



10
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DIVISION DE CIENCIAS DE LA TIERRA

COMPORTAMIENTO DE FRECUENCIAS PICO DE
EVENTOS LP (PERIODO LARGO) REGISTRADOS
DURANTE 1998 EN EL VOLCAN POPOCATEPETL

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERA GEOFISICA
P R E S E N T A
MIRYAM ORTIZ OSORNIO



CIUDAD UNIVERSITARIA,

OCTUBRE DEL 2001



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



REPUBLICA NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-1641

SRITA. MIRYAM ORTIZ OSORNIO
Presente

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

COMPORTAMIENTO DE FRECUENCIAS PICO DE EVENTOS LP (PERIODO LARGO)
REGISTRADOS DURANTE 1998 EN EL VOLCAN POPOCATEPETL

- I INTRODUCCION
- II PARAMETROS DE MONITOREO VOLCANICO
- III INSTRUMENTACION SISMICA EN EL VOLCAN
POPOCATEPETL
- IV OBTENCION Y ANALISIS DE FRECUENCIAS PICO Y
CORRELACION CON OTROS PARAMETROS SISMICOS
- V CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFIA

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

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

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cd. Universitaria, D. F., a 23 de noviembre de 2000

EL DIRECTOR

~~ING. GERARDO FERRANDO BRAVO~~

GFB*RLLR*gtg

RS

“From the top of the mountain to the shore of the sea ... everything is in a state of change. “

(tomado de *Theory of the Earth* de James Hutton, Edinburgo, 1795)

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, a quienes debo todo, gracias por darme la oportunidad...

A María mi madre, quién me enseñó a luchar, a no vencerme y a caminar siempre de frente hacia el futuro.

A Dámaso mi padre, por darme tantos valores y enseñarme sobre todo a defenderlos, por ser tan objetivo.

A mis hermanos Alejandro y Edgar, el conservador y el anarquista, porque sé que están ahí a cada paso que doy, por compartir toda una vida.

A mis primitas Mini y Pini, y desde luego a mis tíos, mil gracias por apoyarnos tanto.

A Beto, por ser tan incondicional, por jamás haberme perdido la fe y sobre todo por ser el apoyo más consistente, sabes que te debo medio título.

A George, Berny y Jorgillo por compartir tantos momentos agradables y porque no, también por aquellos que fueron tristes. Gracias chicos.

A Tair y Richard, sin ustedes la carrera hubiera sido impensable, gracias por hacérmela más ligera.

A Javo por obligarme a dominar un poquitito ése carácter tan mío.

A Deby por ser mi mejor amiga

A Eva, Elia y Armando, por hecharme tantas porras.

A Dan, por enseñarme la inmensidad de razones por las que se puede valorar la vida, por ayudarme a ser feliz

Y desde luego al Dr. Carlos Valdés quién nunca tiró el guante, aunque estoy segura de que deseo hacerlo en cientos de ocasiones. Mil gracias, me parece que es un verdadero ejemplo para la vida.

En fin, a todas ésas personas que de una u otra manera apoyaron a éste logro, y que sería imposible enlistar sin hacer exclusiones

Que mi felicidad sea de ustedes

I. INTRODUCCIÓN

El estudio de aparatos volcánicos cumple con misiones más sobresalientes que el entendimiento científico de los fenómenos volcánicos, la perspectiva es reducir los daños que una erupción puede acarrear a nuestra sociedad. Es bien sabido que el porcentaje mundial de decesos por fenómenos geológicos es mucho menor que el de accidentes de cualquier otro tipo, pero aún así, cuando se observan "cifras" es imposible ignorar la idea de que esos números son vidas humanas.

Tan solo en la explosión del Nevado del Ruiz, Colombia en 1985 murieron más de 22,000 personas, principalmente por la mala organización de las autoridades y un deficiente monitoreo del aparato (Scarth, 1994). También recuérdese que una erupción del Vesubio, Italia (72 a.C.) sepultó por completo la ciudad de Pompeya; y que en 1980, en el Mount St. Helens (Washington, EU) tuvo lugar una de las erupciones más aparatosas que se hayan observado, aún así, el constante y abundante monitoreo ayudaron a que *la destrucción del cráter no conllevara a un número elevado de pérdidas humanas*. Una erupción no solo causa daños en las regiones vecinas al volcán, sino que en ocasiones las nubes de gases expulsadas pueden ser acarreadas por el viento y llevadas a zonas alejadas del aparato, como es el caso del Chichonal, México que en 1982 produjo una erupción cuyos gases recorrieron enormes distancias provocando *cambios climáticos*. Todos los desastres naturales son estudiados en la actualidad con el fin de prevenirlos, ya que no se puede evitar su ocurrencia.

El Popocatepetl es un estratovolcán con una altura de aproximadamente 5452 msnm, tiene un cráter de 900 m de diámetro con una profundidad aproximada de 200 m, y está compuesto de material andesítico. Este tipo de volcanes suelen ser extremadamente explosivos. Su reactivación en 1994, la localización de más de doce poblaciones en las faldas del volcán y su corta distancia a ciudades importantes, como lo son las ciudades de México y Puebla principalmente, hacen evidente el riesgo que la actividad volcánica implica. Muestra de ello son las recientes explosiones del volcán, durante la primera quincena de diciembre del 2000, periodo en el que fueron desalojados cerca de 43,000 habitantes de las comunidades cercanas al volcán. De hecho la Cd. de México y los Estados de Puebla, Tlaxcala y Morelos, fueron alertados ante la posibilidad de lluvias de ceniza provenientes de las explosiones, que afortunadamente no ocurrieron.

Dado lo anterior, no resulta difícil entender por qué la necesidad de un monitoreo continuo y los constantes intentos por descifrar el comportamiento del aparato, principalmente en etapas críticas. Entre los sistemas de monitoreo que han sido más constantes desde la reactivación del volcán hasta la fecha, destacan los de deformación y el monitoreo sísmico, coordinados principalmente en el CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres).

Específicamente, la Red de Monitoreo Sísmico, cuyas características se describen en el interior de éste trabajo, ha proporcionado datos importantes para el estudio del aparato. Uno de ellos es la aparición típica de enjambres de eventos de periodo largo (LP) que han precedido a fuertes explosiones. La ocurrencia de LPs no se da únicamente en periodos explosivos, sino que éste tipo de eventos son los que con mayor abundancia genera el volcán. Actualmente se cuenta con diversas estaciones de registro sísmico, equipadas con aparatos de banda ancha y periodo corto siendo dominante el número

de estaciones del segundo tipo; desigualdad que es consecuencia de la diferencia en costo de los equipos, siendo los de periodo corto aproximadamente 10 veces más baratos que los de banda ancha.

La información obtenida a lo largo de seis años de registro indica que los eventos más comunes son del tipo LP (Carlos Valdés, comunicación personal). El objetivo de la tesis es aprovechar la información que los eventos de tipo LP arrojan respecto a prevención de periodos explosivos. La sugerencia es hacer un estudio sencillo del comportamiento temporal de las frecuencias pico obtenidas de los eventos LP, registrados específicamente con estaciones de periodo corto. Varios autores (Chouet, 1996; Lahr et al, 1994; Nakano et al, 1998) han demostrado que las características temporales y espectrales de dichos eventos se deben principalmente al efecto de la fuente. En numerosos estudios de volcanes (Chouet, 1996; Chouet et al, 1994; Lahr et al, 1994; Power et al, 1994; Gil Cruz et al, 1997) también se ha observado la presencia de eventos tipo LP antes de etapas explosivas. En estudios más recientes, se ha encontrado que el contenido energético de los eventos LP suele concentrarse en una banda de frecuencias bien definida conforme se aproxima una explosión (Chouet et al, 1994). Algunos autores han usado el espectro del sismograma para diferenciar tipos de eventos volcánicos, siendo característica la frecuencia pico (Chouet, 1996; Nakano et al, 1998). El comportamiento de frecuencias pico obtenido para el Popocatepetl, permite identificar bandas frecuenciales que pueden definirse mejor antes de la ocurrencia de una explosión importante.

El estudio se hizo para un año, el de 1998, en el que ocurrieron siete explosiones importantes. Se observaron cambios en el comportamiento de las frecuencias pico que indican posibilidad de explosión. Los cambios se presentan en bandeamientos de las frecuencias pico. Se estudió también el comportamiento de los bandeamientos con rectas de ajuste, se observó la ocurrencia diaria de eventos pertenecientes a las bandas encontradas y finalmente se comparó el comportamiento de las frecuencias con localizaciones en profundidad de eventos vulcanotectónicos, que se relacionan con fracturamiento del material sólido (Chouet et al, 1996; Lahr et al, 1994; Chouet et al; 1994)

II. PARÁMETROS DE MONITOREO VOLCÁNICO

Se llama monitoreo volcánico a la tarea de mantener una vigilancia regular sobre aquellos parámetros que expresan cambios en la actividad del aparato volcánico. La correcta interpretación de estos cambios, es un factor indispensable para el pronóstico o predicción de un evento catastrófico.

Los parámetros que usualmente se relacionan con la actividad volcánica son los originados por la sismicidad, deformación del terreno y también aunque en menor grado, cambios geoquímicos en el sistema geotérmico del volcán. En realidad, existen varios parámetros cuya interpretación puede usarse como premonitor de una erupción. Tal es el caso del monitoreo de variaciones geoelectricas, geomagnéticas y de microgravedad, sin embargo éstas siguen siendo objeto de estudio y su utilidad no ha sido completamente comprobada en un evento eruptivo (Banks et al, 1993).

Es importante señalar, que no existe un modelo a seguir en el caso de ningún parámetro y que lo único que arrojan los avances de las técnicas son algunas estrategias que pueden servir para establecer modelos tentativos en cada volcán, así como ayuda en la elección de los parámetros más convenientes.

El monitoreo volcánico puede ser continuo si se instalan equipos que registren mediciones de manera permanente en un largo intervalo de tiempo (varios años); o periódico, si se instalan equipos por intervalos de tiempo determinados, estos equipos suelen ser portátiles. Se acostumbra usar el segundo para evaluar el riesgo de reactivación de un volcán, la tasa de incremento de actividad no peligrosa hacia una que sí lo es, o bien para probar sistemas o métodos de medición en volcanes activos pero sin riesgo. Es aconsejable el monitoreo continuo en volcanes con intensa actividad y cuya historia eruptiva indique daños en la población.

El volcán Popocatepetl se considera de alto riesgo debido a su cercanía a zonas de alta densidad de población, como la Cd. De México, Puebla y un gran número de poblados ubicados en las faldas y zonas aledañas a éste, un cálculo aproximado de ésta densidad en un radio de 80 km es de 25 a 30 millones de personas. Por ello, se han hecho innumerables esfuerzos por mantener un monitoreo continuo de los principales parámetros de deformación del suelo y sismicidad, además de estudios y monitoreo periódico con métodos que aún están a prueba. Sin embargo, esto no nos libra del peligro latente que la reactivación de este volcán significa; de modo que se siguen buscando parámetros que ayuden a identificar una erupción con tiempo suficiente y evitar una tragedia.

Así mismo, es de gran importancia la correcta interpretación que se haga de los datos obtenidos; porque de ellos dependen las decisiones que sean tomadas ante un posible evento catastrófico. Los apartados de éste capítulo se abocan a las técnicas del monitoreo volcánico, los resultados que se obtengan son independientes en cada aparato volcánico, pero las técnicas deben ser correlacionables en el mismo aparato

11.1 Deformación del suelo

La actividad volcánica suele llevar consigo deformaciones en la superficie del volcán, que en ocasiones preceden a las erupciones. Las deformaciones se presentan como hinchamientos, hundimientos, fallas, fracturas y/o fisuras principalmente, provocando desplazamientos verticales y/o horizontales que pueden ser medidos y registrados para estimar las deformaciones y compararlas en el tiempo. De este modo se puede ayudar a definir el tamaño de la fuente magmática, sus conductos, contenido de volátiles, tasa de reabastecimiento y presión de abastecimiento (Banks et al, 1993).

En estos métodos generalmente se usan equipos de topografía y geodesia, aunque también pueden usarse equipos de otras áreas y específicos según los parámetros que se van a registrar. Es común tener monitoreos periódicos por el bajo costo, pero también es muy usado el continuo.

Los desplazamientos verticales se pueden obtener con nivelación de precisión, cambios en la pendiente del volcán y cambios en el nivel del agua cuando se habla de sistemas cercanos al mar, lagunas o similares (Banks et al, 1993; Iwatsubo et al 1993).

La nivelación de precisión es una técnica topográfica que consiste en medir el cambio de elevación de un punto respecto a un sitio base. Se recomienda por su precisión y porque el equipo es fácil de adquirir; sin embargo en volcanes donde la pendiente es muy fuerte, implicaría mayor número de paradas y tiempo (Banks et al 1993).

El registro de los cambios en la pendiente del volcán actualmente es muy usado, pero sus inicios son de principios del siglo XX cuando en Japón y Hawai se usó un sismógrafo de péndulo horizontal. En 1947 Hagiwara diseñó un inclinómetro de tubo con el que se pudieron obtener mediciones eliminando los problemas de inestabilidad de los hitos. Actualmente se usan dos tipos de configuraciones: 1) húmedas, si utilizan la autonivelación de un fluido y 2) secas, cuando usan un nivel óptico de precisión; ambas son métodos periódicos de medición. La precisión que pueden alcanzar estos métodos llega a ser de tan solo cuatro microradianes. La inclinometría es más confiable, porque se ve menos afectada por los cambios climáticos (Banks et al 1993)

La aplicación de las configuraciones consiste en tomar áreas tan grandes como el método y el terreno lo permita (desde algunos metros hasta 200 m). Las áreas se delimitan con hitos de medición, y el conjunto de datos indica los cambios en la pendiente del volcán. No todas las configuraciones pueden ser usadas en pendientes fuertes, por lo que hay que tener cuidado en la selección de ellas; además que preferiblemente se debe contar con sitios que tentativamente se caracterizan como representativos de los cambios importantes en el estado de la actividad volcánica.

Un monitoreo continuo de la deformación requiere de aparatos automatizados para obtener las lecturas, como son los inclinómetros electrónicos. Las lecturas de estos inclinómetros son muy confiables, porque no se ven afectadas por cambios atmosféricos y su resolución es mucho mejor que las de los métodos mencionados con anterioridad. El inconveniente del monitoreo continuo es el costo elevado del equipo tanto en adquisición como en mantenimiento, además de que las dimensiones de las áreas que se

pueden medir, son más pequeñas, por lo que pueden ser interferidas por inestabilidad local.

Hablando ya de sitios de medida, la práctica ha demostrado que en general, los máximos basculamientos se tienen en la cima (Banks et al, 1993, Iwatsubo et al 1993) por lo que se acostumbra, cuando así es pertinente, colocar al menos un sitio de medida en esa zona.

El monitoreo de los cambios en el nivel del agua es útil en islas volcánicas o sistemas volcánicos cercanos a la costa. Los cambios del nivel del mar pueden considerarse absolutos una vez que se han considerado los cambios naturales del nivel del mar. En la mayoría de los casos estos cambios son muy pequeños y graduales por lo que se suelen medir con mareógrafos, transductores u otros instrumentos. Si se usan mareógrafos éstos deben colocarse en un lugar aislado natural o artificialmente de las mareas y cambio eustáticos. Por su parte los transductores cuentan con una gran precisión y su monitoreo es continuo, se colocan en el fondo del mar o en un pozo o laguna cercano a la orilla. Si las mediciones se hacen de forma periódica en vez de continua, los cambios deben ser mayores a los originados de manera natural para que puedan ser registrados.

La deformación del suelo produce además desplazamientos horizontales, que pueden ser medidos con teodolitos, distanciómetros electrónicos (EDM), GPS (Global Positional System), extensómetros y líneas de fractura, fallamiento o fisura. En teoría, un buen monitoreo incluye la combinación de las técnicas, pero particularmente el EDM ha sido ampliamente usado por su buena resolución, inclusive a grandes distancias. Por su parte, los GPS están teniendo gran auge y buenos resultados. La importancia del uso en el monitoreo de la deformación de éstos dos sistemas les da especial atención, por lo que en los párrafos siguientes se hablará un poco más de ellos.

Los EDM miden la distancia entre dos hitos por medio de la transmisión de un rayo láser que va desde un hito a otro situado como "blanco" o reflector. El tiempo que tarda el rayo en ir al reflector y regresar al hito de transmisión es proporcional a la distancia entre los hitos. Los hitos se colocan en líneas radiales que parten de la cumbre hacia las faldas del volcán y que se encuentran interconectadas triangularmente en las laderas por otros hitos; además debe haber otros hitos base ubicados en sitios retirados que sean estables. La colocación de hitos base, desde luego implica mucho mayor costo, por lo que puede ser sustituido por solo unos EDM móviles que sean trasladados a los hitos base y efectuar las mediciones; esto último disminuye la precisión pero tiene buen funcionamiento (Banks et al, 1993; Iwatsubo et al 1993).

Configuraciones de EDM se han establecido en volcán Pagan, Islas Marianas; volcanes Mayon y Bulusan, Filipinas; y el Nevado del Ruiz, Colombia. En Mount St. Helens una configuración muy completa de EDM se utilizó para detectar el hinchamiento del cráter con éxito antes de la gran erupción de 1980 (Banks et al, 1993; Dzurin, 1993). En el Popocatepelt existe una red de cuatro EDM, que abarca la parte norte del volcán y las mediciones se hacen con un sistema remoto desde CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). Estas mediciones constan de un promedio obtenido en cada estación, después de haber realizado treinta mediciones continuas. Éste último sistema, ha sido desarrollado en conjunción por PUMA (Programa Universitario del Medio Ambiente) y CENAPRED.

Por otro lado, el monitoreo con GPS se desarrolla de forma continua por medio de transmisores de ondas de radio que son percibidas por los 4 satélites más cercanos al sitio de medida, de los 24 satélites con los que cuenta el sistema (USGS,1999). Con éstos cuatro satélites y de acuerdo al tiempo de transferencia de la onda, se puede posicionar el sitio con una precisión de tan solo algunos metros tanto horizontal como verticalmente en la superficie terrestre; las lecturas obtenidas pueden recolectarse por telemetría desde un centro de acopio y trabajarse casi en tiempo real. No obstante, las deformaciones del suelo en un edificio volcánico suelen ser de hasta solo algunos milímetros. El error en las medidas obtenidas con GPS puede disminuirse colocando varias estaciones en el volcán y haciendo simultáneamente lecturas durante un día para corregir por efectos atmosféricos, lo que generaría un error de tan solo unos milímetros.

