema.

En la estación central, una computadora despliega los datos crudos, el tiempo de transmisión y un canal de identidad que identifica la estación de campo del cual provienen los datos y su tipo (si es de la banda de baja, alta frecuencia, pluviómetros, etc.). Finalmente, los datos son graficados en pantalla para una revisión preliminar.

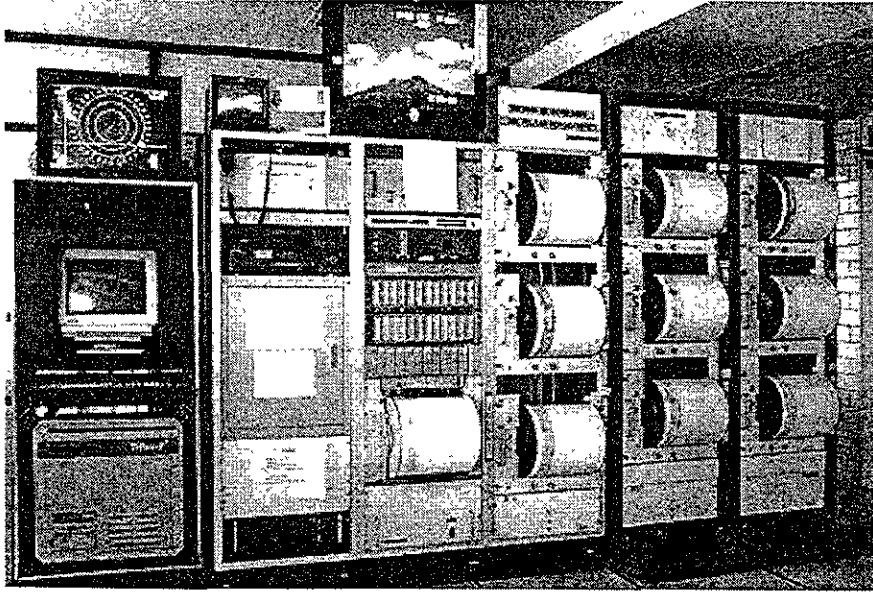


Fig. 4.8 Central de adquisición y procesamiento de datos del CENAPRED (Fotografía CENAPRED)

IV.5 ARCHIVOS GENERADOS

Los archivos generados por los AFM, recibidos en la central de recepción y procesamiento de datos del CENAPRED, pueden presentarse en modo binario o ASCII. En el primer caso, el tamaño de cada uno de ellos es de 210 Kb y reciben los nombres:

tips##.dat	datos del pluviómetro
hilo##.dat	datos del geófono en banda corta
hihi##.dat	datos del geófono en banda larga
full##.dat	datos del geófono en banda completa
bat##.dat	datos del voltaje de la batería

Dado que los archivos anteriores son anuales, ## representa el año de registro.

Los archivos generados en modo ASCII son diarios y su nombre está conformado por la fecha de obtención, así, el archivo 29jan98.dat corresponde al generado el 28 de enero de 1998. El tamaño de estos archivos no es constante, ya que influye en él el número de registros de la transmisión en modo de alerta. Sin embargo, el tamaño mínimo que debe presentar un archivo en operación normal es el día completo (24 horas), entre el intervalo de envío de señales. En el caso del Popocatepetl, el número de registros debe ser igual o mayor a 144.

Cada una de las estaciones puede transmitir de dos modos: señal normal y señal de alerta. El modo normal de transmisión es aquel que recibe los datos en un intervalo constante de tiempo, que en este caso es de 10 minutos y presenta el siguiente formato:

1. La primera columna corresponde a la fecha, dada en día, mes y año.
2. El segundo campo indica la hora GMT en horas y minutos. Para la red instalada en el Popocatepetl, el intervalo entre registros de valores es de 10 minutos.
3. La tercera reporta los valores en milivolts del voltaje pico de salida del geófono, sin filtrar, al momento de transmisión. En todos aquéllos campos correspondientes a las diferentes bandas de frecuencia se representan valores de velocidad de crecimiento vertical de terreno, en unidades de $\text{cm}^{\circ}/\text{seg}$
4. La cuarta es el valor en milivolts del voltaje pico de frecuencias entre 10 Hz y 100 Hz de salida del geófono, con una ganancia de 10 veces del valor anterior, al momento de transmisión. Es decir, alta ganancia, banda baja.
5. La siguiente columna corresponde al valor en milivolts a las frecuencias entre 100 Hz y 250 Hz de salida del geófono, con una ganancia de 10 veces, es decir, alta ganancia, banda alta.
6. La sexta corresponde al valor en milivolts de la cuarta parte del voltaje de la batería.
7. La séptima columna es el valor acumulado de precipitación pluvial desde el último reinicio del equipo. Cada pulso generado por el pluviómetro representa alrededor de 2.3 cm de lluvia
8. Los siguientes tres campos no son utilizados.

A continuación, a modo de ejemplo, un fragmento del archivo generado por la estación PFM1 Canario, el 1° de marzo de 1998:

```
01-MAR-1998 00:08 00000 00001 00000 03184 00089 -00998 -00998 -00998
01-MAR-1998 00:18 00000 00016 00008 03167 00089 -00998 -00998 -00998
01-MAR-1998 00:28 00000 00002 00005 03152 00089 -00998 -00998 -00998
01-MAR-1998 00:38 00000 00002 00002 03138 00089 -00998 -00998 -00998
01-MAR-1998 00:48 00013 00119 00060 03123 00089 -00998 -00998 -00998
(1)          (2)  (3)  (4)  (5)  (6)  (7)  (8)  (9)  (10)
```

Los intervalos de las bandas de los registros son:

10-250 Hz	banda completa
10-100 Hz	banda baja
100-250 Hz	banda alta

En el modo de transmisión de alerta sólo los datos de monitoreo de flujo son registrados. No así las columnas correspondientes a datos del pluviómetro y voltaje de la batería, que presentan -00998 como valor constante. Los siguientes registros se encuentran en modo de alerta:

```

20-APR-2000 22:54 00166 01643 00512 -00998 -00998 -00998 -00998 -00998
20-APR-2000 22:55 00312 03131 00512 -00998 -00998 -00998 -00998 -00998
20-APR-2000 22:56 00428 03880 00513 -00998 -00998 -00998 -00998 -00998
20-APR-2000 22:57 00479 03652 00513 -00998 -00998 -00998 -00998 -00998
20-APR-2000 22:58 00365 03489 00512 -00998 -00998 -00998 -00998 -00998
20-APR-2000 22:59 00270 02547 00512 -00998 -00998 -00998 -00998 -00998
20-APR-2000 23:00 00172 01706 00512 -00998 -00998 -00998 -00998 -00998
20-APR-2000 23:01 00087 00890 00512 -00998 -00998 -00998 -00998 -00998
20-APR-2000 23:02 00084 00837 00512 -00998 -00998 -00998 -00998 -00998

```

Los datos que se encuentran en la computadora de recuperación son respaldados constantemente en un medio más permanente, tal como medios magnéticos. De esta manera, están disponibles para análisis y procesamiento posteriores.

El sistema de detectores acústicos de flujo incluye al programa de cómputo BOB, cuyas principales funciones consisten en graficar los datos de varios pluviómetros y sensores de flujo en una pantalla, de manera tal que el tiempo y magnitud de los eventos puedan ser comparados de una parte del volcán a otra (Marcial et al., 1996). Sin embargo, debido a problemas y falta de calibración de los instrumentos que conforman el sistema de alertamiento, los datos no siempre son completos en número y en ocasiones presentan registros de modo de alerta que no corresponden a eventos reales. De tal manera, es necesario realizar un preprocesamiento que subsane estas anomalías y realice ciertas acciones que permitan presentar los datos correctos y dejarlos listos para una etapa posterior de procesamiento en frecuencias.

IV.6 EXPERIENCIA CON EL SISTEMA AFM EN OTROS VOLCANES

IV.6.1 Monte Redoubt, Alaska

El primer caso de detección de lahares usando monitores acústicos de flujo fue durante la erupción del Monte Redoubt, Alaska en 1989-1990 (Brantley, 1990)

Los flujos piroclásticos producidos durante los eventos eruptivos fundieron repentinamente la nieve y el hielo, provocando el inicio de lahares en el valle del río Drift. Una causa adicional fueron los colapsos de domos que cayeron en el flanco norte del volcán. Esta situación que se presentó en forma repetida creó un escenario ideal para probar el sistema experimental para la detección de lahares

Muchos de los lahares barrieron todo el camino a Cook Inlet a 35 km de distancia e inundaron todo el valle del río, el cual tiene aproximadamente 2 km de ancho. El alcance de los lahares amenazó a una terminal de almacenamiento de petróleo y a las personas que laboraban ahí. El 2 de enero de 1990, un lahar mayor inundó parte de la terminal con agua lodosa, alcanzando los tanques con capacidad de 1,900 barriles de petróleo cada uno.

El sistema de detectores acústicos de flujo instalados cerca al valle del río Drift consta de 3 sensores. El primero de ellos, instalado en la base del volcán, dista 9 km del domo; el segundo está a 13 km del domo y el tercero a 20 km. El sistema pudo detectar y rastrear claramente la trayectoria del evento de flujo desatado por el colapso de un domo el 6 de abril de 1990. Los 3 detectores acústicos de flujo respondieron a este evento, con diferencia de algunos minutos entre sí, mediante el incremento del valor de la velocidad de crecimiento vertical (Dorava, 1994). En cada estación, un sistema de radio envía los datos al Observatorio Volcanológico de Alaska, en Anchorage, donde una computadora almacena los datos y recibe las transmisiones de alerta.

IV.6.2 Monte Pinatubo, Filipinas

La experiencia del Monte Pinatubo es resumida por Marcial et al., (1996). Durante la erupción del 15 de junio, varios flujos piroclásticos bajaron hacia cada uno de los cauces de los ríos. La lluvia intensa (en promedio de 2-4 m por año) provocó miles de lahares, pequeños pero destructivos. Posterior a la erupción del Monte Pinatubo en Filipinas en 1991, una red de alertamiento de lahares compuesta por 6 sistemas AFM fue instalada en el Monte Pinatubo. Cada estación incluía un aparato de calibración de lluvia (pluviómetro), sismómetros convencionales de 1Hz, usados también para monitorear sismicidad tectónica y volcánica, sismómetros de exploración de 10-300 Hz, circuitería asociada a los AFM, cables y puntos de observación. Los AFM fueron colocados a lo largo de los ríos mayores con potencial de encauzar lahares, bajo la mayoría de las fuentes de lahar y todavía lejos de la población, como paredes de cañones o en la cima de las colinas, típicamente a una distancia de 20-100 m del flujo. En el monitoreo de lahares en el Monte Pinatubo de 1991 a 1993, los AFM probaron ser efectivos ya que ningún lahar fluyó por los sistemas de detección instalados sin que fuera registrado. Empíricamente los sensores de flujo comenzaron a reportar un incremento de vibración algunos minutos antes de que un lahar apareciera en la estación AFM y continuaba hasta que la parte final del lahar había pasado. El personal que monitorea los datos desde el PVO (Pinatubo Volcano Observatory) puede detectar lahares entre media y una hora antes de que sean observados por puestos de protección civil

CAPÍTULO V

PREPROCESAMIENTO DE LOS DATOS

CAPÍTULO V

PREPROCESAMIENTO DE LOS DATOS

V.1 INTRODUCCIÓN

El sistema de detectores acústicos de flujo cuenta con un programa de graficación de los datos, denominado *BOB*, instalado en la computadora receptora de datos en el CENAPRED. Esencialmente éste despliega de los datos de varios pluviómetros y sensores de flujo en una sola pantalla (Marcial et al., 1996).

El formato numérico de los archivos de datos es un conjunto de columnas que contienen los datos de interés. Sin embargo, para extraer información específica de ella es necesario convertirlo a un formato que pueda ser leído por un programa que la grafique de manera sencilla y de esta manera extraer de los datos toda la información posible. Previo a esta acción, es necesario un preprocesamiento de los archivos que permita reconocer datos emitidos en modo de alerta y la duración de ellos. También, en algunas ocasiones existen datos que aún cuando se emiten en modo de alerta, en realidad no reflejan un evento diferente, sino que son producidas por eventos ajenos al paso de lahares, como sismos volcánicos, exhalaciones o ruido.

Otra razón para realizar el preprocesamiento de los archivos es reconocer los registros faltantes y decidir la acción a llevar a cabo en esta situación, de manera que el archivo no presente bríncos o líneas sin registro. La salida del preprocesamiento es un archivo de datos en código *ASCII*, que refleja un conjunto de selecciones sobre los datos, en periodo y en su origen, listo para ser leído por un graficador o como archivo de entrada para una etapa posterior de análisis espectral o estadístico.

V.2 LENGUAJE

Las características deseadas del programa de preprocesamiento son: que sea un programa sencillo y amigable con el usuario, aún con aquel que desconozca su funcionamiento; que permita realizar modificaciones sobre el código fácilmente; que ofrezca un menú simple con diferentes opciones; que esté escrito en un lenguaje que no requiera características especializadas en una computadora y finalmente que sea fácil de instalar y ejecutar en diversas plataformas.

Se analizaron las características particulares de varios lenguajes de programación para la creación del programa, finalmente se decidió utilizar el lenguaje C por las razones siguientes:

1. Es un lenguaje poderoso y flexible. Se usa para proyectos tan diversos como procesadores de palabras, gráficos, hojas de cálculo y hasta compiladores para otros lenguajes.
2. Es un lenguaje común y cuenta con una amplia variedad de compiladores.
3. Es un lenguaje portátil, es decir, que escrito para un sistema de computadora puede ser compilado y ejecutado en otro sistema con pocas o ninguna modificación. La portabilidad se incrementa con el estándar ANSI para el C.
4. Es un lenguaje de pocas palabras, que contiene solamente unos cuantos términos

llamados palabras clave que son la base sobre la que está construida la funcionalidad del lenguaje.

5. Es modular. Debe ser escrito en rutinas llamadas funciones, las cuales pueden ser reutilizadas en otras aplicaciones o programas. Se puede crear código útil y reutilizable.

V.3 OBJETIVOS

Los objetivos principales del programa de preprocesamiento de los archivos de salida del sistema AFM son:

- Seleccionar un periodo de revisión de los datos, por día, mes o año
- Verificar la existencia del archivo o archivos seleccionados
- Numerar los registros de cada archivo e investigar si faltan registros
- Completar el archivo seleccionado, en el caso de que esté incompleto a fin de presentar un archivo coherente
- Detectar registros en modo de alerta
- Verificar que los registros en modo de alerta representen un evento anómalo
- Obtener un archivo de salida con la columna o columnas de datos seleccionadas

V.4 FUNCIONAMIENTO

Es necesario que los archivos de los datos de diferentes estaciones se encuentren en un esquema de árbol (Fig. 5.1). El programa de preprocesamiento, denominado *lahar1*, debe encontrarse en el directorio principal, denominado PFM; bajo él se localizan subdirectorios denominados con la clave de las estaciones AFM, es decir, PFM1, PFM2, PFM3 y PFM4. En cada uno de ellos se localizan todos los archivos de cada estación, nombrados como se indicó en el tema anterior.

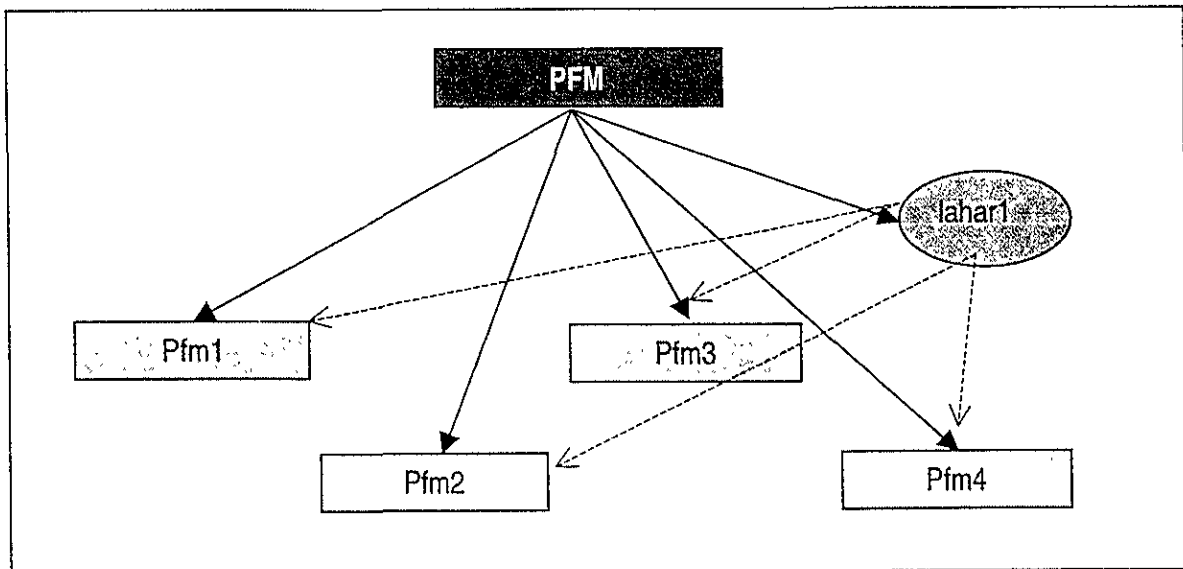


Fig. 5.1

Diagrama de árbol de los directorios de datos

Inicialmente, *lahar1* introduce al usuario a un menú que presenta las alternativas de estación a seleccionar. A saber presenta 4 opciones:

Seleccione la estación:

- 1) PFM1-Canario
- 2) PFM2-Zorzal
- 3) PFM3-Union
- 4) PFM4-Tlamacas
- 5) Salir

Cualquier opción diferente a las presentadas enviará un mensaje de uso inexacto del programa. Elegir una de las anteriores abrirá el directorio correspondiente para continuar con el menú de elección de periodo a procesar. En este caso se han propuesto varios intervalos de tiempo que pueden variar de un día a un año. La selección se realiza comparando las cadenas de caracteres que componen el nombre del archivo con los seleccionados:

```

=====
Introduce el año (dos dígitos):

=====
Introduce el mes ( 0 para todos los meses):

=====
Introduce el día (dos dígitos, o 0 para todos):

=====

```

En cada caso, la selección llevará a un menú donde se especifique la información referente al periodo. La primera opción sería procesar todo el año, introduciendo esta información en el primer campo, y 0 para los otros dos. Para procesar todo un mes de un año específico, se ingresa el año en el primer campo y el número de mes en el segundo, finalizando con el ingreso del valor 0 para el campo correspondiente al día. Si se varían las opciones se puede elegir todos los días de un año, de un mes y un día sólo; un día de todos los meses, o un día específico.

Dentro del código del programa se ha incorporado una pequeña base de datos que contiene el número de archivos que deben leerse en cada situación. Para la selección de un mes y realizada la lectura de su nombre, *lahar1* revisa el número de archivos que deben contener esa cadena y los compara con la información contenida en la base de datos y también se contabiliza el número de archivos que debe contener un año.

Al realizar la comparación emite un mensaje que indica que el número de archivos es correcto o diferente al esperado:

```

El número de archivos para el periodo seleccionado es menor al
esperado.
Deben existir ## archivos y existen ##
Continuar?

```

- 1) Si
- 2) No

o bien,

El número de archivos para el periodo seleccionado es correcto.
Continuar?

- 1) Si
- 2) No

En el primer caso, para la elección de la opción de continuar es importante evaluar la diferencia entre número de archivos existentes y esperados y dependiendo de los objetivos del preprocesamiento esto puede ser de suma importancia o no. Si la primera opción es elegida, *lahar1* rellenará esos datos faltantes con un valor base que, representados gráficamente, se presentarán como una línea horizontal entre el dato previo y el siguiente.

A continuación se realizará una contabilidad de líneas que contiene cada archivo del periodo elegido. Si éste fue de un día, se contarán las líneas del archivo elegido que, dado que los registros son cada 10 minutos o menos (si es que existen registros en modo de alerta), el número de registros o líneas debe ser igual o mayor a 144.

El número de datos faltantes es muy grande. Continuar?

- 1) Si
- 2) Seleccionar un nuevo periodo
- 3) Salir

La primera opción llevará a rellenar los datos con un valor constante. La segunda a unos pasos anteriores. La tercera terminará con la ejecución del programa.

Cuando el número de registros es mayor a 144, el programa automáticamente realizará una identificación de los registros que no cumplen los periodos constantes y que son llamados anómalos por *lahar1*. Se emitirá una lista de éstos y procederá a revisar su validez mediante el criterio de que los campos del pluviómetro y de batería deben presentar el valor -0998. En caso contrario se consideran "falsas alarmas" y son considerados no válidos y por lo tanto ignorados.

El último menú permite al usuario seleccionar el archivo de salida deseado. Las opciones que presentan son:

=====

Para generar un archivo con los datos del periodo en cuestion, seleccione:

- 1) Banda completa
- 2) Banda baja
- 3) Banda alta
- 4) Voltaje de la bateria
- 5) Pluviometro
- 6) Salir

=====

V.5 ARCHIVOS DE SALIDA

Los archivos de salida incluyen columnas con la fecha y valor de la selección. Una tercera columna con un dígito cuyo valor puede ser 0 ó 1 se utiliza para indicar si el registro está en modo de operación normal o en modo de alerta, respectivamente.

El nombre asignado a éstos es elegido por el usuario. Dado que la salida es un archivo de texto y valores en modo *ASCII*, es deseable utilizar la extensión *.dat* o *.txt* para que pueda ser reconocido por otros programas.

A continuación se presenta un extracto de un ejemplo del archivo de salida del mes de enero del 2000, de la estación PFM2 y extrayendo la columna correspondiente a banda baja. La salida es sólo una columna que puede ser graficada en valores de velocidad vertical ($\text{cm/s} \times 10^6$) contra el número de datos:

04-JAN-2000	6	0
04-JAN-2000	3	0
04-JAN-2000	12	0
04-JAN-2000	3	0
04-JAN-2000	10	0
04-JAN-2000	4	0
04-JAN-2000	5	0
04-JAN-2000	5	0
04-JAN-2000	6	0
04-JAN-2000	12	0
04-JAN-2000	10	0
04-JAN-2000	3	0
04-JAN-2000	3	0
04-JAN-2000	8	0
04-JAN-2000	8	0
04-JAN-2000	3	0
04-JAN-2000	6	0
04-JAN-2000	6	0
04-JAN-2000	6	0

Cuando el periodo seleccionado es un día, para generar el archivo de salida son extraídas las columnas de fecha y la correspondiente a la selección. Si el periodo es un mes o un año, todos los archivos que integran la selección son concatenados para generar uno temporal y a continuación realizar el corte de las columnas correspondientes.

Además de los archivos de datos generados, el programa de preprocesamiento crea un reporte que indica los modos de alerta encontrados en el periodo seleccionado, el cual incluye la fecha, la hora de inicio del registro diario y las horas para los modos de alerta, como se ejemplifica a continuación:

```
-----  
Archivo leído: 22mar99.dat  
  Hora de inicio 00:01  
  Modo de alerta a las 17:48  
150 líneas en el archivo  
-----
```

```
-----  
Archivo leído: 01apr99.dat  
Hora de inicio 00:00  
  Modo de alerta a las 00:04  
  Modo de alerta a las 00:05  
  Modo de alerta a las 00:09  
  Modo de alerta a las 00:15  
  Modo de alerta a las 00:16  
  Modo de alerta a las 00:17  
  Modo de alerta a las 00:19  
  Modo de alerta a las 00:20  
143 líneas en el archivo  
-----
```

De esta manera, se simplifica el procedimiento para comparar los eventos de modo de alerta registrados por la estación AFM con aquéllos registrados por otros medios.

Los datos pueden ser graficados de forma independiente o ser correlacionados con otras estaciones para observar el seguimiento de un posible flujo en una barranca.

Finalmente, los datos se pueden conjuntar para ser graficados en algún *software* de propósito general, o ser ingresados en una hojas de cálculo para poder evaluar parámetros estadísticos simples, tales como la media o la desviación estándar.

V.6 ETAPA DE PREPROCESAMIENTO

Los datos procesados en el presente trabajo son los adquiridos por el sistema de monitoreo acústico de flujos durante el año 1999 y hasta octubre de 2000.

Se decidió el periodo mencionado debido a que, aún cuando el sistema fue instalado a finales de 1997, durante el periodo de enero a agosto de 1998 la estación PFM2 dejó de funcionar debido a que el impacto de una roca lanzada por una erupción explosiva del volcán provocó la destrucción parcial de la estación, por lo que durante este periodo no hubo recepción de datos. En agosto de 1998 la estación fue reinstalada un kilómetro aguas abajo junto a la misma barranca, de la cota 4294 m a 3985 m. Un puesto militar de observación fue instalado durante 1998 cerca de la confluencia de las barrancas Tenenepanco y Espinera. Las observaciones y reportes realizados por este grupo de observadores fueron formales a partir de 1999.

Para generar los archivos anuales se utilizó el programa *lahar1*, descrito en las secciones anteriores. Se obtuvieron archivos individuales para cada año, para tres estaciones, PFM1, PFM2 y PFM3 y para cuatro de las bandas de salida, banda completa, banda baja, banda alta y pluviómetro.

Para los fines del presente trabajo la banda correspondiente al voltaje de la batería no fue considerada. Además, debido a que la estación PFM4, Tiamacas, es una repetidora de los datos a las oficinas centrales y Centro de Procesamiento del CENAPRED, los datos registrados ahí no fueron evaluados en el presente trabajo.

Por lo tanto, los 24 archivos generados en una primera etapa fueron:

- Año 1999, Estación 1, Banda 1
- Año 1999, Estación 1, Banda 2
- Año 1999, Estación 1, Banda 3
- Año 1999, Estación 1, Banda 5

- Año 1999, Estación 2, Banda 1
- Año 1999, Estación 2, Banda 2
- Año 1999, Estación 2, Banda 3
- Año 1999, Estación 2, Banda 5

- Año 1999, Estación 3, Banda 1
- Año 1999, Estación 3, Banda 2
- Año 1999, Estación 3, Banda 3
- Año 1999, Estación 3, Banda 5

- Año 2000, Estación 1, Banda 1
- Año 2000, Estación 1, Banda 2
- Año 2000, Estación 1, Banda 3
- Año 2000, Estación 1, Banda 5

- Año 2000, Estación 2, Banda 1
- Año 2000, Estación 2, Banda 2
- Año 2000, Estación 2, Banda 3
- Año 2000, Estación 2, Banda 5

- Año 2000, Estación 3, Banda 1
- Año 2000, Estación 3, Banda 2
- Año 2000, Estación 3, Banda 3
- Año 2000, Estación 3, Banda 5

Las gráficas de cada uno de los archivos anteriores permite observar las tendencias generales, variaciones temporales y espaciales a gran escala.

V.7 EVENTOS RECONOCIDOS

Los eventos reconocidos son aquellos que se emiten en modo de alerta, cuando el flujo produce una vibración que sobrepasa el umbral establecido. La salida generada por el programa *lahar1* es un archivo en modo de texto, en el cual se escribe la fecha y las horas en las cuales se reconoció el modo de alerta (Apéndice 1).

Un análisis detallado, gráfico y visual brinda información relevante acerca de los fenómenos laháricos que ocurren en el Popocatepetl, de la respuesta instrumental de los detectores acústicos de flujo y de los problemas que eventualmente presentan.

Idealmente, el paso de un flujo de material volcánico con agua genera una vibración menor en cuanto éste se acerca por el canal de drenaje al sitio de ubicación de la estación AFM. El valor máximo registrado por los sensores está relacionado con la descarga máxima de flujo. Cuando el lahar se aleja o disminuye notablemente su carga, la respuesta de los sensores va disminuyendo paulatinamente hasta que cae por debajo del umbral y regresa la transmisión a modo normal. En este esquema, los valores registrados por el AFM deberían ir aumentando paulatinamente hasta llegar a un valor máximo, mantenerse por un tiempo en un rango alto de valores y comenzar a disminuir al cabo de un lapso de tiempo (Fig. 5.2). Estos periodos son determinados por las características particulares de los flujos.

Sin embargo, muchos de los modos de alerta registrados por el sistema de AFM del CENAPRED parecen no reflejar un evento real de flujo lahárico de tamaño relevante, ya que el registro es único, es decir, sólo durante un minuto como máximo se sobrepasa el valor umbral, debido posiblemente a exhalaciones del volcán (Quaas, comunicación personal). Esto genera un evento en el cual sólo existe un registro en modo de alerta, como se observa a continuación:

```
-----  
Archivo leído: 29apr00.dat  
Hora de inicio 00:02  
Modo de alerta a las 17:30  
144 líneas en el archivo  
-----
```

Aún cuando este tipo de eventos representa un porcentaje importante del total de los eventos en modo de alerta reconocidos, es necesario considerarlos con el fin de conocer el comportamiento general, frecuencia y finalmente proponer una explicación a ellos.