El uso de GPS resulta eficiente en el monitoreo de estratovolcanes, porque las estaciones no necesitan tener visibilidad entre ellas; lo único necesario es que cada sitio tenga la mejor visibilidad hacia el cielo, para disminuir los errores en las lecturas. Este método es usado actualmente por muchos observatorios vulcanológicos en el que se incluye el del Popocatepetl, en éste caso la red GPS se conoce como DefNet (IG,1999), y se encuentra dentro del programa UNAVCO del USGS (United States Geological Survey) para monitoreo de volcanes con GPS a nivel mundial. Por otro lado, en 1997 con la ayuda de GPS, se pudo detectar una intrusión en el Kilauea (USGS,1999).

II.2 Sismicidad Volcánica

Los procesos químicos y físicos que ocurren en el interior de un aparato volcánico, son causa de cambios en el estado de esfuerzos en el material sólido o fluido. A su vez, un cambio en el estado de esfuerzos puede generar eventos sísmicos. La fuente de estos eventos es un proceso que puede darse en el material sólido o fluido. Los cambios en presión y temperatura conllevan a flujos de magma que generan movimientos en el subsuelo; por otro lado, la inyección a presión de estos fluidos puede generar fracturas y vibración en los conductos. Ésta es una visión muy general de los procesos que ocurren en un edificio volcánico, y que son los generadores de eventos sísmicos; debe entenderse que el mecanismo llevado a cabo es aun más complejo y que ambos procesos, físicos y químicos, se desarrollan conjuntamente.

Para relacionar los mecanismos de fuente con los registros en superficie, se han elaborado diversos esquemas. Minakami (1960) elaboró una clasificación de eventos basada en su forma temporal y sus mecanismos de fuente inferidos. Esta clasificación es el resultado de la observación de muchas erupciones y de cambios en los procesos eruptivos. En Banks *et al* (1993) se puede encontrar una generalización de las categorías del esquema de Minakami, ésta es comparable con la realizada posteriormente para el volcán Redoubt (Lahr *et al*, 1994) y descrita detalladamente por Chouet (1996). Existen además otras clasificaciones cada una de las cuales responde al aparato volcánico propio del estudio.

Para los fines de éste proyecto nos ha parecido conveniente usar la clasificación de Chouet (1996), en vista de que las características de los eventos registrados en el volcán Popocatepetl se pueden describir con la misma

Seguindo ésta clasificación, los eventos sísmicos pueden ser generados por dos procesos distintos dentro del volcán: uno involucra el movimiento de fluidos y otro tiene origen en el material sólido. De acuerdo al tipo de fuente y sus posibles combinaciones, se han diferenciado cuatro tipos principales de eventos sísmicos: los de periodo largo, los volcano-tectónicos (llamados así para diferenciarlos de los puramente tectónicos), los eventos híbridos y los temblores (Lahr et al, 1994; Chouet, 1996; Chouet et al, 1994; Gil Cruz et al, 1997; Nakano et al, 1998). Se puede llegar a esta diferenciación haciendo un estudio cuidadoso de la forma de los sismogramas en el dominio del tiempo, no obstante es más confiable una comparación de espectros y peridogramas para su correcta identificación (Chouet, 1996)

Los eventos de periodo largo (LP), también llamados así por Banks *et al* (1993), se asocian con la resonancia de los fluidos o la inyección de magma en los conductos, por lo que involucran modos de deformación volumétrica (Chouet et al 1994; Chouet, 1996; Lahr et al, 1994; Gil Cruz et al 1997; Nakano et al, 1998). Se caracterizan por no tener el arribo de la onda P bien definido y el de la onda S muy marcado (Gil Cruz et al, 1997); además, en el dominio del tiempo son muy parecidos a un temblor tectónico, pero se diferencian perfectamente de éstos en su rango frecuencial (Lahr et al, 1994). En el espectrograma suelen observarse dos núcleos frecuenciales correspondientes al arribo de ondas P y S, así como una señal armónica (monofrecuencial) posterior al evento fuerte (Chouet, 1996). Tienen frecuencias dominantes entre 1 y 5 Hz y su contenido de frecuencias va de 1 a 10 Hz (Chouet, 1996; Lahr et a, 1994; Gil Cruz et al, 1997; Nakano et al, 1998). Enjambres de este tipo de eventos se han relacionado con erupciones e intrusiones, que en ocasiones presentan bandas de frecuencia características (Chouet et al, 1994; Lahr et al, 1994; Power et al, 1994; Gil Cruz et al, 1997; Nakano et al, 1998).

En la Figura II.1 se presenta un evento LP típico registrado días antes de una explosión en el mes de septiembre de 1998 en el volcán Popocatepetl. En éste, como en muchos otros registrados se observa que la mayor cantidad de energía se concentra entre 2 y 5 Hz, con una frecuencia pico alrededor de 3Hz. En el peridograma se observa solo un núcleo frecuencial.

Los sismos volcano-tectónicos (VT), reconocidos como Tipo A por Banks *et al* (1993), se originan en la parte sólida y suficientemente rígida del aparato volcánico, se relacionan con fisuras y fracturamiento de las estructuras, debidos a cambios de esfuerzos asociados con actividad magmática (Chouet et al 1994; Chouet, 1996; Lahr et al, 1994; Gil Cruz et al 1997; Nakano et al, 1998). Por ello pueden diferenciarse los que se deben a estructuras profundas y los de estructuras someras (Chouet, 1996). Sus fases P y S son fácilmente reconocibles y en general el arribo de la onda P es impulsivo, lo que es un rasgo fácil de identificar en el dominio del tiempo (Gil Cruz et al, 1997). En muchos casos los eventos VT son indicadores de fuerte actividad volcánica. La diferenciación entre un VT profundo y uno somero se puede realizar fácilmente en el dominio frecuencial, ya que un VT profundo es dominado por una banda ancha debida a ondas P y S, y cuenta con una coda con rango de frecuencias angosto. En el caso de un VT somero el espectrograma se ve fuertemente influenciado por la presencia de ondas superficiales que, originan una banda de frecuencias más angosta, además que su coda en general es más larga que la de un VT profundo (Chouet, 1996) Su contenido de frecuencias se puede extender hasta 20 Hz mostrando frecuencias pico entre 5 y 8 Hz (Lahr et al, 1994; Gil Cruz et al, 1997)

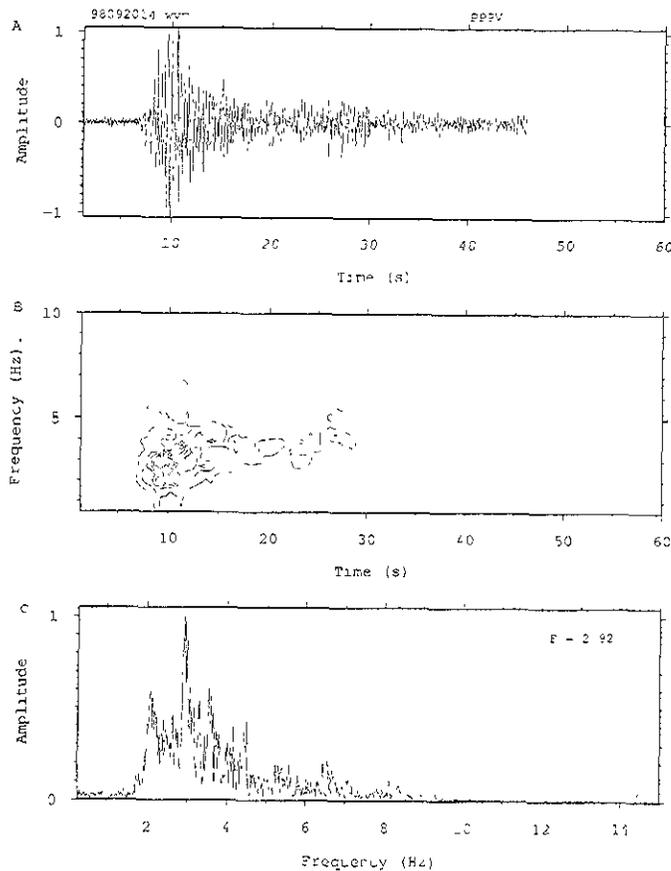


Figura 11.1 Evento de Período Largo (LP) registrado en la estación PPP el día 20 de septiembre a las 21:01 hrs. A) componente vertical del evento, B) peridograma calculado con una ventana móvil de 2.56 s y corrimiento de 75 ms, C) espectro de amplitudes de Fourier F es la frecuencia pico.

Los eventos VT del volcán Popocatépetl pueden alcanzar frecuencias pico de hasta 9 Hz, su contenido energético se distribuye en todo el dominio frecuencial y puede tener varios máximos espectrales importantes (Figura 11.2).

Un evento híbrido, reconocido como Tipo B por Banks *et al* (1993), se define como una combinación entre los dos anteriores. Su origen se atribuye a movimientos en zonas de material semisólido o donde se combinan roca y fluido (Chouet *et al* 1994; Chouet, 1996; Lahr *et al*, 1994; Gil Cruz *et al* 1997; Nakano *et al*, 1998). Por este hecho, su contenido frecuencial contiene rasgos de ambos tipos y su forma en el dominio del tiempo es muy similar a la de un LP. Tienen fases de onda P y S emergentes y difíciles de distinguir (Gil Cruz *et al*, 1997). Se diferencian de un LP principalmente por que la coda de un híbrido no es armónica y sus frecuencias máximas suelen ser mayores que las de un LP, sin embargo el espectrograma de ambos es muy parecido (Chouet, 1996).

Los eventos VT y los híbridos muestran polaridad según la orientación de la estación en tanto que los LP tienen la misma polaridad en todas las estaciones. En teoría los LP, los híbridos y los VT similares tienen origen en la misma región.

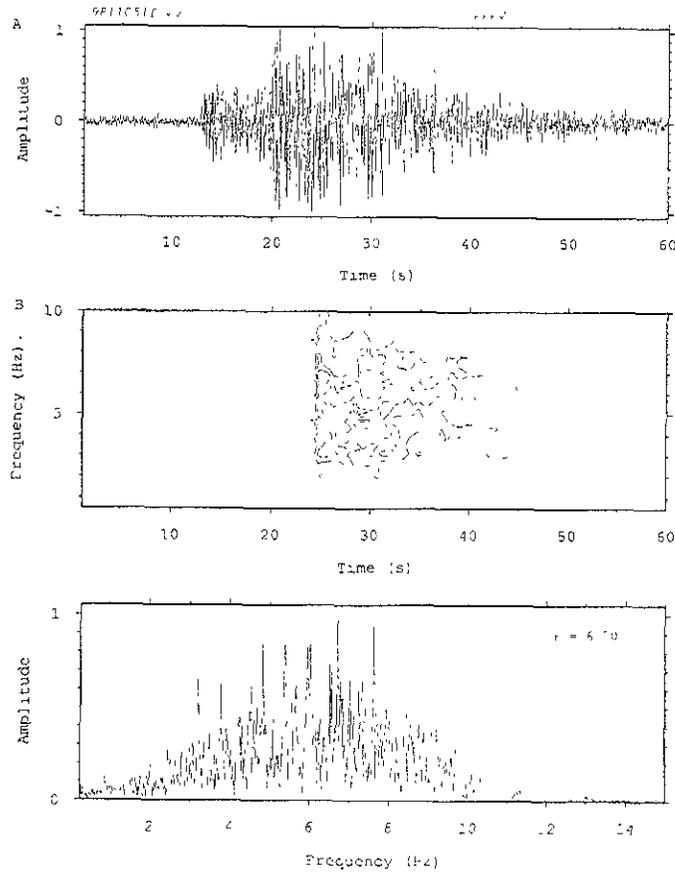


Figura 11.2 Evento Vulcanotectónico registrado en la estación PPP el día 5 de noviembre a las 15:41 hrs. A) componente vertical del evento, B) peridograma calculado con una ventana móvil de 2.56 s y corrimiento de 75 ms, C) espectro de amplitudes de Fourier. F es la frecuencia pico.

El tremor se caracteriza como una señal armónica que puede mantener la misma amplitud por varios minutos, días o hasta meses. También se originan por movimiento del fluido, por lo que en muchas ocasiones tienen las mismas componentes espectrales y temporales de los LP (Chouet et al, 1997; Chouet, 1996; Banks et al, 1993; Leet, 1988;), define al anterior como un tremor armónico. Se dice que si existen cambios significativos en frecuencia y/o amplitud, entonces el evento es un tremor espasmódico. En general, se habla de tremor volcánico cuando existe una señal con una amplitud aproximadamente igual y que se mantiene por un tiempo considerable.

La Figura 11.3 muestra un tremor volcánico en el Popocatepetl, en éste caso se observa un espectro con un marcado contenido energético alrededor de 2 Hz, pero éste puede ser muy variable manteniéndose en los rangos de los LP. Existen otros tremores con un amplio contenido de frecuencias, que muestran espectrogramas más dispersos

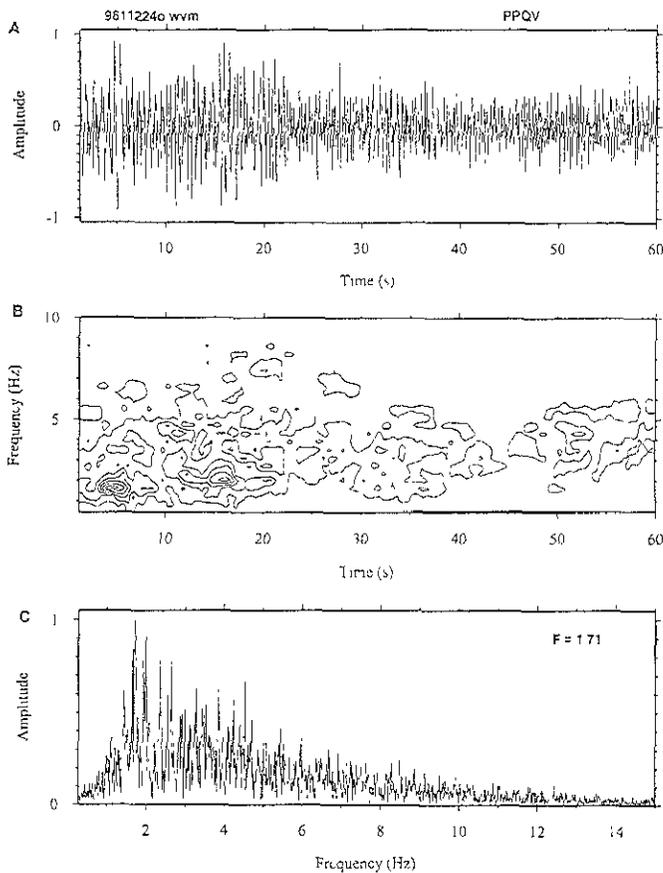


Figura 11.3 Evento de tremor registrado en la estación PPQ el día 22 de noviembre a las 23:54 hrs. A) componente vertical del evento, B) peridograma calculado con una ventana móvil de 2.56 s y corrimiento de 75 ms, C) espectro de amplitudes de Fourier. F es la frecuencia pico.

Para el registro de los eventos se cuenta con una gran variedad de instrumentos que van desde los que registran una componente vertical, dos componentes horizontales o incluso las tres componentes. Existen equipos con capacidad de respuesta de banda ancha o de periodo corto y además se pueden conseguir portátiles o adaptarlos. El registro se puede almacenar en la memoria del instrumento o conectar a una red telemétrica para su registro en papel y en estaciones de trabajo o cualquier otro tipo de almacenador de datos, como un CD-ROM o cintas magnéticas.

La red sismológica del volcán Popocatepetl cuenta básicamente con dos tipos de sismógrafos: de banda ancha y periodo corto. Su número y distribución se detallan en el siguiente capítulo.

II.3 Emisión de gases

La actividad volcánica como ya se ha dicho, depende de diversos factores. La composición del magma y la variación de sus componentes gaseosos debe ser un buen reflejo del estado de la actividad magmática. Hoy día, el estudio de la liberación de gas incluyendo el tipo, es un método de monitoreo del que puede sacarse gran provecho, pero aún falta mucho por estudiar y en gran medida por la instrumentación que se requiere para estudiar tales cambios.

En una degasificación se puede señalar liberación de gases como CO_2 , SO_2 , H_2S , H_2O , HCl y HF solubles en agua, y N_2 , O_2 , H_2 , CO y He , principalmente. El monitoreo de gases en un volcán con fines más predictivos se realiza con dióxido de carbono y dióxido de azufre generalmente. Los gases pueden ser muestreados in situ o medidos indirectamente con sensores y espectrómetros localizados en o cerca de la zona de emisión, que pueden ser fumarolas, fracturas y fisuras con emisiones o en el propio cráter (Sutton et al, 1993 y USGS, 1999).

El muestreo de gas es una técnica bastante laboriosa. Consiste en ir al sitio de emisión con instrumental específico que principalmente incluye tubos de vacío, y tomar una muestra de todo el material gaseoso que se está liberando. Posteriormente, en el laboratorio, se analizan los componentes del fluido y se cuantifican con un espectrómetro. Un gran problema de estas técnicas, es que las emisiones suelen estar en lugares muy riesgosos para el personal que hace las recolecciones, por lo que debe ser cuidadosamente evaluada. Los estudios de laboratorio sirven para estudiar los gases que libera un volcán y además de tener una colección de datos con la que se puede determinar el origen de gases específicos. Un método más seguro aunque mucho menos preciso, es el monitoreo indirecto. En él, se usan sensores que pueden monitorear varios gases a la vez, y espectrómetros para medir la tasa de emisión de SO_2 y CO_2 particularmente (Sutton et al, 1993).

Existen sensores que se colocan en los sitios de emisión y que detectan un número importante de gases, las medidas se realizan automáticamente cada n minutos y se transmiten inmediatamente por telemetría a un centro de acopio de información, por lo que son recibidas casi en tiempo real. Por la secuencia que tienen estas medidas se consideran de monitoreo continuo.

La medida de la tasa de emisión del dióxido de azufre es más común a nivel mundial, ésta se hace normalmente con un espectrómetro de correlación o "COSPEC" por sus siglas en inglés (CORrelation SPECTrometer), pero también puede hacerse con percepción remota. El COSPEC mide la absorción de una longitud de onda de la luz ultravioleta, que es proporcional a la concentración del gas. La absorción se mide en unidades de concentración por distancia recorrida y se calibra con una concentración estándar del aparato; además, debe tomarse en cuenta el factor de velocidad del aire (USGS, 1999). Las medidas son realizadas sobre un plano perpendicular al penacho. El COSPEC puede colocarse en una avioneta de dos maneras: 1) bajo un ala fija y se sobrevuela sobre el penacho para obtener las muestras (Sutton et al, 1993), ó 2) se coloca el espectrómetro en el lugar de una ventanilla y se vuela bajo la pluma para hacer las mediciones. También pueden hacer mediciones terrestres p. ej. en una camioneta que pase por debajo del penacho o con trípode con el que se pueda mover el espectrómetro a varios

ángulos. La tasa de emisión que se registra es un promedio de varias medidas realizadas consecutivamente y a diferentes ángulos.

Mediciones terrestres de emisión de SO_2 se hacen en el Popocatepetl a intervalos regulares cada tres días y los valores que han obtenido oscilan entre 1000 y hasta 50,000 toneladas diarias. El registro de éstas mediciones para el año de 1998 se puede observar en la figura II.4.

Para medir la tasa de emisión de CO_2 se usa un espectrómetro conocido como LICOR, éste mide la absorción de luz infrarroja que es emitida por el propio espectrómetro. En ésta técnica las mediciones se hacen dentro de la fumarola por lo que sólo pueden ser aéreas, se hacen en ángulo recto a la fumarola igual que las anteriores. El método se ha usado en Mount St. Helens y en Hawaii y fue usado por primera vez en el Popocatepetl durante 1995 por los científicos del USGS (United States Geological Survey) (USGS,1999).

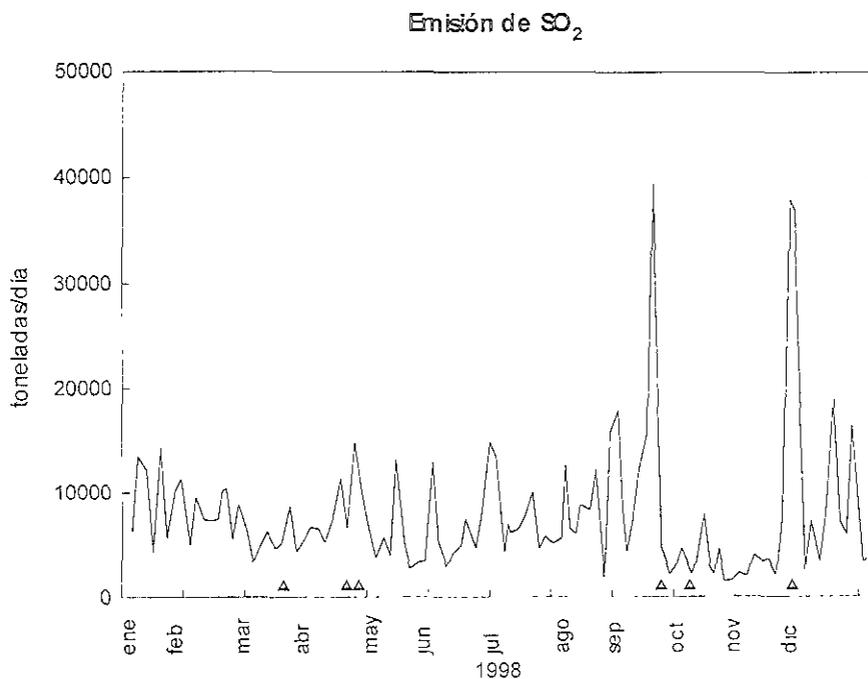


Figura II.4 Emisión de SO_2 durante 1998 (tomada de la base de datos del CENAPRED). Los indicadores negros son las fechas de las explosiones

Un método innovador es el espectrómetro que usa la transformada de Fourier (FTIR) para medir la tasa de emisión de CO_2 . Se usa de dos maneras: 1) para diferenciar entre la luz solar y la luz generada por filamentos de dióxido de carbono y 2) para diferenciar entre gas perteneciente a la fumarola o a la pluma, con ayuda de una celda interna en el FTIR (USGS,1999).

Estudios recientes han demostrado que el dióxido de carbono también puede muestrearse en el suelo, ya que el gas de los conductos suele filtrarse en el terreno en grandes extensiones. En Mammoth Mountain, California, se logró obtener un mapa de

zonas con alto contenido de CO₂. El fenómeno se relaciona con estructuras que tienen contacto con la superficie y permiten así la transferencia de gases del magma hacia el subsuelo. En dicha localidad, se usa también el LI-COR para hacer las lecturas (USGS, 1999).

II.4 Sistemas de Percepción Remota

Los sistemas remotos no se usan como predictores, sino más bien como medidores de los hechos que ya están ocurriendo. Sin embargo la ayuda de estos sistemas es imprescindible en el sentido de que pueden hacer una justa cuantificación del evento y las probables direcciones que este podría tomar o que está tomando, e informar de esta manera y con muy buen tiempo, a la población. De este modo, se usa a los sistemas remotos para seguir nubes de explosiones e incluso la ocurrencia de éstas cuando el clima no permite la visibilidad hacia el cráter.

Las imágenes satelitales se obtienen de satélites geoestacionarios con órbita polar, y pueden recibirse directamente en los observatorios volcánicos. Los sensores de éstos satélites son capaces de registrar energía térmica con distinta longitud de onda que se emite o radia desde una nube eruptiva y también de cualquier superficie Terrestre. Cuando existe una erupción, puede ser fácilmente observada por imágenes satelitales e incluso seguir su trayectoria. Desde un sistema remoto se diferencia una nube meteorológica de una nube eruptiva con dos longitudes de onda (USGS, 1999).

Los cambios térmicos detectados por un sistema remoto también pueden servir para identificar hot spots, depósitos volcánicos recientes como flujos de lava o piroclásticos, etc. En Alaska se ha hecho uso de estos sistemas por ejemplo: en 1992 se detectaron 3 explosiones del Mt. Spurr, una de ellas alcanzó 14 km de altura sobre el nivel del mar; además, en 1996 se detectó con esta técnica, el reinicio de actividad del volcán Pavlof (USGS, 1999).

En el Volcán Popocatépetl se usa un radar Doppler que detecta nubosidad y emisión de gases. Éste ha sido de gran utilidad, sobre todo cuando las condiciones meteorológicas no permiten una observación directa de las emisiones del cráter.

II.5 Otras imágenes

La correcta manipulación de imágenes obtenidas por fotografía terrestre o aérea, o de videocámaras enfocadas a un sitio, es de gran ayuda. Éstas imágenes, estratégicamente tomadas pueden revelar cambios en la deformación del suelo principalmente, ya que se puede observar hinchamiento, si es suficientemente visible o cambio en la longitud a lo largo de fracturas importantes. Esto se logra comparativamente con fotografías tomadas con las mismas características (tipo de lente, apertura, localización, etc.) en distintas fechas (Banks et al, 1993; Topinka, 1993, Furukawa et al, 1993).

Los videos tomados en cualquier etapa, sobre todo en las de crisis, son un testigo seguro de los acontecimientos, si la cámara cuenta con una ubicación adecuada, las imágenes obtenidas pueden ser usadas como una secuencia importante en el monitoreo del volcán.

Una cámara de video enfocada al cráter y visualizada desde CENAPRED y vía internet (CENAPRED,1999), se usa en el Popocatépetl para tener una vigilancia visual continua.

III. INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA EN EL VOLCÁN POPOCATÉPETL

Como ya se ha mencionado, el riesgo geológico que tiene el Popocatepetl hace del monitoreo volcánico continuo una necesidad. Una de las redes de monitoreo más importantes que se tienen desde el inicio de la actividad y que continúa en funcionamiento, es la red sismológica, cuyo principal centro de acopio de información se encuentra en CENAPRED. Otras instituciones como el Instituto de Ingeniería (II) y el de Geofísica (IG), ambos de la UNAM, también tienen estaciones en la estructura. Durante la crisis que marcó la reinicialización de la actividad volcánica en 1994, solo se contaba con cuatro estaciones, desde entonces la red ha ido creciendo y completándose con el tiempo, para ser hoy una de las redes más importantes en lo que a monitoreo volcánico se refiere. Esto ha dado como resultado un registro sísmico extenso del volcán.

III.1 Evolución de la Red Sismológica del volcán (Quaas et al, 1995)

La primera estación colocada en el volcán no tenía como misión principal monitorear al mismo, aunque durante la reactivación fumarólica tuvo un papel importante. La instalación de ésta estación la hizo el II en julio de 1987 y forma parte de la sismológica SISMEX. Su principal propósito era registrar la sismología de la Sierra Nevada y servir de repetidora de otras estaciones, por lo que se colocó en el centro de Altzomoni en una repetidora de microondas de Televisa. La instrumentación del sitio consiste de un sismómetro vertical de periodo corto con enlace de telemetría radiofónica analógica FM-FM en VHF hacia el II. Su funcionamiento ha sido continuo desde su instalación.

Posteriormente, en septiembre de 1989 y con una finalidad más asociada al registro de actividad en la zona del volcán se instaló la estación PPM en el Cerro de Tlamacas, en una repetidora de microondas de PEMEX e Imevisión. La instalación de PPM se realizó por el IG, y posteriormente se incorporó a la red del Servicio Sismológico Nacional (SSN). Su instrumentación consiste de un sismómetro triaxial de periodo corto con el mismo enlace telemétrico pero con transmisión UHF al mismo Instituto.

En el año de 1993 el volcán Popocatepetl inició una fase de aumento en la actividad sísmica y para principios de 1994 esta fase se identificó por intensa actividad fumarólica, tras el reinicio de actividad que era cada vez más evidente y conociéndose los antecedentes de grandes erupciones, se desarrolló un plan para iniciar el monitoreo constante, de la sismicidad volcánica. No obstante y debido a la urgencia del evento, lo más inmediatamente posible fue la instalación de dos estaciones portátiles prestadas por el II

La instalación de las nuevas estaciones empezó en octubre de 1994 con el sitio Chipiquixtle (PPX), éste se localiza en la ladera suroeste del volcán en la cota 3980 msnm; contó originalmente con un sismómetro vertical de 2 Hz y equipo de telemetría analógico FM con enlace radiofónico VHF al II y CENAPRED. Inicialmente se colocó el aparato en una hielera y se dejó a la intemperie. La segunda estación se colocó en noviembre en el flanco Este del volcán junto a una barranca, a ésta estación se le nombró Colibrí y se le dio la clave PPC, su elevación es de 3980 msnm y sus características básicas son las mismas de PPX. Por ser PPC una estación con poca visibilidad, se tuvo que conectar con una repetidora para retransmisión de su señal.

Las cuatro estaciones mencionadas hasta el momento, eran las únicas con las que se contaba durante la explosión ocurrida en la madrugada del 21 de Diciembre de 1994 a las 01:30 horas tiempo local. Todas las estaciones registraron los eventos de ese día, por lo que se ha podido hacer una interpretación de lo que sucedió dentro del aparato.

Ésta crisis volcánica confirmó las sospechas de que la reactivación del Popocatepetl era asunto a tratar con más rigor. Fue entonces cuando personal especializado en monitoreo de volcanes del USGS, como parte de un programa de apoyo a desastres volcánicos de la misma institución arribó a nuestro país, y en colaboración con las instancias ya mencionadas se programó la rápida instalación de más estaciones. En éste caso el instrumental fue prestado por el USGS. Se trata de 2 sismómetros verticales portátiles con telemetría, 3 inclinómetros biaxiales también con telemetría y un sistema centralizado de recepción y análisis de datos.

Los inclinómetros se instalaron por separado, uno junto al pico del Ventorrillo en Nexpayantla (PIN) a una elevación de 3846 msnm; el segundo, en la ya construida estación Chipiquixtle (PIX). Una estación de registro sísmico se instaló en el sitio Bonsai (PPB) a una altura de 3080 msnm. El sismómetro y el inclinómetro restantes se colocaron en las proximidades del Refugio el Canario (PPP) a 4170 msnm.

Aunado a la cooperación del USGS, el IG colocó en la ya mencionada estación Tlamacas, un sismómetro triaxial de periodo largo (5 s), la clave asignada fue PPM2. También se instalaron por parte de CENAPRED en la misma estación: un sismómetro digital triaxial portátil con registro en cinta magnética, y temporalmente un acelerógrafo diseñado en la institución para registro de microsismos.

Independientemente el IG instaló tres sismómetros verticales de periodo corto, en distintos sitios. PPL en la Loma del Muerto hacia el SE, con una altura de 2830 msnm; PPS en San Nicolás de los Ranchos en el costado E a 2700 msnm, y PPX a 3980 msnm en la ladera NE en Juchitepec. Todas ellas transmiten sus señal al SSN.

III.2 Situación actual de la Red

La sección anterior se limita a lo que podría llamarse la primera etapa del monitoreo en el volcán, como es de esperarse la ampliación del número de las estaciones ha sido desde entonces y hasta la fecha un claro objetivo. En la actualidad se cuenta con 15 estaciones instrumentadas con equipos de distintas características. Algunas de las estaciones originales han sido modificadas.

La tabla III.1, es un registro de las estaciones existentes y una breve descripción del equipo con el que cuentan. Cada estación tiene una ruta de acceso bien definida, el mapa de localización de las estaciones, se muestra en la Figura III.1

La comunicación entre las estaciones y la central de recepción y monitoreo ubicada en CENAPRED se hace por medio de telemetría en las bandas UHF y VHF, por lo que se cuenta con recepción de señales en tiempo real. Las señales de las estaciones localizada en la parte oculta del volcán, vistas desde el CENAPRED, son retransmitidas a otras estaciones para reenviarse a la central de registro.

Las características de los equipos de registro sísmico varían en algunas estaciones, pero la mayoría son equipos de periodo corto. Existen estaciones que cuentan además con equipos de banda ancha pero su número es reducido. Estos fueron instalados a principios de 1998, aunque un registro continuo con los equipos de banda ancha se tiene hasta el segundo semestre del mismo año.

Las radiofrecuencias empleadas en la red se emiten con una potencia de 1 a 2 Watts, dependiendo del sitio y distancia del enlace. La señal multiplexada es captada por el receptor e introducida simultáneamente a un banco de filtros pasabanda sintonizados a la frecuencia correspondiente, con ello se demultiplexa la señal, se demodula y se obtienen las señales de voltaje originales.

La manera en que los equipos registran los movimientos del subsuelo es mediante la generación de una señal de voltaje proporcional a la velocidad. Ésta pequeña señal analógica es amplificada y filtrada y luego utilizada para modular en frecuencia una subportadora de audio de frecuencia mediante los osciladores controlados por voltaje. De éste modo el voltaje de cada sensor es convertido a una señal de la banda audible FM, con frecuencia proporcional a la velocidad del terreno dentro de una banda de 125 Hz alrededor de la frecuencia de la subportadora. Las señales se suman por multiplexado y se envían en una sola banda, donde se pueden codificar hasta 8 señales distintas.

Las señales están prácticamente libres de ruido inferido por la retransmisión, por lo que son de alta fidelidad, y el ruido registrado se reduce a ser el ambiental, que en varias estaciones es muy bajo o nulo.

Para aislar las estaciones de movimientos y cambios atmosféricos ajenos a los de interés, se han ideado dos tipos de instalaciones en las estaciones, una es subterránea, y la otra es en casetas de mampostería construidas especialmente para el efecto. En todos los casos se ha tratado de buscar terreno firme para evitar la detección de movimientos que no correspondan a la estructura. Además, como puede observarse en la Figura III.1, la distribución de las estaciones cubre la mayor parte del volcán de manera que se pueden localizar con mucha precisión los eventos sísmicos.

CLAVE	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	LOCALIZACION DE LA ESTACION	ALT. (msnm)	LAT N	LONG. W	INSTRUMENTACION	INSTITUCION	FECHA DE INSTALACIÓN
PCR	CENAPRED	Cenapred, México DF	2365	19.3151	99.1747	Central de recepción, registro, monitoreo y procesamiento	CENAPRED, USGS,	agosto, 1994
PRAD	CENAPRED	Cenapred, México DF	2365	19.3151	99.1747	radar Doppler hidrometeorológico	CENAPRED, USGS	noviembre, 1996
PCA	ALTZOMONI	Microondas Altzomoni	4000	19.1204	98.6535	cámara de video	CENAPRED, RTC	febrero, 1995
IIA	ALTZOMONI	Microondas Altzomoni	4000	19.1204	98.6535	sismómetro vertical (1 Hz), repetidora	IDEI, CENAPRED	julio, 1994
PPAB	ALTZOMONI	Microondas Altzomoni	4000	19.1204	98.6535	sismómetro triaxial de banda ancha	CENAPRED, TELMEX	marzo, 1998
PBA	ALTZOMONI	Microondas Altzomoni	4000	19.1204	98.6535	microbarógrafo **	CENAPRED	mayo, 1997
PCIF	ALTZOMONI	Microondas Altzomoni	4000	19.1204	98.6535	cámara térmica infrarroja **	CENAPRED	febrero, 1998
PPM	TLAMACAS	Microondas Tlamacas	3980	19.0663	98.6278	sismómetro triaxial (1 Hz), repetidora	IGEOF, CENAPRED	septiembre, 1994
PPC	COLIBRI	Ladera SW cerca de San Pedro, Benito Juárez	2650	18.9870	98.5572	sismómetro triaxial (1Hz)	CENAPRED	noviembre, 1994
PPB	BONSAI	Ladera NE cerca de Santiago Xalitzintla	3080	19.0498	98.5600	sismómetro vertical (1 Hz) **	CENAPRED, USGS	enero, 1995
PPX	CHIPIQUIXTLE	Arenales ladera SW	3980	19.0088	98.6566	sismómetro triaxial (1 Hz)	CENAPRED, USGS	octubre, 1994
PPXB	CHIPIQUIXTLE	Arenales ladera SW	3980	19.0088	98.6566	sismómetro triaxial de banda ancha	CENAPRED, USGS	julio, 1998
PIX	CHIPIQUIXTLE	Arenales ladera SW	3980	19.0088	98.6566	inclinómetro biaxial	CENAPRED, USGS	febrero, 1995
PPJ	JUNCOS	Base del Ventorrillo ladera NW	4452	19.0342	98.6446	sismómetro triaxial (1 Hz)	CENAPRED, USGS	noviembre, 1997
PIJ	JUNCOS	Base del Ventorrillo ladera NW	4452	19.0342	98.6446	inclinómetro biaxial	CENAPRED, USGS	noviembre, 1997
PPT	TETEXCALOC	Ladera sur	3300	18.9745	98.6241	sismómetro triaxial (1 Hz)	CENAPRED	mayo, 1996

* fuera de funcionamiento temporalmente, ** Colocadas temporalmente

Tabla III.1 Clave y localización de la instrumentación del volcán Popocatepetl. Modificada de CENAPRED, 1999.