Las posibilidades planteadas para tales respuestas son variadas. La primera de ellas propone el escenario en donde los datos correspondan a un tipo de vibración dentro del límite de frecuencias registradas por los geófonos, provocadas probablemente por la caída de una roca. Otra posibilidad es que los valores anómalos sean producidos por un inadecuado funcionamiento de los instrumentos que conforman la estación. Finalmente, se puede plantear la posibilidad de que en realidad hubiera existido un flujo, de pequeña magnitud, que no fuera observado ni reportado y cuya descarga máxima haya sobrepasado el umbral en un instante.

Con el fin de plantear una posible relación entre los modos de alerta reconocidos y las exhalaciones del volcán y los sismos detectados y reportados por el CENAPRED. Se analizaron datos de fechas en las cuales se registran varios modos de alerta, no consecutivos. Las fechas propuestas son, en 1999, 7 de mayo, 15 de junio, 7 y 12 de julio y

20 de diciembre. En el año 2000 se analizan para el 2 de junio, 9 y 3 de agosto. El análisis de los reportes internos de sismicidad registrada por la red de monitoreo sísmico del volcán Popocatepetl para las fechas mencionadas, no muestra que los modos de alerta detectados tengan relación con los sismos volcanotectónicos más importantes detectados por el sistema. Sin embargo, el 7 de julio de 1999 ocurrieron tres sismos registrados menos de una hora previo al primer modo de alerta registrado por el sistema AFM. Es posible que éstos tengan relación con el inicio del flujo lahárico.

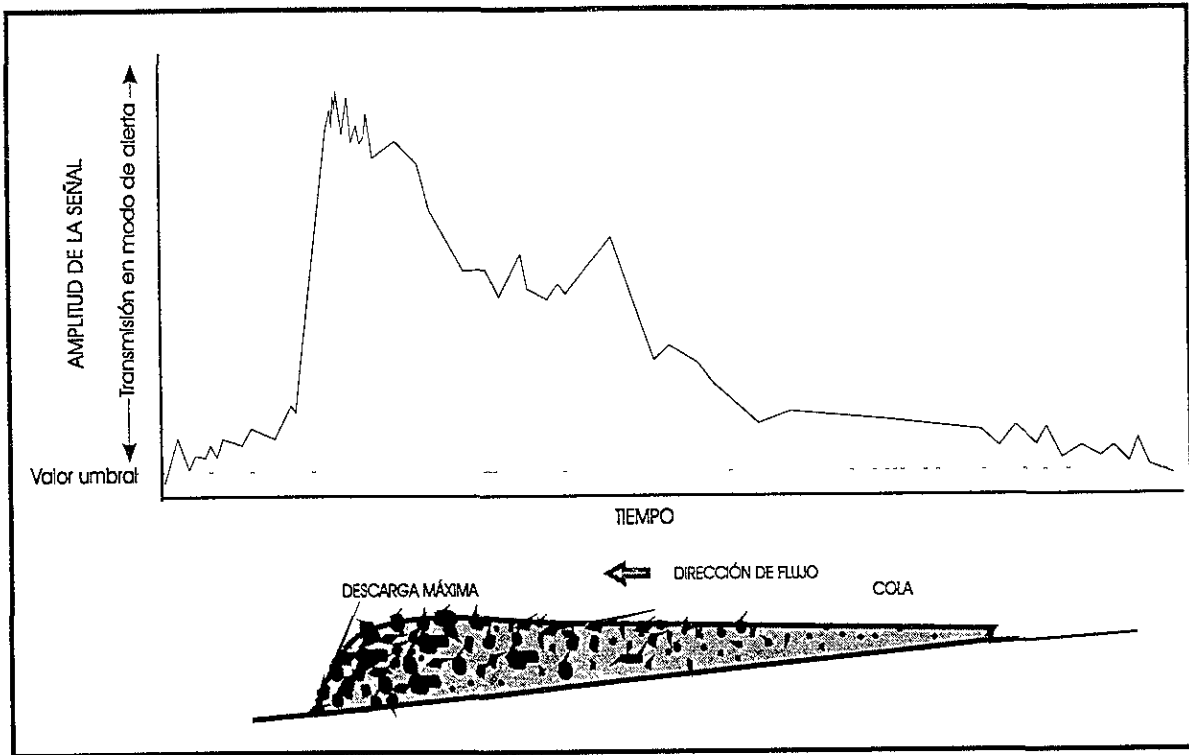


Fig. 5.2 Relación entre dinámica de un lahar y registro en el AFM

CAPÍTULO VI

CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE FLUJOS

LAHÁRICOS

CAPÍTULO VI CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE LOS FLUJOS LAHÁRICOS

VI.1 BITACORA DE DATOS

VI.1.1 Puesto militar de observación

En 1998 fue establecido un puesto militar de observación, perteneciente al plan de protección civil DN-3 del Ejército Mexicano, denominado *Flujos 3*, para monitorear la descarga y características de los flujos que drenan por las barrancas del sector N-NE del volcán Popocatepetl.

Colaborando con el CENAPRED, el personal militar asignado a la estación recaba información visual para una descripción física de los diferentes eventos de flujo. Las instalaciones del puesto están muy próximas a la estación PFM3, esto es, en el punto donde confluyen las barrancas Tenenepanco y Espinera. Esta ubicación permite, en caso de ser necesario, inspeccionar los flujos en ambas barrancas, en el punto de confluencia de ellas y en el cauce que drena a ambas, la barranca Huiloac. (Fig. 4.1).

VI.1.2 Adquisición de datos

En una intercomunicación constante con el centro de procesamiento del CENAPRED, donde se encuentra la computadora de adquisición de datos del sistema de AFM, la información fluye bilateralmente. El sistema envía una señal de alerta cuando ha detectado un flujo, cuya magnitud supere el valor umbral de la amplitud, lo cual provoca que una alarma acústica se active en la central de adquisición y procesamiento en el CENAPRED. El personal a cargo en este sitio llama al puesto de observación para avisar del evento y ellos realizan una inspección visual para determinar características físicas (Fig. 6.1) y emitir el reporte correspondiente.

Los datos que obtienen son principalmente la estimación de las dimensiones y velocidad del flujo, así como el horario en que éstos son observados. La estimación de las dimensiones del flujo que transita por la barranca se realiza en una sección del canal de ancho conocido y con una escala vertical instalada en medio del cauce para medir la profundidad observando el nivel alcanzado por el flujo (Fig. 6.2). Las unidades de medida de la profundidad y ancho son en centímetros.

La velocidad de flujo se determina mediante la observación de la velocidad superficial en un sector de la barranca próximo al puesto de observación. La magnitud de la velocidad es reportada en kilómetros por hora, mediante la apreciación visual de un objeto flotando en el flujo. El aspecto vectorial de la velocidad se entenderá como la dirección de máxima pendiente en el cauce del flujo y en las referencias posteriores a la velocidad se omitirá mencionar este aspecto.

VI.1.3 Bitácora 1999 y 2000

Debido a la fecha de reinstalación de la estación *Flujos3*, los reportes se han emitido desde 1999, y en forma más constante durante el año 2000. Los registros aquí

mencionados se vertieron tal y como fueron plasmados en las bitácoras para evitar alterarlos y realizar interpretaciones previas incorrectas (Apéndice 2).

Los eventos se reportan en hora local; sin embargo en algunas ocasiones existe incongruencia en la hora reportada cuando es en un rango de 12 horas, debido a que no se menciona si es AM o PM.



Fig. 6.1 Obtención de datos de flujo en la barranca (Fotografía del puesto militar de observación *Flujos 3*, Julio de 1999)

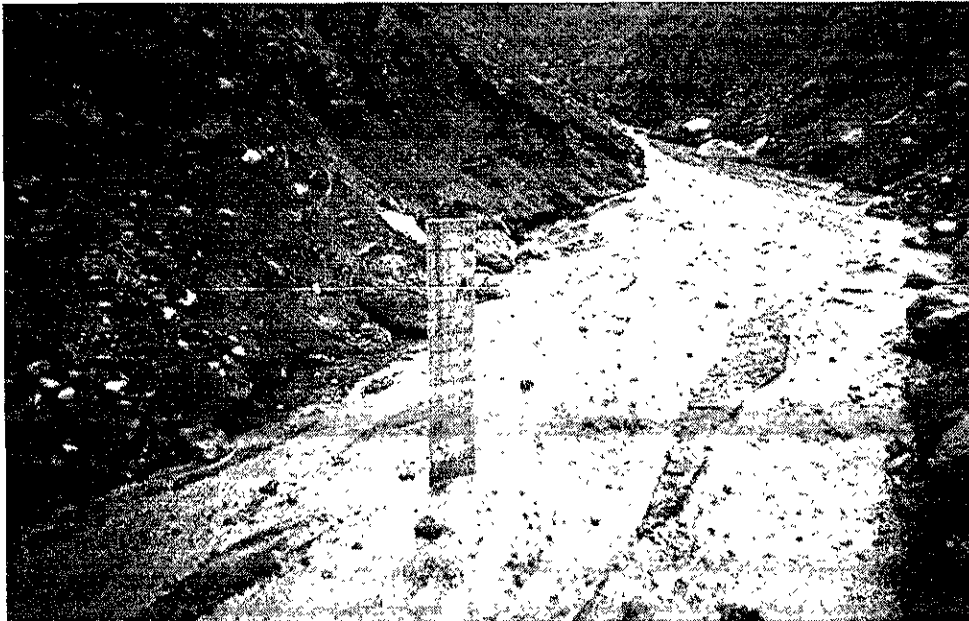


Fig. 6.2 Escala vertical para estimar la profundidad de los flujos (Fotografía del puesto militar de observación *Flujos 3*, Julio de 1999)

VI.2 ANÁLISIS PRELIMINAR DE LOS DATOS

VI.2.1 Datos totales

Sin realizar una selección previa se ha realizado un análisis del total de los datos generados por las tres estaciones de detección de flujos, en cada banda, desde 1999 hasta octubre del 2000. Las gráficas completas de cada estación permiten un análisis visual para determinar el comportamiento de los datos a lo largo del tiempo y observar los rangos de amplitud y valores máximos de velocidad vertical de vibración del terreno. La distribución de los datos en bandas de frecuencia permite además, observar en cuáles de ellas se registran los valores más altos y cuál registra mayor número de eventos (Apéndice 3).

Con relación a las amplitudes se observa que los rangos de valores máximos, expresados en $\text{cm/seg} \times 10^6$, oscilan entre 3000 y 4000. Sin embargo, el 13 de marzo de 1999, en la banda baja de la estación 2 se registra un valor mayor a $8000 \text{ cm/seg} \times 10^6$, el cual duplica el rango de valores máximos. En realidad se trata de un valor anómalo que en el análisis posterior de los datos es discriminado.

En la estación 1 se registran más eventos que en la 2 y la 3. Esto conduce a pensar que la barranca Tenenepanco es la más activa, es decir, por este cauce se drenan más flujos que por la barranca Espinera. Otra posibilidad es que los eventos ahí son de dimensiones mayores. La barranca 3 registra muy pocos valores altos. La mayor parte de los registros caen dentro de un valor pequeño que, con relación a los valores mayores, se observa como un valor base. Estas tendencias se mantienen durante 1999 y 2000. Sin embargo, los datos de esta estación, aunque son escasos, podrían representar los eventos laháricos mayores.

Las gráficas de los datos proporcionados por los pluviómetros muestran el incremento de la lluvia acumulada en el transcurso del año. Sin embargo, debido a la distribución espacial, ellos deberían presentar un comportamiento muy similar, lo cual no ocurre en la estación 2 de 1999, que muestra una caída a valor 0 en septiembre. Lo anterior se debe a un ajuste del registro al valor inicial, realizado por el personal del CENAPRED. La misma situación se observa en junio del 2000, en la estación 1. Finalmente, el pluviómetro de la estación 3 no registra aumento en la cantidad de lluvia durante 2000 debido a problemas instrumentales, tales como el atascamiento con ceniza del recipiente cónico del sensor, por lo tanto los datos no son muy confiables (Quaas, comunicación personal).

Registros negativos en los pluviómetros (-00998) corresponden a valores que se asignan cuando el modo de alerta es activado y sustituye en el archivo el valor de lluvia acumulada. En general los datos pluviométricos no son confiables debido a fallas ocasionadas por la caída de ceniza. Por esta razón, la información de precipitación pluvial se complementa con datos meteorológicos proporcionados por la Comisión Nacional del Agua, de estaciones ubicadas en San Pedro Nexapa y Amecameca, Estado de México.

VI.2.2 Distribución horaria

Para obtener información de la distribución de los eventos durante el día, se graficaron los modos de alerta instrumentales en hora GMT (Apéndice 4). El objetivo consiste en observar tendencias en el cambio de hora de ocurrencia durante el transcurso del año.

El comportamiento es semejante en las tres estaciones durante el año y en él no se aprecian tendencias definitivas, es decir, la hora de inicio de los eventos varía en todo el rango de horas. Sin embargo, a mitad de los años 1999 y 2000, de mayo a octubre, se observa un ligero incremento en la hora de ocurrencia de los eventos, que tienden a aumentar hasta las 18:00 hrs. GMT (12:00 hrs. en hora local), interrumpido por eventos ocurridos más temprano. Durante el año 2000, las gráficas se presentan sesgadas a la izquierda, es decir, al parecer la hora máxima de ocurrencia se registra durante abril y mayo, con una hora promedio alcanzada a las 21:00 GMT (15:00 local). La tendencia se mantiene para la estación número 2, pero no para la estación 3. En ambos años, el comportamiento de ésta última es más difícil de caracterizar, en parte debido al número pequeño de datos registrados en ésta.

Concluir un comportamiento con base en las tendencias observadas es innecesario y erróneo, ya que los datos incluyen eventos que no necesariamente corresponden a eventos de flujo, sino debido a la alta sismicidad del sitio (Quaas, comunicación personal). Estos datos se analizan y discriminan en una etapa de análisis posterior.

VI.2.3 Distribución mensual

Se grafican los modos de alerta agrupándolos en el mes en el cual ocurrieron (Apéndice 5). De esta forma, es posible relacionar la ocurrencia de eventos con las épocas del año y trazar una tendencia si es que existe.

El análisis visual muestra que existe una tendencia de aumento hacia la mitad del año 1999. La estación 1 muestra un comportamiento bimodal, en marzo y junio, pero éste no se mantiene en las estaciones 2 y 3 para el mismo periodo. Durante el año 2000, el comportamiento es semejante al del año anterior, en cuanto al aumento de eventos hacia la mitad de año y también en la gráfica bimodal (picos en marzo y junio) de la estación 1, que tampoco se mantiene para las estaciones 2 y 3 de este año, mientras que la estación 2 muestra una tendencia similar a su correspondiente de 1999.

Aún cuando no es concluyente, los modos de alerta disminuyen en los extremos del año, enero y diciembre en 1999. En el caso del 2000 no se puede confirmar la disminución hacia fin de año por la falta de estos registros al momento de realizar este análisis. Sin embargo, el principio del año 2000 también registra un número menor de eventos que el resto del año.

Nuevamente la estación 3 de ambos años no muestra tendencias fácilmente identificables y, en apariencia, no se relaciona con las estaciones 2 y 3 correspondientes.

Finalmente, al igual que en el análisis anterior, no existen interpretaciones concluyentes para el comportamiento de los datos. Por lo anterior, en los datos seleccionados se observará si el comportamiento se mantiene.

VI.3 EVENTOS LAHÁRICOS

VI.3.1 Banda de frecuencia de mejor detección

Los detectores acústicos de flujo tienen una respuesta en frecuencias entre 10 y 250 Hz, mientras que un sismómetro típico de periodo corto detecta frecuencias entre 1 y 10 Hz.

La vibración del terreno generada por lahares se encuentra predominantemente en el rango de frecuencias de 30 a 80 Hz mientras que las vibraciones generadas por sismos, tremores volcánicos y erupciones explosivas generalmente es menor a 6 Hz (Lahusen, 1996). Esta diferencia en la respuesta en frecuencia permite distinguir entre lahares y otras vibraciones del terreno de origen volcánico natural (Fig. 6.3)

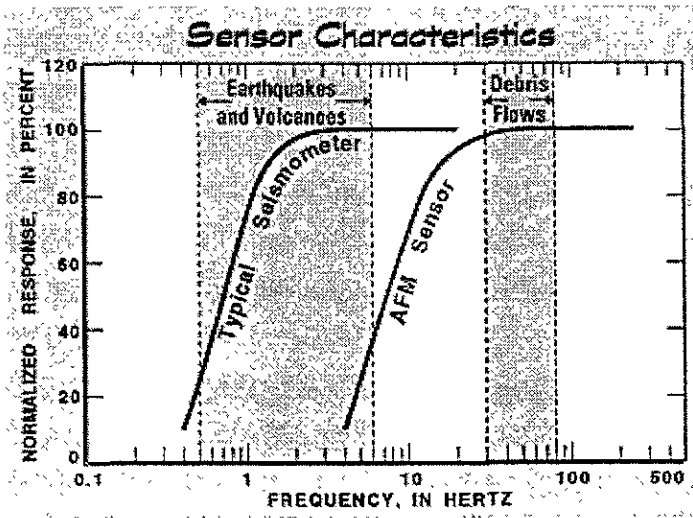


Fig. 6.3 Rango de respuesta en frecuencia para AFM y sismómetros típicos (USGS, 2000)

La experiencia con los lahares del Monte Pinatubo en Filipinas, durante los años 1991 y 1992 sugieren que la energía de los flujos de escombros y flujos hiperconcentrados se concentra en la banda baja de los AFM, es decir, de 10 a 100 Hz, mientras que las corrientes de agua es concentrada en la banda alta (100-250 Hz) (Marcial et al., 1995).

La mayoría de los flujos laháricos detectados en el Popocatepetl de 1999 a 2000, aún cuando no todos se han correlacionado con observaciones visuales, se han registrado mejor en la banda baja de frecuencia. Un menor número presenta una amplitud mayor en la banda alta por lo cual podemos concluir que en el caso de estos últimos se trata de corrientes de agua.

VI.3.2 Clasificación de los eventos

Para analizar los datos en modo de alerta que se registran por la sección instrumental junto con los datos recabados en la bitácora, se integra toda la información en una tabla, a partir de la cual, y con apoyo de las gráficas, se clasifican los eventos.

Los criterios que se han elegido están basados en los objetivos del estudio. Basándose en ellos es posible discriminar eventos de flujo de magnitud importante de aquellos que no lo son. Sin embargo, debido a que la experiencia del sistema instrumental y de procesado de la información es poca, es susceptible a ser modificado y mejorado posteriormente. Los términos de la clasificación se enuncian a continuación.

1. En primer término se clasifican los eventos observados y reportados por el puesto militar de observación en la bitácora que presentan relación con la parte instrumental correspondiente al modo de alerta en los AFM, considerando la diferencia de horario entre hora local y hora GMT. En algunas ocasiones la descripción en la bitácora, realizada por los observadores, es escueta o los registros en modo de alerta no son muchos ni continuos.
 - A los eventos que se representan claramente en la parte instrumental, es decir, que cuentan con varios modos de alerta continuos y que en la bitácora de datos tienen una descripción clara de las características del flujo se les ha asignado la letra **A** en la tabla.
 - Los eventos que en la bitácora presentan un informe de activación de la alarma acústica en el CENAPRED, pero que no existe una descripción del flujo y por otra parte, existe la correspondiente señal instrumental se han designado con la letra **B**.
2. En la siguiente clase se encuentran los eventos en modo de alerta registrados por la parte instrumental, para los cuales sin embargo no existe un reporte correspondiente por parte del puesto militar de observación. Dentro de esta clasificación se consideran 4 variantes:
 - La más importante es cuando existe claramente un evento, que es registrado al menos en las estaciones 1 o 2 y en la estación 3, con la letra **C**.
 - Cuando existe un evento instrumental claro en una estación, que dura más de un solo registro, es decir, que se registra por más de un minuto. La clasificación para estos eventos es con la letra **D**.
 - Un evento incierto es aquel en el cual el modo de alerta presenta sólo un registro, es decir, que fue detectada como una vibración anómala en una única ocasión, asignándoles la clasificación **E**.
 - Finalmente, existen eventos que se registran por una sola ocasión en la misma hora al menos en dos estaciones y se clasifican con la letra **F**.
3. La tercera clasificación incluye a aquellos reportes en la bitácora que no tienen su correspondiente evento en modo de alerta instrumental. Una subdivisión de ellos incluye:
 - Reportes de flujo con descripciones en la bitácora, denominados con la letra **G**.
 - Reporte de activación de la alarma acústica, nombrado con la letra **H**.

Evento instrumental	Reporte en la bitácora	Letra asignada
✓ Claro	✓ Claro	A
✓ Alerta	✓ Alarma	B
✓ Más de una estación	X	C
✓ Una estación	X	D
✓ Registro único en 1 estación	X	E
✓ Registro único en varias estaciones	X	F
X	✓ Claro	G
X	✓ Alarma	H

Tabla 4 Clasificación de los eventos detectados por el sistema de AFM

VI.3.3 Flujos no reconocidos

Con base en el análisis anterior, podemos considerar no válidos los registros siguientes:

Eventos **E**: Cuando se registra un modo de alerta único, y no presenta datos correspondientes en otras estaciones ni observaciones por parte del puesto de observación, es factible considerar que estos eventos fueron producidos por un agente diferente a un flujo. La caída de una roca, el paso de animales cerca del área de instrumentación o los pasos del personal cuando visita la estación pueden ser explicaciones para estos eventos. P. ej.

 Archivo leído: 07apr99.dat
 Hora de inicio 00:08
 Modo de alerta a las 22:05
 158 líneas en el archivo

Eventos **F**: Los registros en modo de alerta a la misma hora en dos o tres de las estaciones pueden deberse a una falla instrumental del sistema, dado que sería poco común un evento de flujo cuya descarga pico sobrepasara el valor umbral en dos estaciones simultáneamente, considerando que las estaciones están separadas espacialmente. También puede proponerse como explicación un evento sísmico dentro del rango de frecuencias registrado por el geófono del AFM, que haya sido detectado por él. Esta situación sucedió con mucha frecuencia.

Los siguientes registros son un ejemplo de ello:

ESTACIÓN PFM1

 Archivo leído: 09mar00.dat
 Hora de inicio 00:03
 Modo de alerta a las 21:44
 145 líneas en el archivo

ESTACIÓN PFM2

 Archivo leído: 09mar00.dat
 Hora de inicio 00:05
 Modo de alerta a las 21:44
 142 líneas en el archivo

EVENTOS G: Aunque los reportes en la bitácora proporcionan información valiosa e interesante, al no ser posible la correlación con datos instrumentales del AFM no se cuenta con elementos para comparar y realizar un análisis numérico de ellos. Sin embargo, su ocurrencia y la determinación de ciertas características a partir de inspecciones visuales permite establecer un criterio para relacionar los eventos de flujo con el disparo de la transmisión en modo de alerta.

Los reportes de flujos de dimensiones pequeñas son frecuentes, pero es evidente que existe un incremento en el número de ellos en el año 2000. Es posible que en realidad esto no ocurra así, sino sea debido a una mayor constancia y experiencia en las observaciones, lo cual permite que se registren estos eventos que antes pasaban desapercibidos para el personal del puesto de observación.

Es de interés conocer que existen muchos flujos pequeños, que pudieran ser lahares o escorrentías de agua con sedimento, en el transcurso del año y que los eventos mayores cuando ocurren, son sólo una escala mayor de estos.

EVENTOS H: La activación de la alarma acústica de flujos sin que este evento esté reflejado en los datos puede deberse a imperfecciones instrumentales del sistema de AFM y la telemetría asociada, ya que no existe razón para que la alarma suene sin que exista un factor externo que provoque el registro de los valores anómalos esperados.

Finalmente los datos útiles registrados en conjunto de la sección instrumental y los reportes vertidos en la bitácora de datos son aquellos clasificados como A, B, C y D, fueron en total 93 eventos. De ellos se realiza un análisis detallado de la información.

VI.3.4 Eventos reconocidos

La graficación de los 93 eventos seleccionados permiten realizar una descripción de ellos y reconocer sus características. Por otra parte se calculan, cuando los datos así lo permiten, la magnitud, velocidad, el flujo acústico y la descarga o flujo volumétrico. Las gráficas de los eventos de flujo más importantes (7 de julio de 1999 y 24 de mayo del 2000) se muestran en el Apéndice 7.

Eventos tipo A

En total 31 eventos de tipo A fueron identificados. Datos en modo de alerta instrumental pueden ser correlacionados con referencias a la bitácora. Dado que cuentan con ambos elementos, es posible correlacionar la señal observada para caracterizar el flujo observado. Por lo tanto, se puede obtener de ellos el flujo acústico y el gasto observado, así como la velocidad calculada en el caso de que existan datos en la estación 3.

Idealmente estos son los datos más completos que permiten verificar el buen funcionamiento del sistema en general y obtener la mayor cantidad de información.

La mayoría de estos eventos muestran registros satisfactorios, con eventos de flujo claros³. Tal es el caso de los eventos 8, 10, 11, 12, 13, 24 y 25. Un caso especial resultan los eventos 20, 21 y 22 que corresponden al flujo del 24 de mayo del 2000, que ha sido el más importante registrado durante 1999 y 2000. Otros eventos claros de flujo son: 3, 4, 5, 6, 7, 9, 14, 16, 17, 18, 19, 26 y 29. Eventos que parecen representar torrentes de agua por registrar valores más altos en banda de frecuencia son los 27, 28 y 31.

Finalmente, los eventos que han sido catalogados como pulsos unitarios, es decir, que solo presentan un registro en modo de alerta y se considera que no reflejan eventos de flujo tienen números 1 y 2.

Del análisis visual podemos determinar el momento de activación del modo de alerta para un mismo flujo en diferentes estaciones, lo cual indica una diferenciación en las condiciones de las fuentes y de las barrancas por las cuales se drena el flujo.

Eventos tipo B

Hay 16 eventos de tipo B registrados. La alarma acústica indica que se sobrepasó el nivel de umbral, por lo cual inicialmente se considera que se trata de eventos de flujo. Los números 32, 35, 37, 38 y 47 presentan un comportamiento similar entre ellos, y su característica particular es que no se observa un evento de flujo, sino un pulso momentáneo de valor alto que dispara el modo de alerta.

Los eventos 33, 34, 36, 43, 45 y 46 presentan un comportamiento que permite catalogarlos como eventos de flujo pequeños, dado que su valor máximo es más pequeño en comparación con los eventos clasificados como tipo A.

Eventos claros de flujo registrados por los geófonos se presentan el día 17 de julio de 1999 en las estaciones 1 y 2, con números 39 y 40 respectivamente. El evento 44 se caracteriza por el dominio de registro en la banda alta, por lo cual puede considerarse como un torrente de agua.

Eventos tipo C

A pesar de no haberse realizado observaciones de estos flujos por parte del puesto militar, tienen representación en al menos dos estaciones, con registros en modo de alerta y continuidad en los registros. Es posible correlacionar el evento de una estación a otra, limitarlo temporalmente y obtener, por lo tanto, el flujo acústico de ellos. En aquellos casos en los cuales se tienen registros en la estación 3 es factible calcular la velocidad del flujo. Se clasificaron 15 eventos de este tipo.

Las gráficas de estos eventos, del número 48 al 61, muestran que a todos se les puede considerar flujos, aunque las amplitudes de los modos de alerta presenten una variación grande. En esta clasificación existen flujos de muy pequeños a medianos.

Eventos tipo D

31 eventos en total han sido clasificados como tipo D. Debido a que sólo se registra en una sola estación, no es posible correlacionarlos con otras temporalmente ni calcular de ellos su velocidad. Sin embargo, dado que han sido reconocidos como eventos de flujo se calcula el flujo acústico correspondiente.

Los eventos 63, 68, 69, 70, 72, 73, 74, 76, 77, 78, 79, 80, 82, 83, 84, 85, 86, 88, 89, 90, 91, 92 muestran registros característicos de flujos, aunque la mayoría de ellos son de dimensiones pequeñas

Se registran eventos donde hay datos faltantes debido a mantenimiento de los instrumentos, por un tiempo de algunas horas por lo cual no es conveniente el cálculo del flujo acústico para ellos, ya que los valores arrojados serían incorrectos. Tales son los eventos 64, 66, 81, 87, 93

VI.4 PARÁMETROS ESTIMADOS

VI.4.1 Magnitud

Inicialmente la magnitud de un evento se consideró como la amplitud de la señal del detector acústico de flujo, que corresponde a la velocidad de vibración vertical del terreno, expresado en $\text{cm/seg} \times 10^{-6}$ lo cual indica el movimiento vertical medido a través del tiempo. Obviamente una amplitud mayor significa una perturbación exterior mayor, provocada quizá por una cantidad mayor de material fluyendo por el canal. Sin embargo, este parámetro no es el más importante para determinar la magnitud de flujos laháricos, debido a que es posible que valores de amplitud altos puedan obtenerse por factores ajenos a un flujo.

Los mayores eventos reconocidos como lahares actuales del Popocatepetl (esto es, después de una discriminación del total de los eventos) tienen una amplitud aproximada de $4000 \text{ cm/seg} \times 10^{-6}$, cuyo orden de magnitud es semejante a los lahares registrados en el monte Pinatubo, Filipinas (Tuñgol y Regalado, 1995) y Redoubt, Alaska (Dorava y Meyer, 1994). El valor máximo de un evento de flujo registrado fue de $3909 \text{ cm/seg} \times 10^{-6}$ y el valor mínimo de $509 \text{ cm/seg} \times 10^{-6}$, tal como se muestra en la figura 6.4. Dado que el rango de magnitudes registradas es muy amplio, se calcula el valor de la media aritmética y la desviación estándar promedio del total de eventos reconocidos como lahares para conocer su comportamiento como un conjunto de valores.

Media aritmética: $1942 \text{ cm/seg} \times 10^{-6}$
 Desviación estándar promedio: $880 \text{ cm/seg} \times 10^{-6}$

Es importante mencionar que para aquellos eventos registrados en dos estaciones, siendo una de ellas la estación 3, los valores son siempre mayores a $1500 \text{ cm/seg} \times 10^{-6}$ y dentro de éstos se encuentra el valor máximo obtenido, $3909 \text{ cm/seg} \times 10^{-6}$. Lo anterior puede conducir a considerar que los flujos mayores, que son lo suficientemente grandes para ser registrados en dos puntos del cauce por las estaciones AFM, son aquellos cuya magnitud es mayor a $1500 \text{ cm/seg} \times 10^{-6}$, siempre y cuando su comportamiento instrumental muestre que realmente se trata de un flujo lahárico.

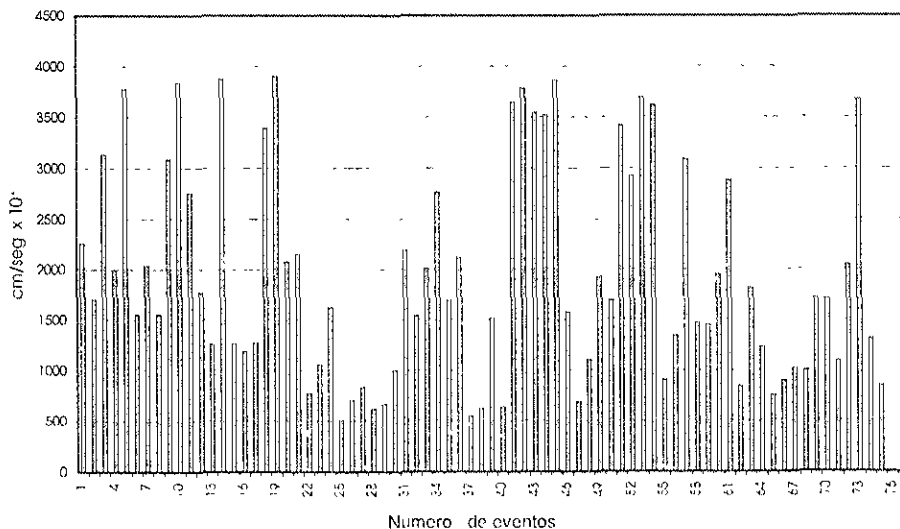


Fig. 6.4 Valores máximos de velocidad vertical de flujos reconocidos

VI.4.2 Flujo acústico

Es una medida de la agitación del terreno cerca del canal por donde fluye el lahar. Se determina como la suma del producto de cada amplitud leída y su duración (Tuñgol y Regalado, 1995). En términos prácticos se refiere al área bajo la curva de cada evento (Figura 5.2) y las unidades determinadas son $\text{cm} \times 10^{-3}$. Este parámetro pondera los eventos, ya que en este caso la amplitud máxima alcanzada no es tan relevante como la distribución continua de amplitudes grandes a lo largo de cierto tiempo. De esta manera, es posible diferenciar entre eventos con un claro patrón de flujo lahárnico, que tiene un comienzo incipiente, y luego una amplitud pico relacionado con la descarga. Finalmente decrece hasta regresar al nivel base de la señal (Figura 5.2).

El cálculo del flujo acústico se realizó para todos los tipos de eventos reconocidos, seleccionando de ellos el intervalo temporal correspondiente a un aumento claro y significativo de la señal sobre los niveles base que indicaban la proximidad de una descarga. En la mayoría de los casos el intervalo se integró en horas completas, significando esto un error, pero dado las amplitudes laterales muy pequeñas consideradas, el error no es grande. Para el cálculo se utiliza una regla trapezoidal en el paquete de cómputo Origin®, 2000. La tabla 4 muestra los valores de flujo acústico calculado y su amplitud máxima. Los valores encontrados por Tuñgol y Regalado (1996) para los lahares del Pinatubo en 1992 oscilan entre 80 y 12300 $\text{cm} \times 10^{-3}$, lo cual muestra la diferencia en las dimensiones entre los lahares del Pinatubo y del Popocatépetl en el periodo estudiado.

Número de evento	Fecha GMT	Duración aproximada (horas)	Flujo acústico calculado ($\text{cm} \times 10^{-3}$)	Amplitud máxima ($\text{cm/s} \times 10^{-6}$)	Clasificación
1.	12/marzo/1999	1	0.377	1774	A
2.	15/marzo/1999	2	0.524	2478	A
3.	31/marzo/1999	6	2.071	2264	A
4.	1/abril/1999	2	1.906	1708	A
5.	16/mayo/1999	3	1.462	3142	A
6.	26/mayo/1999	7	2.013	2002	A
7.	26/mayo/1999	4	4.062	3781	A
8.	4/junio/1999	6	2.370	1556	A
9.	7/junio/1999	8	1.925	2043	A
10.	27/junio/1999	8	6.893	1556	A
11.	28/junio/1999	1	0.513	3096	A
12.	7/julio/1999	7	7.101	3849	A
13.	7/julio/1999	6	7.747	2759	A
14.	7/julio/1999	5	2.492	1771	A
15.	7/octubre/1999	5	1.753	1263	A
16.	20/abril/2000	10	3.481	3880	A
17.	20/abril/2000	9	1.598	1271	A
18.	16/mayo/2000	3	1.679	1194	A
19.	17/mayo/2000	4	1.498	1275	A
20.	24/mayo/2000	6	6.480	3402	A

Tabla 5 Flujo acústico y amplitud de eventos de flujo reconocidos

21.	24/mayo/2000	6	9.174	3909	A
22.	24/mayo/2000	4	4.676	2083	A
23.	25/mayo/2000	6	2.586	2158	A
24.	27/mayo/2000	6	3.423	782	A
25.	3/junio/2000	5	2.872	1058	A
26.	10/junio/2000	3	1.222	1625	A
27.	2/julio/2000	5	0.586	509	A
28.	3/julio/2000	2	0.285	710	A
29.	12/julio/2000	7	2.633	834	A
30.	26/agosto/2000	2	0.203	620	A
31.	5/septiembre/2000	8	0.357	671	A
32.	15/marzo/1999	1	0.524	2478	B
33.	18/abril/1999	1	0.437	1006	B
34.	8/mayo/1999	6	0.920	2192	B
35.	30/mayo/1999	1	2.267	1081	B
36.	5/junio/1999	9	1.475	1541	B
37.	6/junio/1999	9	1.890	327	B
38.	4/julio/1999	2	0.351	1430	B
39.	17/julio/1999	6	1.583	2015	B
40.	17/julio/1999	5	2.510	2771	B
41.	5/agosto/1999	2	0.414	1695	B
42.	6/agosto/1999	2	0.642	2121	B
43.	29/agosto/1999	2	0.165	551	B
44.	17/junio/2000	2	0.289	623	B
45.	23/junio/2000	2	0.939	1519	B
46.	9/julio/2000	13	0.981	639	B
47.	21/julio/2000	1	0.972	3892	B
48.	5/mayo/1999	5	3.935	3651	C
49.	5/mayo/1999	6	6.355	3789	C
50.	15/junio/1999	4	2.839	3554	C
51.	15/junio/1999	6	4.021	3528	C
52.	16/junio/1999	4	4.903	3870	C
53.	16/junio/1999	4	3.300	1578	C
54.	16/junio/1999	4	0.580	698	C
55.	25/junio/1999	11	0.763	1105	C
56.	25/junio/1999	9	2.842	1928	C
57.	9/septiembre/1999	4	0.703	1694	C
58.	9/septiembre/1999	3	5.242	3423	C
59.	9/septiembre/1999	3	3.195	2932	C
60.	30/septiembre/1999	5	1.750	3700	C
61.	30/septiembre/1999	1	0.853	3625	C
62.	30/septiembre/1999	1	0.228	906	C

Tabla 5 Flujo acústico y amplitud de eventos de flujo reconocidos (cont.)

63.	21/enero/1999	2	0.946	1343	D
64.	22/enero/1999	7	7.893	1620	D
65.	22/enero/1999	3	1.818	3623	D
66.	28/enero/1999	2	2.598	3671	D
67.	20/marzo/1999	1	0.639	3090	D
68.	23/marzo/1999	5	0.983	1473	D
69.	28/abril/1999	6	1.178	1456	D
70.	7/mayo/1999	7	4.052	3138	D
71.	17/junio/1999	7	1.467	3724	D
72.	26/junio/1999	6	1.366	1733	D
73.	12/julio/1999	24	15.968	1953	D
74.	13/julio/1999	16	8.092	2890	D
75.	26/julio/1999	6	1.333	3507	D
76.	13/septiembre/1999	8	2.760	843	D
77.	15/noviembre/1999	5	4.211	3600	D
78.	17/noviembre/1999	4	1.419	1816	D
79.	20/noviembre/1999	3	1.377	1234	D
80.	4/diciembre/1999	12	4.671	763	D
81.	20/diciembre/1999	24	10.508	670	D
82.	3/febrero/2000	9	24.69	900	D
83.	26/febrero/2000	2	0.653	1024	D
84.	31/marzo/2000	8	1.210	994	D
85.	31/marzo/2000	3	0.761	1722	D
86.	22/mayo/2000	6	0.873	1712	D
87. *	31/mayo/2000	5	6.034	3487	D
88.	2/junio/2000	6	4.600	1090	D
89.	21/junio/2000	3	2.072	2045	D
90.	21/julio/2000	2	1.421	3682	D
91.	12/septiembre/2000	3	0.588	1310	D
92.	2/octubre/2000	1	0.253	851	D
93. *	13/octubre/2000	7	19.382	3361	D

* Estos eventos no son considerados para las gráficas de flujo acústico

Tabla 5 Flujo acústico y amplitud de eventos de flujo reconocidos (cont.)

VI.4.3 Velocidad del flujo

Una característica importante de los flujos laháricos es la velocidad con la cual fluyen a través de los canales de drenaje. Para aquellos eventos que presentan una clara incidencia en dos estaciones, siendo una de ellas la estación número 3, es posible realizar el cálculo de la velocidad al reconocer la descarga máxima en la gráfica obtenida de los datos emitidos por los geófonos correspondientes.

Al determinar la hora de las diferentes descargas, se obtiene el tiempo de trayecto. Por otra parte, la distancia recorrida se calcula como una combinación de las distancias horizontales y verticales en un modelo simple. Las distancias horizontales se miden a lo largo de la trayectoria del canal de drenaje o barranca, sobre el mapa topográfico

donde éstas se encuentran delineadas mediante segmentos rectos o utilizando un planímetro, considerando como inicio la estación 1 o 2, y la estación 3 como punto final (Fig. 6.5).

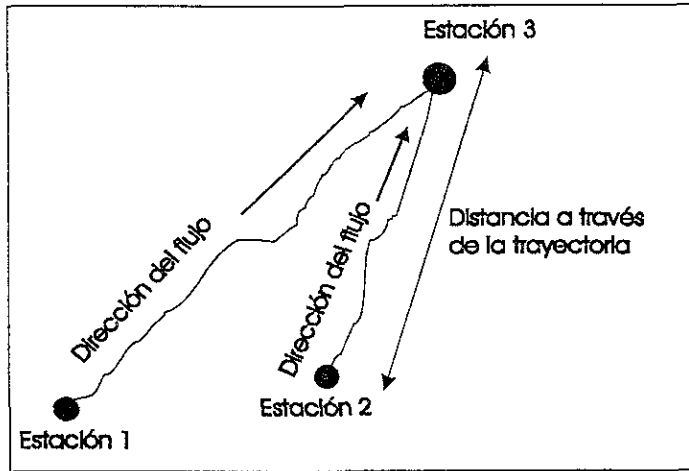


Fig. 6.5 Determinación de la distancia horizontal entre estaciones AFM

La distancia vertical se determina de las cotas verticales proporcionadas por el CENAPRED. Utilizando un modelo triangular donde la distancia horizontal es uno de los catetos y la vertical el otro, se obtiene la distancia real recorrida calculando la hipotenusa, tal como se muestra en la figura 6.6.

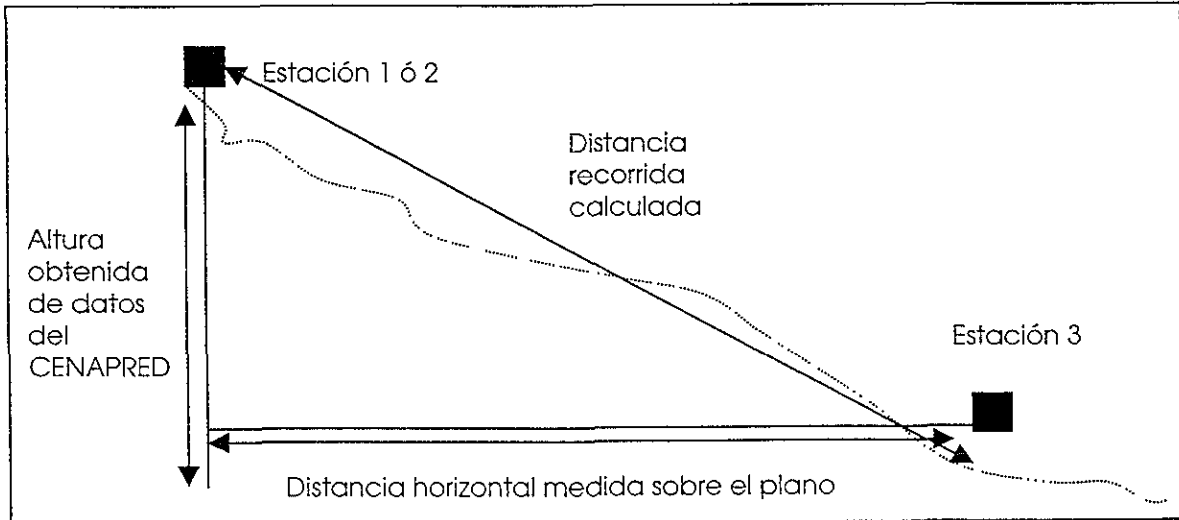


Fig. 6.6 Determinación de la distancia recorrida entre cada estación

	Distancia horizontal	Distancia vertical	Distancia recorrida	Pendiente
Estación 1-2	2750 m	477 m	2791 m	9.84°
Estación 2-3	2050 m	292 m	2071 m	8.10°

Tabla 6 Distancias entre estaciones AFM

Los eventos que tienen registro en modo de alerta en la estación 3 son un porcentaje muy pequeño del total de los eventos registrados por el sistema AFM. De ellos, 5 tienen correlación con eventos de flujo detectados en las estaciones 1, 2 y 3. 4 corresponden al año 1999 y uno al 2000.

El evento del 30 de septiembre de 1999, a pesar de haberse registrado en tres estaciones a diferentes tiempos no parece registrar un evento de flujo, ya que la diferencia entre cada una de ellas es de 1 minuto, lo cual arroja velocidades extremadamente altas, por lo cual se omitió del cálculo de velocidades y puede relacionarse con una exhalación observada al momento del registro.

Es importante mencionar que las amplitudes en unidades de velocidad vertical en la estación 3 disminuyen considerablemente en relación con sus correspondientes 1 y 2. Esto permite inferir que durante el trayecto por los cauces correspondientes existen las condiciones necesarias para el depósito del material y poco o nada de condiciones de incorporación de material sólido o incorporación de agua que provoquen el aumento del volumen del flujo. La razón anterior también permite explicar que los eventos de magnitud menor, registrados en la estación 1 ó 2, no presenten un registro en modo de alerta en la estación 3.

Es posible que algunos flujos tengan su descarga correspondiente y sean registrados en modo de alerta, pero su magnitud es más pequeña que aquella propuesta como valor umbral que dispare el modo de alerta.

Los rangos de tiempo entre los valores máximos de las estaciones varían ampliamente, entre 39 y 235 minutos para un mismo trayecto y las velocidades 2.46 y 0.712 km/h (Tabla 5).

Fecha (GMT)	Estaciones	Tiempo de recorrido (minutos)	Velocidad del flujo (m/s) (km/h)	Flujo acústico	Amplitud máxima (cm/s x10 ⁴)
16 junio 1999	1-3	68	0.68 2.46	81.73	3870
	2-3	46	0.74 2.67	55.01	1578
7 julio 1999	1-3	39	1.19 4.29	118.35	3849
	2-3	46	0.74 2.66	129.13	2759
9 septiembre 1999	1-3	235	0.20 0.71	11.73	1694
	2-3	208	0.16 0.59	87.37	3423
24 mayo 2000	1-3	65	0.72 2.57	108.01	3402
	2-3	36	0.95 3.42	152.90	3909

Tabla 7 Velocidades de los flujos que presentan registro en la estación 3.

Relacionadas a las velocidades reportadas por el puesto de observación militar, generalmente de 1 o 2 km/h, las calculadas generalmente son mayores, sin embargo, el orden de magnitud se mantiene. No se observa predominio de velocidades altas en alguna de las dos barrancas, Tenepanco y Espinera, ya que para diferentes eventos, la primera permite velocidades mayores y la segunda en otros.

Las velocidades calculadas son pequeñas, esto obedece a las características particulares de la magnitud del evento, el canal donde fluye, la reología de flujo, la cantidad de material sólido, etc. Indudablemente un factor determinante es la pendiente del terreno que existe entre las estaciones. Su cálculo determina que se trata de pendientes de aproximadamente 10° . En comparación con velocidades determinadas para lahares del Monte Santa Elena en 1980, se encuentra que en las zonas de baja pendiente estos fluían con una velocidad de 1.3 m/s, mientras que en las zonas de pendiente alta más próximas al volcán las velocidades alcanzaron 40 m/s (Janda eta al., 1981). Otros lahares históricos han tenido velocidades similares, con promedios en el orden de 10-20 m/s.

VI.4.4 Descarga promedio

Es también llamado flujo volumétrico o caudal y se calcula determinando el volumen de un flujo que fluye por una sección del canal en determinado tiempo. Debido a que los flujos que se estudian son de frontera libre, es decir, no se encuentran confinados por una tubería, el área considerada no es constante. En términos prácticos, el flujo volumétrico es el producto del área del flujo (Fig. 6.7) por la velocidad del flujo.

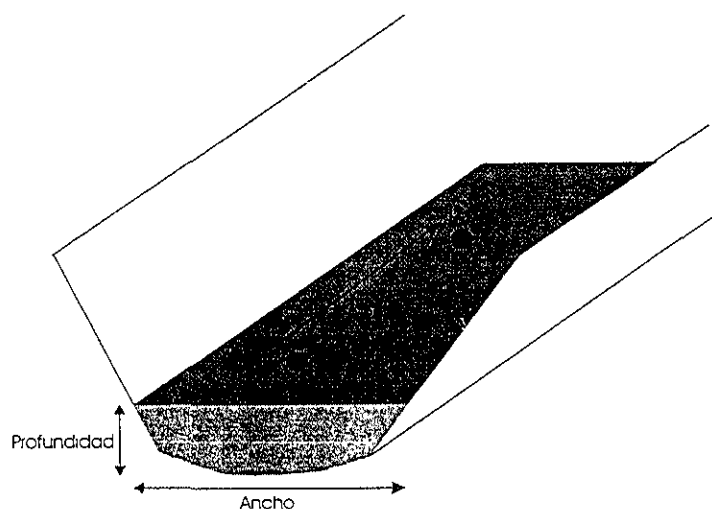


Fig. 6.7 Elementos de un canal idealizado para el cálculo de la descarga

El área se considera a partir de una simplificación de una sección del canal como un rectángulo con valor de alto y ancho, la profundidad y ancho del flujo. Obviamente la consideración anterior induce un error, debido a que el área sobre un fondo irregular cóncavo es menor que la calculada, por lo tanto, habrá que considerar estos valores máximos como una buena aproximación del área real. El área de una sección del canal puede ser determinada exactamente antes de un evento de flujo, sin embargo, ésta se modificará debido al depósito o incorporación de material.

Los datos de descarga o flujo volumétrico reportados en la tabla 6 sólo fueron calculados para eventos de los cuales hay datos de dimensiones de flujo y velocidad, reportados en la bitácora por personal del puesto de observación.

Es necesario considerar que las velocidades son datos observacionales, los cuales presentan un porcentaje de error que depende de la pericia del observador.

Como se observa, los rangos de descarga son bajos, a excepción del evento del 24 de mayo. Son además, menores a los valores de descarga encontrados por Tuñigol y Regalado (1995) en 1992 para flujos pequeños a lo largo del río Sacobia, cerca del Monte Pinatubo, Filipinas.

Número de evento	Fecha (GMT)	Profundidad (m)	Ancho (m)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	Descarga (m ³ /s)
6	6 junio 1999	0.10	1.00	0.100	0.277	0.027
10	27 junio 1999	0.08	2.00	0.160	0.277	0.044
15	6 octubre 1999	0.20	2.00	0.400	0.277	0.111
17	20 abril 2000	0.60	0.12	0.072	0.277	0.020
19	17 mayo 2000	0.05	0.80	0.040	3.470	0.138
20	24 mayo 2000	0.70	4.00	2.800	1.110	3.108
23	25 mayo 2000	0.20	1.20	0.240	0.277	0.066
24	27 mayo 2000	0.20	2.00	0.400	1.390	0.556
25	3 junio 2000	0.15	1.50	0.225	0.277	0.062
27	1 julio 2000	0.18	1.20	0.216	0.550	0.118
28	2 julio 2000	0.10	0.90	0.090	0.277	0.025
29	12 julio 2000	0.18	1.10	0.198	0.550	0.109
30	25 agosto 2000	0.10	0.80	0.080	0.277	0.022
31	5 septiembre 2000	0.10	0.27	0.027	0.277	0.007

Tabla 8 Velocidades y descargas de flujo calculadas a partir de información de la bitácora de datos

CAPÍTULO VII

CORRELACIÓN DE DATOS E INTERPRETACIÓN

VII.1 CORRELACIÓN DE AMPLITUDES, VELOCIDADES, FLUJOS ACÚSTICOS Y DESCARGAS

Con el objetivo de obtener relaciones entre los diferentes parámetros y conocer mejor el comportamiento de los eventos de flujo, se han graficado los parámetros obtenidos.

La primera relación es la que involucra la duración del evento con la amplitud máxima observada, tal como se muestra en la figura 7.1. En ella se observa que el tiempo de duración de la mayoría de los eventos es menor a 10 horas, considerando desde que el evento inicia hasta que la perturbación del terreno debida al término del lahar ha sido registrada por el geofono, o bien, por la producción continua de flujos. La duración no está directamente relacionada con la amplitud, ya que todo el rango de ésta última es barrido por eventos desde cortos hasta muy largos, los cuales incluyen un día entero con amplitudes medianas.

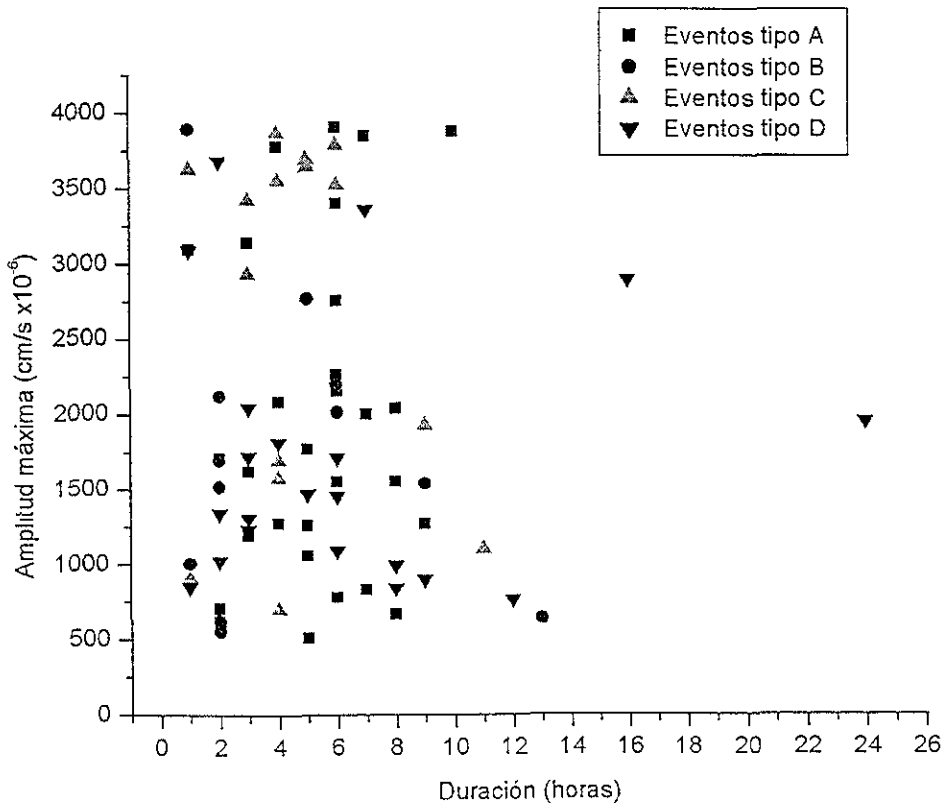


Fig. 7.1 Amplitud máxima contra duración de los eventos reconocidos

La relación más directa involucra las amplitudes de velocidad vertical detectadas por los geófonos en la banda baja, contra los flujos acústicos calculados. Para generar esta gráfica se han vertido todos los eventos considerados de flujo.

Inicialmente se puede considerar que es una relación directa, que un incremento en la amplitud genera un valor mayor de flujo acústico, dado que se integra sobre la curva que dibuja la amplitud. La relación obtenida no es tan simple, debido a que

eventos de flujo pequeños presentan flujos acústicos calculados semejantes a los eventos de amplitud mayor registrados en un periodo menor (Fig. 7.2).

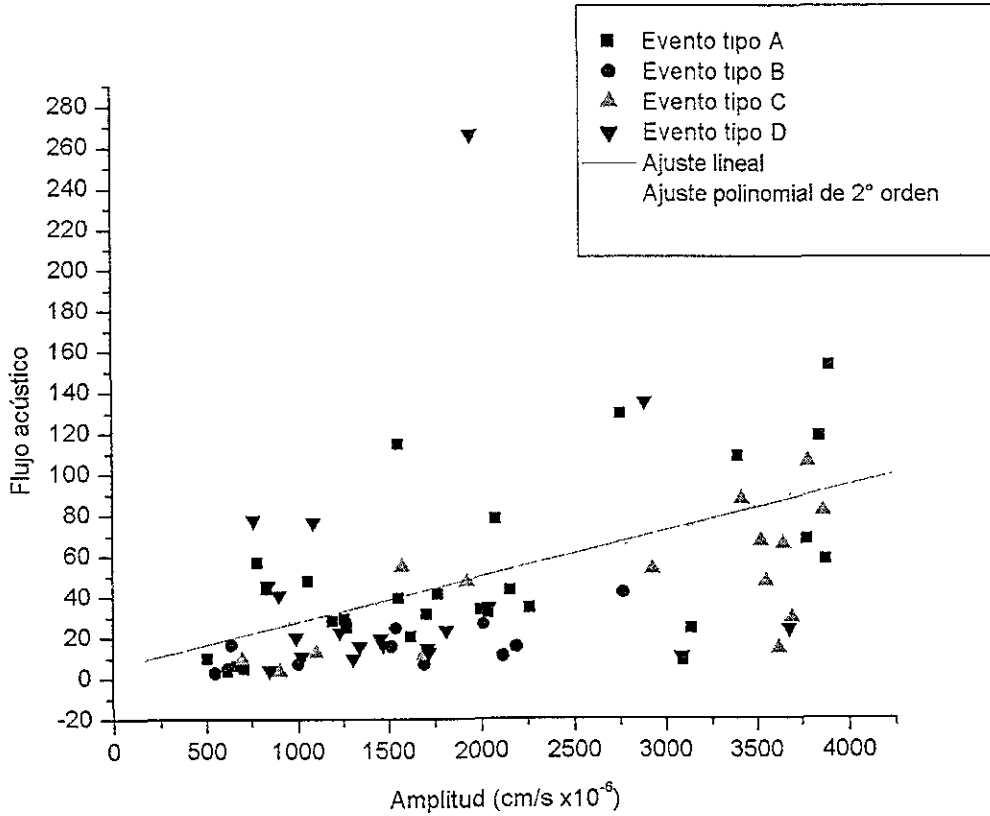


Fig. 7.2 Flujo acústico contra amplitud de la banda baja observada

Las gráficas muestran que la consideración inicial es correcta, que las curvas de ajuste lineal y polinomial son muy semejantes y que existe una relación lineal. Sin embargo, existen valores muy desviados de las líneas de las funciones propuestas y la dispersión es grande. Un ajuste de curvas sólo para los eventos tipo A arrojaría un comportamiento similar. Particularmente estos eventos son interesantes y conducen a investigar la causa de este comportamiento y las circunstancias en las cuales fueron registrados.