CLAVE	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	LOCALIZACION DE LA ESTACION	ALT. (msnm)	LAT. N	LONG. W	INSTRUMENTACION	INSTITUCION	FECHA DE INSTALACIÓN
PPP	CANARIO	Refugio El Canario	4170	19.0412	98.628	sismómetro triaxial (1 Hz)	CENAPRED, USGS	enero, 1995
PPPB	CANARIO	Refugio El Canario	4170	19.0412	98.628	sismómetro triaxial de banda ancha	CENAPRED	marzo, 1998
PIP	CANARIO	Refugio El Canario	4170	19.0412	98.628	inclinómetro biaxial	CENAPRED, USGS	enero, 1995
PIN	NEXPAYANTLA	Loma al SW de Tlamacas	4100	19.0465	98.6355	inclinómetro biaxial	CENAPRED, USGS	enero, 1995
PPN	LOMO DEL NEGRO	Yoloxóchitl, ladera NW	3700	19.0744	98.6738	sismómetro vertical (1 Hz)	CENAPRED	septiembre, 1995
IIB	CALO	Cerro Calo, Chalchihuapan	2500	18.9641	98.3448	sismómetro vertical (1 Hz), repetidor	CENAPRED, IDEI	diciembre, 1996
PPOB	CALO	Cerro Calo, Chalchihuapan	2500	18.9641	98.3448	sismómetro triaxial de banda ancha *	CENAPRED	
PPY	AYAQUEME	Cerro Ayaqueme, cerca de Juchitepec	2800	19.1485	98.9941	sismómetro vertical (1 Hz)	IGEOF	enero, 1995
PPS	TECHALOTEPEC	SW de Sn Nicolás de los Ranchos	2700	19.0030	98.5000	sismómetro vertical (1 Hz)**	IGEOF	enero, 1995
PPQ	LOS CUERVOS	Parte alta ladera sur	4200	19.0009	98.6246	sismómetro triaxial (1 Hz)	CENAPRED	enero, 1995
PIQ	LOS CUERVOS	Parte alta ladera sur	4200	19.0009	98.6246	inclinómetro biaxial	CENAPRED, USGS	enero, 1995
PPE	ECATZINGO	Ladera SW				sismómetro triaxial de banda ancha *	CENAPRED	
PFM1	CANARIO	Refugio de El Canario barranca Tenenepanco, ladera norte	4170	19.0412	98.6280	detector acústico de flujo y pluviómetro	CENAPRED, USGS	octubre, 1997
PFM2	ESPINERA	Barranca Espinera, ladera norte	4294	19.0383	98.6255	detector acústico de flujo y pluviómetro **	CENAPRED, USGS	octubre, 1997
PFM3	UNION	Unión de las barrancas Espinera y Tenenepanco	3693	19.0681	98.6122	detector acústico de flujo y pluviómetro	CENAPRED, USGS	octubre, 1997
PFM4	TLAMACAS	Microondas cerro Tlamacas	3980	19.0663	98.6278	pluviómetro y repetidor de estaciones detectoras de flujo	CENAPRED, USGS	octubre, 1997

fuera de funcionamiento temporalmente, ** Colocadas temporalmente

Tabla III.1 (continuación). Clave y localización de la instrumentación del volcán Popocatepetl. Modificada de CENAPRED, 1999.

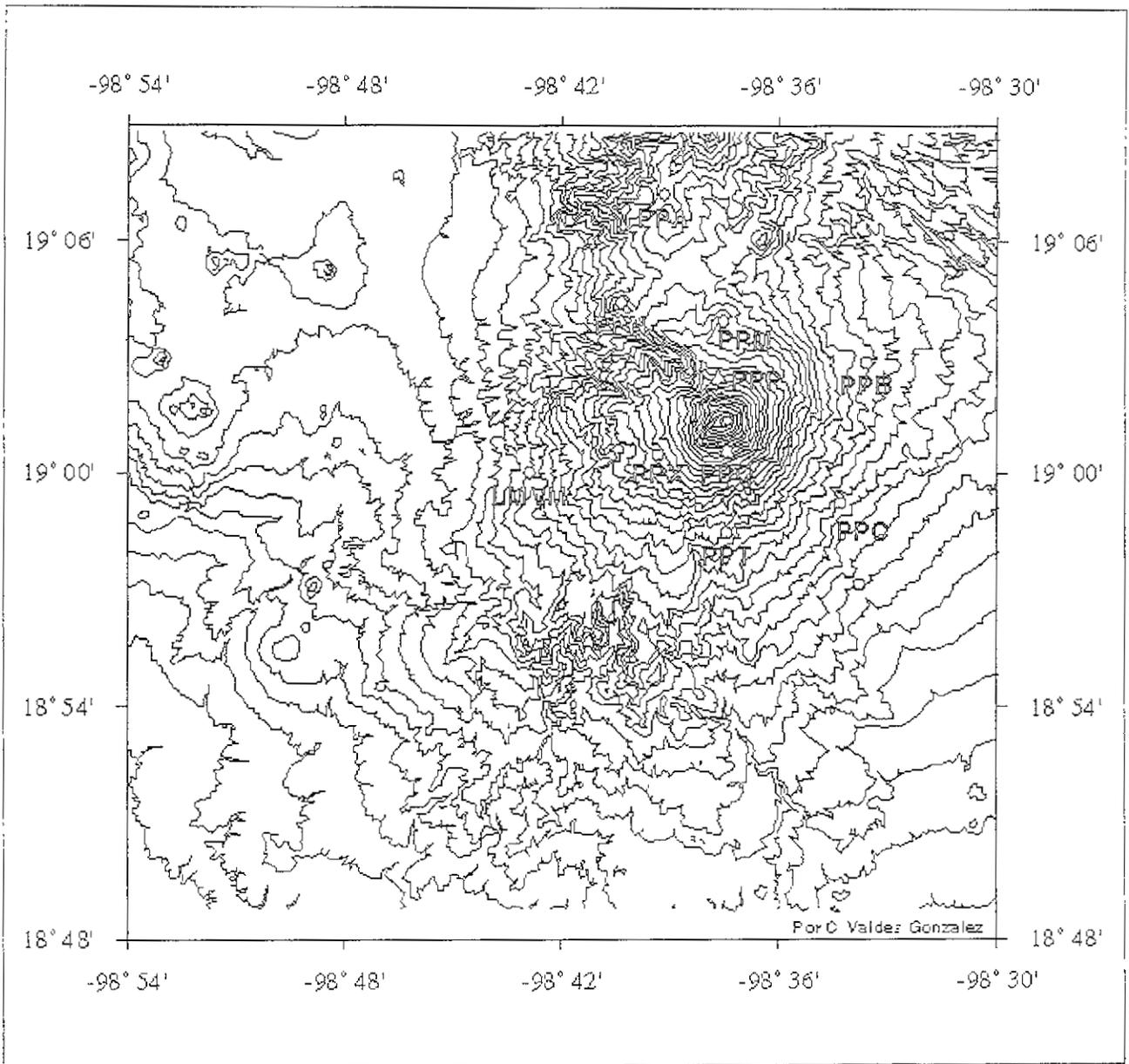


Figura III.1 Ubicación de las estaciones de monitoreo volcánico. Las estaciones PPP y PPQ se muestran con triángulos, el resto de las estaciones se indica con círculos. (cortesía de C. Valdés).

III.3 Las estaciones PPP y PPQ

Salta a la vista que la mayor cobertura sísmica del volcán está dada por instrumentos de periodo corto, resultado propiciado principalmente por razones económicas.

Puede observarse tanto en la Figura III.1 como en la Tabla III.1 que las estaciones triaxiales con mayor cota y menor distancia al cráter, son PPP y PPQ. Ésta característica las postula como las mejores para los fines buscados, ya que al estar más cerca del centro principal de emisión, reportan con mayor fidelidad la sismicidad ocurrida durante cada emisión. Además, los registros de ambas estaciones son comparativamente y en la mayoría de los casos, de mejor calidad que en el resto de las estaciones.

La estación PPQ (los Cuervos) se encuentra a 4200 msnm, sobre la ladera sur del volcán, su distancia al cráter es de aproximadamente 2.55 km. En ésta estación la instrumentación se ha colocado de forma subterránea. Cuenta con sismómetro triaxial de periodo corto y un inclinómetro biaxial.

PPP (Canario) se localiza en la ladera norte a 4170 msnm, su distancia al cráter es de 2.07 km; cuenta con un sismómetro triaxial de periodo corto, un sismómetro triaxial de banda ancha, un inclinómetro biaxial, un detector sísmico de flujo y un pluviómetro, todo éste equipo la coloca entre las estaciones mejor instrumentadas. La estación es una caseta de mampostería.

Para nuestro estudio hemos usado específicamente las componentes verticales de ambas estaciones, por lo que, en lo que se referirá a PPP o PPPV y PPQ o PPQV indistintamente a los registros de dicha componente en caso de ser necesario se aclarará el uso de otra componente.

IV. OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE FRECUENCIAS PICO Y CORRELACIÓN CON OTROS PARÁMETROS SÍSMICOS

En este capítulo se describe la búsqueda de un método sencillo que relacione el comportamiento de las frecuencias pico y las explosiones ocurridas durante 1998 en el volcán Popocatepetl. La búsqueda del método parte de caracterizar las explosiones, para posteriormente elaborar distintas propuestas de métodos que podrían relacionarse con ellas.

Los eventos que se observan con más frecuencia en los registros sísmicos del volcán son de tipo LP. El origen de estos eventos ya se ha discutido ampliamente en varios trabajos (Lahr et al, 1994; Chouet et al, 1994; Chouet, 1996; Cruz Gil et al, 1998; Nakano et al, 1998) y se les ha relacionado con movimientos de fluido dentro del aparato volcánico. En el volcán Redoubt, Alaska durante la crisis de 1989, se observó que la energía de éstos eventos se concentraba alrededor de una banda de frecuencias conforme se aproximaba una erupción y que posteriormente el espectro de los eventos distribuía su energía en un espectro más amplio de frecuencias (Chouet et al, 1994). En otros trabajos se han caracterizado varias frecuencias principales relacionándolas con la fuente (Gil Cruz et al, 1997; Nakano et al, 1998), también se ha visto que por medio del un espectrograma es fácilmente diferenciable un evento de tipo LP de cualquier otro evento (Chouet, 1996). Además se tienen referencias de que en un evento registrado por equipos con distintas localizaciones y de formas temporales totalmente diferentes, la frecuencia pico del evento se encuentra regularmente en valores muy próximos entre sí, por lo que es característica de la fuente e independiente de la trayectoria (Chouet, 1996).

Considerando que la frecuencia pico es reflejo de la fuente, que la fuente actúa como un resonador (Chouet, 1996; Nakano et al 1998), y que como tal cambia sus modos de resonancia conforme la presión confinante del fluido aumenta, es de esperar que se observen cambios en la frecuencia pico de los eventos LP antes de una explosión.

Un primer problema que presenta en los registros de periodo corto, es que una parte considerable de ellos está saturada. Sin embargo se ha tenido la oportunidad de comparar los espectros de registros obtenidos con equipos de periodo corto y registros de banda ancha, comprobando que ni la forma general, ni la frecuencia pico del espectro de frecuencias cambia (ver figuras IV.1 y IV.2). La diferencia entre los espectros solo es visible en frecuencias menores 1 Hz debido al equipo de registro, pero éstas frecuencias no están dentro del rango de estudio (Ver sección II.2), por lo que podemos confiar en la frecuencia pico obtenida. Obsérvese también que el decaimiento es muy similar hasta antes de 10 Hz, y como ya se había mencionando con anterioridad el rango de interés está entre 1 y 5 Hz.

Otro factor que podría afectar la amplitud de los registros usados es la atenuación. En éste caso se recurrió a una amplia base de datos elaborada por Alicia Martínez en el CENAPRED. En ésta se encuentran valores calculados para el factor de calidad Q con frecuencias de 1.5, 3, 6 y 12 Hz, usando eventos registrados en toda la red sismológica del Volcán. De ésta base se obtuvieron promedios de Q para el año de 1998 en las estaciones PPP y PPQ con frecuencia de 3 Hz. En el sitio PPP se promedió un valor de 485 ± 145 y en el sitio PPQ se obtuvo 433 ± 129 . De aquí que el factor de atenuación no modifica el espectro de los datos para el propósito del estudio.

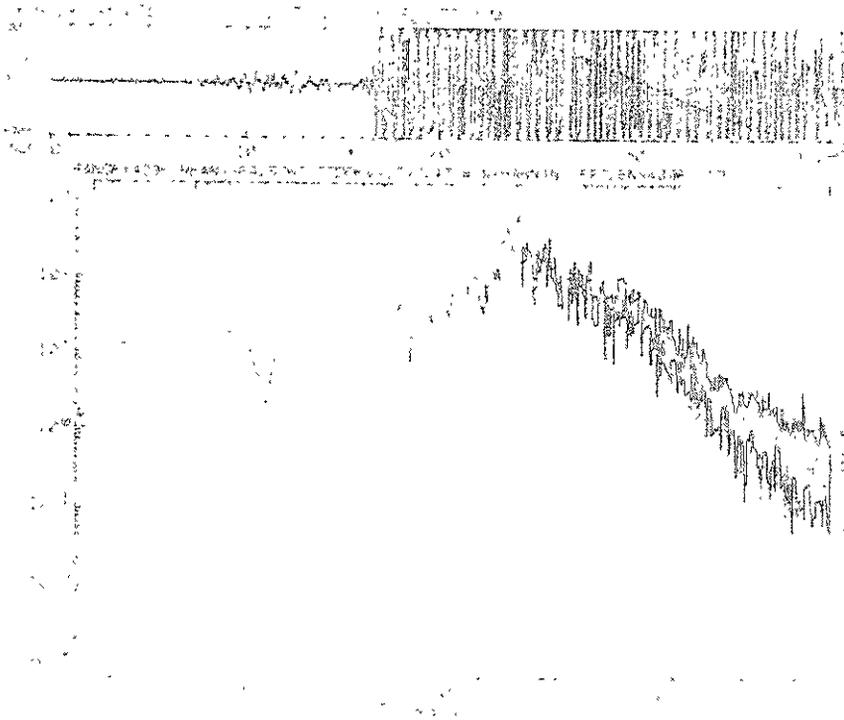


Figura IV.1. viento registrado el 22 de marzo del 2001 por la estación PPP (superior) con un equipo de banda estrecha y espectro del evento (inferior). Frecuencia pico alrededor de 2 Hz.

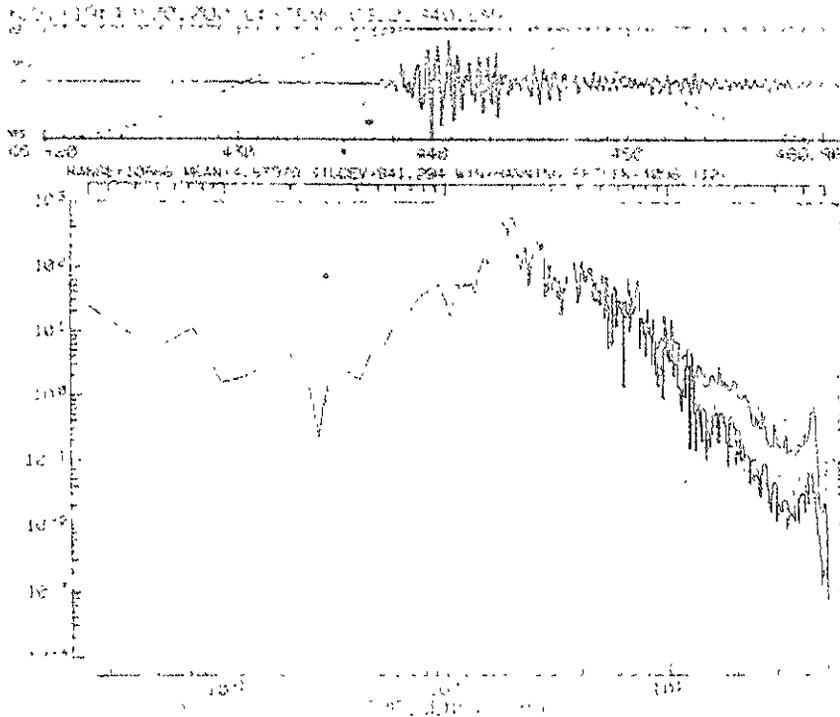


Figura IV.2. El mismo evento que en la figura IV.1 pero registrado con el equipo de banda ancha de la misma estación. Frecuencia pico alrededor de 2 Hz.

IV.1 Caracterización de las explosiones

El año de 1998 terminó con un fuerte periodo explosivo superior en mucho a cualquiera que hubiese ocurrido durante el resto de año, este periodo inicia el 25 de noviembre y termina hasta diciembre 17. A este periodo lo precedieron tres días de fuerte actividad y finalmente el 23 de noviembre se registró el número más alto de eventos LP de todo el año (ver Figuras IV.17 y IV.21). Posteriormente, el día 25 ocurrió una fuerte explosión que solo fue la antecesora de una más intensa que se registró 2 días más tarde, el 27 de noviembre. El principio de este periodo, pone límite a nuestro estudio, ya que se considera que la fuerte actividad del 25 de noviembre, marca un cambio de etapa en la actividad explosiva que se había dado durante el resto del año.

El intervalo estudiado incluye todos los eventos registrados desde el mes de enero hasta el 25 de noviembre de 1998. Durante éste lapso de tiempo ocurrieron un total de siete explosiones, en las siguientes fechas: 21 de marzo, 21 y 27 de abril, 22 y 23 de septiembre, 6 de octubre y 25 de noviembre. Se les llama explosiones por sus características temporales, espectrales y sobre todo porque en todas ellas existe emisión de partículas piroclásticas de diversos tamaños y fumarolas de alturas considerables. Se clasifica a estos eventos como vulcanotectónicos.

En ésta sección se pretende caracterizar únicamente a las siete explosiones mencionadas. Con éste fin se recurrió a descripciones físicas y a los registros obtenidos con el sistema XDETEC de los equipos de periodo corto, porque los sistemas de banda ancha no estuvieron activos durante las explosiones. Los registros de las siete explosiones, así como los espectros en las estaciones PPP y PPQ se presentan en el apéndice A. Los registros de las explosiones están saturados, por ello se buscó la comparación en el dominio frecuencial. Se obtuvo de manera gráfica sus características espectrales (ver tabla IV.1), también se anexan descripciones físicas de las explosiones tomadas de un reporte de explosiones elaborado por Pomposo et al; 1999.

DESCRIPCIÓN DE LAS EXPLOSIONES

La forma de los espectros de cada estación es significativa. En PPPV el espectro es más agudo, en tanto que en PPQV el espectro se mantiene en un horizonte plano más marcado. El efecto de la forma es atribuible a la trayectoria, porque el máximo espectral y el contenido de frecuencias es muy similar.

Marzo, 21 (22:21 GMT)

Registro saturado en todas las estaciones. Duración del evento aproximadamente 3 min. La componente horizontal es más larga (figura A1).

PPPV. Duración del evento 2.5 min, la fase intensa entre 40 y 50 s. El máximo se encuentra en 3 Hz poco superior a las 40 unidades. Se observa una pequeña parte donde la curva se conserva horizontalmente, ésta va de 2 a 5 Hz y cuenta con 20 unidades de amplitud. La curva muestra un decaimiento constante a partir de los 10 Hz (figura A2).

PPQV. Duración del evento 4 min y de la fase intensa 60 a 70 s. Su máximo está en 3.5Hz y tiene 70 unidades de amplitud. La curva empieza a decaer posterior a los 10Hz y muestra una meseta entre 3 y 10 Hz de 20 unidades en promedio (figura A3).