Las correlaciones no son tan afortunadas para los demás gráficos que involucran amplitud vs. velocidad calculadas (Fig. 7.3) y amplitud vs. descarga (Fig. 7.4). Los datos se presentan disgregados, sin mostrar tendencias ni comportamiento preferencial y al aplicarles algoritmos de ajuste lineal y polinomial, éstos no involucran a la mayoría de los datos.

Otro factor a considerar es el número de eventos para los cuales estos parámetros han sido calculados, el cual constituye un universo muy pequeño que, por su propia naturaleza, puede ofrecer dispersión grande a partir de las tendencias propuestas por las curvas de ajuste.

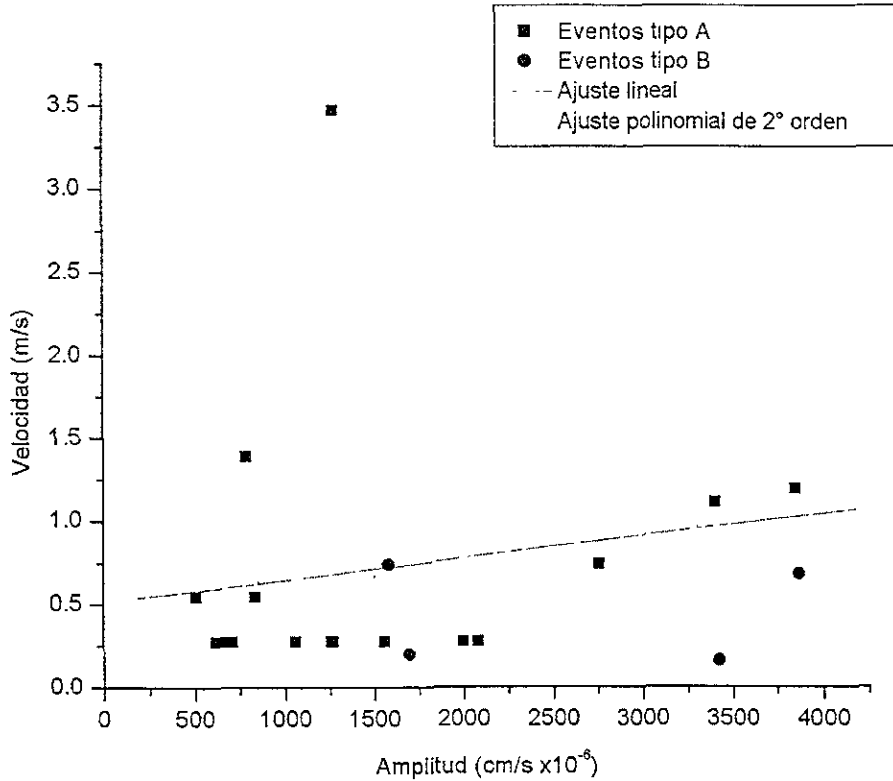


Fig. 7.3 Amplitud de la banda baja contra velocidad calculada

La gráfica 7.3 muestra que el conjunto de valores de velocidad menores a 1.5 m/s se distribuye para todo el rango de amplitudes e incluye a la mayoría de los eventos. Fuera de todo rango se encuentra el valor 3.5 m/s del 17 de mayo del 2000, que corresponde a una amplitud moderada en el rango propuesto. Este valor también es importante. Sin embargo, dado que el evento corresponde a un dato apreciado visualmente, es probable que se trate de un problema de apreciación en ella.

Los valores de descargas observados en la figura 7.4 se mantienen en un nivel volumétrico constante muy bajo para la mayoría de los eventos. Sin embargo, existe nuevamente un valor de amplitud que sale del rango. Esto puede explicarse en términos del área correspondiente que fue determinada por observaciones visuales, la cual determina el valor de descarga. En este caso corresponde al valor del 24 de mayo del 2000, que es a saber, el lahar de mayor tamaño observado durante el período de procesamiento de los datos, por lo que la descarga calculada no es inusual, sobre todo si es comparada con eventos semejantes en otros volcanes. Nuevamente los valores corresponden a observaciones que posiblemente incluyen un factor de error importante. El ajuste polinomial de 2º orden se determina por el dato anómalo, y dado que no existen más valores que apoyen este ajuste, debe considerarse cuidadosamente.

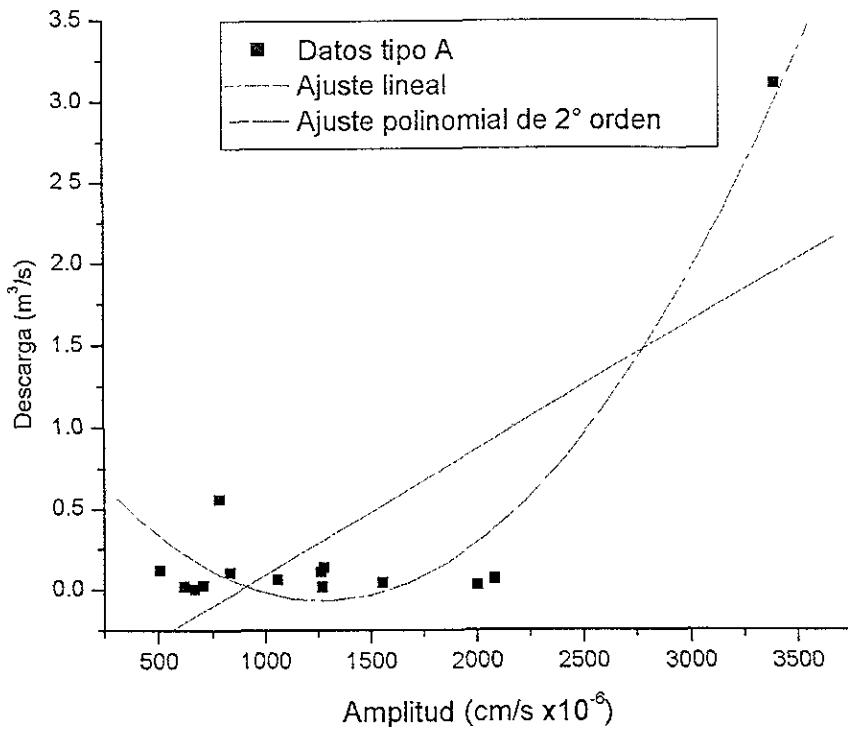


Fig. 7.4 Amplitud de la banda baja contra descarga

VII. 2 RELACIÓN DE EVENTOS CON LAS ÉPOCAS DEL AÑO

La época de mayores temperaturas se registradas en esta latitud, es durante los meses de marzo a junio (CNA, 2000), y aún cuando no existe un registro formal de las temperaturas en la zona de la Sierra Nevada, las variaciones son semejantes a las del Valle de México. La incidencia de radiación a la cual se asocia la elevada temperatura, sobre cuerpos de agua congelada, puede provocar un deshielo parcial de ellos con la consecuencia de que las aguas de deshielo fluyan por trayectorias de máxima pendiente. Es posible que la situación anterior se produzca en los glaciares del volcán Popocatepetl, y esa sea la fuente de aporte de agua para la generación de lahares. Aunado a esto, se ha observado una actividad fumarólica que se localiza cerca y posiblemente el glaciar e implica un aumento de temperatura.

Se observa un comportamiento semejante durante los dos años, en los cuales el mayor número de eventos se registra en los meses de mayo, junio y julio (Figs. 7.5 y 7.6). Una representación bimodal aparece en 1999, siendo uno de los valores máximos el mes de septiembre. Hacia los extremos del año la tendencia es a disminuir de manera importante el número de eventos. A pesar de que no se cuenta con mayores datos para años anteriores, es posible suponer que esta tendencia es válida. El problema a resolver consiste en discernir entre deshielo del glaciar y lluvias intensas como fuente de agua para la generación de los eventos de flujo.

No existen registros de temperatura disponibles para el área del volcán Popocatepetl, y aunque las temperaturas deben disminuir con respecto al valle de México, las variaciones se mantienen, lo cual confirma que las temperaturas máximas se presentan de abril a junio, mientras que el mes de septiembre ésta disminuye aproximadamente 2 °C con respecto a mayo (Figs. 7.5 y 7.6).

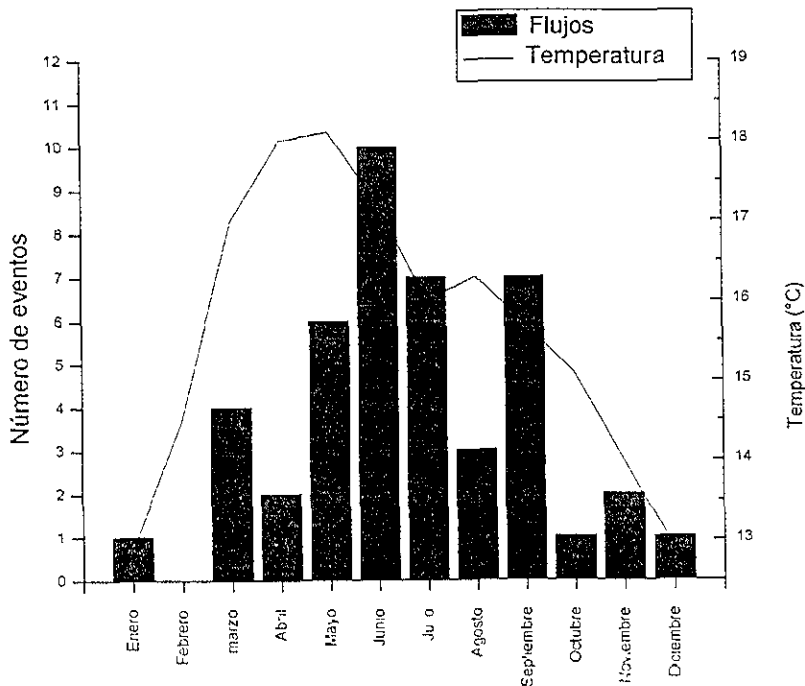


Fig. 7.5 Número de eventos en 1999 y temperatura media mensual en el Valle de México

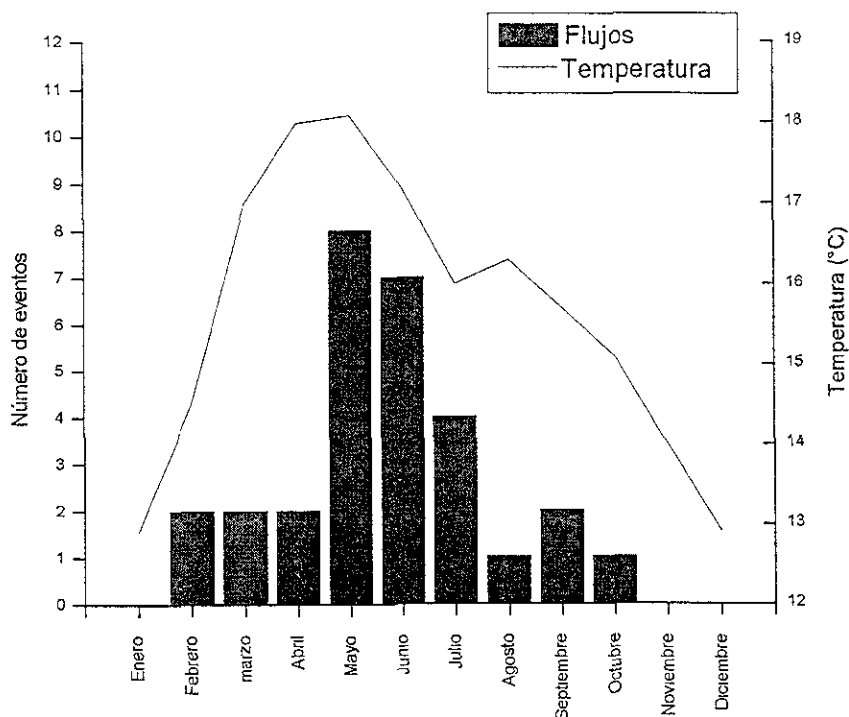


Fig. 7.6 Número de eventos en 2000 y temperatura media mensual en el Valle de México.

Las lluvias se registran en forma constante en la época de verano y aunque pueden producirse lluvias aisladas el resto del año, es en esta época cuando se registra la mayor acumulación de lluvia, siendo el valor total acumulado para el año 1999 en el Distrito Federal 487 mm. La Comisión Nacional del Agua mantiene estaciones en regiones cercanas al volcán que proporcionan información acerca de la cantidad de precipitación pluvial, pero los datos reportados sólo cubren hasta 1999 al momento.

Existe una semejanza marcada en los datos de eventos laháricos y lluvia durante los años 1999 y 2000 (Figs. 7.7 y 7.8). Sin embargo, es apreciable un defasamiento de los eventos de flujo con los máximos de la lluvia, lo cual indica que los primeros ocurrieron antes de que ocurriera la mayor precipitación pluvial. Esto conduce a considerar que muchos de los eventos no ocurrieron relacionados a la mayor cantidad de lluvia, sino por esta causa combinada con otra o definitivamente por otra causa.

Un análisis conjunto de las gráficas que relacionan lahares con temperaturas y lluvias permiten proponer que el agua necesaria para producir los eventos de flujo actuales en el Popocatepetl provienen de una combinación de ambos factores. Sin embargo, las temperaturas más elevadas parecen influir de manera determinante, aún más que las lluvias intensas. La relación exacta es aparentemente más compleja y aún difícil de discernir completamente. Encontrarla requiere estudiar los mecanismos ponderados que revelen su participación en el proceso de generación de lahares.

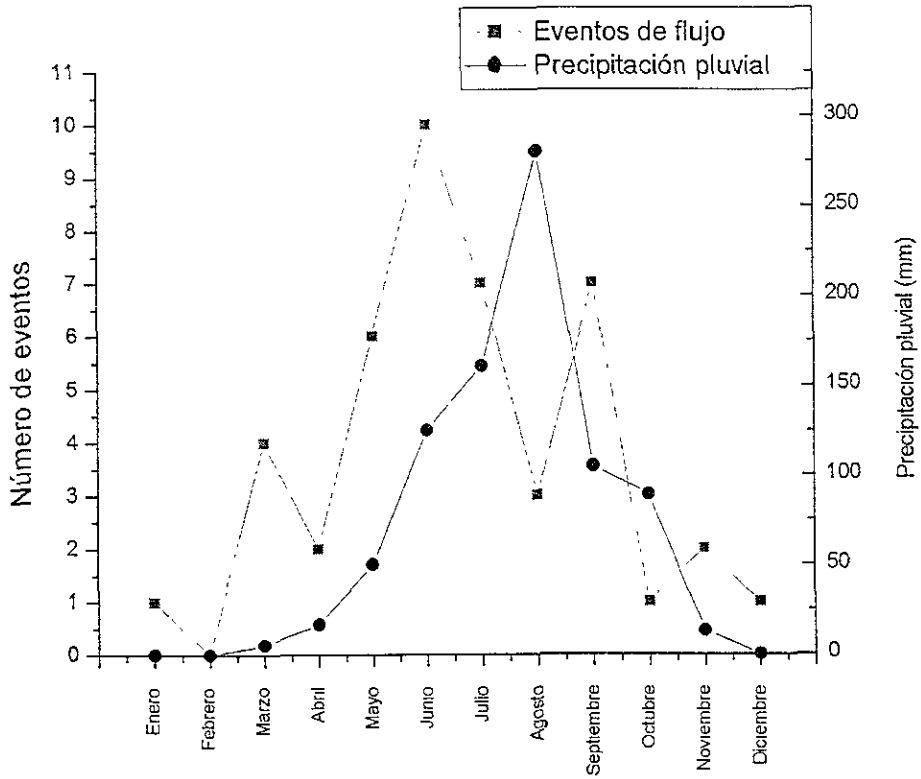


Fig. 7.7 Eventos de flujo y valores de lluvia durante 1999

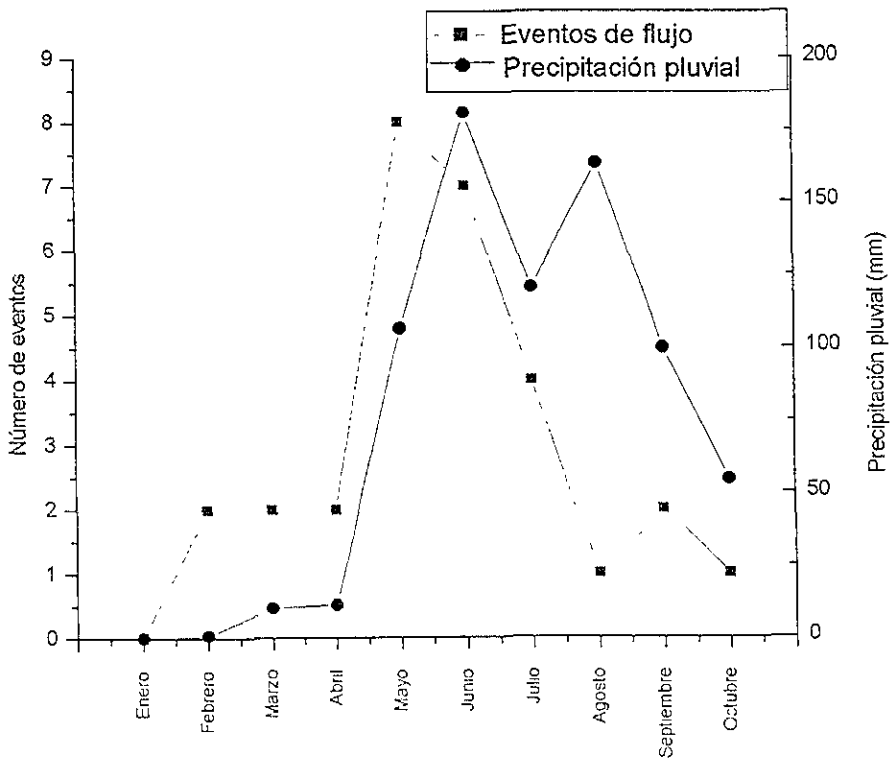


Fig. 7.8 Eventos de flujo y valores de lluvia durante 2000

Debido a la importancia del flujo, se realizó una visita de campo para obtener mayor información por parte del personal del puesto de observación. Se obtuvieron muestras para realizar análisis sedimentológicos y captar imágenes de los drenajes y los depósitos del flujo.

La información recabada directamente en el puesto de observación *Flujos 3* versó sobre las características de flujo, basadas en un cuestionario con las siguientes respuestas:

- Flujo de color pardo a chocolate
- Apariencia de colada de concreto
- Muy turbio
- Mucho contenido de material
- El material consistió de lodo, arena, árboles
- El tamaño máximo de los clastos transportados fue de 40 cm de diámetro
- El flujo transportó material vegetal, ramas y troncos de hasta 1.20 m de longitud
- La altura máxima sobre el cauce fue 70 cm y el ancho 4 m.
- No hay reporte de lluvia previa en el área
- El alcance del flujo fue de menos de 500 m antes del poblado Santiago Xalitlintla, sin embargo, una fase de agua sucia llegó hasta la población.
- La duración en hora local fue desde las 15:15 hasta las 22:28 hrs.

Las apreciaciones visuales, aunadas a los análisis sedimentológicos realizados permiten emitir una clasificación del flujo.

VII.3.2 Análisis sedimentológico

Las muestras se recolectaron en el drenaje donde las barrancas se unen, muy cerca de la estación PFM3, denominada *Puesto militar* y aguas abajo sobre el drenaje, estación denominada *Basurero*.

Se obtuvieron muestras de 2 horizontes en cada estación correspondientes a diferentes niveles del evento lahárico del 24 de mayo del 2000: el horizonte de material más fino, denominado B y el horizonte del fondo del canal, nombrado C, de acuerdo al siguiente diagrama (Fig. 7.10).

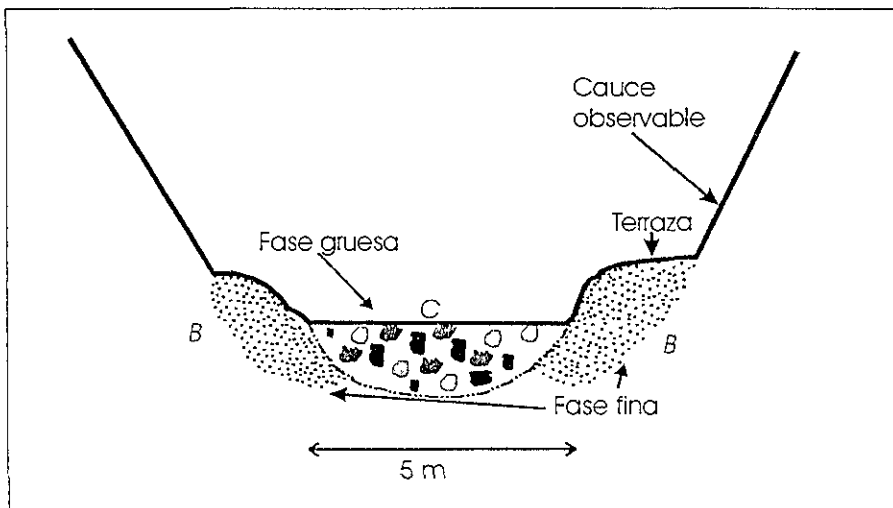


Fig. 7.10 Sección transversal del canal de la estación *Puesto Militar*

El esquema del basurero esencialmente es igual en la distribución de los horizontes marcados en la estación Puesto Militar.

	Clave de la muestra
Estación Puesto Militar:	
Horizonte B:	PM-BF
Horizonte C:	PM-C
Estación Basurero:	
Horizonte B:	B-B
Horizonte B:	B-C

Los histogramas de las figuras 7.11, 7.12, 7.13 y 7.14 muestran la distribución del tamaño de los clastos en cada uno de los horizontes.

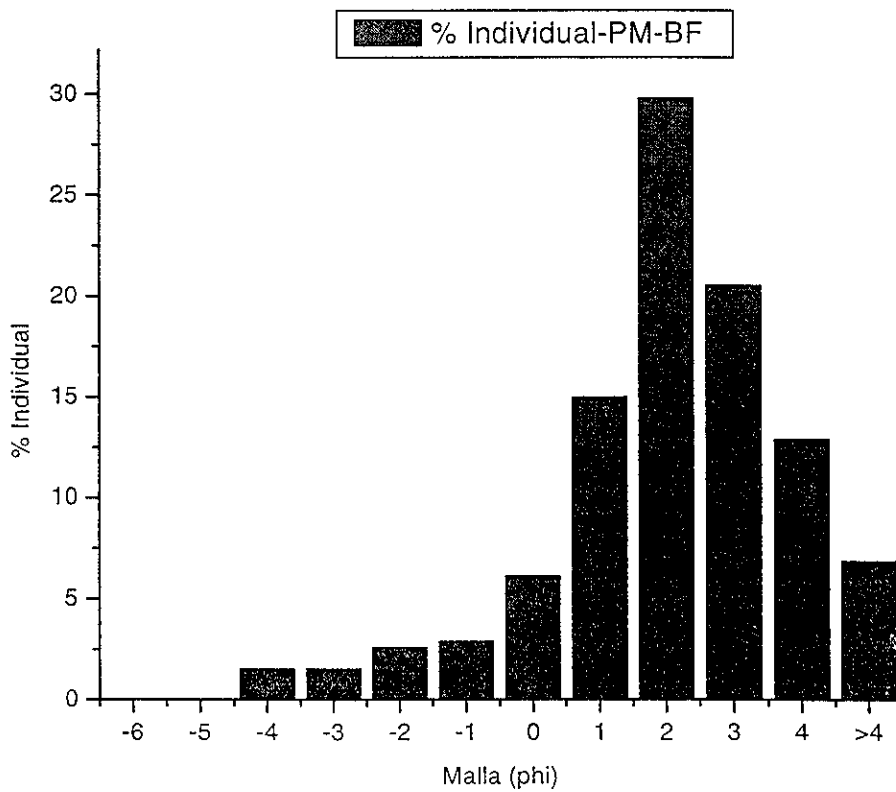


Fig. 7.11 Distribución de tamaño de granos de la muestra PM-BF

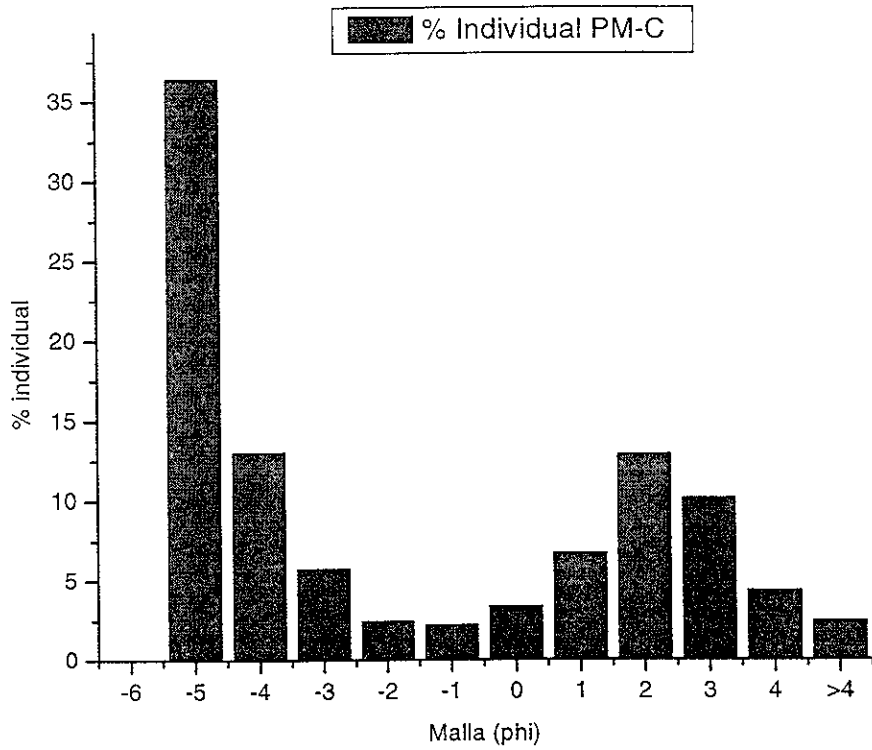


Fig. 7.12 Distribución de tamaño de granos de la muestra PM-C

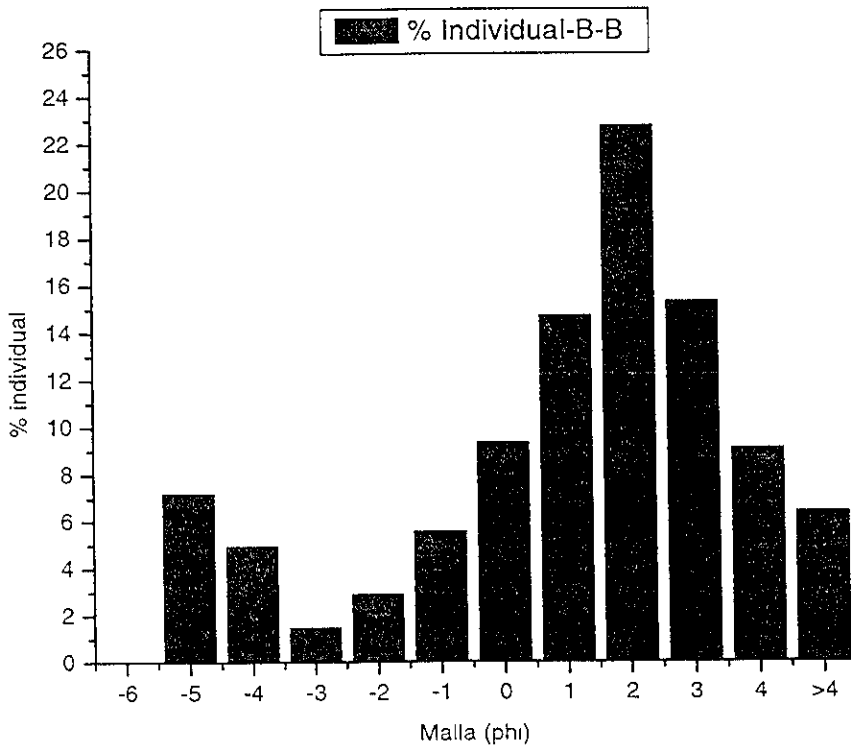


Fig. 7.13 Distribución de tamaño de granos de la muestra B-B

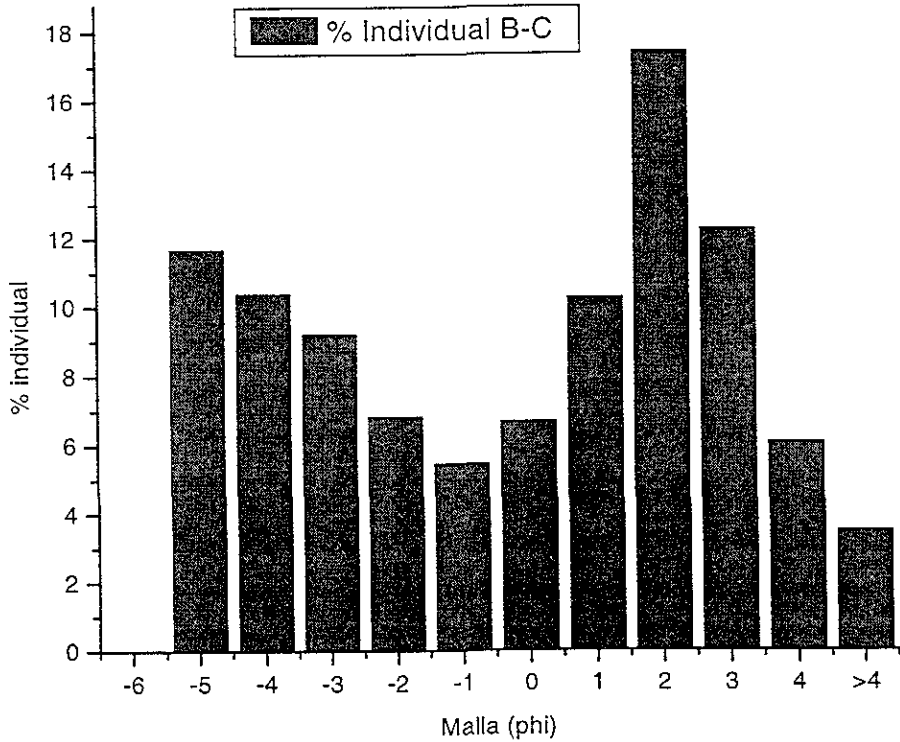


Fig. 7.14 Distribución de tamaño de granos de la muestra B-C

Una interpretación de las gráficas muestra que el horizonte **B** de la estación *Puesto Militar* (muestra PM-BF) muestra un histograma unimodal con máximos del tamaño grava fina, con poco contenido de clastos mayores y un porcentaje individual alto de material de tamaño arena, mientras que la componente de tamaño de limos y arcillas, menor a 4ϕ , presenta un porcentaje individual en peso de 6.85%. El horizonte inferior, **C**, del fondo del canal que corresponde a la base del flujo (muestra PM-C), presenta gran cantidad de grava gruesa, y es aquí donde se encuentran los clastos más grandes, de tamaño superior a 70 cm; también presenta un pico menor en tamaño arena y el componente de tamaño menor a 4ϕ es del 2.39%.