Descripción física de la explosión

No existe.

Abril, 21 (16:07 GMT)

Registro saturado en todas las estaciones. Duración aproximada de 3 min, en la componente horizontal es más larga (figura A4).

PPPV. Duración del evento 2.5 min, la fase intensa dura entre 40 y 50 s. El espectro tiene su máximo alrededor de 3 Hz con casi 70 unidades de amplitud. La curva encuentra su punto más agudo entre 6 y 8 Hz y se mantiene en promedio a 20 unidades, después de los 10 Hz decae igual que en el caso anterior (figura A5).

PPQV. Duración del evento 2 min, la fase intensa tiene 25 s. El máximo del espectro está en 3 Hz, con poco más de 70 unidades de amplitud. La meseta de éste espectro va de 3 a 10 Hz y se mantiene en 20 unidades aproximadamente. Posteriormente el espectro decae suavemente (figura A6).

Descripción física de la explosión

"fragmentos incandescentes lanzados por la explosión produjeron algunos incendios en los pastizales de las partes altas del volcán. Se reportó que se cimbraron los vidrios en algunas poblaciones cercanas por la fuerza de la explosión."

Abril, 27 (15:17 GMT)

Registro saturado en todas las estaciones. Duración aproximada de 3 min, es un poco más larga la componente horizontal (figura A7).

PPPV. Duración del evento casi 3 min, la fase intensa dura 40 a 50 s. El máximo se ubica en 3 Hz con una amplitud de 50 unidades. En éste caso se observa una meseta entre 2 y 7 Hz, con 10 unidades de amplitud. La curva es muy suave y empieza a decaer poco antes de los 10 Hz (figura A8).

PPQV. Duración del evento poco más de 3 min, la fase intensa dura 40 a 50 s. El máximo se localiza poco antes de los 2 Hz y tiene menos de 70 unidades en amplitud. La meseta es considerablemente más grande que en los espectros anteriores, abarcando de 2 hasta 10 Hz y manteniéndose en 10 unidades. Igual que en PPP la curva es muy suave y su decaimiento es después de los 10 Hz (figura A9).

Descripción física de la explosión

"se registró una exhalación explosiva del volcán Popocatepetl, que duró 3 minutos en su fase más intensa y fue seguida por una señal de tremor de alta frecuencia por 5 minutos más. Esta explosión produjo una nube de ceniza que alcanzó una altitud estimada de 4 km sobre la cima."

Septiembre, 22 (17:20 GMT)

Muy saturado en casi todas las estaciones. Duración general del evento 4 min. Un poco más larga en las componentes horizontales (figura A10).

PPPV. Duración del evento 2.5 min, duración de la fase intensa 40 a 50 s. Su máximo está cercano a los 3 Hz y muestra una amplitud mayor a 80 unidades, en éste caso la tendencia horizontal es hacia las 20 unidades, extendida entre 1 y 6 Hz. Posterior a los 8 Hz el espectro empieza a decaer de forma habitual (figura A11).

PPQV. Duración del evento casi 4 min, fase intensa poco más de 50 s. En éste caso el máximo se ve en 1 Hz, y tiene una amplitud poco superior a las 100 unidades. Este máximo poco usual se subsecuenta de otros con amplitudes cercanas a las 100 unidades antes de 2 Hz. Por lo que es impreciso saber si existe un máximo considerable como real entre los 2 y 3 Hz. La meseta se conserva entre 5 y 10 Hz, a 20 unidades de amplitud. La curva tiene su decaimiento normal poco después de los 10 Hz (figura A12).

Descripción física de la explosión

"se registró una exhalación explosiva cuya fase de mayor intensidad duró un minuto y se prolongó por 6 minutos más, produciendo una pluma de vapor, gases y ceniza que alcanzó una altura de 4 km sobre la cima. Aunque a la hora del evento no hubo visibilidad del volcán por mal tiempo, el radar doppler detectó la presencia de ceniza en las inmediaciones del cráter."

Septiembre, 23 (23:25 GMT)

Registro poco saturado, corto a comparación de los anteriores mide máximo 3 min. Ligeramente más larga en las componentes horizontales, específicamente muy largo en PPP componente horizontal dirección E-W (6 min) (figura A13)

PPPV. Aquí el registro aparenta no estar saturado. Tiene una duración de unos 2 min y la fase intensa no es mayor de 50 s. Su máximo se localiza cerca de 3 Hz y la amplitud es superior a 80 unidades. La meseta se extiende de 2 y 3 Hz alrededor de las 20 unidades de amplitud. Después de lo 8 Hz, el espectro empieza a decaer de manera habitual (figura A14)

PPQV. En esta estación el registro sí está saturado. Su duración es de un poco más de 3 min, la duración de la fase intensa es de 40 s. El máximo está próximo a los 2 Hz y tiene una amplitud aproximada de 50 unidades. Entre 4 y 10 Hz la curva se mantiene

en 7 unidades. Posterior a los 10 Hz el decaimiento se da de forma normal (figura A15).

Descripción física de la explosión

"nuevamente se registró en el volcán una exhalación explosiva que duró un minuto en su fase más intensa y luego se prolongó por cinco minutos más. La exhalación fue acompañada de ceniza y alcanzó tres mil metros sobre el cráter. El evento fue detectado por el radar doppler operado desde el CENAPRED. Horas después la exhalación se reportó caída de ceniza en varios poblados del sector suroeste del volcán tales como Atlautla, Ozumba y otros."

Octubre, 6 (04:11 GMT)

Registro saturado en casi todas las estaciones. El rango de duración va de 2 a 3 min. El evento muestra subsecuentemente eventos más pequeños de tipo LP. Igual que en el caso anterior la estación PPP muestra un registro mal definido y muy largo en su componente E-W (casi 10 min) (figura A16).

PPPV. Registro no saturado. 2 min aproximadamente de duración, la fase intensa no se define bien pero se encuentra alrededor de 30 s. Es seguido de unos 7 u 8 LP's. El máximo es un poco mayor a 3 Hz y tiene una amplitud de 40 unidades. La curva se mantiene estable alrededor de las 7 unidades entre 2 y 7 Hz, posterior a los 8 Hz empieza a decaer de forma común (figura A17).

PPQV. Evento saturado, duración aproximada de 2 min, duración de la fase intensa 40 a 50 s. Secuentado de 3 LP's muy marcados. Su máximo es poco superior a 1 Hz y alcanza una amplitud cercana a 70 unidades. Se observa una meseta entre 1 y 2 Hz en 20 unidades. En éste caso la curva decae suavemente después de los 3 Hz de manera habitual (figura A18).

Descripción física de la explosión

"se presentó un exhalación explosiva moderadamente grande la cual duró 2 minutos en su fase más intensa y se prolongó por casi 30 minutos más a menor nivel, produciendo una pluma de vapor, gases y ceniza que se elevó casi 4 km encima del cráter. Se recibieron reportes de un resplandor provocado por la incandescencia dentro del cráter."

Noviembre, 25 (14:01 GMT)

Registro saturado. Duración general de 3 min, un poco más largo en componentes horizontales (figura A19).

PPPV. Duración: menos de 2.5 min. La fase intensa dura entre 40 y 50 s. Máximo superior a 3 Hz, con amplitud mayor a 100 unidades. La meseta se observa entre 4 y 7 Hz, alrededor de 20 unidades. Después de los 9 Hz, el espectro empieza a decaer (figura A20).

PPQV. En esta estación la duración no pasa de 2 min, y la fase intensa tiene 30 a 40 s de duración. El máximo es superior a los 2 Hz y a las 100 unidades de amplitud. El espectro muestra una parte plana entre los 4 y los 8 Hz, que alcanza 10 unidades de amplitud. Después de 9 Hz, decae lentamente (figura A21).

Descripción física de la explosión

"ocurrió una explosión moderadamente grande , que duró 1 minuto y ha sido seguida por una señal de tremor armónico de amplitud intermedia que persiste hasta el momento de este reporte. La explosión fue acompañada de una emisión de ceniza de corta duración que alcanzó una altitud de 3 a 4 km sobre la cima y que el viento dominante a esa altitud lleva hacia el Norte. La parte media y baja de la pluma volcánica se desplaza por un régimen diferente de vientos hacia el suroeste, por lo que podrían esperarse muy leves lluvias de ceniza en poblaciones de esos sectores del volcán. La explosión lanzó algunos fragmentos de roca sobre el entorno del cráter a una distancia estimada en 2 km"

La descripción espectral y física de las explosiones, son parámetros que nos han ayudado a diferenciar las explosiones (ver tabla IV.1). El propósito principal, es comparar la intensidad de ellas y correlacionarlos con la variación en tiempo de las fp obtenidas a partir de los registros de eventos tipo LP.

Es posible que las explosiones muestren diferencias en un rango frecuencial más bajo, que no es posible detectar con los sensores que se usaron para este trabajo. En realidad, se trató de trabajar en el caso de las explosiones con registros de las estaciones de banda ancha, esto no pudo ser, debido a que en el periodo de estudio dichos aparatos acababan de ser instalados, por lo que no funcionaban correctamente y solo se encontró el registro de la explosión del 25 de noviembre, siendo así, fue necesario usar los registros de periodo corto.

De la tabla IV.1 se tiene que en la estación PPP la frecuencia pico de las explosiones es de 3 Hz, y que en la estación PPQ la misma puede variar desde 1 hasta 3 Hz. Ésta diferencia en el contenido energético puede atribuirse a la direccionalidad de las explosiones en el volcán.

La descripción de los eventos conduce a asumir que la explosión más energética es la del 25 de noviembre. Por su parte, las explosiones del 22 de septiembre y 21 de abril sería un tanto menos energéticas que la de noviembre. Por último, las menos intensas de la secuencia en 1998, fueron las del 21 de marzo y 6 de octubre. Es difícil señalar sin ambigüedad que tanto más o menos intensas son unas con respecto a las otras

Podemos concluir que los intervalos temporales de la fase intensa en cada explosión van de 40 a 60 s, en pocas ocasiones son menores a 30 s o superiores a 60 s. El evento del 21 de abril muestra la fase intensa más corta de todos los eventos evaluados (25 s, en PPQV), y ésta fue una de las explosiones más intensas. La segunda fase corta es la registrada en la misma estación el día 25 de noviembre

FECHA	HORA (GMT)	DURACIÓN				FRECUENCIA PICO				PARTE PLANA				DECAIMIENTO	
		TOTAL [min]		FASE INT. [s]		AMPLITUD		MÁXIMO [Hz]		AMPLITUD		RANGO [Hz]		[Hz]	
		PPPV	PPQV	PPPV	PPQV	PPPV	PPQV	PPPV	PPQV	PPPV	PPQV	PPPV	PPQV	PPPV	PPQV
Mar, 21	22:21	2.5	4	40-50	60-70	40	70	3	3.5	20	20	2-5	3-10	10	10
Abr, 21	16:07	2.5	2	40-50	25	70	70	3	3	20	20	6-8	3-10	10	10
Abr,27	15.17	3	3	40-50	40-50	50	70	3	2	10	10	2-7	2-10	10	10
Sep,22	17:20	2.5	4	40-50	50	80	100	3	1	20	20	1-6	5-10	8	10
Sep,23	23:25	2	3	50	40	80	50	3	2	20	7	2-3	4-10	8	10
Oct,6	4:11	2	2	30	40-50	40	70	3	1	7	20	2-7	1-2	8	3
Nov,25	14:01	2.5	2	40-50	30-40	100	100	3	2	20	10	4-7	4-8	9	9

Tabla IV.1 Resumen de las características espectrales de las explosiones registradas.

IV.2 Obtención y análisis de las frecuencias pico

IV.2.1 Relación tiempo-frecuencia pico

La parte medular de este estudio son las frecuencias pico (f_p) obtenidas día con día durante prácticamente un año de actividad del volcán Popocatepetl (del 18 de enero al 25 de noviembre de 1998). El resultado han sido 4036 f_p obtenidas de la estación PPP y 3950 de la estación PPQ, para dar un gran total de 7986 eventos procesados.

Las señales usadas para este estudio corresponden a eventos de tipo LP, registradas en las estaciones PPP y PPQ, ambas en su componente vertical. El sistema con el que se registran las señales usadas es el MDETEC. Se grafican 60 segundos de la señal, pero su longitud puede ser menor, el muestreo es cada 0.01 segundos. El método de selección en un inicio es en su forma temporal y se corrobora con los espectrogramas (ver Figuras IV.4 a IV.13).

Durante el año de 1998 se observó la presencia de enjambres de eventos tipo LP que comúnmente preceden a las explosiones (Figura IV.3), estos enjambres puede ser muy variables en cuanto a amplitud e intensidad de los eventos. Además como se había mencionado con anterioridad éste tipo de eventos son los que se observan con mayor frecuencia en el volcán.

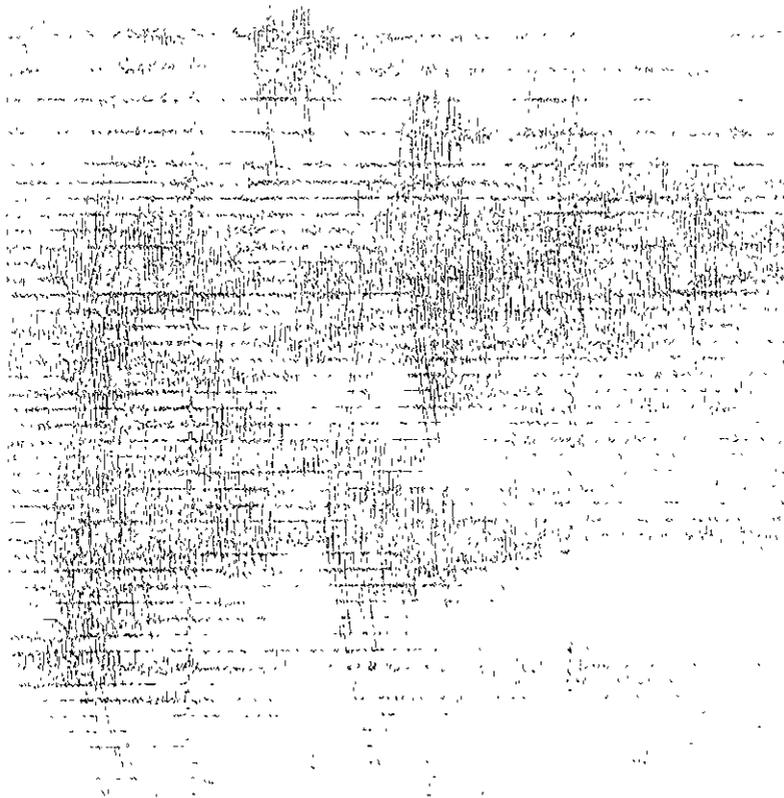
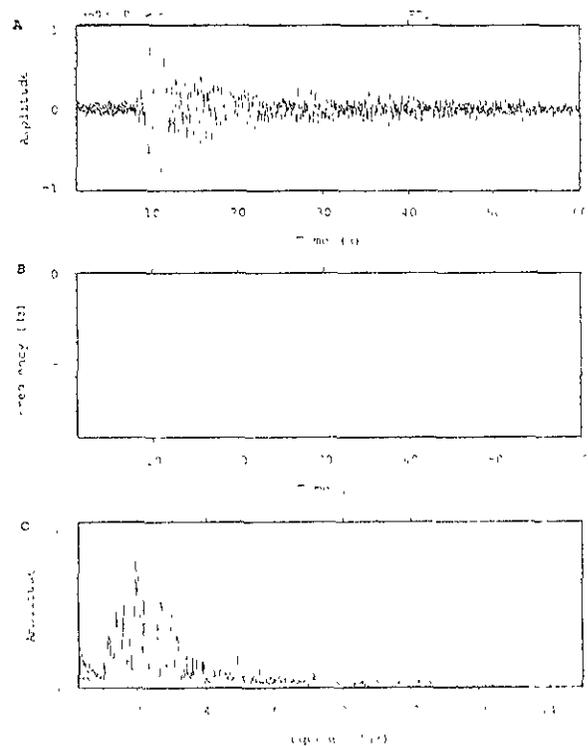
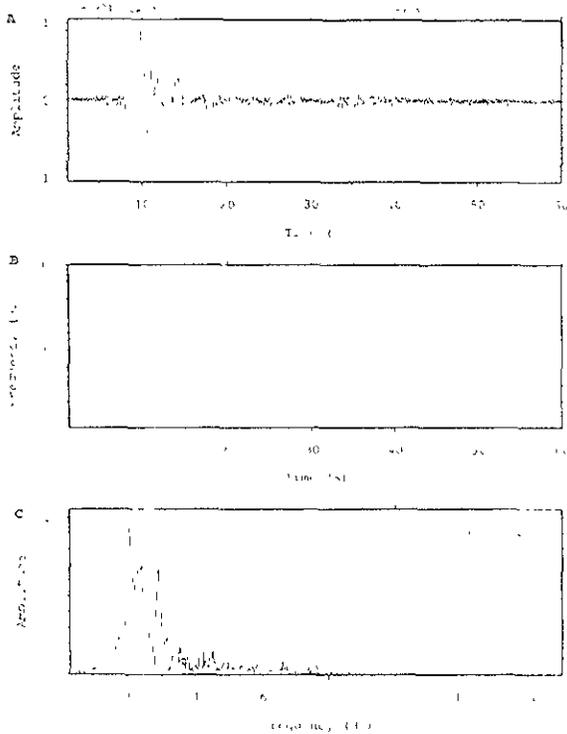


Figura IV 3 Enjambre de eventos LP registrado el 20 de noviembre de 1998, cinco días antes de la explosión del 25 del mismo mes

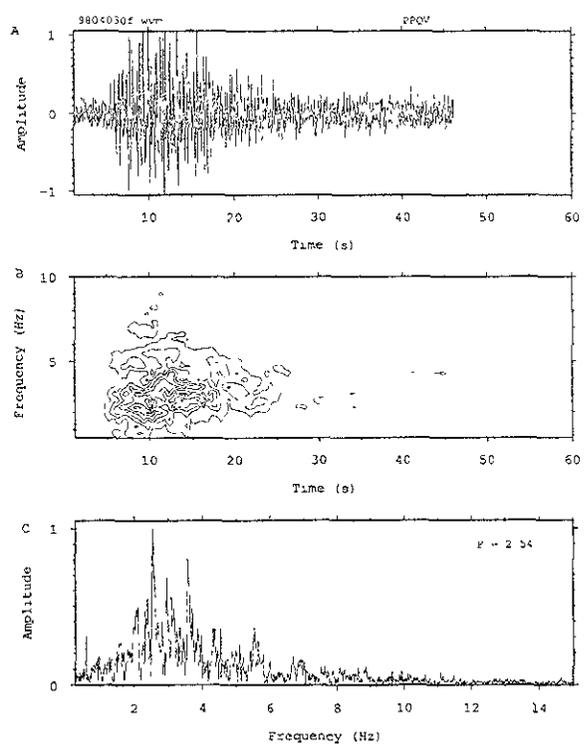
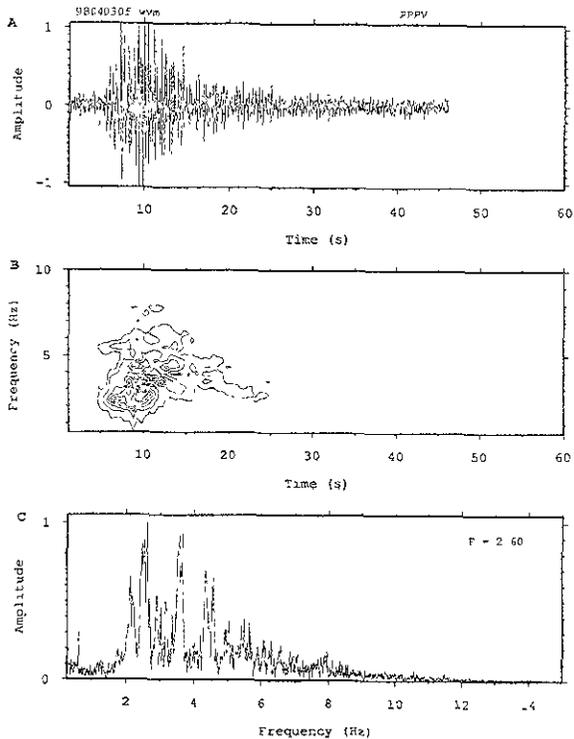
Para obtener la frecuencia pico es necesario hacer uso de la transformada de Fourier, como es común ya en análisis espectrales se aplicó la FFT (Fast Fourier Transform), que tiene como requerimiento inicial el que la longitud total del muestreo de la señal debe ser potencia de dos, por lo que todos los registros fueron rellenados con ceros hasta alcanzar una longitud de 8192 muestras. Una vez construido el espectro de la señal, se obtiene su máximo algebraico y éste es la frecuencia pico o principal, que en adelante llamaremos f_p (ver Figuras IV.4 a IV.13), en todos los casos se normalizó el espectro de amplitudes. También se elaboraron peridogramas de los eventos con los que se comprobó la acumulación de energía en un intervalo de frecuencias bien delimitado. Los peridogramas se obtuvieron con ventanas de 2.56 s y corrimiento de 75 ms.