La estación basurero presenta en los dos horizontes un histograma bimodal con máximos de porcentaje individual en tamaño entre gravas finas y arena gruesa para el primer horizonte. La parte inferior es predominantemente tamaño grava gruesa y arena gruesa. En la estación B-B el porcentaje de material menor a 4ϕ fue 6.40%, mientras que para la muestra B-C se midió 3.46%.

VII. 3.3 Parámetros estadísticos

La tabla 7 muestra el cálculo de los parámetros estadísticos principales obtenidos a partir del análisis sedimentológico, cuyas correlaciones permiten clasificar el evento observado.

Parámetro estadístico	Fórmula de cálculo (Folk y Ward, 1957)	Puesto Militar Horizonte B	Puesto Militar Horizonte C	Basurero Horizonte B	Basurero Horizonte C
Mediana	$M_d = \phi_{50}$	1.5	-4	1.2	0
Media	$M_z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$	1.6	-2.3333	0.5666	-0.7
Clasificación	$\sigma_1 = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6}$	1.794	3.2136	2.784	3.1386
Asimetría	$Sk_I = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$	-0.0326	0.6711	-0.3501	-0.2255
Curtosis	$K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})}$	1.249	0.5588	1.3143	0.6706

Tabla 9 Parámetros estadísticos del evento del 24 de mayo del 2000

Se utilizó el trabajo de Scott (1988), que involucra tamaño medio de las partículas M_z contra clasificación σ_1 para realizar una clasificación más precisa, que incluye los diversos tipos de mezclas sedimento/agua de procedencia volcánica (Fig. 7.15).

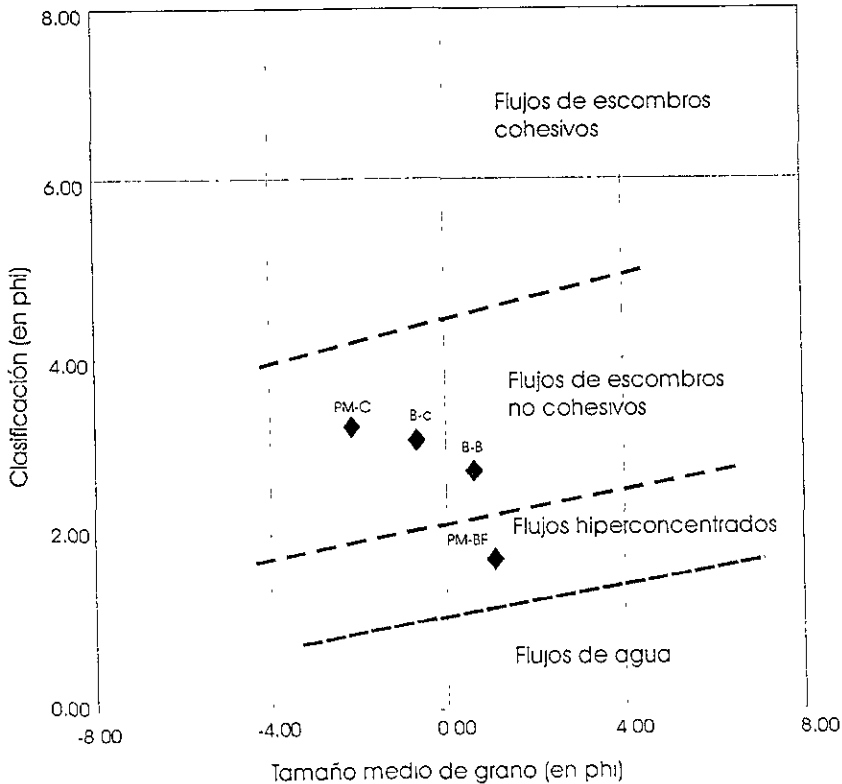


Fig. 7.15 Clasificación de las muestras de acuerdo a la gráfica de tamaño medio de grano contra clasificación a partir de los valores del Monte Rainier (Vallance y Scott, 1997) y del Monte Santa Elena (Scott, 1988).

- Estación Puesto Militar:
Horizonte B: PM-BF Flujo hiperconcentrado
Horizonte C: PM-C Flujo de escombros no cohesivo
- Estación Basurero:
Horizonte B: B-B Flujo de escombros no cohesivo
Horizonte C: B-C Flujo de escombros no cohesivo

- Estación Puesto Militar:
Horizonte B: Pobrementemente clasificado, casi simétrico, leptocúrtico
Horizonte C: Muy pobrementemente clasificado, altamente asimétrico fino, muy platicúrtico
- Estación Basurero:
Horizonte B: Muy pobrementemente clasificado, altamente asimétrico grueso, leptocúrtico
Horizonte C: Muy pobrementemente clasificado, asimétrico grueso, platicúrtico

Con base en la clasificación de Scott (1988) los flujos del evento del 24 de mayo del 2000, que ha sido el más grande en el periodo estudiado, son clasificados como flujo hiperconcentrado y flujos de escombros no cohesivos. Esta información parece contraria a la clasificación basada en el contenido de partículas de tamaño menor a 4ϕ (Scott, 1985), en la cual, las muestras PM-BF y B-B corresponderían a lahares cohesivos, dado que su contenido de arcilla es 6.85% y 6.40% respectivamente.

En este sentido, considerando que las muestras corresponden a la fase fina del depósito de cada sitio (horizonte B) y que los valores son cercanos al límite, la clasificación utilizada es la de Vallance y Scott (1997) y Scott (1988) mostrada en la figura 7.15, que involucra el tamaño medio de las partículas y la clasificación, los cuales son parámetros más representativos del depósito en general.

Se considera que la muestra PM-BF, clasificada como flujo hiperconcentrado, corresponde al depósito de la cola del lahar, que tal como muestra la figura 5.2, presenta menor contenido de clastos grandes y se interpreta como una transición temporal del flujo para un mismo evento, analizado en un mismo sitio.

Instrumentalmente, este evento clasificado como tipo A, es uno de los mayores detectados durante 1999 y 2000 y presenta los siguientes parámetros:

Flujo acústico	Estación A:	108.1
	Estación B:	152.90
	Estación C:	77.94
Velocidad calculada		0.72 a 0.95 m/s
Velocidad apreciada		1.11 m/s
Descarga		3.108 m ³ /s

Con las características obtenidas y la información aportada por el análisis sedimentológico se tiene la caracterización completa de este lahar. Se trató de un flujo de escombros de tamaño pequeño (<100 m³/s) de acuerdo a la clasificación propuesta por Pierson (1998) basada en el valor de las descargas.

VII.5 IMPLICACIONES DE RIESGO

El riesgo es la posibilidad de pérdida de vidas humanas, propiedades, capacidad productiva, etc., dentro de un área determinada sujeta a los peligros y que considera el costo, vulnerabilidad y peligro (Tilling y Beate, 1993). Dentro de los fenómenos volcánicos que pueden considerarse riesgosos se incluyen los flujos de lava, flujos piroclásticos, caída de ceniza, colapsos estructurales y lahares.

Las áreas de inundación y la longitud de un lahar están grandemente influenciadas por el volumen, velocidades del lahar y su granulometría. La combinación de estos parámetros genera diferentes escenarios que permiten la evaluación del riesgo en áreas de posible inundación. Un trabajo que muestra de manera clara en un mapa las áreas de riesgo asociados a lahares en el Popocatepetl se desarrolló por Ávalos (1998).

Un gran volumen, un alto contenido de arcilla y el confinamiento en un valle angosto favorece el recorrido de grandes distancias. Sin embargo, el riesgo se incrementa si los rangos de descarga y los flujos acústicos son grandes.

Por otra parte, la descarga pico de lahares que tienen un alto contenido de arcilla se atenúa rápidamente y lo mismo ocurre con lahares que se esparcen sobre áreas amplias de relieve bajo. Los lahares que se mueven a altas velocidades pueden ascender paredes en la parte exterior de curvas y pueden sobrepasar barreras topográficas, tales como los producidos en 1980 en el volcán Santa Elena, EUA (Scott, 1985).

Si la velocidad y densidad del lahar son altas, los lahares pueden destruir la vegetación y las estructuras importantes a lo largo de los valles que los drenan. Los depósitos también pueden rellenar canales de ríos, disminuyendo de esta manera su capacidad de drenaje de torrentes de agua.

Los valores pequeños de descarga, flujo acústico y velocidades de flujo no reflejan un riesgo inminente para la vida de los habitantes de los poblados que se encuentran en o cerca de los valles que drenan el sector N-NE del volcán Popocatepetl en las condiciones eruptivas del volcán que han prevalecido durante 1999 y 2000. Sin embargo, dado los alcances en distancia del evento del 24 de mayo del 2000, eventos laháricos de de tamaño mayor pueden alcanzar estas poblaciones y causar afectaciones a las viviendas y al entorno habitacional.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los parámetros calculados: magnitud, velocidad, descarga y flujo acústico, permiten concluir que los eventos ocurridos en el periodo comprendido entre enero de 1999 y octubre del 2000 han sido eventos pequeños, especialmente si son comparados con lahares en otros volcanes del mundo. Un caso especial por su tamaño lo constituyó el flujo ocurrido el 24 de mayo del 2000.

Los mayores lahares detectados en este periodo han sido aquellos que se han detectado en al menos dos estaciones y generalmente la amplitud máxima registrada en el sistema de detectores acústicos de flujo ha sido mayor a $1500 \text{ cm/s} \times 10^9$, por lo cual se propone considerar esta amplitud como mínima para la identificación de eventos importantes.

La combinación de las velocidades bajas en que se han desplazado estos flujos y las descargas pequeñas permiten considerar que el riesgo para la vida de los habitantes que viven en los alrededores del volcán, en las partes bajas de los valles es bajo. Es importante enfatizar que estos parámetros están relacionados con las condiciones eruptivas actuales, y que mientras estas se mantengan, los eventos laháricos tendrán un comportamiento semejante y provocarán un nivel de riesgo similar.

Los flujos que han ocurrido durante 1999 y 2000 presentan comportamientos instrumentales diferentes en el sistema de detectores acústicos de flujo. Los torrentes fueron identificados en la banda alta de frecuencia, y los lahares se registraron mejor en la banda baja de frecuencia. Considerando la información visual y la obtenida por el análisis sedimentológico, los lahares ocurridos comprendieron flujos hiperconcentrados y de escombros.

Se concluye que el origen de los lahares ocurridos durante el periodo estudiado fue la combinación de la precipitación pluvial y el deshielo del glaciar producido por las altas temperaturas climáticas, siendo este último factor el principal para el aporte de agua requerido para la generación de estos flujos. Sin embargo, no está descartado que un factor adicional, tal como un flujo piroclástico o emisión de lava, sea el que provoque la fundición del cuerpo de hielo que corona el volcán. Otro parámetro muy importante es la disponibilidad de material sólido no consolidado, producto de la actividad volcánica explosiva.

Los parámetros físicos obtenidos en el presente estudio serán útiles en una etapa posterior que se enfoque a la modelación de flujos laháricos y su simulación en el volcán Popocatepetl, y la metodología será aplicable a ambientes volcánicos y no volcánicos, asignando parámetros particulares para cada caso. Para cuestiones de riesgo, los eventos laháricos simulados deben ser mayores a los estudiados en el presente trabajo.

El sistema de detectores acústicos de flujo es una herramienta útil para monitorear la ocurrencia y comportamiento de los flujos laháricos en el volcán Popocatepetl, sin embargo, es deseable realizar algunas modificaciones en la operación del sistema a fin de garantizar que los resultados sean los más completos posibles, algunas de ellas actualmente realizadas por el CENAPRED:

- Realizar un estudio topográfico de las barrancas, poner secciones de control para medir alturas, velocidades y descargas.
- Colocar cámaras de video controladas remotamente para observar la ocurrencia y comportamiento de un flujo.

- Registrar sistemáticamente en la bitácora de datos los eventos que reporta el puesto militar de observación. La información debe considerar la hora del inicio y final del evento, la duración, las características físicas del flujo, tales como color, apariencia, tamaño máximo y medio de partículas transportadas, contenido de vegetación, velocidad (medida en metros por segundo) y las dimensiones medidas sobre una sección determinada del canal por donde fluye.
- Averiguar el origen de cada evento que provoque la activación de la alarma acústica para discriminar con precisión el origen del modo de alerta.
- Registrar las dimensiones mínimas de flujos reportados por el puesto militar de observación que activan la alarma acústica permitirá conocer mejor el comportamiento instrumental del sistema y variar sus parámetros para una nueva calibración. Por otra parte, es importante el procesamiento constante de los datos generados, con el fin de contar con un reporte inmediato del comportamiento de este aspecto del volcán y conocer de esta manera la variación de estos niveles normales.

BIBLIOGRAFÍA

Aitken, Peter, and Jones, Bradley, 1994, *Aprendiendo C en 21 días*: Prentice Hall Iberoamericana, S.A., 720 pp

Alexander, D., 1995, *Natural Disasters*: Chapman & may, New York, 2nd impresión, 279 pp.

Araña Saavedra, V. y Ortiz Ramis, Ramón, 1984, *Volcanología*: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Editorial Rueda, Madrid, 510 pp.

Ávalos Torres, H., 1998, *Peligros y riesgos asociados a lahares en el volcán Popocatepetl*: Tesis profesional, ESIA, IPN, México. 109 pp.

Bates, R.L. and Jackson, J.A., eds, 1987, *Glossary of Geology*: American Geological Institute, Alexandria, Virginia, 788 pp.

Beverage, J.P. y Culbertson, J.K., 1964, *Hyperconcentrations of suspended sediments*: Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, v.90, p.117-128.

Brantley, S.R. (ed.), 1990, *The eruptions of Redoubt Volcano, Alaska, December 14, 1989-August 31, 1990*: U.S. Geological Survey Circular 1061, p.33.

Bursik, M., González-Huesca, A., y Delgado, H., 1999, *Debris flow of July 1, 1997, Popocatepetl, México*. Resúmenes del Simposio Internacional "Volcán Popocatepetl". Ciudad de México, p. 4.

Carrasco, G., 1985, *Geología del volcán Popocatepetl*: Tesis profesional de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Carrasco, G., Silva, L., Delgado, H. y Urrutia, J., 1986, *Geología y Paleomagnetismo del volcán Popocatepetl*: Comunicaciones técnicas (serie Investigación), Instituto de Geofísica, UNAM, p. 205-225.

Cas, R.A.F. and Wright J.V., 1987, *Volcanic successions: Modern and ancient*. Chapman & Hall, 528 pp.

Castelán, G., Quass, R., Montalvo, G., Marso, J., Lockhard, A., Galicia, F. y Galicia, M., 1999, *Sistema para la detección automática de flujos en el volcán Popocatepetl*: Resúmenes del Simposio Internacional "Volcán Popocatepetl", México, p.9.

Cenapred, 2000, página del Centro Nacional de Prevención de Desastres, www.cenapred.unam.mx

Crandell, D.R., 1971, *Postglacial lahars from Mount Rainier volcano, Washington*: Geological Survey Profesional Paper, 677, p. 1-15

Crandell, D.R., Booth, B., Kusumadinata, K., Shimosuru, D., Walker, G.P.L. y Westercamp, D., 1984, *Source book for volcanic-hazard zonation*: Natural hazard 4, UNESCO, París, 97 pp.

- Costa, J.E., 1988,** *Rheologic, geomorphic and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flow*, in Baker, V.R., Kochei, R.C., and Patton, P.C., eds., *Flood geomorphology*: John Wiley and Sons, New York, p. 113-122.
- Delgado, H., 1986,** *Estudios glaciológicos en los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl*: Resúmenes de la VIII Convención Anual de la Sociedad Geológica Mexicana, p.109.
- Delgado, H., 1996,** *The glaciers of Popocatepetl volcano (México): changes and causes*: *Quaternary International*, v. 43, p 1-8.
- Delgado, H. y Brugman, M., 1995,** *Monitoreo de los glaciares del Popocatepetl en Volcán Popocatepetl*: Estudios realizados durante la crisis de 1994-1995, CENAPRED-UNAM, México, p. 221-241.
- Delgado, H., Carrasco, G., Urrutia, J., y Casanova, J. M., 1988,** *Análisis of eruptive records of the Popocatepetl volcano, México*: Kagoshima International Conference on Volcanoes, Kagoshima, Japan, p. 510-513
- Delgado, H., González-Huesca, A. y Oropeza-Villalobos, B., 2000,** *Possible linkage between lahatic events and glacier ice melting at Popocatepetl volcano, Mexico*: *Volcano/ice interaction on Earth and Mars*, abstract volume, Iceland.
- Dorava, J.M. y Meyer, D.F., 1994,** *Hydrologic hazards in the lower Drift River basin associated with the 1989-1990 eruptions of Redoubt Volcano, Alaska*: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v.62, p 387-407.
- Fink, J., Malin, M., D'Alli, R.E., y Greeley, R., 1981,** *Rheological properties of mudflows associated with the spring 1980 eruptions of Mount St. Helens volcano, Washington*: *Geophysical Research Letters*, v.8, no.1, p 43-46.
- Fisher, R.V. y Schmincke, H.-U., 1984,** *Pyroclastic Rocks*: Springer-Verlag, Berlín, 472 pp.
- Folk, R.L., y Ward, W.C., 1957,** *Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters*: *Journal of Sedimentary Petrology*, v.27, p. 3-26.
- Fuentes Aguilar, Luis, 1975,** *El paisaje de piedemonte poblano de los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl*: *Boletín del instituto de Geografía, UNAM No. 6*, p 97-116.
- Garrido, U., 1980,** *Análisis geomorfológico de la región de Atlixco, Puebla*, Tesis de licenciatura, ESIA, IPN.
- García, F., Ramos, E. y Domínguez, R., 1995,** *Posible flujo de lodo en el costado oriente del volcán Popocatepetl*: *Volcán Popocatepetl estudios realizados durante la crisis 1994-1995*, Comité Científico Asesor CENAPRED-UNAM, p. 109-119.
- González Huesca, A.E., Delgado, H. y Urrutia Fucugauchi, J., 1997,** *The San Nicolás lahar at Popocatepetl, volcano (México): A case study of a glacier-ice-melt-related debris flow, triggered by a blast at the onset of a plinian eruption*: IAVCEI, Puerto Vallarta, México, p. 94.
- González Huesca, A.E., 2000,** *Estudios de detalle estratigráfico y sedimentológico del lahar de San Nicolás en el flanco noreste del volcán Popocatepetl*: Tesis profesional de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, 110 pp

Hadley, K.C., y Lahusen, R.G., 1991, *Deployment of an acoustic flow monitor system and examples of its application at Mount Pinatubo, Phillipines (abs.):* Eos transactions, American Geophysical Union, v.72, no. 44, p.67.

Hadley, K.C., y Lahusen, R.G., 1995, *Technical manual for an experimental acoustic flow monitor:* U.S. Geological Survey open file report 95-114, 24 pp.

INEGI, 1990, Hoja topográfica E-14-B41, Amecameca, 1:50,000

INEGI, 1990, Hoja topográfica E14-B42, Huejotzingo, 1:50,000

INEGI, 1990, Hoja topográfica E14-B51, Cuautla, 1:50,000

INEGI, 1990, Hoja topográfica E14-B52, Atlixco, 1:50,000

Iverson, R. M., 1997, *The physics of debris flow:* Reviews of Geophysics, v.35, p. 245-296.

Iverson, R.M. and Denlinger, R.P. 1987, *The physics of debris flows -A conceptual assessment,* en Beschta, R.L., Blinn, T., Grant, G.E., Ice, G.C. y Swanson, F.J., eds., *Erosion and sedimentation in the Pacific Rim: International Association of Hydrological Sciences Publication No. 165,* p.155-165.

Janda, R.J., Scott, K.M. and Martinson, H.A., 1981, *Lahar movements, effects, and deposits, en The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington,* editado por P.W. Lipman and D.R.Mullineaux, U.S. Geological Survey Professional Paper, 1250, p. 461-478.

Johnson, A.M., 1970, *Physical processes in Geology:* Freeman & Cooper, San Francisco California.

Lahusen, R.G., 1996, *Detecting Debris Flow using ground vibrations:* U.S. Geological Survey Fact Sheet FS-236-96, 2 pp.

López N., B., Martínez B., A., Quas W., R., Montalvo G., A., Castelán P., G., Valdés G., C., 1999, *Sistema de procesamiento del volcán Popocatepetl:* Resúmenes del Simposio Internacional "Volcán Popocatepetl", México, p. 23.

Lowe, D.R., 1979, *Sediment gravity flows: Their classification and some problems of application to natural flows and deposits,* in Doyle, L.J., and Pilkey, O.H. Jr., eds., *Geology of continental slopes: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication 37,* p. 75-82.

Lorenzo, J.L., 1964, *Los glaciares de México:* Monografías del Instituto de Geofísica /1, UNAM, 114 pp.

Lozano Velázquez, L y Carrasco Núñez, G., 1997, *Laharic sequences at the southwestern flank of Popocatepetl volcano,* México: IAVCEI, Puerto Vallarta, México, p 95.

Lugo Hupb, J., 1984, *Geomorfología del sur de la cuenca de México:* Serie Varia T. 1 Num.8, Instituto de Geografía, UNAM, México, 95 pp.

- Marcial Segio, Melosantos Arnaldo A., Hadley Kevin, Lahusen Richard and Marso Jeffrey, 1996, Instrumental lahar monitoring at Mount Pinatubo, en Newhall, C.G., y Punungbayan, R.S., eds., Fire and Mud: eptions and lahar of Mount Pinatubo, Philippines: Philippine Institute of Volcanology and Seismology, Quezon City and University of Washington Press, Seattle, p. 1015-1022.**
- Martínez, M. M., Arboleda, R. A., DelosReyes, P. J., Gabinete, E. y Dolan M. T., 1996, Observations of 1992 lahars along the Sacobia-Bamban river system, en Newhall, C.G., y Punungbayan, R.S., eds., Fire and Mud: eptions and lahar of Mount Pinatubo, Philippines: Philippine Institute of Volcanology and Seismology, Quezon City and University of Washington Press, Seattle, p. 1033-1043.**
- Mills, H.H., 1984, Clast orientation in Mount St. Helens debris flow deposits, North Fork Toutle River, Washington: Journal of Sedimentary Petrology, v. 54, p. 626-634**
- Mingfu, W., Yizheng, Z., Jianjun, L., Wenzhong, D., and Weimin, W., An experimental study on turbulence characteristics of flow with hiperconcentration, in Proceedings of the Second International Symposium on River Sedimentation, p 45-53.**
- Miyamoto K and Suzuki, H., 1991, Research on disaster prevention around an active volcano, Reporte Interno, Sabo Technical Center, Tokio, Japón.**
- Mizumaya T. and Miyamoto K., 1992, Method of predicting regions prone to sediment disasters on volcanoes, Reporte no publicado.**
- Mójica, J., Colmenares, F., Villaroel, C., Macia, C., y Moreno, M., 1985, Características del flujo de lodo ocurrido el 13 de noviembre de 1985 en el valle de Armero, Colombia: Geología colombiana, V.14, p.107-140.**
- Montalvo G., A., Quacs W., R., Castelán P., G., Vaidés G., C., Guevara O., E., Galicia A, F., Galicia L., M., 1999, Red sismológica del volcán Popocatépetl: Resúmenes del Simposio Internacional "Volcán Popocatépetl", México, p. 26.**
- Mooser, F., Nairn, A.E., and Negendank, J.F., 1974, Paleomagnetic investigations of the tertiary and quaternary igneus rocks VII, a paleomagnetic and petrologic study of volcanics of the Valley of Mexico: Geol. Rundschau, 63, p 451-483.**
- Morán Zenteno, Dante, 1984, Geología de la República Mexicana: INEGI y Facultad de Ingeniería, UNAM, 88 pp.**
- Morán Zenteno, Dante, 1994, Geology of Mexican Republic: American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology #39, EUA, 1994, 160 pp.**
- Naranjo, J.L., Sigurdsson, H., Carey, S.N., y Fritz, W., 1986, Eruption of the Nevado del Ruiz volcano, Colombia, on 13 november 1985: tephra fall and lahars: Science, v. 233, p.961-963.**
- Newhall, C., Stauffer, P. and Hendley II, J., 1997, U.S. Geological Survey Fact Sheet 114-97, Online Version 1.1**
- Ordoñez, E., 1941, Las provincias fisiográficas de México, Revista Geográfica IPGH.**
- Origen versión 6,0, 1999, Tutorial Manual, Microcal Software Inc**

Origin versión 6.0, 1999, *User's Manual*, Microcal Software Inc.

Oropeza-Villalobos, B., Delgado, H. y Ruiz-García, B., 1999, *Análisis de los datos de detectores de flujo del volcán Popocatepetl. Reporte preliminar*. Resúmenes del Simposio Internacional "Volcán Popocatepetl", México, p.29

Oropeza-Villalobos, B., Delgado, H., Quass, R., Montalvo, A., and Castelán, G., 2000, *Use of acoustic flow monitoring system to identify and characterize lahars at Popocatepetl, México: Volcano/Ice interaction on Earth and Mars*, abstract volume, Iceland.

Pierson, T.C., 1981, *Dominant particle-support mechanism in debris flow at Mount Thomas, New Zeland, and implications for flow mobility*: *Sedimentology* v. 28, p. 49-60.

Pierson, T.C., 1985, *Initiation and flow behavior of the Pine Creek and Muddy river lahars, Mount St. Helens, Washington*: *Geological Society of America Bulletin*, v. 96, p. 1056-1069.

Pierson, T.C., 1995, *Flow characteristics of large eruptions-triggered debris flow at snow-clad volcanoes: constraints for debris flow models*: *Journal of volcanology and geothermal research*, v. 66, p. 283-294.

Pierson, T.C., 1998, *An empirical method for estimating travel times for wet volcanic mass flow*: *Bulletin of Volcanology*, v. 60, p. 98-109.

Pierson, T.C., and Costa, J.E., 1987, *A reological classification of subaerial sediment-water flows*: *Geological Society of America reviews in Engineering Geology*, v.7, p.1-12.

Pierson T.C., and Scott K.M., 1985, *Downstream dilution of a lahar: transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow*: *Water Resources Research*, v.21, p. 1511-1524.

Qian , Y., Yang, W., Zhao, W., Chang, X., Zhang, L. and Xu, W., 1980, *Basic characteristic of flow with hyperconcentration of sediment*. In *Proceedings of the International Symposium on River Sedimentation*, p. 175-184.

Quass, R., González, R., Guevara, E., Ramos, E. y De la Cruz, S., 1995, *Monitoreo volcánico: instrumentación y métodos de vigilancia: Volcán Popocatepetl, estudios realizados durante la crisis 1994-1995*, Comité Científico Asesor CENAPRED-UNAM, p. 25-76.

Quass, R., De la Cruz, S., Meli, R., Montalvo, G., Castelán, G., López, B., Martínez, A., Guevara, E., Valdés, C., Gutierrez, C., Galicia, F., 1999, *Monitoreo y vigilancia del volcán Popocatepetl*: Resúmenes del Simposio Internacional "Volcán Popocatepetl", México, p.32.

Quiroz, R., H.N., 1989, *Morfopedología y erosión en los grandes estratovolcanes de la Sierra Nevada*, *Revista Geografía*, INEGI, V. 7, p 1-33.

Ramos, E. y Echavarría, A., 1999, *Propuesta para implementación de obras de retención de escombros en la parte NW del volcán Popocatepetl, para mitigar el riesgo de posibles flujos de lodo*: Resúmenes del Simposio Internacional "Volcán Popocatepetl", México, p.34.

Robin, C., y Boudal, C., 1987, *A gigantic Bezymianny-type event at the begining of modern Popocatepetl*: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v.31, p 99-113.

Robin, C., y Boudal, C., 1989, *Volcán Popocatepetl: Recent eruptive history and potential hazards and risks in future eruptions*, IAVCEI Proceedings in Volcanology 1, J.H. Latter, eds, Volcanic Hazards, Springer-Verlag, Berlín Heidelberg, p 110-128.

Salgado, J., González, C. Y Nolasco, V., 1999, *Análisis topográfico e hidrográfico de la barranca Huiloac en el Popocatepetl: Implicaciones para su comportamiento en caso de flujos extraordinarios: Resúmenes del Simposio Internacional "Volcán Popocatepetl"*, México, p.37.

Scott, K.M., 1971, *Origin and sedimentology of 1969 debris flow near Glendora, California:* Geologic survey Profesional Paper 750-C, p. 242-247.

Scott, K.M., 1985, *Lahars and lahar-runout flows in the Toutle Cowlitz River System, Mount St Helens, Washington -origins, behavior and sedimentology:* Geologic survey Open-File Report 85-500, 202 pp.

Scott, K.M., 1988, *Origin, behavior and sedimentology of prehistoric catastrophic lahars at Mount St. Helens, Washington,* en Clifton H.E., ed., *Sedimentologic consequences of convulsive geologic events:* Geologic Society of America Special paper 229, p. 23-26.

Scott, K.M., Wallace,, J.W., y Pringle, P.T., 1995, *Sedimentology, behavior and hazards of debris flow at Mount Rainier, Washington:* U.S. Geological Survey, Profesional paper 1547, 56 pp.

Siebe, C., Abrams, M. y Macías, J.L., 1995, *Derrumbes gigantes, depósitos de avalancha de escombros y edad actual del cono del volcán Popocatepetl: Volcán Popocatepetl, estudios realizados durante la crisis 1994-1995,* Comité Científico Asesor CENAPRED-UNAM, p195-220.

Siebe, C., Abrams, M., Macías, J.L. y Obenholzner, J., 1996a, *Repetead volcanic disasters in Prehispanic time at Popocatepetl, central Mexico: Past key to the future?:* Geology, mayo 1996, v.24, no. 5, p 399-402.

Siebe, C., Macías, J.L., Abrams, M. Y Obenholzner. J., 1996b, *La destrucción de Cacaxtla y Cholula: un suceso en la historia eruptiva del Popocatepetl.* Ciencias 41, enero-marzo 1996, p. 36-45.

Siebe, C., Macías, J.L., Abrams, M., Rodríguez y Castro, R., 1997, *Catastrophic Prehistoric eruptions at Popocatepetl and Quaternary explosive volcanism in the Serdán-Oriental Basin, East-Central Mexico:* Fieldtrip guidebook, pre-meeting excursion #4, IAVCEI, Puerto Vallarta, México, 88 pp.

Siebert, L.,1984, *Large volcanic debris avalanches: Characteristics of source areas and associated eruptions:* Journal of Volcanology and Geothermal Research, v.22, p. 163-197.

Smith, G.A., 1986, *Coarse-grained nonmarine volcanoclastic sediment: Terminology and depositional process:* Geological Society of America Bulletin, V. 97, p.1-10.

Smith, G.A., and Fritz, W.J., 1989, *Volcanic influences on terrestrial sedimentation:* Geology, v17, p. 375-376.

Smith, G.A. y Lowe, D. R., 1991, *Lahars: volcano-hydrologic events and deposition in the debris flow - hyperconcentrated flow continuum,* en Fisher, R.V., y Smith, G.A., eds.,

Sedimentation in volcanic settings: SEPM (society for Sedimentary Geology) Special Publication 45, p. 59-70.

Takahashi, T., 1978, *Mechanical characteristics of debris flow:* Journal of Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, V.106, p. 381-396.

Takahashi, T., 1981, *Debris Flow:* Annual Review of Fluid Mechanics, v.13, p 57-77.

Takahashi, T., 1991, *Debris Flow, Monograph:* International Association for Hydraulic Research and Association Internationale de Recherches Hydrauliques, 165 pp.

Tilling, R. I. Y Beate, B., 1993, *Apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos:* World Organization of Volcano Observatories, 125 pp.

Tuñol, Normal y Regalado, Ma. Theresa., 1995, *Rainfall, acoustic flow monitor records, and observed lahars of the Sacobia River in 1992,* en Newhall, C.G., y Punungbayan, R.S., eds., *Fire and Mud: eptions and lahar of Mount Pinatubo, Philippines:* Philippine Institute of Volcanology and Seismology, Quezon City and University of Washington Press, Seattle, p. 1023-1043.

USGS, 2000, *Página USGS Lahar detection system:* Volcano Hazards Program, Strategy for reducing volcanic risk,
<http://volcanoes.usgs.gov/About/What/Monitor/Hydrologic/Lahar/Detect.html>

Urrutia, J., y Del Castillo, L., 1977, *Un modelo del eje volcánico mexicano:* Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, v.38, pp. 18-28.

Vallance, J.W y Scott, K.M., 1997, *The Osceola Mudflow from Mount Rainier: sedimentology and hazards implications of a huge clay-rich debris flow:* Geological Society of American Bulletin, v. 109, p. 143-163.

Yamashita, S and Miyamoto K., 1992, *Numerical simulation method of debris movements with a volcanic eruption,* Japan-U.S.: Workshop on snow avalanche, landslide debris flow prediction and control. Informe no publicado.

Apéndice 1

Modos de alerta reconocidos

APÉNDICE 1 MODOS DE ALERTA RECONOCIDOS

MODOS DE ALERTA DE LA ESTACIÓN 1, 1999 (Hora local)

FECHA	HORA	FECHA	HORA	FECHA	HORA
17/ene/1999	01:16	15/may/1999	19:25	7/sep/1999	18:44
21/ene/1999	12:45	26/may/1999	12:22	9/sep/1999	12:24
22/ene/1999	11:01	26/may/1999	22:28	12/sep/1999	17:32
6/feb/1999	06:17	30/may/1999	00:28	13/sep/1999	11:24
5/mar/1999	19:05	4/jun/1999	14:14	29/sep/1999	00:21
11/mar/1999	19:42	5/jun/1999	10:05	29/sep/1999	08:18
14/mar/1999	20:14	5/jun/1999	22:00	29/sep/1999	13:53
15/mar/1999	18:08	14/jun/1999	22:20	30/sep/1999	10:34
17/mar/1999	10:29	15/jun/1999	14:44	1/oct/1999	06:23
18/mar/1999	05:32	16/jun/1999	13:28	4/oct/1999	20:51
19/mar/1999	14:05	16/jun/1999	19:28	5/oct/1999	05:53
19/mar/1999	18:40	18/jun/1999	06:33	5/oct/1999	18:54
22/mar/1999	11:47	24/jun/1999	02:31	25/oct/1999	15:40
23/mar/1999	11:17	25/jun/1999	08:21	27/oct/1999	08:27
26/mar/1999	14:31	26/jun/1999	13:15	29/oct/1999	07:48
28/mar/1999	03:23	2/jul/1999	01:47	2/nov/1999	22:18
31/mar/1999	17:43	4/jul/1999	13:58	7/nov/1999	20:39
4/abr/1999	02:29	5/jul/1999	00:36	10/nov/1999	23:08
7/abr/1999	16:05	7/jul/1999	12:20	15/nov/1999	10:55
14/abr/1999	18:09	7/jul/1999	16:27	17/nov/1999	11:32
16/abr/1999	10:18	12/jul/1999	06:01	20/nov/1999	09:42
18/abr/1999	11:30	13/jul/1999	02:06	30/nov/1999	12:22
28/abr/1999	04:59	14/jul/1999	19:56	4/dic/1999	01:45
5/may/1999	13:40	17/jul/1999	15:15	7/dic/1999	07:56
7/may/1999	09:06	6/ago/1999	14:37	14/dic/1999	01:13
8/may/1999	10:22	28/ago/1999	15:40	20/dic/1999	01:29
11/may/1999	08:21	7/sep/1999	13:44	28/dic/1999	23:21

MODOS DE ALERTA DE LA ESTACIÓN 2, 1999 (Hora local)

FECHA	HORA	FECHA	HORA	FECHA	HORA
9/ene/1999	01:27	6/jun/1999	18:32	9/sep/1999	12:47
14/ene/1999	23:54	11/jun/1999	18:38	30/sep/1999	10:35
22/ene/1999	15:57	15/jun/1999	14:44	6/oct/1999	21:32
18/mar/1999	05:33	16/jun/1999	14:00	11/oct/1999	08:47
19/mar/1999	14:05	16/jun/1999	22:51	27/oct/1999	08:27
22/mar/1999	11:48	25/jun/1999	09:12	7/nov/1999	20:39
31/mar/1999	18:04	27/jun/1999	14:24	30/nov/1999	12:22
5/may/1999	15:32	27/jun/1999	20:25	7/dic/1999	07:55
11/may/1999	08:22	7/jul/1999	16:21	14/dic/1999	01:13
25/may/1999	00:32	17/jul/1999	15:41	23/dic/1999	17:53
26/may/1999	12:27	26/jul/1999	11:51	28/dic/1999	23:21
26/may/1999	22:43	5/ago/1999	09:42		
5/jun/1999	19:42	5/ago/1999	19:16		

MODOS DE ALERTA DE LA ESTACIÓN 3, 1999 (Hora local)

FECHA	HORA	FECHA	HORA	FECHA	HORA
28/ene/1999	10.22	16/jun/1999	15.02	9/sep/1999	15.57
22/mar/1999	11.48	5/jul/1999	17.35	30/sep/1999	10.36
24/abr/1999	21.14	7/jul/1999	17.06		
12/jun/1999	08.14	29/ago/1999	17.04		

MODOS DE ALERTA DE LA ESTACIÓN 1, 2000 (Hora local)

FECHA	HORA	FECHA	HORA	FECHA	HORA
26/ene/2000	13:27	14/abr/2000	19:47	10/jun/2000	09:59
3/feb/2000	07:05	16/abr/2000	17:09	17/jun/2000	13:05
14/feb/2000	13:10	20/abr/2000	16:54	21/jun/2000	08:46
17/feb/2000	11:20	27/abr/2000	20:22	2/jul/2000	20:53
28/feb/2000	14:29	16/may/2000	15:55	6/jul/2000	07:17
1/mar/2000	13:35	20/may/2000	17:30	21/jul/2000	00:15
1/mar/2000	22:35	20/may/2000	18:56	4/ago/2000	11:53
4/mar/2000	14:56	21/may/2000	23:07	9/ago/2000	05:45
6/mar/2000	19:56	24/may/2000	09:39	10/ago/2000	06:54
9/mar/2000	15:44	24/may/2000	14:10	22/sep/2000	21:07
11/mar/2000	15:02	30/may/2000	12:01	27/sep/2000	17:37
17/mar/2000	18:52	31/may/2000	13:46	28/sep/2000	01:13
26/mar/2000	20:15	1/jun/2000	20:15	13/oct/2000	09:34
31/mar/2000	16:51	8/jun/2000	03:22		

MODOS DE ALERTA DE LA ESTACIÓN 2, 2000 (Hora local)

FECHA	HORA	FECHA	HORA	FECHA	HORA
26/feb/2000	17:39	20/may/2000	18:03	11/jun/2000	07:24
4/mar/2000	14:56	24/may/2000	14:20	12/jul/2000	12:55
5/mar/2000	14:01	25/may/2000	11:06	20/jul/2000	23:47
9/mar/2000	15:44	27/may/2000	13:40	26/jul/2000	05:42
17/mar/2000	18:52	30/may/2000	12:01	4/ago/2000	11:53
31/mar/2000	12:01	2/jun/2000	13:41	9/ago/2000	05:45
20/abr/2000	17:09	3/jun/2000	15:30	20/ago/2000	00:10
27abr/2000	13:27	14/jun/2000	14:34	25/ago/2000	18:33
29abr/2000	20:22	20/jun/2000	04:41	27/ago/2000	07:01
29abr/2000	15:27	22/jun/2000	18:37	28/ago/2000	16:39
10may/2000	16:39	30/jun/2000	15:26	12/sep/2000	15:56
12may/2000	13:51	1/jul/2000	19:58	23/sep/2000	01:31
16may/2000	16:23	9/jul/2000	16:09	2/oct/2000	12:09
17may/2000	15:09	10/jul/2000	01:52		

MODOS DE ALERTA DE LA ESTACIÓN 3, 1999 (Hora local)

FECHA	HORA	FECHA	HORA	FECHA	HORA
29abr/2000	11:30	21/jul/2000	00:17	14/sep/2000	19:24
24/may/2000	15:13	9/ago/2000	05:45		
12/jun/2000	01:19	5/sep/2000	14:37		

Apéndice 2

Bitácora de datos 1999 y 2000

APÉNDICE 2 BITÁCORA DE DATOS 1999 y 2000

Fecha	Evento	Hora de inicio (local)	Hora de término (local)	Ancho (cm)	Prof. (cm)	Vel. (km/h)	Observaciones
7-mar-1999		20:50					Se activó la alarma de flujos
11-mar-1999	Flujo de lodo			25	30		
14-mar-1999		8:11					Se activó la alarma de flujos
23-mar-1999		14:13					Se activó la alarma de flujos
31-mar-1999		17:00					Canario N y canario vertical dispararon la alarma de flujos, que dura más de 1:30 horas
	Flujo de agua con lodo			100	20		
14-abr-1999	Flujo de lodo	18:15		30	6		
18-abr-1999							Se activó la alarma de flujos
8-may-1999		11:19					Se activó la alarma de flujos
15-may-1999	Flujo de lodo	18:30		150	4		
26-may-1999							"Bajada" de agua
30-may-1999		1:55					Se activó la alarma de flujos
4-jun-1999	Flujo de lodo	17:26	22:04	150	5		
5-jun-1999	Flujo de lodo	15:11		60	11	1	
		20:40					Se activó la alarma de flujos
		22:52					Se activó la alarma de flujos. También se registró un posible desplome en Canario y Canario N
6-jun-1999	Flujo de lodo	16:35		100	10	1	
11-jun-1999	Flujo de lodo			100	3	1	
		14:35					Se dispara la alarma de flujos y se registra en los tambores un evento pequeño
19-jun-1999							Se activó la alarma de flujos. No reportaron eventos en el puesto de observación
22-jun-1999	Flujo de lodo		20:53				
23-jun-1999	Flujo de lodo	16:30	21:15				
24-jun-1999	Flujo de lodo	18:40	21:15	75	6	0.9	
27-jun-1999	Flujo de lodo	15:00		200	8	1	
4-jul-1999		11:14					Se activó la alarma de flujos
7-jul-1999	Flujo de lodo	18:20					
10-jul-1999							Se activó la alarma de flujos
17-jul-1999							Se activó la alarma de

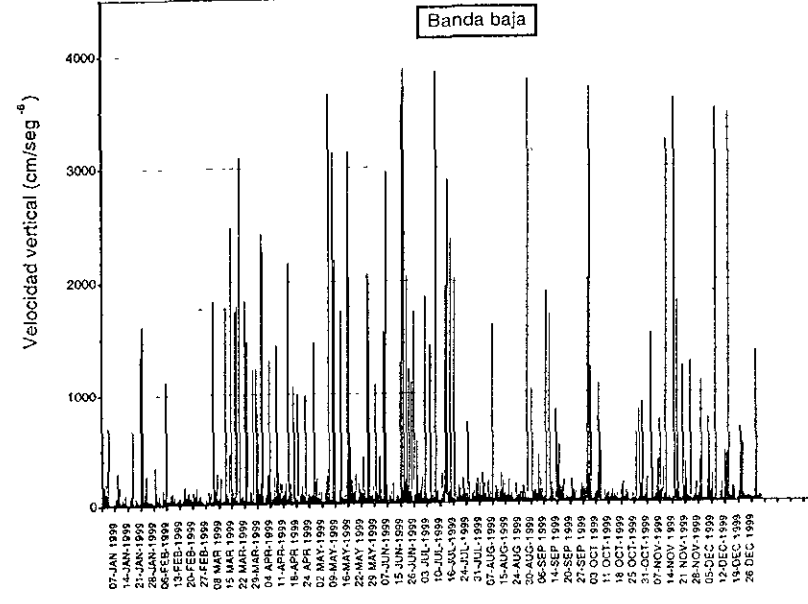
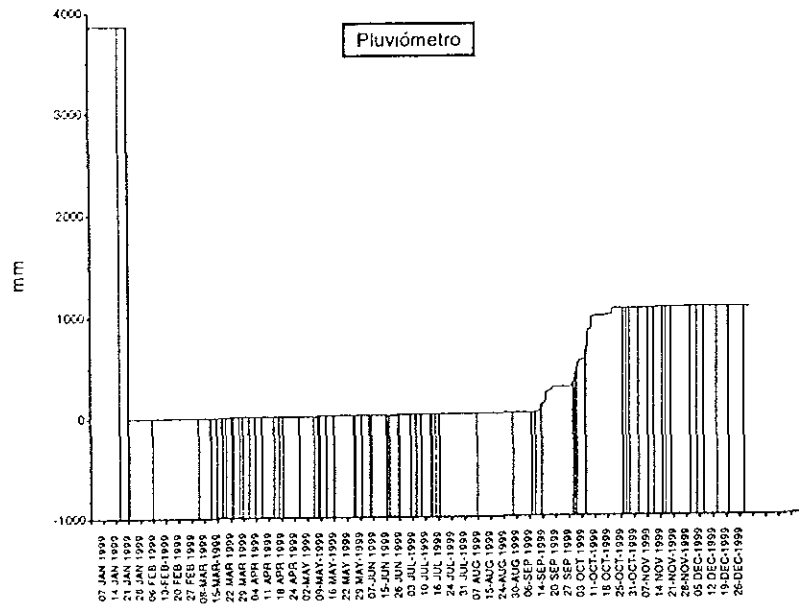
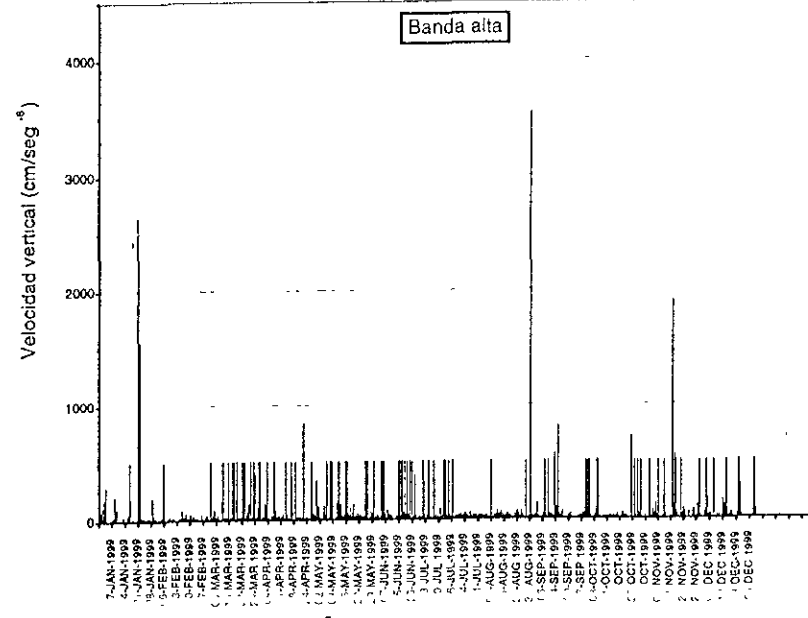
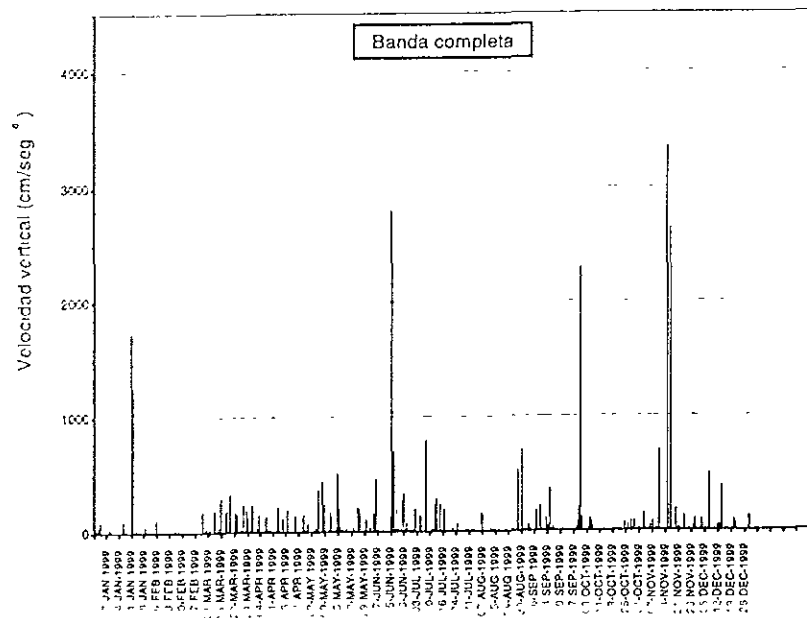
							flujos
19-jul-1999	Flujo de lodo con agua	19:38					
31-jul-1999		7:26					Se activó la alarma de flujos. El puesto de observación no reporta eventos.
5-ago-1999		20:15					Se activó la alarma de flujos
24-ago-1999		21:20					Se activó la alarma de flujos. Se observa en los tambores un evento de probable emisión de ceniza
	Corriente de agua	21:48					No hay más datos por la oscuridad. Relacionado quizá con intensas lluvias de la tarde.
29-ago-1999		18:03					Se activó la alarma de flujos
4-sep-1999		6:56					Se activó la alarma de flujos. No hay reporte del puesto de observación
24-sep-1999		20:36					Se activó la alarma de flujos
6-oct-1999	Flujo de lodo	22:50	8:00 del 7 de octubre	200	20	10	Flujo por la barranca Huiloac hasta Santiago Xalitzintia. 30 mm de lluvia durante el periodo en PFM1, PFM2 y PFM3 y 20mm 3n PFM4
5-dic-1999		13:53					Se activó la alarma de flujos
19-dic-1999							Se activó la alarma de flujos en dos ocasiones
20-dic-1999		14:11					Se activó la alarma de flujos. No hay reporte del puesto de observación
		17:09					Se activó la alarma de flujos. No hay reporte del puesto de observación
21-mar-2000	Flujo de lodo	17:05		100	20		
2-abr-2000	Flujo de lodo	18:20		50	5	10	En Tenenepanco
3-abr-2000	Flujo de lodo	19:45		5	2	10	
17-abr-2000	Flujo de lodo	18:03					
20-abr-2000	Flujo de lodo			60	12	1	
26-abr-2000	Flujo de lodo	17:35		40	7	1	En Tenenepanco
16-may-2000	Flujo de lodo						
17-may-2000	Flujo de lodo	19:40		80	5	10 a 15	
24-may-2000	"Bajada" de agua	21:12					En el basurero
25-may-2000	Flujo de lodo	16:11		50	3	1	
		16:32	19:28	120		2	Seguimiento del flujo. En la barranca de Tenenepanco. Nevado y

							bastante calor.
26-may-2000	Flujo de lodo	17:03		100	20	5-10	Mucha nieve que ha disminuido
27-may-2000	Flujo de lodo	16:31		200	20	5	Se disparó la alarma de flujos 4 veces
		17:55		220	50	5	Se elaboró un reporte extraordinario
3-jun-2000	Flujo de agua	18:28		150	15	1	Se activó la alarma de flujos dos veces.
		20:26	23:35	80	5	1	Continúa el reporte
5-jun-2000	Flujo de lodo	16:05	20:43				
10-jun-2000							Se activó la alarma de flujos en varias ocasiones, pero un grupo de personas se encontraba trabajando en la estación sismológica Canario
17-jun-2000		19:04					Se activó la alarma de flujos
22-jun-2000		20:30					Se activó la alarma de flujos tres veces, pero no se observó nada.
23-jun-2000	Flujo de lodo						En el NE
24-jun-2000	Flujo de lodo	4:25		50	7	2	
		4:50	7:34	80	18	3	Continúa reporte
25-jun-2000	Flujo de lodo	16:42	19:50	100	20	2	
28-jun-2000	Flujo de lodo			30	15	2	
1-jul-2000	Flujo de lodo	6:47		120	18	2	Se activó la alarma de flujos pero no se pudo confirmar si fue falsa o no.
2-jul-2000	Flujo de lodo	3:52		70	10	1	
	Flujo de lodo			90	6	1	
4-jul-2000	Flujo de lodo	15:50		80	10	2	
8-jul-2000	Flujo de lodo	16:31	19:17	110	17	2	
9-jul-2000							Se activó la alarma de flujos. El puesto de observación no reportó nada.
12-jul-2000	Flujo de lodo	16:05		110	18	2	
13-jul-2000	Flujo de lodo	17:19		60	8	1	
17-jul-2000	Flujo de lodo	16:35		72	8	1	
19-jul-2000	Flujo de lodo	16:38		122	17	2	Coloración terrosa
20-jul-2000	Flujo de lodo	16:19	18:57	54	6	1	
21-jul-2000	Flujo de lodo	16:00	22:10	70	8	1	
		21.25					Se activó la alarma de flujos
22-jul-2000	Flujo de lodo con agua	18:00		75	8	2	
23-jul-2000		15:25					Se activó la alarma de flujos
	Flujo de lodo	16:48	20:10	60	8	1	
24-jul-2000	Flujo de lodo	16:20	18:26	80	10	1	
		23:14					Se activó la alarma de flujos
25-jul-2000	Flujo de lodo	16:55	19:56	80	10	2	