Se pudo observar que la f_p oscila entre 2 y 3 Hz comúnmente y con menor frecuencia muestra valores cercanos a 4 Hz (Ver Figura IV.14). Éste intervalo se conserva para ambas estaciones, es común ver frecuencias similares o hasta iguales para el mismo evento en las dos estaciones, inclusive si las formas en el dominio temporal son distintas (Figuras IV.4 a IV.11).

También se observó el efecto de la saturación en eventos que fueron registrados completamente en una estación pero saturados en otra, en éstos casos fue posible comprobar que la frecuencia pico se mantenía en rangos muy parecidos. Tal es el caso de las Figuras IV.10 a IV.13.



Figuras IV.4 (izquierda) y IV.5 (derecha) Evento LP registrado en las estaciones PPP y PPQ (respectivamente) el 1ro de septiembre. En ambas A) componente vertical del evento, B) peridograma, y C) espectro de amplitudes normalizado, F es la frecuencia pico de 2.04 Hz en las dos estaciones.

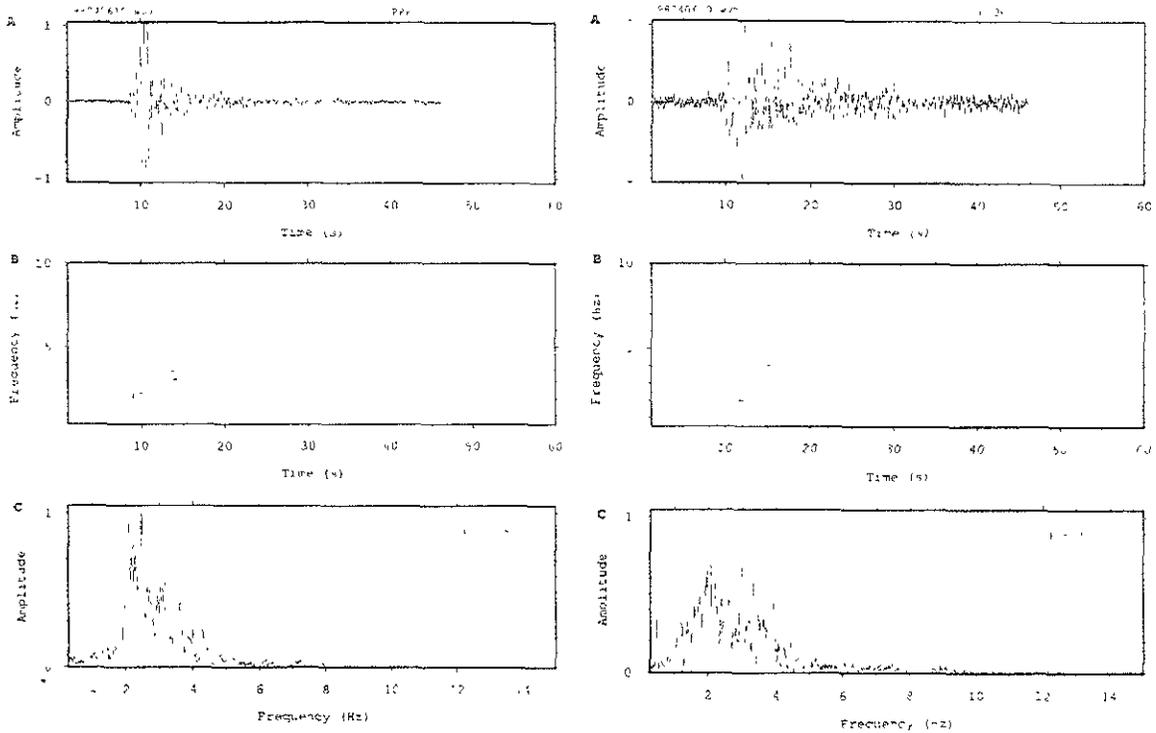


Figuras IV.6 (izquierda) y IV.7 (derecha) Evento LP registrado en las estaciones PPP y PPQ (respectivamente) el 3 de abril. En ambas A) componente vertical del evento, B) peridograma, y C) espectro de amplitudes normalizado, F es la frecuencia pico de 2.6 y 2.54 Hz respectivamente.

Lamentablemente la secuencia en tiempo de las frecuencias pico de los eventos LP, no ha podido ser estudiada en su totalidad, debido a intervalos de tiempo en los que no se tienen registros. A estos intervalos los llamamos gaps, y es muy importante tomarlos en cuenta en los avances subsecuentes, ya que no son "vacíos" frecuenciales como respuesta a los mecanismos que rigen al aparato volcánico, sino más bien, espacios con ausencia de información.

Existen cuatro gaps importantes en nuestros datos (ver figura IV.14), el primero corresponde al intervalo entre el 13 de mayo y el 2 de junio, el segundo se encuentra entre el 20 de junio y el 3 de julio, hay uno más entre los días 4 y 13 de septiembre y por último y el más importante porque precede a una explosión, el que va del 26 de septiembre al 3 de octubre. A ellos los llamaremos como el gap de mayo, el de julio, el de septiembre y el de octubre respectivamente.

Además la observación conjunta de los datos nos llevó a elegir intervalos o bandas frecuenciales, donde se destacan alineaciones de frecuencias pico. Estas bandas se ven claramente acotadas por enjambres de fp (que involucran desde luego enjambres de LP's), que suelen presentarse antes de una explosión (ver figura IV.14). Tal es el caso de la explosión del 1 de marzo, el enjambre que precedió a las explosiones del 21 y 27 de abril, el que corresponde a las del 22 y 23 de septiembre y por último aunque no tan bien definido como los demás el que está antes de la explosión del 25 de abril. No obstante existe un enjambre que presenta los bandeamientos respectivos entre los meses de junio y julio que no antecede a ninguna explosión.



Figuras IV.8 (izquierda) e IV.9 (derecha) Evento LP registrado en las estaciones PPP y PPQ (respectivamente) el 6 de abril. En ambas A) componente vertical del evento, B) peridograma, y C) espectro de amplitudes normalizado, F es la frecuencia pico de 2.47 y 2.04 Hz respectivamente. Obsérvese que aunque la forma del registro no es la misma, la frecuencia es muy similar.

En el caso del enjambre entre el sexto y el séptimo mes del año se puede atribuir la ausencia de una explosión fuerte al hecho de que, posterior a este periodo se observó la presencia de fumarolas que sin ser meramente explosivas, implican la liberación de energía y con ello la no acumulación de ésta para que se presentara una explosión fuerte. El caso respectivo a la explosión de noviembre, que no cuenta con una marcación tan clara en las bandas frecuenciales elegidas y que no obstante cuenta con el enjambre precursor más grande de todo el año en estudio; puede ser un definido cambio de fase del volcán.

Al estudio del bandeado se enfocaron los principales esfuerzos, debido a que de acuerdo con el tipo de ocurrencia de los eventos LP, es posible que las bandas presenten ciertos cambios correlacionables con el tipo de explosión, es decir con el fenómeno de la fuente.

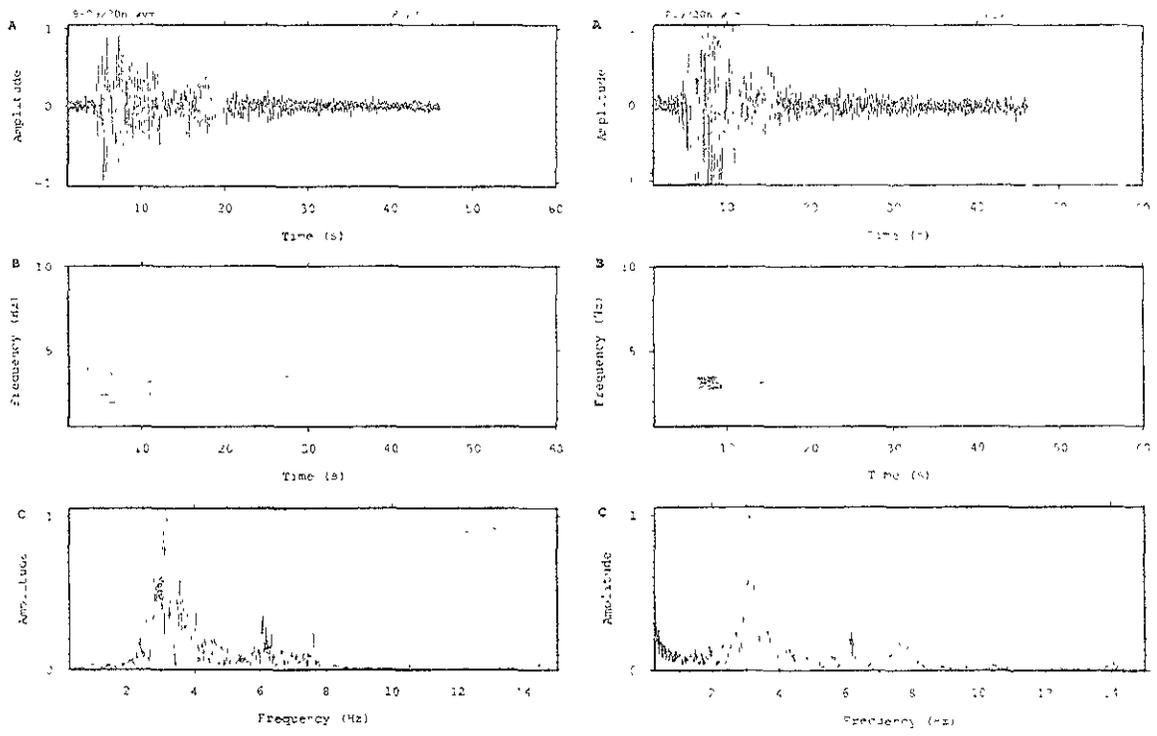


Figura IV.10 (izquierda) y IV.11 (derecha). Evento LP registrado en las estaciones PPP y PPQ (respectivamente). En ambas A) componente vertical del evento; B) peridograma, y C) espectro de amplitudes normalizado, F es la frecuencia pico de 3.17 y 3.11 Hz respectivamente. Se observa que a pesar de la saturación los espectros conservan frecuencias pico muy parecidas.

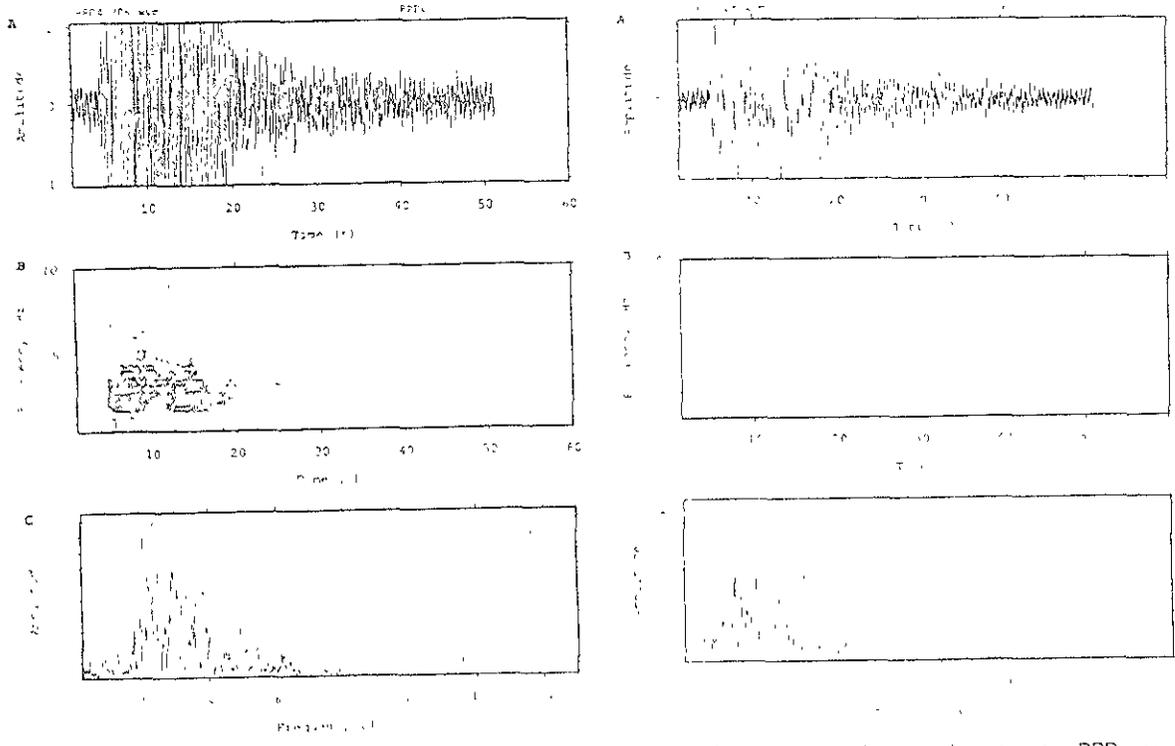


Figura IV.12 (izquierda) y IV.13 (derecha). Evento LP registrado en las estaciones PPP y PPQ (respectivamente). En ambas A) componente vertical del evento, B) peridograma, y C) espectro de amplitudes normalizado, F es la frecuencia pico. Se observa que a pesar de la saturación los espectros conservan frecuencias pico muy parecidas.

Inicialmente se observaron cinco bandas de frecuencias, pero una de ellas es muy baja y su frecuencia oscila entre 0.13 y 0.15 Hz. Este rango de frecuencias está fuera de la respuesta del instrumento; sin embargo puede relacionarse con el efecto de marea. Si el espesor de la corteza oscila normalmente entre 35 y 40 km, y se han calculado velocidades de aproximadamente 5 km/s; entonces la longitud de onda λ calculada con la relación $\lambda = v/f$ nos da intervalos entre 34 km y 39 km, por lo que esta banda no debe entrar en nuestro estudio; más bien, si se suscitara estudios posteriores recomendaría poner un límite tanto inferior como superior para la selección de frecuencias pico entre 1 y 5.0 Hz, ya que en la mayor parte de los eventos que mostraban frecuencias pico fuera de este rango, incluían además frecuencias comunes con las otras bandas y de gran amplitud, pero menor a la alcanzada por la frecuencia pico obtenida (ver figuras IV.15 y IV.16).

Por lo tanto, el estudio se realizó con cuatro bandas básicas de f_p . Dichas bandas quedaron definidas con los siguientes intervalos y nomenclaturas: 1.65 – 1.85 Hz (**F1**), 1.90 – 2.15 Hz (**F2**), 2.35 – 2.60 Hz (**F3**), 2.80 – 3.20 Hz (**F4**). Si se abre más la ventana de frecuencias se pueden encontrar subbandeados entre los intervalos mencionados; pero para nuestro fin, pareció adecuado dejar estas cuatro bandas representativas. Además, no pareció conveniente hacer un estudio estadístico estricto para seleccionar las bandas, en vista de que éstas pueden ya interpretarse como una respuesta del volcán, y son muy marcadas.

Finalmente, el número de datos con que se trabajó, corresponde a un 40% del gran total, repartido en las cuatro bandas frecuenciales, tal reparto es diferente en cada estación, pero la banda de mayor peso es siempre **F4**.

Con los intervalos definidos se calcularon longitudes de onda (tabla IV.2) para hacer una estimación del tamaño de los conductos. El cálculo de λ (longitud de onda) se realizó con dos velocidades propuestas, $\alpha_1=1.5$ km/s y $\alpha_2=2.0$ km/s, que son las velocidades calculadas para el volcán (C. Valdés, comunicación personal). Los resultados de esta operación, indican que la longitud de los conductos podría oscilar entre 500 y 1000 m.

Habiendo definido claramente los datos con los que se va a trabajar, se propone el análisis de la cantidad de LP ocurridos diariamente en cada banda de frecuencias, y debido a la aparente linealidad de los datos se sugiere un estudio de pendientes calculadas de una regresión lineal. Ambos procedimientos tomaron diversos caminos, que se describen en las secciones posteriores.

Frecuencia principal de las estaciones PPPV y PPQV

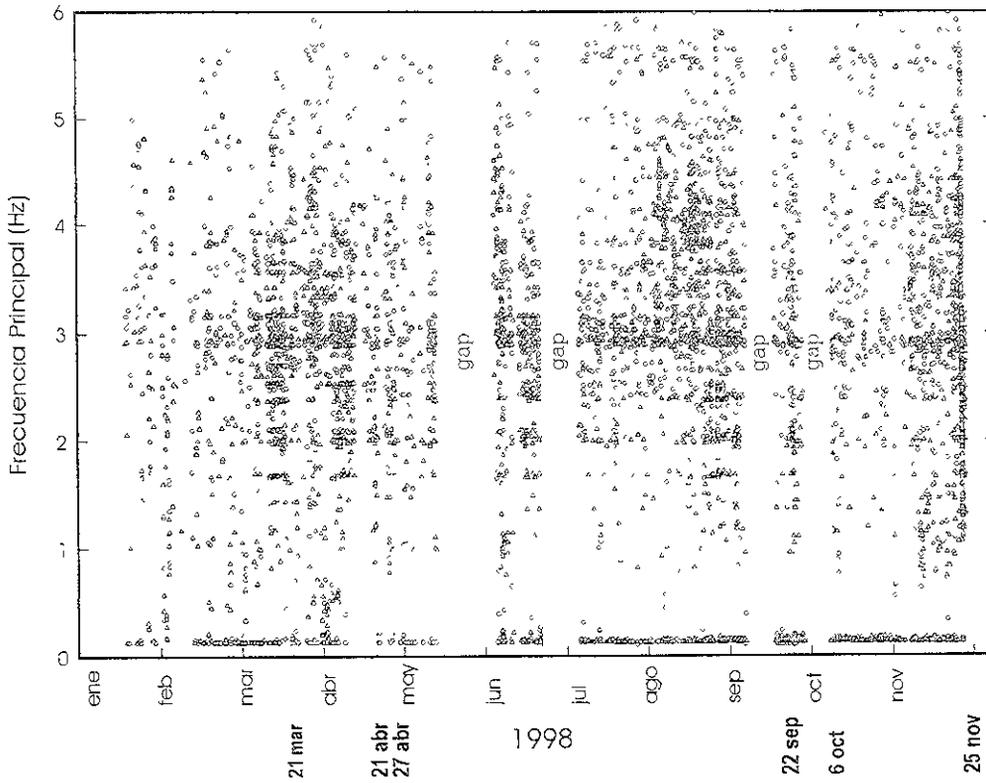


Figura IV.14 Relación tiempo frecuencia pico, de las estaciones PPP (círculos) y PPQ (triángulos). Se indican con líneas punteadas las fechas de las explosiones y los gaps. Obsérvese el bandeamiento que se presenta alrededor de los 3 Hz principalmente.

Frecuencia	Rangos frecuenciales	Longitud de onda con distinta α	
		$\alpha = 1.5 \text{ km/s}$	$\alpha = 2.0 \text{ km/s}$
f1	1.65 - 1.85	0.909 - 0.810	1.212 - 1.081
f2	1.90 - 2.15	0.789 - 0.697	1.052 - 0.930
f3	2.35 - 2.60	0.638 - 0.576	0.851 - 0.769
f4	2.80 - 3.20	0.535 - 0.468	0.714 - 0.625

Tabla IV.2 longitud de onda calculada a partir de los intervalos de frecuencias observados y proponiendo dos velocidades de propagación.

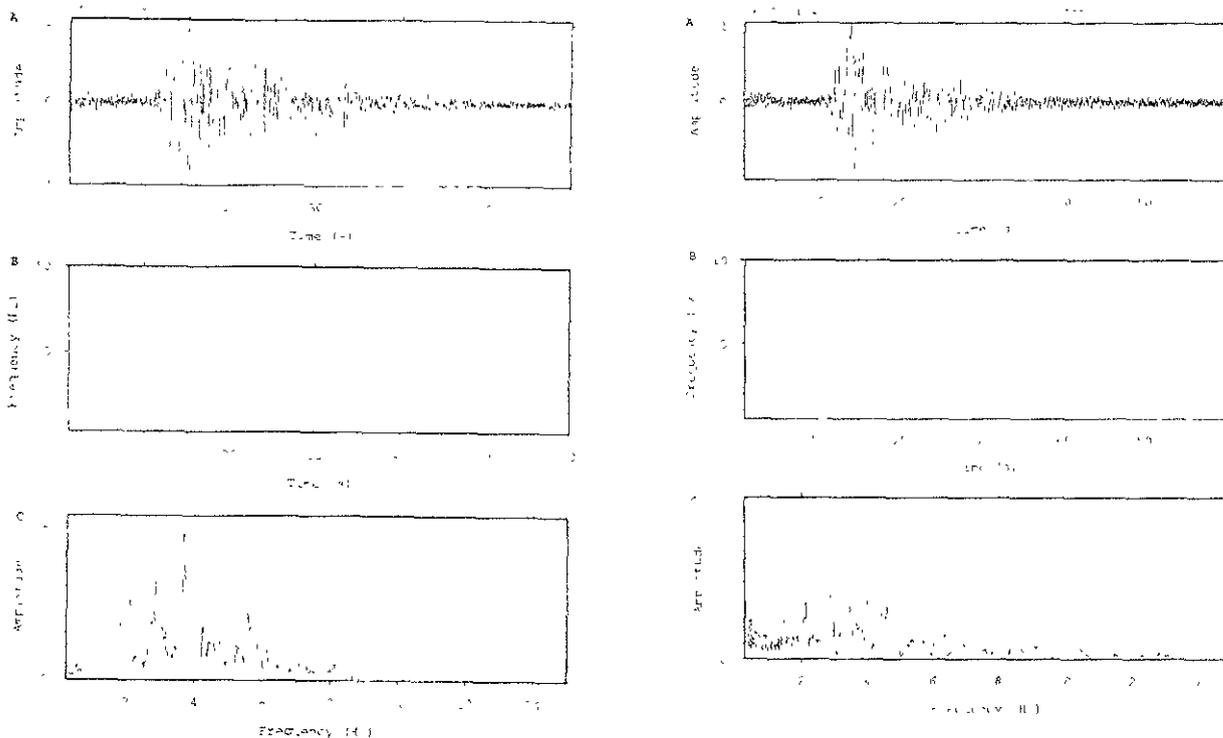


Figura IV.15 (izquierda) Evento LP registrado el 26 de octubre, se observa una fp de 0.13 y un segundo máximo espectral de 2.9 Hz. Figura IV.16 (derecha) Evento LP registrado el 4 de noviembre, se observa una fp de 0.13, y un segundo máximo en 3.3 Hz.

IV.2.2 Densidad de fp en las bandas de frecuencias

De la figura IV.14 se puede observar que la cantidad de LPs en las bandas F1, F2, F3 y F4 (definidos en la sección IV.2.1) varía con respecto al tiempo y suele aumentar (enjambres de LPs) antes de una etapa explosiva. Para observar si este comportamiento guarda claramente una relación con las explosiones se decidió cuantificarlo.

Esta sección se enfoca al comportamiento de la cantidad de eventos LP por día de acuerdo a cada banda de frecuencias. En la figura IV.17 se muestra el intervalo de tiempo estudiado contra el número de LPs cuyo contenido de frecuencias se encuentra en los rangos F1, F2, F3 ó F4. El recuadro inferior en cada una de las dos columnas es la representación gráfica del número de LP que ha sido utilizado para este estudio. Éste gráfico muestra algunas diferencias con respecto al que se analizará en la sección IV.3 conjuntamente a la profundidad de las explosiones, tal hecho se debe a que no todos los eventos se encuentran registrados en el formato que se utilizó para el estudio. De éste modo, en el gráfico de los eventos LP registrados por día que aquí se presenta, se pueden observar los gaps generados por falta de información.

En la figura IV.17 se puede identificar que el número de eventos LP registrados diariamente es prácticamente el mismo en ambas estaciones. No obstante, el número de éstos eventos con fp en las bandas de frecuencias propuestas, no es estrictamente el mismo en PPP y PPQ, en realidad se observan fuertes diferencias. Éste hecho no es

extraño, porque puede ser resultado de la delimitación de las bandas, recuérdese que en el caso de F3 y F4 el intervalo que las separa es de tan solo 0.2 Hz. Eventualmente la fp podría caer en una u otra, o incluso fuera, debido a que es más frecuente encontrar fps similares que iguales.

Lo sobresaliente aquí, es que los máximos más importantes aparecen al mismo tiempo y que casi siempre pueden relacionarse con un explosión. El único máximo que no muestra relación directa con un evento explosivo, es el máximo localizado a mediados del mes de junio (ver figura IV.17). Aún así, cuatro máximo de cinco localizados, anteceden una explosión.

Otro hecho importante es la ausencia de eventos LP con fp en la banda de frecuencias F1 en la estación PPP, y la marcada presencia de dichos eventos en la estación PPQ antes de una explosión. Lo más valioso es que éste tipo de eventos únicamente aparecen antes de una explosión, y que en el tiempo restante no se registran eventos con ésta fp (ver figura IV.17). Es propio además indicar que sólo en ésta banda no se observa el máximo anteriormente citado al que no se le relaciona ninguna explosión (ver figura IV.17). La hipótesis al respecto, tiene que ver con la direccionalidad de las explosiones del volcán siempre hacia el flanco Sur, donde se encuentra PPQ. La aparición de eventos LP con fp en la banda F1, posiblemente es un indicativo de la reapertura de conductos que solo son utilizados en etapas en las que el sistema de esfuerzos dentro del volcán se desestabiliza. Es decir que, por diversas razones la presión confinante aumenta y es necesario liberar energía, para lo cual es se usan más conductos, preferentemente los ya abiertos con anterioridad y direccionados hacia la zona de debilidad del flanco Sur. El uso de éstos conductos no siempre es necesario y son los conductos anteriormente considerados como los más largos o más estrechos (ver sección IV.2.1).

En la figura IV.17 también se observa que la banda de frecuencias predominante a lo largo del tiempo es la banda F4, y que ésta también presenta incrementos importantes en el número de LPs, conforme se aproxima un evento explosivo.

En el caso de los máximos el número de eventos con fp en las bandas elegidas suelen representar más del 60% de los eventos LP registrados en esos días. En el recuento diario restante la fp se encuentra distribuida en el rango de frecuencias de 1 a 5 Hz. Específicamente en la explosión del 25 de noviembre, dos días antes, el 23 y 24 se registraron 139 y 464 eventos LP respectivamente, de los cuáles cerca del 70% tienen fp en las bandas F1 a F4.

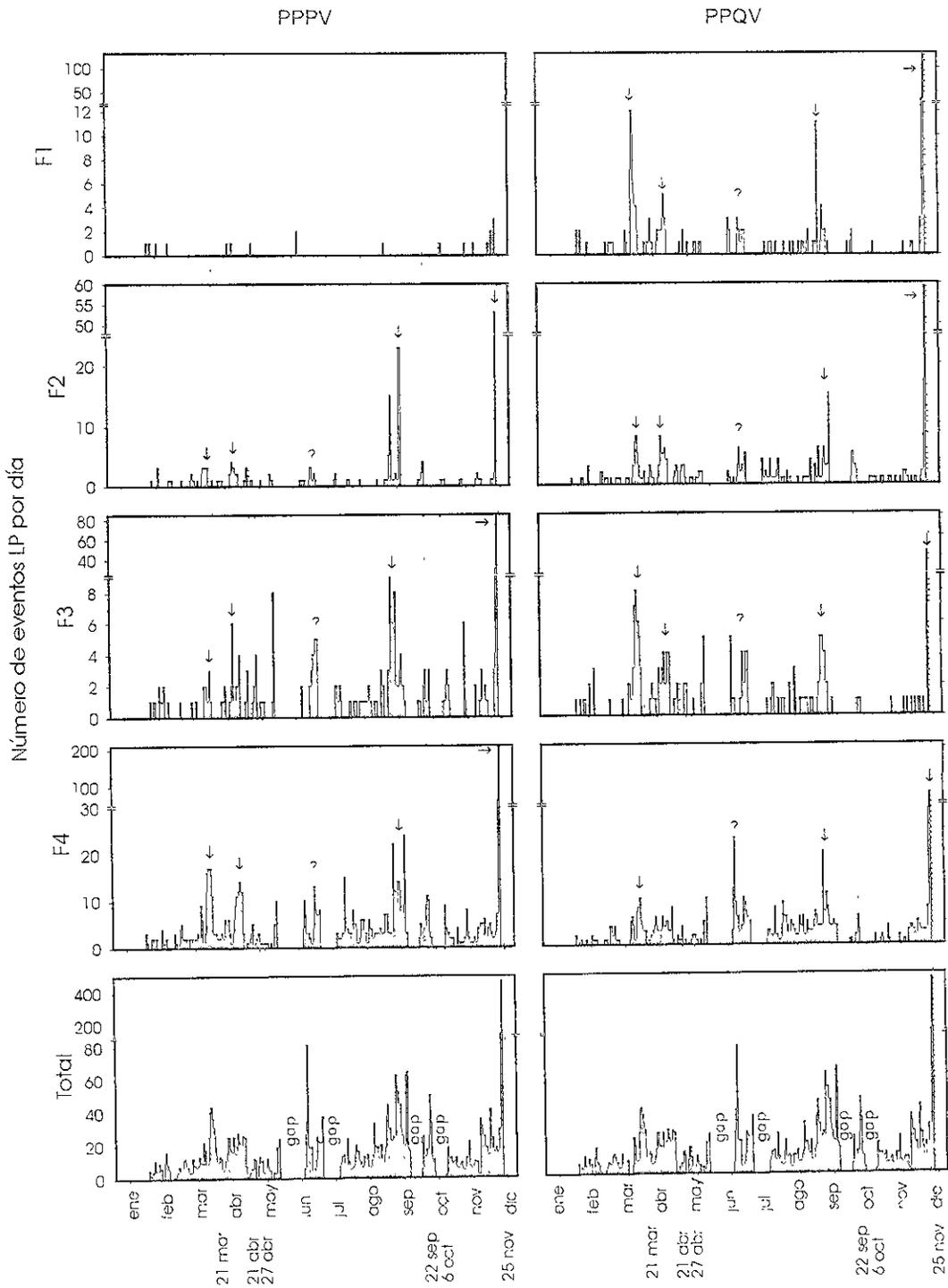


Figura IV.17 Número de eventos diarios con FP dentro de las bandas F1, F2, F3 y F4 (anteriormente acotadas) y número de eventos LP registrados por día (último renglón), Las fechas en la parte más inferior indican las explosiones. Las flechas en los recuadros son los máximos más importantes relacionados con las explosiones, el signo de interrogación indica un máximo que no se relaciona con un evento explosivo.

IV.2.3 REGRESIÓN DE LAS BANDAS DE FRECUENCIAS

a. POR EXPLOSIÓN

Debido a que las bandas de frecuencia se comportan de forma prácticamente horizontal, se propuso el estudio de las pendientes. Este estudio se llevó a cabo calculando la recta de regresión correspondiente para cada banda frecuencial, tomando como puntos para la regresión a las frecuencias pico obtenidas del cálculo de los espectros para las estaciones PPP y PPQ y sucedidos antes de cada explosión. De modo que para el año de 1998 se calcularon rectas de regresión con intervalos definidos por las explosiones y dos por cada intervalo, una para la estación PPP y otra para la estación PPQ.

El corto tiempo que separa a las explosiones del mes de abril por un lado y por otro a las que ocurrieron en el mes de septiembre, es un factor por el que no se puede calcular una recta de regresión entre cada par de eventos, por lo que se ha decidido en este caso que las explosiones de abril sean consideradas como una sola, evaluada al 21 de abril, y similarmente para las de septiembre, que se evaluarán al 22 de septiembre.

Es en esta sección donde se ve más el efecto de la ausencia de datos o gaps, porque para la explosión del 6 de octubre no existen datos suficientes para hacer una regresión (ver Figuras IV.5 a IV.8), puesto que el intervalo de la regresión corresponde prácticamente al del gap de octubre (ver sección IV.2).

Con lo anterior, restan cuatro intervalos para hacer las regresiones, y se definieron con las siguientes fechas: del 18 de enero al 21 de marzo, del 22 de marzo al 21 de abril, del 1ro de julio al 22 de septiembre y del 11 de octubre al 25 de noviembre. Obsérvese que el último día de cada regresión es el de una explosión.

Los resultados de las regresiones se muestran en una secuencia de cuatro gráficas correspondientes cada una a la banda frecuencial con la que se hicieron las regresiones. En cada gráfica se pueden observar los ajustes de cada intervalo y con los datos de las dos estaciones estudiadas.

En éstas gráficas se puede ver claramente que la frecuencia más baja respectiva a F1 no se detecta muy bien por la estación PPP y que para ninguna explosión muestra datos de interés. En tanto que esta misma banda muestra pequeños enjambres anteriores a las explosiones en los tres primeros casos en la estación PPQ y conserva en todos los casos una tendencia decreciente. La ausencia de datos en una, la probable relación con explosiones en otra produjo confusión, el hecho de ser pocos los datos permitió que se revisarán uno a uno, descubriéndose que los eventos se registraron en ambas estaciones, pero en la estación PPP se obtuvieron frecuencias que radican en bandas superiores, principalmente F4. Ello hace pensar que la estación PPQ tienen un efecto de sitio que reduce la amplitud de frecuencias superiores.

La banda F2 por su parte, es importante en los tres primeros intervalos, pero en el periodo de la última explosión son muy pocos los eventos con f_p dentro de este rango. En tanto que la recta de regresión tiene pendientes tanto ascendentes como descendentes

Y aunque en PPP predominan las rectas ascendentes y en PPQ las descendentes, es difícil generalizar.

Para la tercera banda frecuencial F3 el comportamiento del ajuste es según la explosión e igual en ambas estaciones, aunque es notable el del 22 de septiembre que tiene una tendencia marcadamente descendente.

La banda F4 es la que contiene al grueso de las fp obtenidas, se observan también subbandeados pero los intervalos se traslapan por lo que prácticamente se mantiene una sola banda; los ajustes de la banda F4 son descendentes en PPPV y en los dos últimos eventos de PPQV, no así en los dos primeros, donde el ajuste muestra una tendencia ascendente.