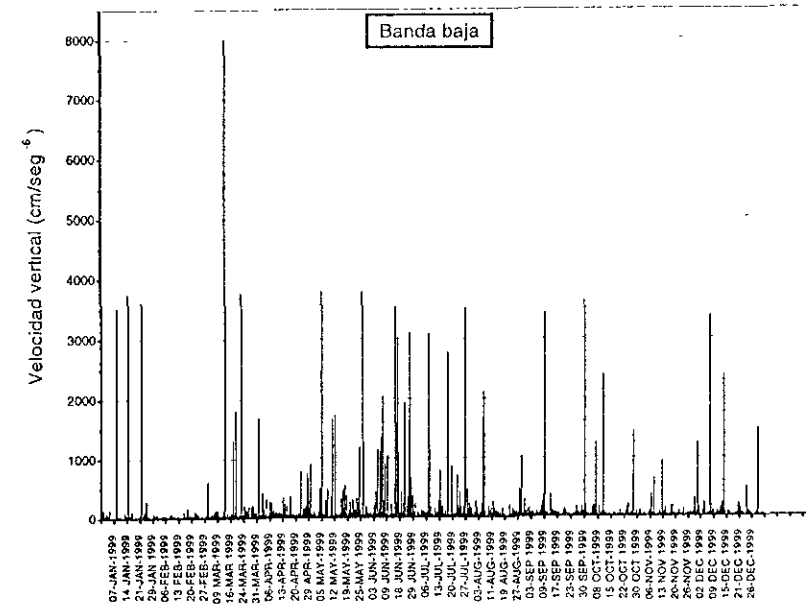
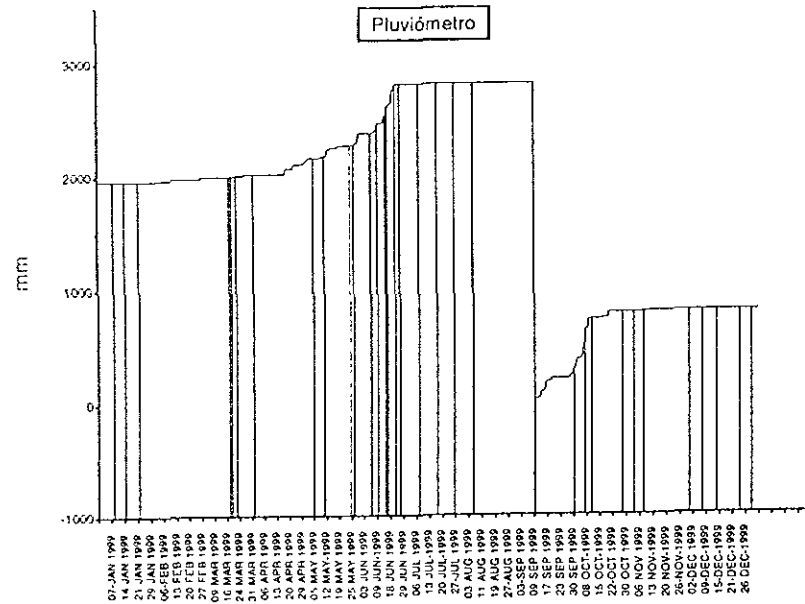
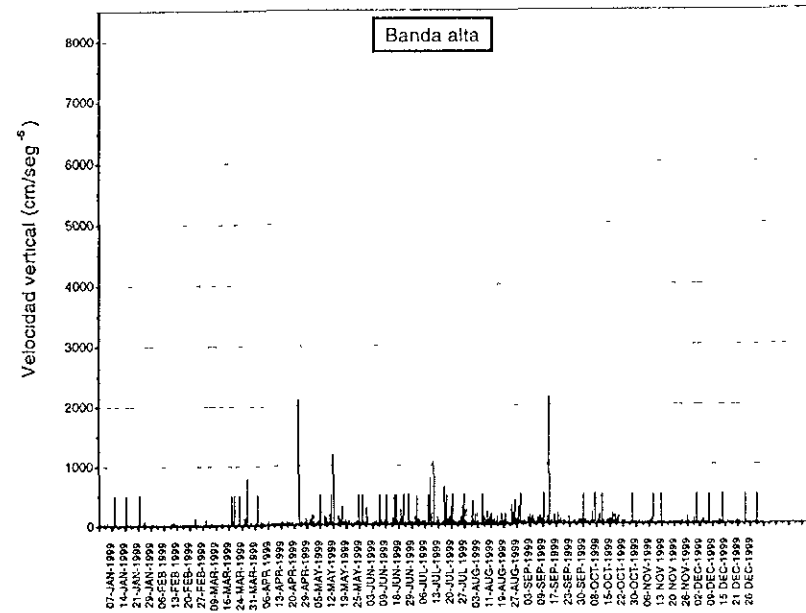
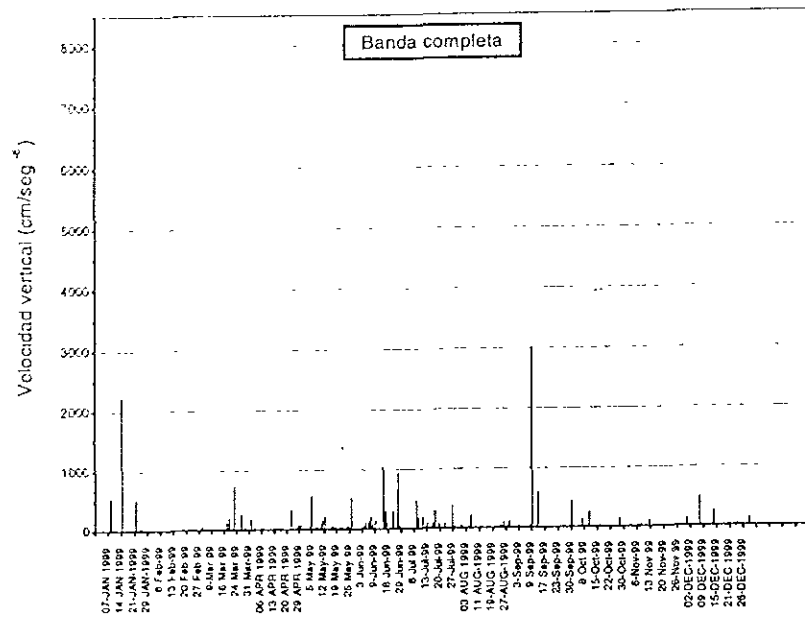
30-jul-2000	Flujo de lodo	17:50		70	10	2	
4-ago-2000	Flujo de lodo	20:00		40	20	1-2	
5-ago-2000	Flujo de lodo	17:32		110	12	2	
			21:30	90	10	1	Otro flujo en Tenenepanco
7-ago-2000	Flujo de lodo	17:50		120	20	1	
		18:50					Disminuye el flujo
8-ago-2000	Flujo de lodo	17:00		40	5	1	Barranca de Tenenepanco
16-ago-2000	Flujo de lodo	18:40	20:40	60	10	1	Al final con consistencia de agua
17-ago-2000	Flujo de lodo	17:00		70	10	1	
18-ago-2000	Flujo de lodo	19:55		85	20	1	Lluvias en el volcán
		17:50		50	13		Seguimiento del reporte
		19:02		85	20		Seguimiento del reporte
		20:55		65	10		Seguimiento del reporte
		21:23		35	5		Seguimiento del reporte
		21:50					Concluyó como flujo de agua
25-ago-2000	Flujo de lodo	18:00		80	10	1	En la cañada de Tenenepanco
29-ago-2000							Se activó alarma de flujos, pero se desactivó por ser falsa alarma.
30-ago-2000	Flujo de lodo	15:30		60	10	1	
		16:04		120	15	2	Seguimiento del reporte
		16:48	20:50	120	25	3	Seguimiento del reporte
31-ago-2000	Flujo de lodo			80	15	1	
1-sep-2000	Flujo de lodo	18:10		100	20	1	10% ceniza, 30% lodo, 60% agua
		19:50	22:00	50	15	1	Seguimiento del reporte
4-sep-2000	Flujo de lodo	17:30		70	10	1	Coincide con altas temperaturas
5-sep-2000	Flujo de lodo	17:41	20.15	127	10	1	
6-sep-2000	Flujo de lodo	18:08		70	5	1	
9-sep-2000	Flujo de lodo	17:45	23:00	80	10	1	85% agua, 10% lodo, 5 % ceniza
11-sep-2000	Flujo de lodo	18:15		60	4	1	
19-sep-2000	Flujo de lodo	18:20		30	5	1	
20-sep-2000	Flujo de lodo	18:15		80	10	1	
25-sep-2000	Flujo de lodo	18:40	21:00	40	10	1	
29-sep-2000	Flujo de lodo	18:35		40	10	1	
2-oct-2000	Flujo de lodo	19:00	21:30	40	10	1	
8-oct-2000							Se activó la alarma de flujos.
14-oct-2000							Se activó la alarma de flujos en dos ocasiones, pero fue falsa.

Apéndice 3

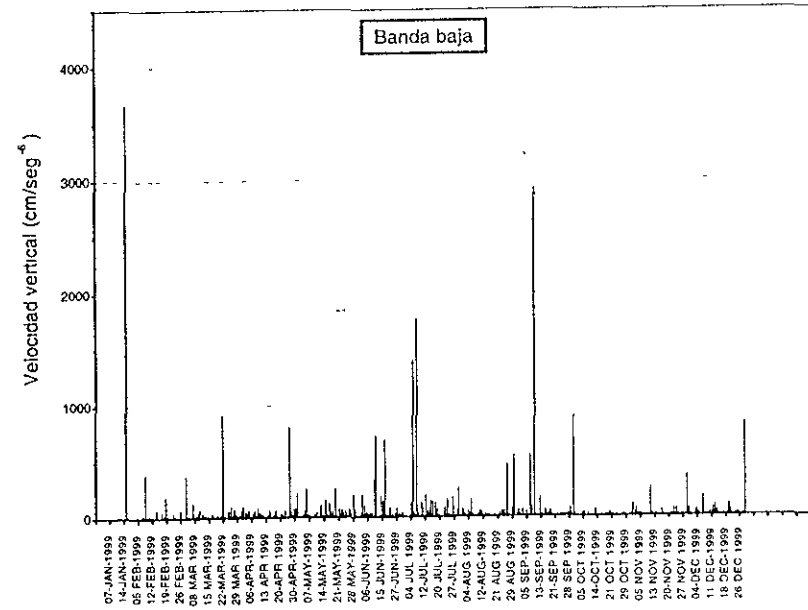
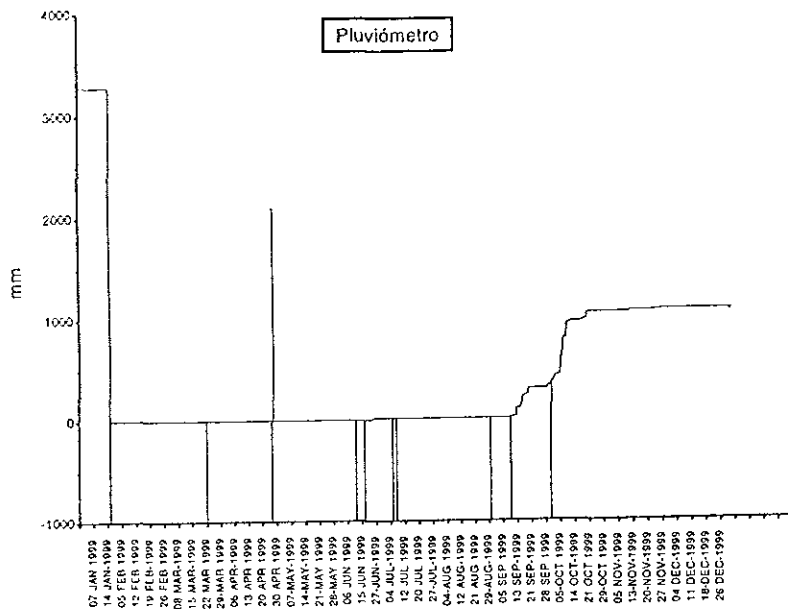
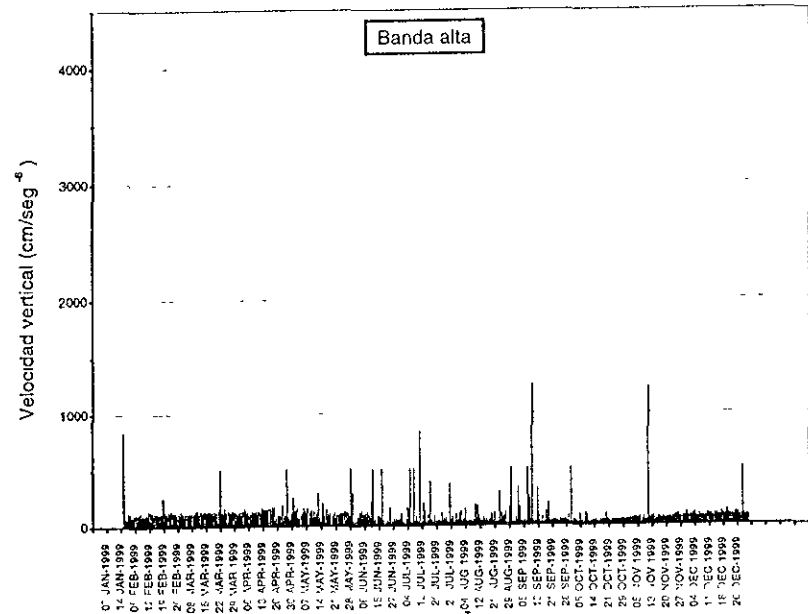
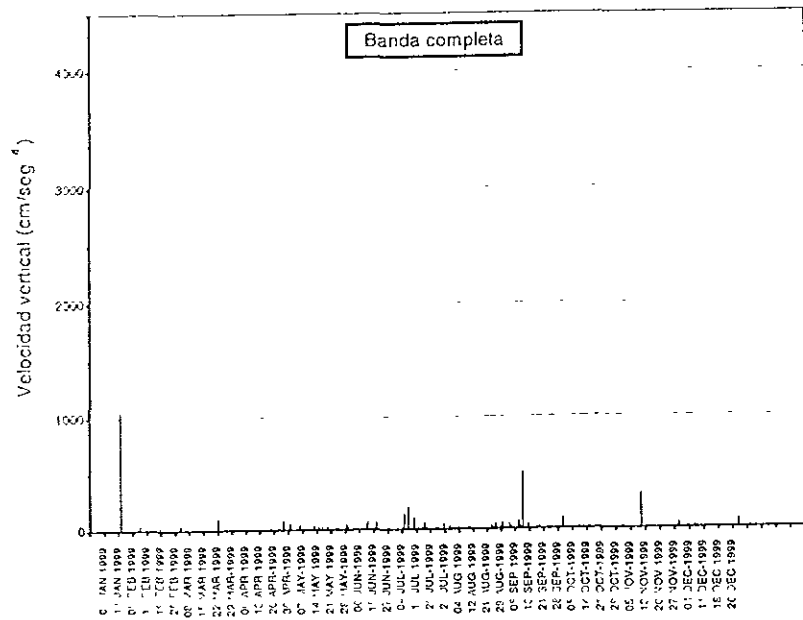
Análisis gráfico previo de datos



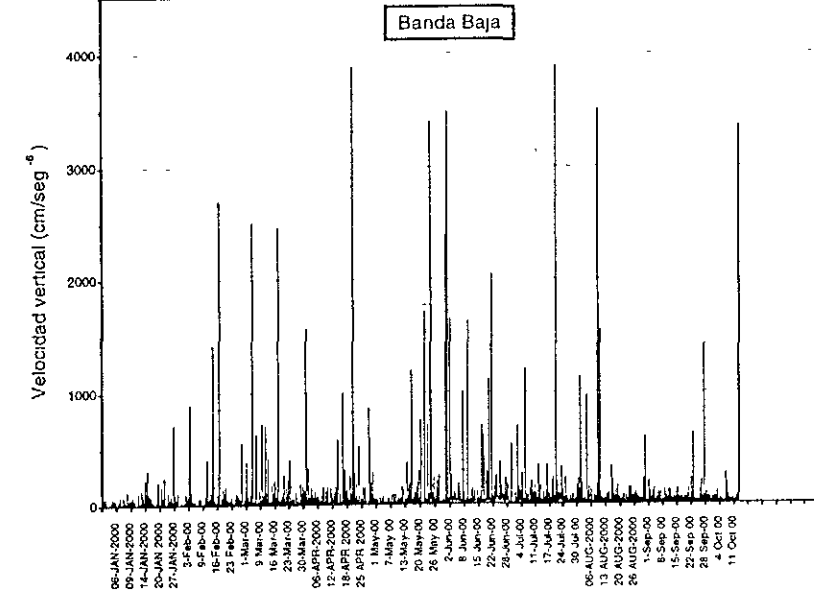
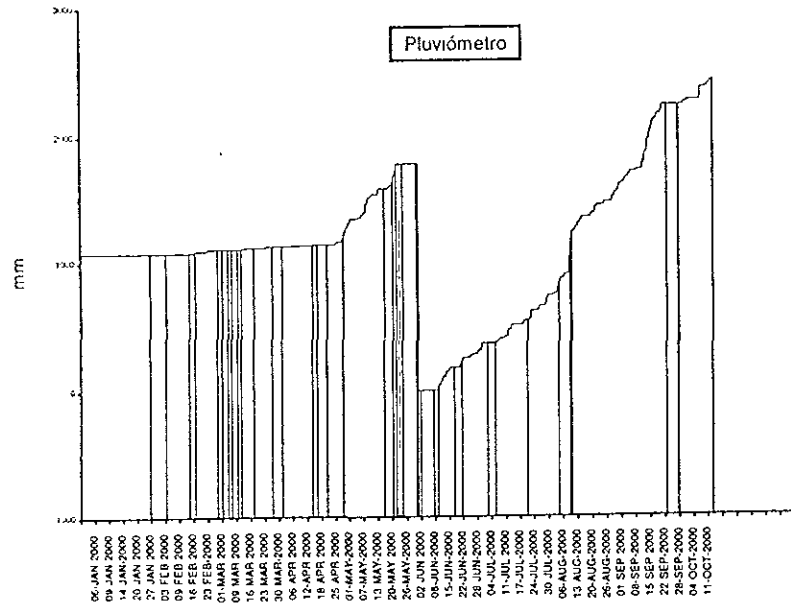
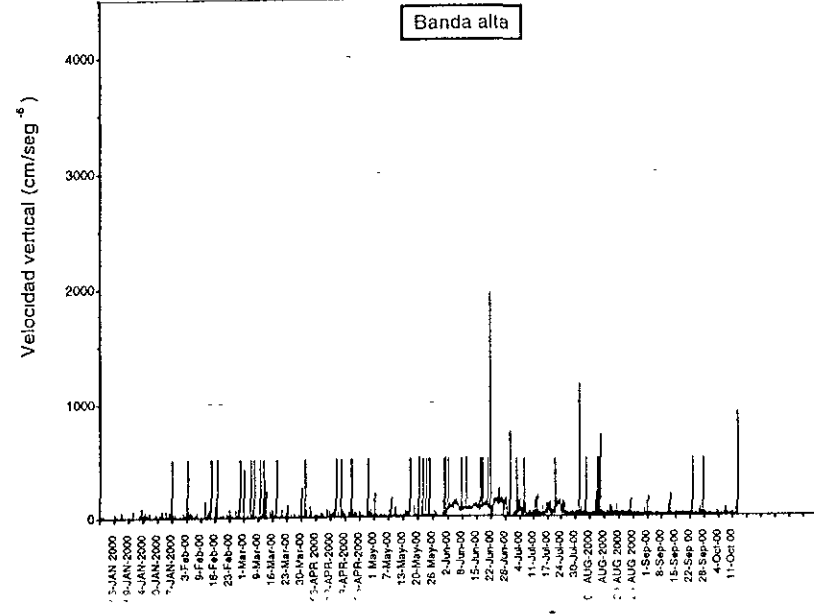
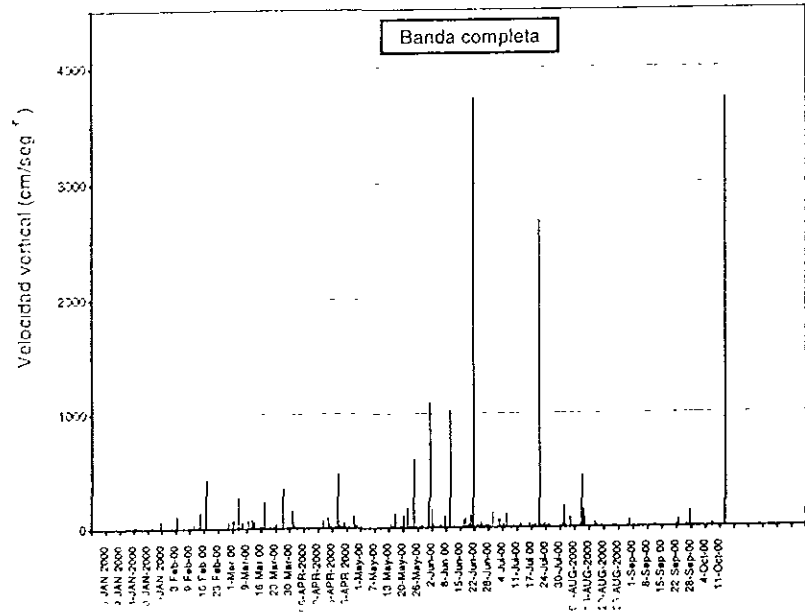
Estación 1, Año 1999



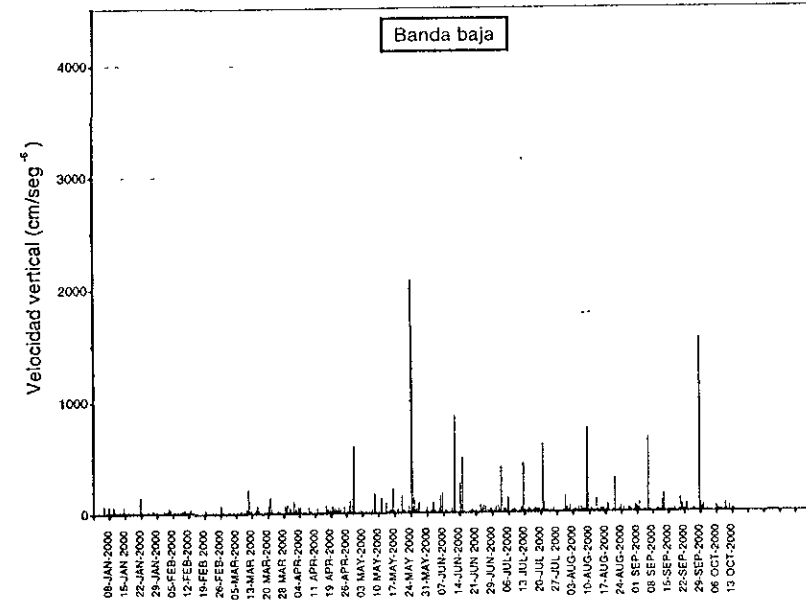
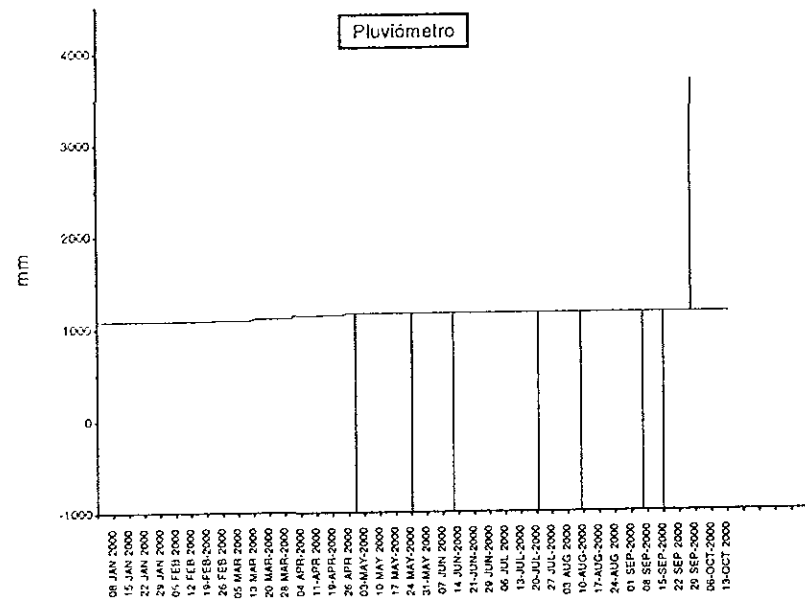
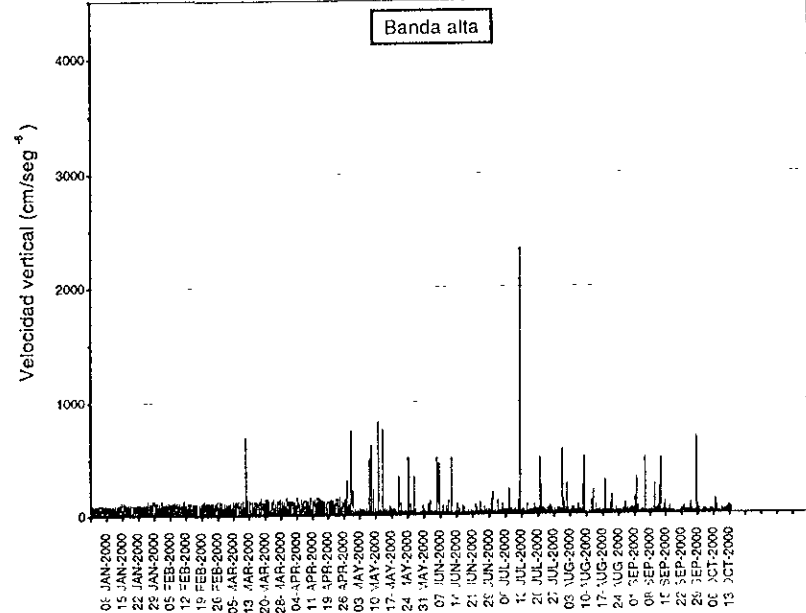
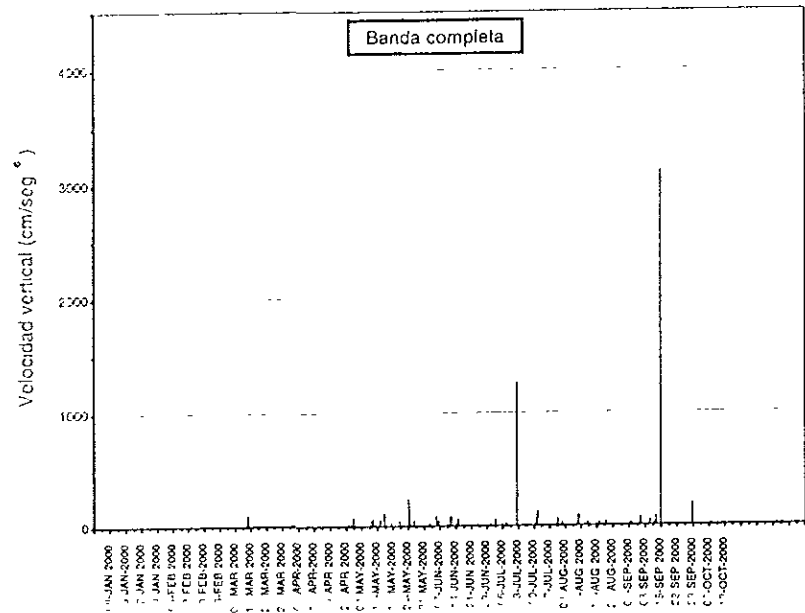
Estación 2, Año 1999



Estación 3, Año 1999



Estación 1, Año 2000

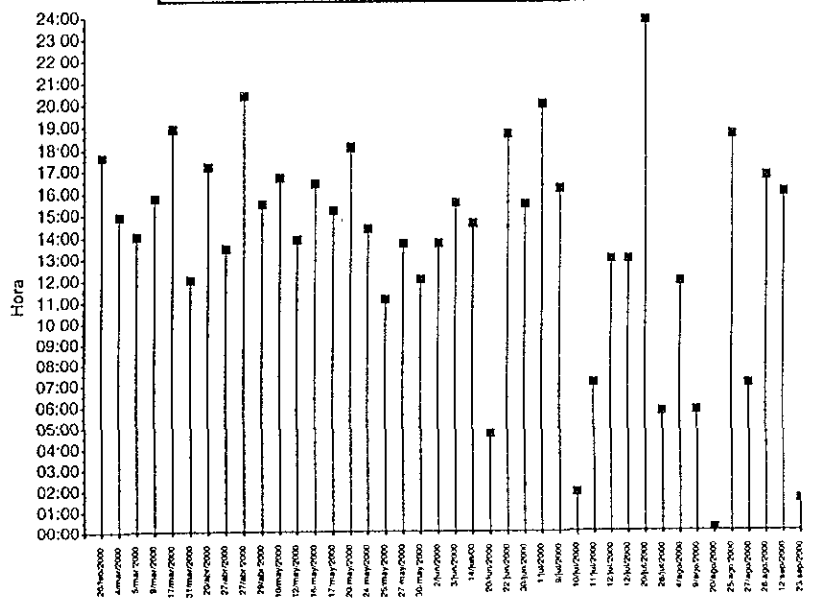
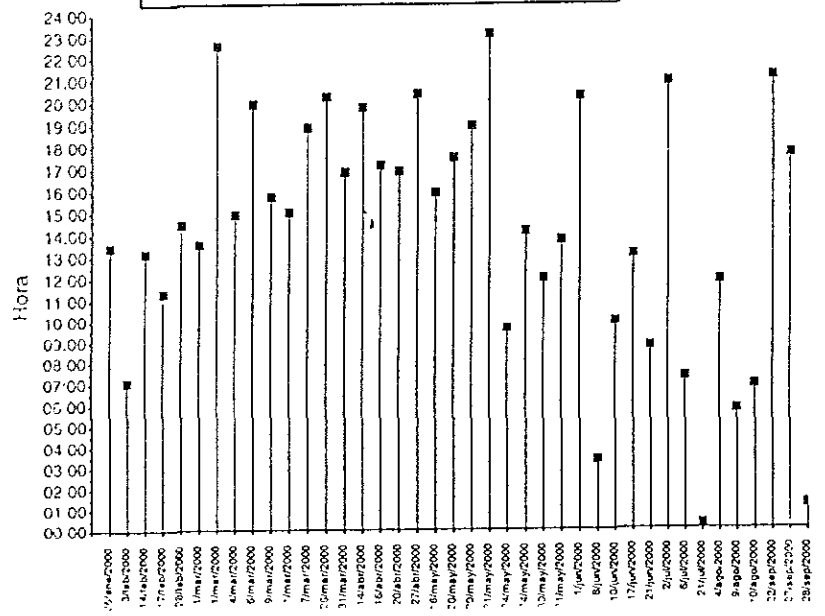


Estación 3, Año 2000

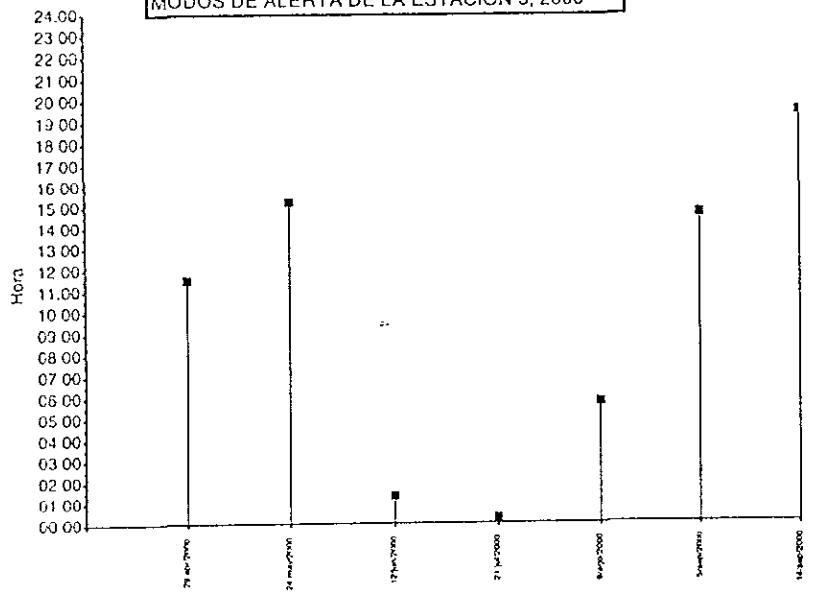
Apéndice 4

Distribución horaria

MODOS DE ALERTA DE LA ESTACION 1, 2000



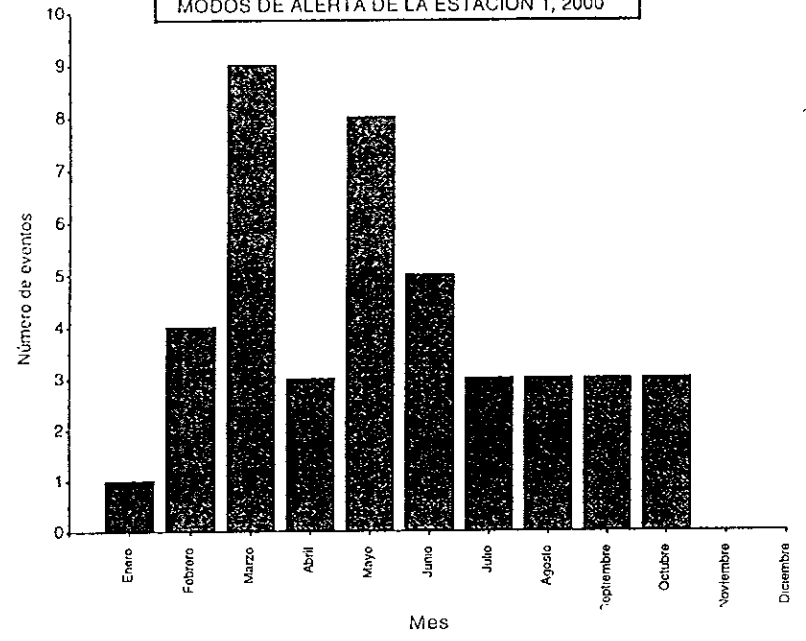
MODOS DE ALERTA DE LA ESTACION 3, 2000



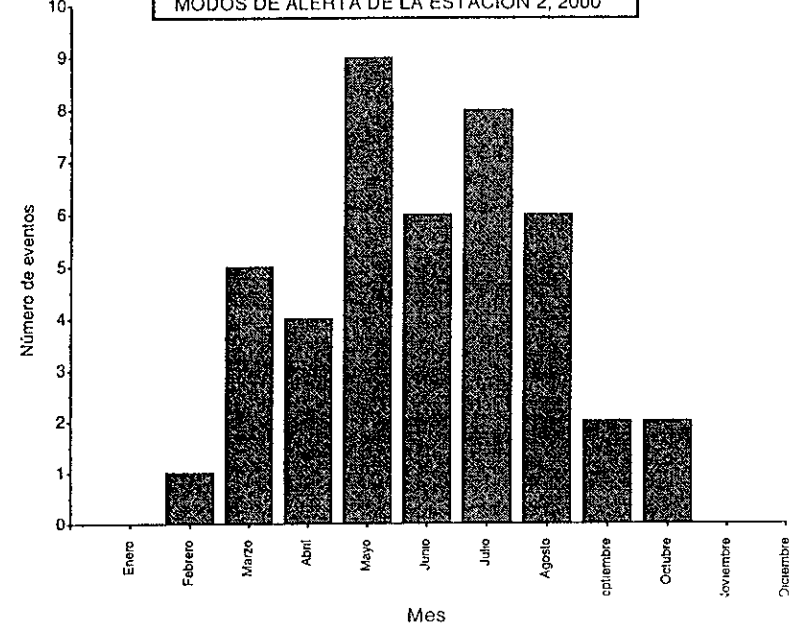
Apéndice 5

Distribución mensual

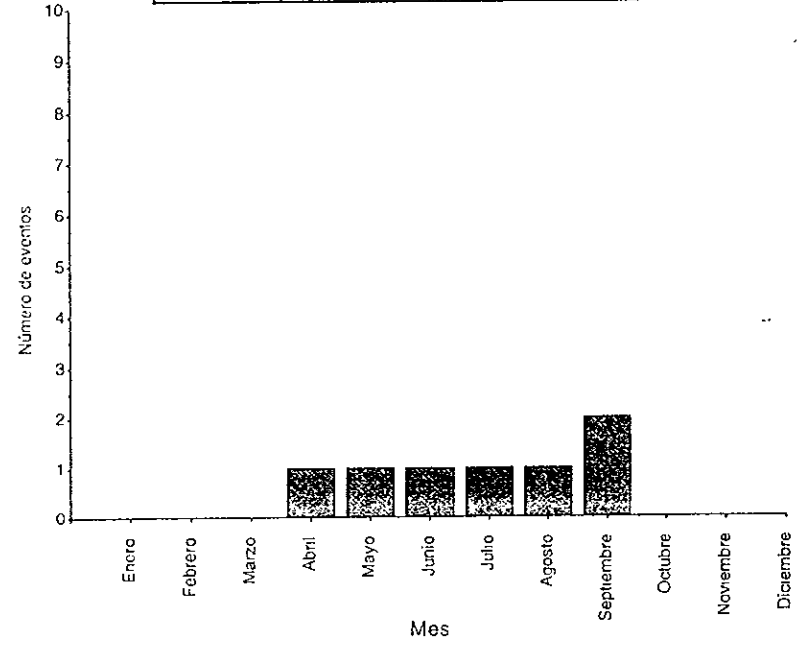
MODOS DE ALERTA DE LA ESTACIÓN 1, 2000

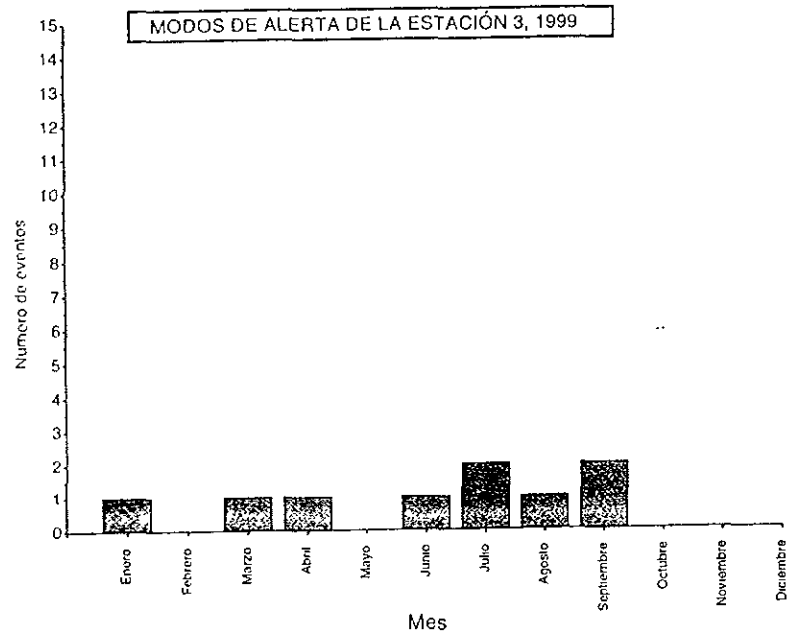
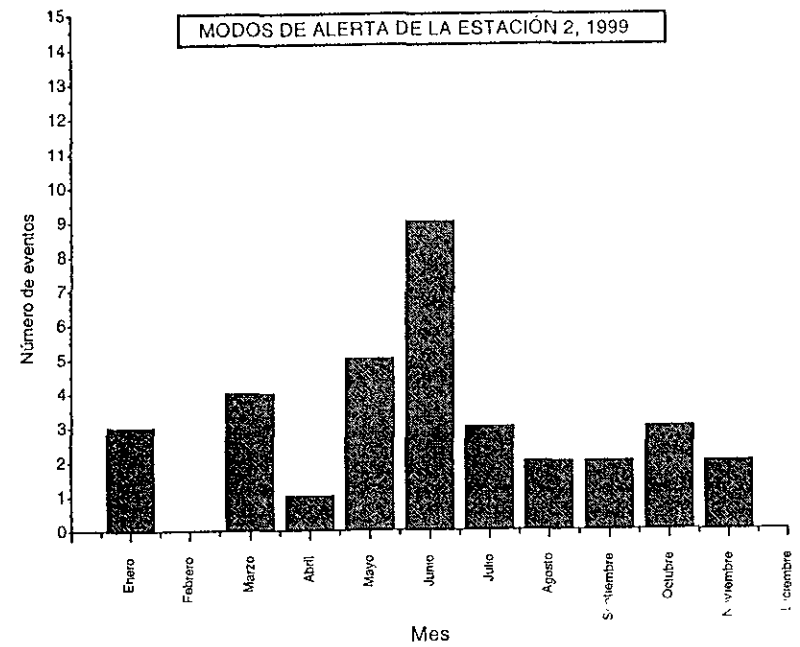
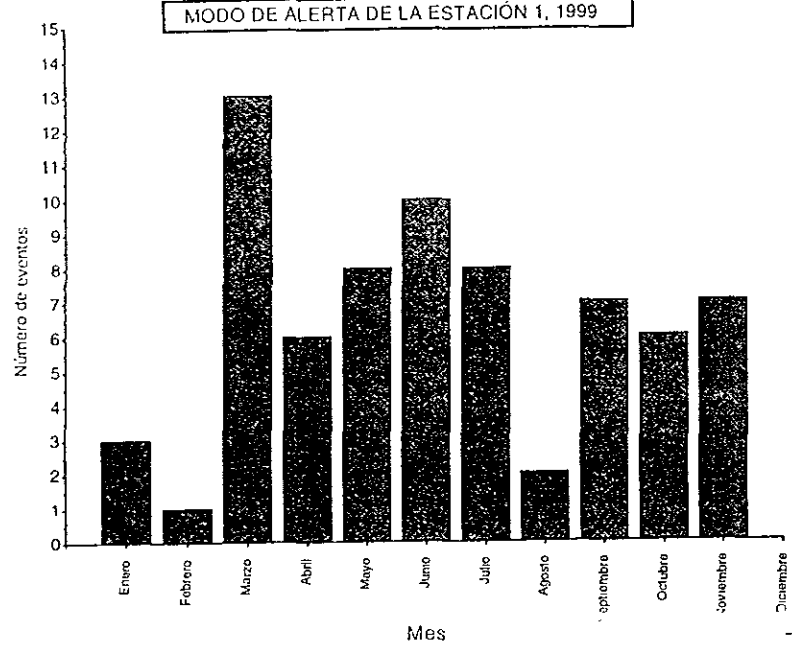


MODOS DE ALERTA DE LA ESTACION 2, 2000



MODOS DE ALERTA DE LA ESTACIÓN 3, 2000





Apéndice 6

Eventos de flujo reconocidos

APÉNDICE 6

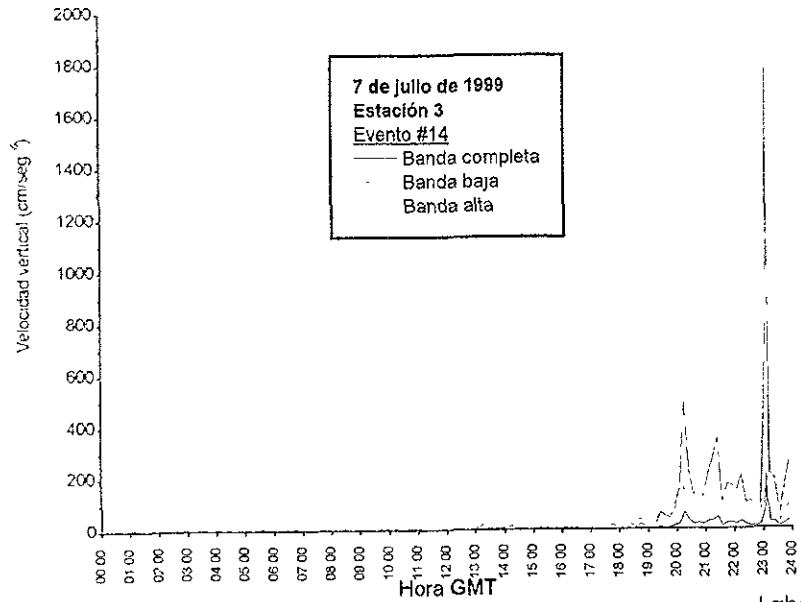
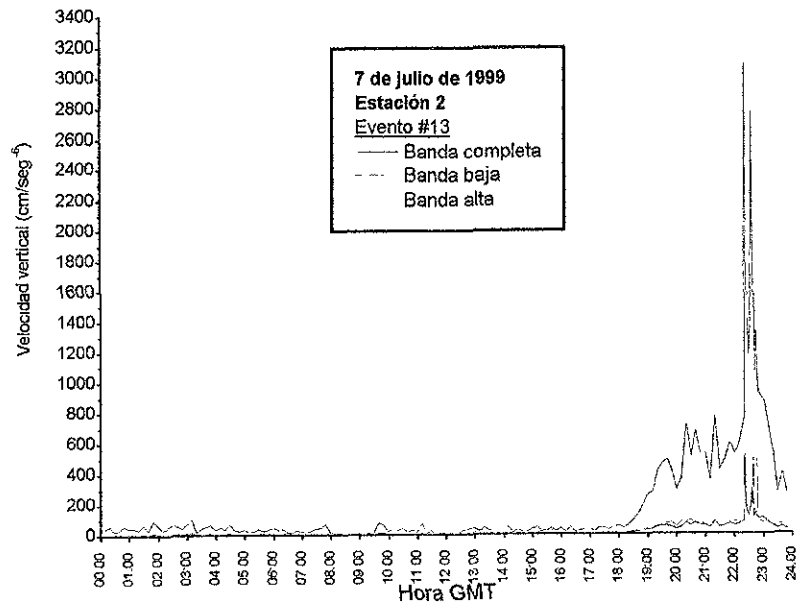
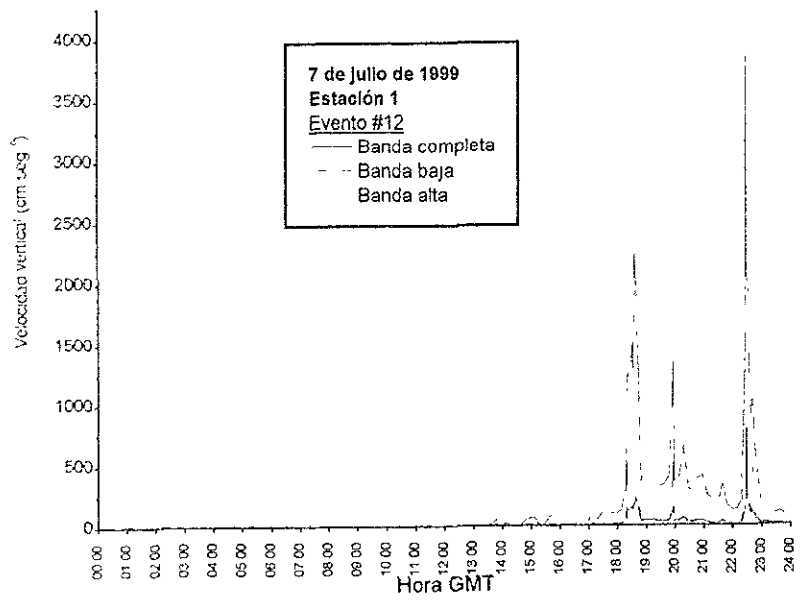
EVENTOS DE FLUJO RECONOCIDOS

Número de evento	Tipo de evento	Hora y fecha local		Hora y fecha GMT		Estaciones de registro		
						1	2	3
1.	A	11 marzo 1999	19:42	12 marzo 1999	01:42	X		
2.	A	14 marzo 1999	18:08	15 marzo 1999	02:14	X		
3.	A	31 marzo 1999	17:43	31 marzo 1999	23:43	X		
4.	A	31 marzo 1999	18:04	1 abril 1999	00:04		X	
5.	A	15 mayo 1999	19:25	16 mayo 1999	01:25	X		
6.	A	26 mayo 1999	12:22	26 mayo 1999	18:22	X		
7.	A	26 mayo 1999	12:27	26 mayo 1999	18:27		X	
8.	A	4 junio 1999	14:14	4 junio 1999	20:14	X		
9.	A	6 junio 1999	18:32	7 junio 1999	00:32		X	
10.	A	27 junio 1999	14:24	27 junio 1999	20:24		X	
11.	A	27 junio 1999	20:25	28 junio 1999	2:25		X	
12.	A	7 julio 1999	12:20	7 julio 1999	18:20	X		
13.	A	7 julio 1999	16:21	7 julio 1999	22:21		X	
14.	A	7 julio 1999	17:06	7 julio 1999	23:06			X
15.	A	6 octubre 1999	21:32	7 octubre 1999	3:27		X	
16.	A	20 abril 2000	16:54	20 abril 2000	22:54	X		
17.	A	20 abril 2000	17:09	20 abril 2000	23:09		X	
18.	A	16 mayo 2000	15:55	16 mayo 2000	21:55	X		
19.	A	17 mayo 2000	15:09	17 mayo 2000	21:09		X	
20.	A	24 mayo 2000	9:39	24 mayo 2000	15:39	X		
21.	A	24 mayo 2000	14:20	24 mayo 2000	20:20		X	
22.	A	24 mayo 2000	15:13	24 mayo 2000	21:13			X
23.	A	25 mayo 2000	11:06	25 mayo 2000	17:06		X	
24.	A	27 mayo 2000	13:40	27 mayo 2000	19:04		X	
25.	A	3 junio 2000	15:30	3 junio 2000	21:30		X	
26.	A	10 junio 2000	9:59	10 junio 2000	15:59	X		
27.	A	1 julio 2000	19:58	2 julio 2000	1:58		X	
28.	A	2 julio 2000	20:53	3 julio 2000	2:53	X		
29.	A	12 julio 2000	12:55	12 julio 2000	18:55		X	
30.	A	25 agosto 2000	18:33	26 agosto 200	00:33		X	
31.	A	5 septiembre 2000	14:37	5 septiembre 2000	20:37			X
32.	B	14 marzo 1999	20:14	15 marzo 99	02:14	X		
33.	B	18 abril 1999	11:30	18 abril 1999	17:30	X		
34.	B	8 mayo 1999	10:22	8 mayo 1999	16:22	X		
35.	B	30 mayo 1999	00:28	30 mayo 1999	06:28	X		
36.	B	5 junio 1999	10:05	5 junio 1999	16:05	X		
37.	B	5 junio 1999	19:42	6 junio 1999	01:42		X	
38.	B	4 julio 1999	13:58	4 julio 1999	19:58	X		
39.	B	17 julio 1999	15:15	17 julio 1999	21:15	X		
40.	B	17 julio 1999	15:41	17 julio 1999	21:41		X	
41.	B	5 agosto 1999	09:42	5 agosto 1999	15:42		X	
42.	B	5 agosto 1999	19:16	6 agosto 1999	01:16		X	
43.	B	29 agosto 1999	17:04	29 agosto 1999	23:04			X
44.	B	17 junio 2000	13:05	17 junio 2000	19:05	X		
45.	B	22 junio 2000	18:37	23 junio 2000	00:37		X	
46.	B	9 julio 2000	16:09	9 julio 2000	22:09		X	
47.	B	21 julio 2000	00:45	21 julio 2000	06:15	X		
48.	C	5 mayo 1999	13:40	5 mayo 1999	19:40	X		
49.	C	5 mayo 1999	15:32	5 mayo 1999	21:32		X	

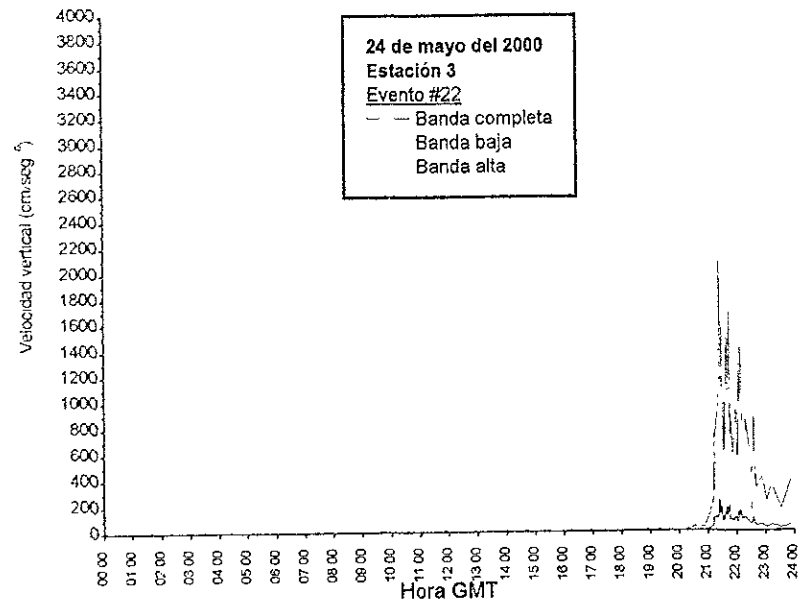
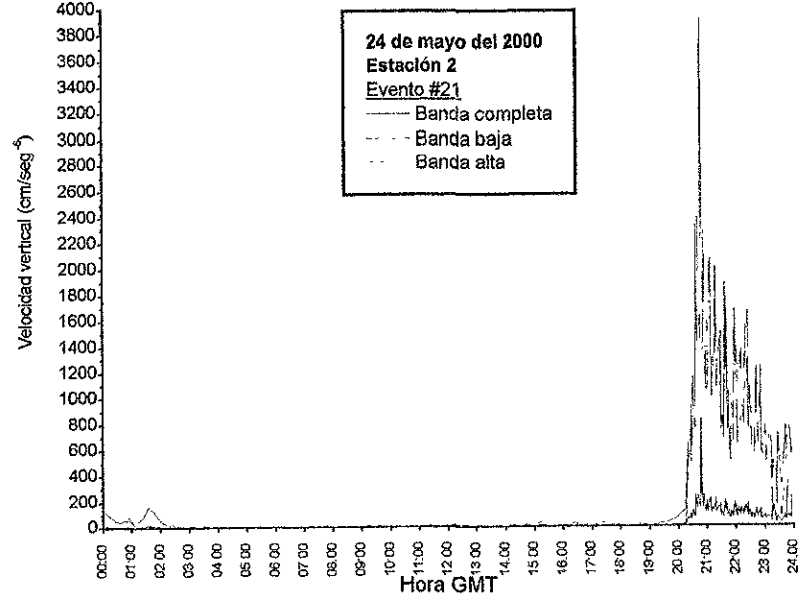
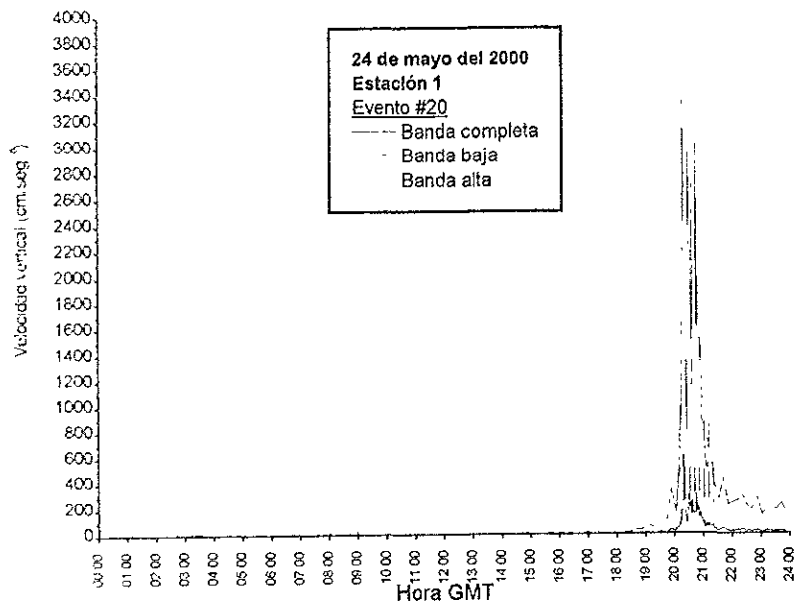
50.	C	15 junio 1999	14:44	15 junio 1999	20:44	X		
51.	C	15 junio 1999	14:44	15 junio 1999	20:44		X	
52.	C	16 junio 1999	13:28	16 junio 1999	19:28	X		
53.	C	16 junio 1999	14:00	16 junio 1999	20:00		X	
54.	C	16 junio 1999	15:02	16 junio 1999	21:02			X
55.	C	25 junio 1999	08:21	25 junio 1999	14:21	X		
56.	C	25 junio 1999	09:12	25 junio 1999	15:12		X	
57.	C	9 septiembre 1999	12:24	9 septiembre 1999	18:24	X		
58.	C	9 septiembre 1999	12:47	9 septiembre 1999	18:47		X	
59.	C	9 septiembre 1999	15:57	9 septiembre 1999	21:47			X
60.	C	30 septiembre 1999	10:34	30 septiembre 1999	16:34	X		
61.	C	30 septiembre 1999	10:35	30 septiembre 1999	16:35		X	
62.	C	30 septiembre 1999	10:36	30 septiembre 1999	16:36			X
63.	D	21 enero 1999	12:45	21 enero 1999	18:45	X		
64.	D	22 enero 1999	11:01	22 enero 1999	17:01	X		
65.	D	22 enero 1999	15:57	22 enero 1999	21:37		X	
66.	D	28 enero 1999	10:22	28 enero 1999	16:22			X
67.	D	19 marzo 1999	18:40	20 marzo 1999	00:40	X		
68.	D	23 marzo 1999	11:17	23 marzo 1999	19:17	X		
69.	D	28 abril 1999	04:59	28 abril 1999	10:59	X		
70.	D	7 mayo 1999	9:06	7 mayo 1999	15:06	X		
71.	D	16 junio 1999	19:28	17 junio 1999	01:28	X		
72.	D	26 junio 1999	13:15	26 junio 1999	19:15	X		
73.	D	12 julio 1999	13:15	12 julio 1999	15:01	X		
74.	D	13 julio 1999	02:06	13 julio 1999	08:06	X		
75.	D	26 julio 1999	11:51	26 julio 1999	19:15		X	
76.	D	13 septiembre 1999	11:24	13 septiembre 1999	17:24	X		
77.	D	15 noviembre 1999	10:55	15 noviembre 1999	16:55	X		
78.	D	17 noviembre 1999	11:32	17 noviembre 1999	17:32	X		
79.	D	20 noviembre 1999	09:42	20 noviembre 1999	15:42	X		
80.	D	4 diciembre 1999	01:45	4 diciembre 1999	07:45	X		
81.	D	20 diciembre 1999	01:29	20 diciembre 1999	07:29	X		
82.	D	3 febrero 2000	07:05	3 febrero 2000	13:05	X		
83.	D	26 febrero 2000	17:39	26 febrero 2000	21:39		X	
84.	D	31 marzo 2000	16:51	31 marzo 2000	22:52	X		
85.	D	31 marzo 2000	12:01	31 marzo 2000	18:01		X	
86.	D	21 mayo 2000	23:07	22 mayo 2000	05:07	X		
87.	D	31 mayo 2000	13:46	31 mayo 2000	19:46	X		
88.	D	2 junio 2000	13:41	2 junio 2000	19:41		X	
89.	D	21 junio 2000	08:46	21 junio 2000	14:46	X		
90.	D	20 julio 2000	23:47	21 julio 2000	05:47		X	
91.	D	12 septiembre 2000	15:56	12 septiembre 2000	21:56		X	
92.	D	2 octubre 2000	12:09	2 octubre 2000	18:09		X	
93.	D	13 octubre 2000	09:34	13 octubre 2000	15:34	X		

Apéndice 7

Gráficas de los eventos de flujo más importantes



Lahar del 7 de julio de 1999



Lahar del 24 de mayo del 2000