F1

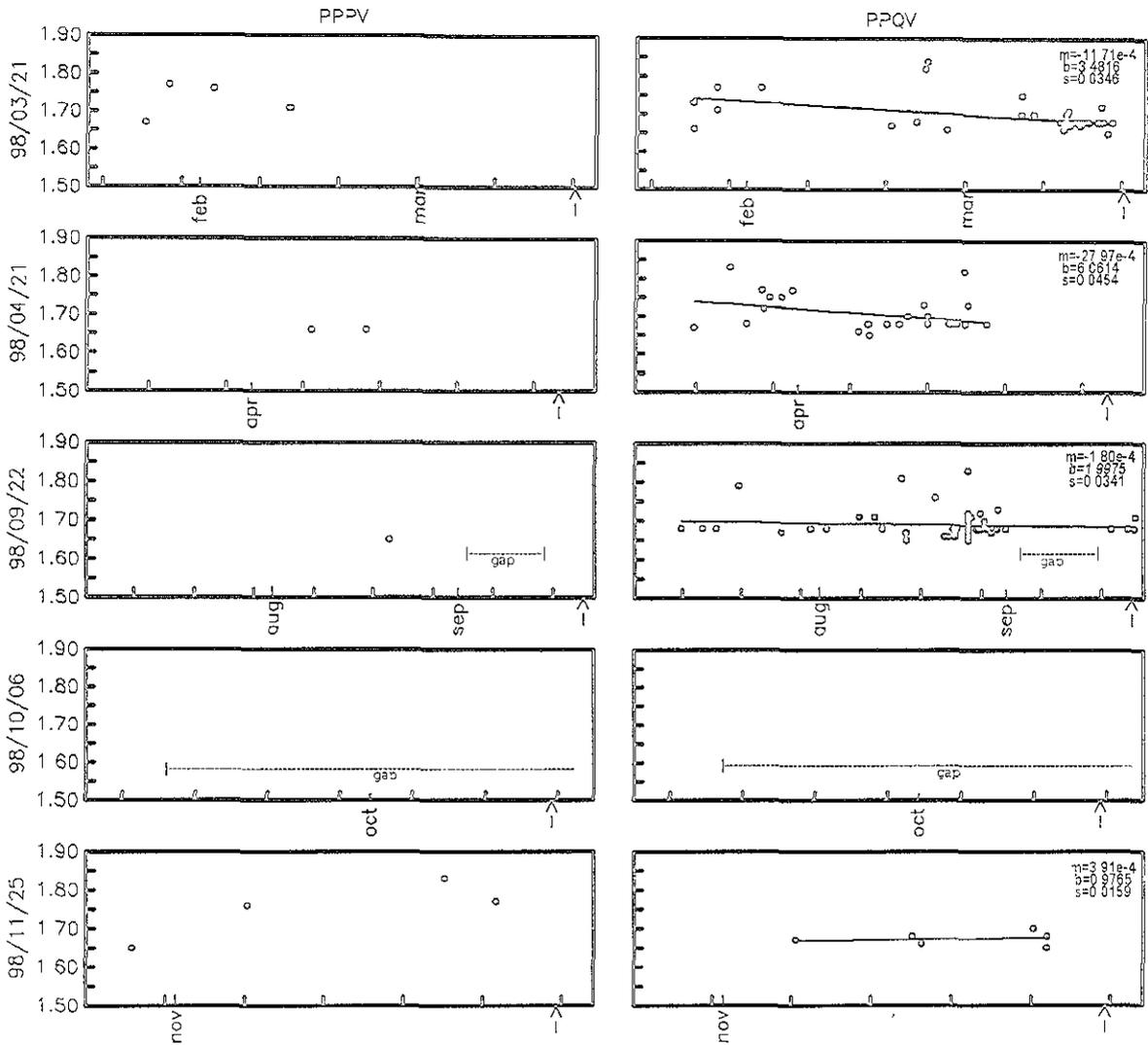


Figura IV.18. Con puntos negros se indican las fp dentro de la banda F1 (ver texto), de eventos LP, se ocupa un renglón para cada explosión (ver texto), que se ubica temporalmente con las flechas. En la columna izquierda se grafican las fp de registros en la estación PPPV y en la derecha los de la estación PPQV. La línea continua es la recta de regresión para cada caso, los valores m, b y s corresponden a la pendiente, ordenada al origen y desviación estándar respectivamente. Obsérvese que la estación PPP no contiene el mismo registro de fp, efecto que es atribuido al sitio de registro, las fp faltantes pertenecen a intervalos frecuenciales más altos, generalmente a los de la banda F3. También se observa que las regresiones de la estación PPQ son principalmente descendentes, y que en la primera explosión se observa claramente un enjambre que la precede.

F2

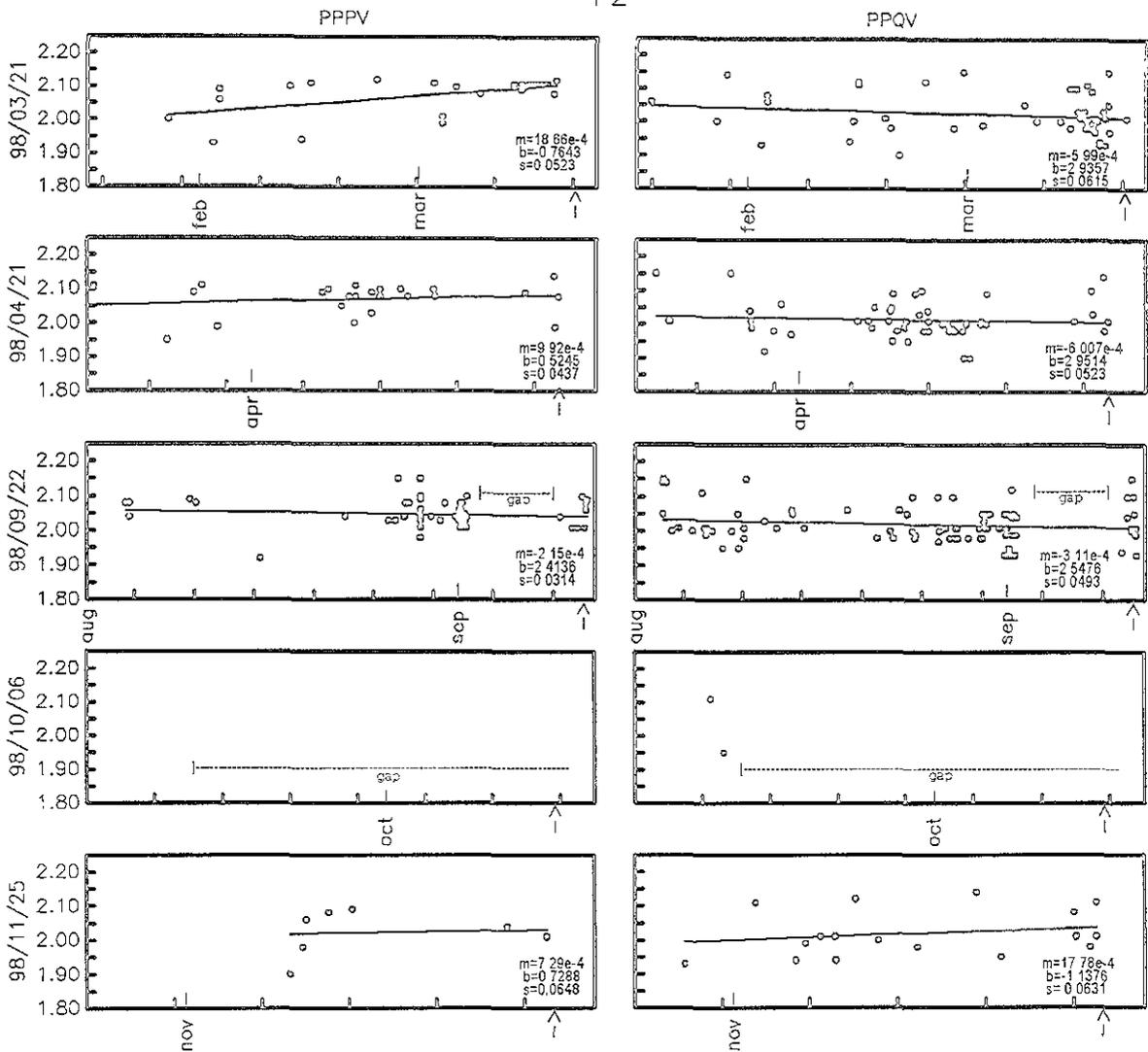


Figura IV.19. Con puntos negros se indican las fp dentro de la banda F2 (ver texto), de eventos LP, se ocupa un renglón para cada explosión (ver texto), que se ubica temporalmente con las flechas. En la columna izquierda se grafican las fp de registros en la estación PPPV y en la derecha los de la estación PPQV. La línea continua es la recta de regresión para cada caso, los valores m, b y s corresponden a la pendiente, ordenada al origen y desviación estándar respectivamente. Se observa claramente la ausencia de datos en la cuarta explosión debida al gap de octubre (ver texto), en éste caso la tendencia de las rectas de regresión no es uniforme, sin embargo se mantiene cada explosión exceptuando las correspondientes al 21 de marzo, donde en PPP la recta es ascendente y en PPQ descendente

F3

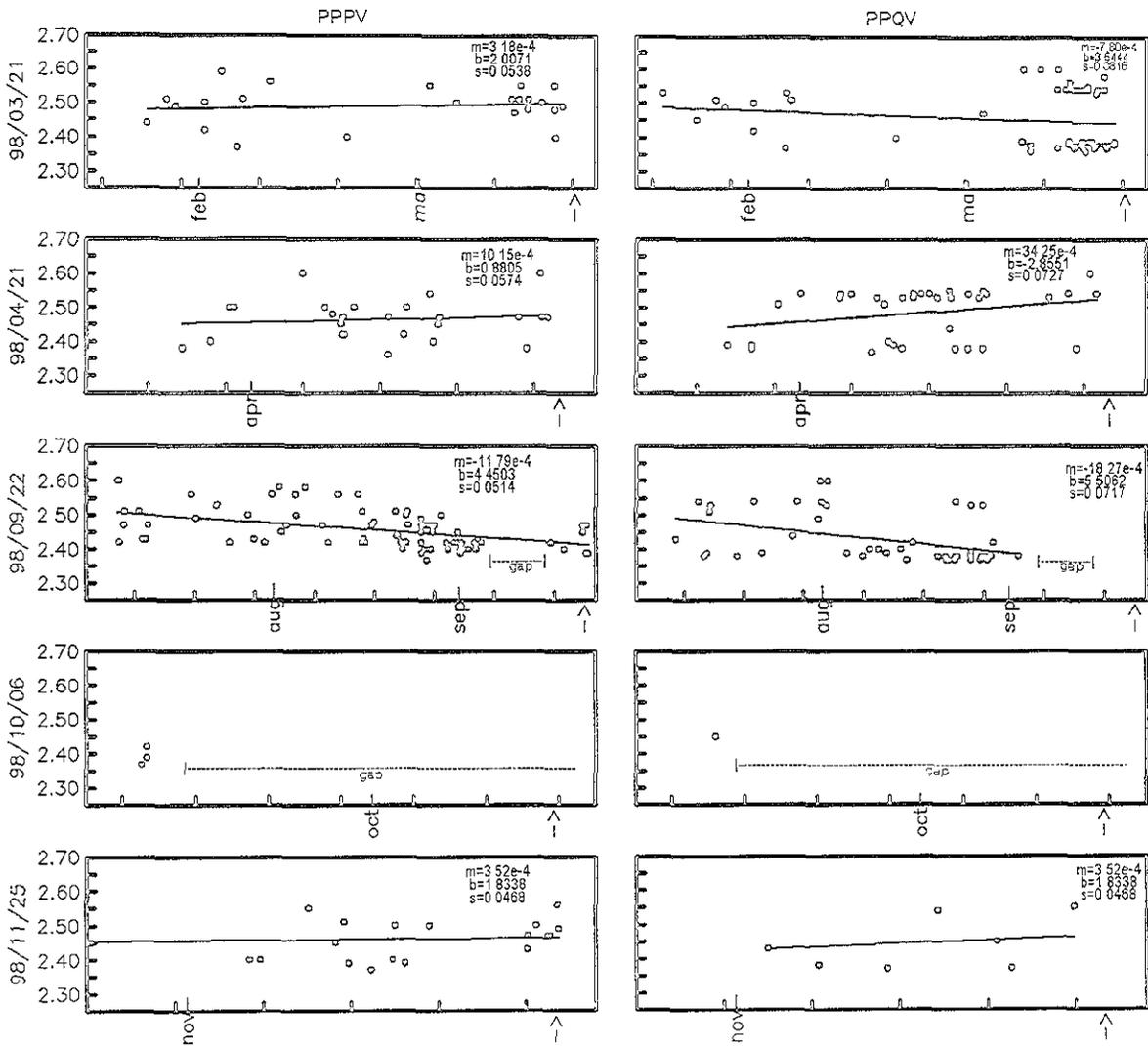


Figura IV.20. Con puntos negros se indican las fp dentro de la banda F3 (ver texto), de eventos LP, se ocupa un renglón para cada explosión (ver texto), que se ubica temporalmente con las flechas. En la columna izquierda se grafican las fp de registros en la estación PPPV y en la derecha los de la estación PPQV. La línea continua es la recta de regresión para cada caso, los valores m , b y s corresponden a la pendiente, ordenada al origen y desviación estándar respectivamente. También aquí es evidente el gap de octubre. Las pendientes de la estación PPQ son muy pronunciadas comparativamente con lo que se ha visto hasta el momento, esto es debido a un "subbandeado" que se marca bien antes de cada explosión, esto no se presenta dentro de la estación PPP donde las pendientes son menores.

F4

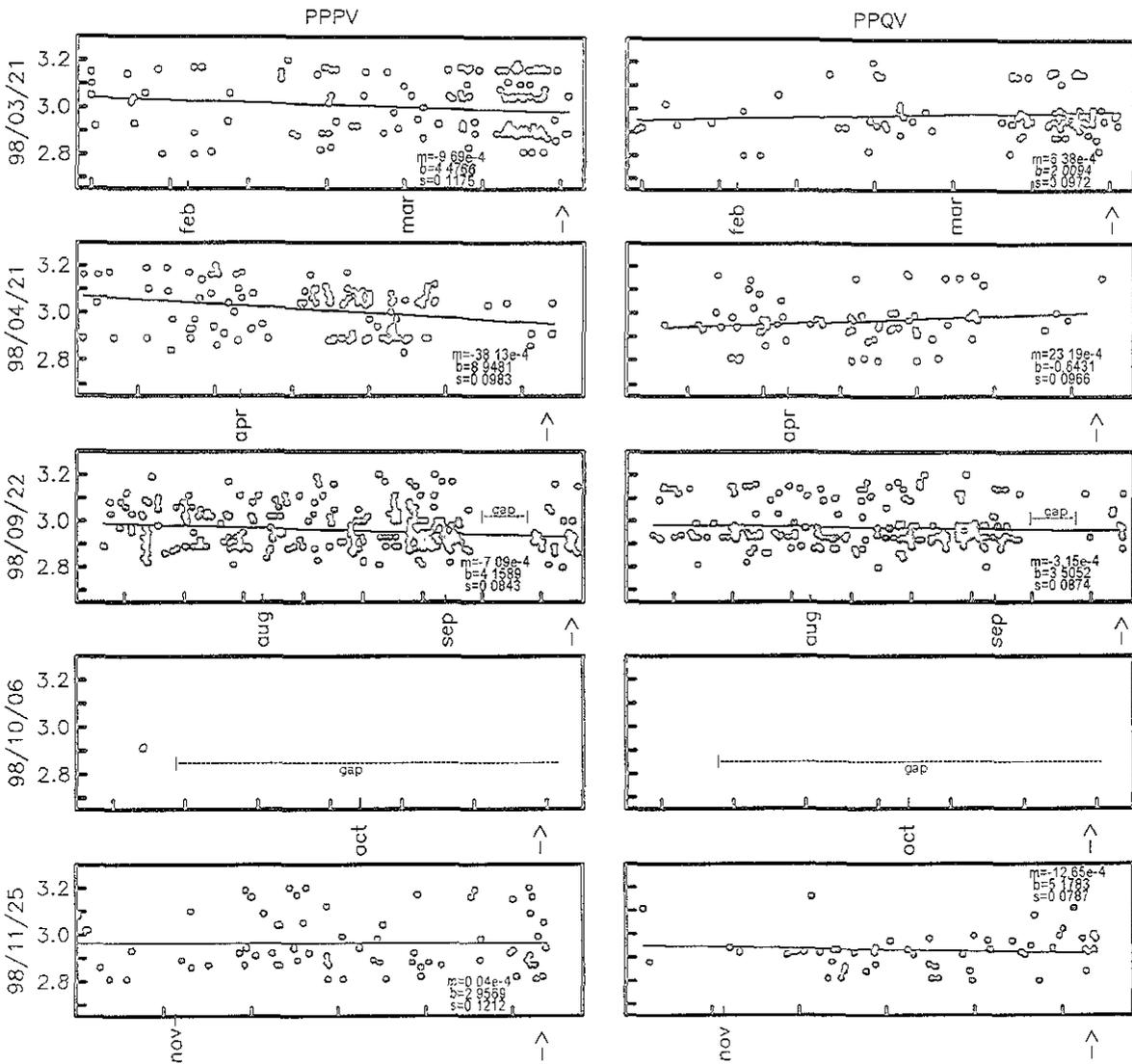


Figura IV.21. Con puntos negros se indican las fp dentro de la banda F4 (ver texto), de eventos LP, se ocupa un renglón para cada explosión (ver texto), que se ubica temporalmente con las flechas. En la columna izquierda se grafican las fp de registros en la estación PPPV y en la derecha los de la estación PPQV. La línea continua es la recta de regresión para cada caso, los valores m, b y s corresponden a la pendiente, ordenada al origen y desviación estándar respectivamente.

IV.2.3 Relación de la fp con otros parámetros

La relación que pueda o no existir entre la fp y los mecanismos que originan una explosión son más valorables si se ayudan de otros parámetros. El motivo de esta sección es interpretar la ocurrencia de las fp en el tiempo echando mano de algunas localizaciones de eventos vulcanotectónicos, en profundidad y magnitud (Figura IV.22 c), y del número de eventos LP registrados por día en estaciones de banda corta (Figura IV.22 b). La figura IV.22 a) es la misma de la sección IV.2.1 (Figura IV.14) y como ya se dijo representa la frecuencia pico calculada para los eventos LP en las estaciones PPP y PPQ.

En los párrafos siguientes, se hace una descripción cualitativa de los primeros dos recuadros (el último recuadro, ya ha sido descrito con anterioridad). Posteriormente se correlaciona la información obtenida. Se intenta encontrar un nexo común entre las explosiones. Es importante mencionar que la relación a las explosiones, se hace únicamente a cinco de ellas; esto debido a que los eventos del 21 y 27 de abril son muy cercanos (en base a nuestro análisis) y se cuentan como uno; igual es el caso de las explosiones del 22 y 23 de septiembre (el último no se graficó por estética). En adelante, se referirá a éstas como las explosiones del 21 de abril y el 22 de septiembre respectivamente.

Se puede generalizar que las fuentes principales se encuentran entre los primeros 2 y 5 km de profundidad a partir del cráter (Figura IV.22 c); y que en muy pocas ocasiones se localizan eventos entre 7 y 10 km de profundidad. Es importante señalar que los dos eventos más profundos son los que se localizan en dos intervalos, limitados por las explosiones del 21 de marzo y la del 21 de abril, uno; y otro limitado por la explosión del 27 de abril y el 22 de septiembre.

Dentro del rango establecido, se puede decir que los vulcanotectónicos son variables en cuanto a profundidad; sin embargo existen casos en los que se acumulan varios eventos, estos se refieren como a1, a2 y a3 en la figura IV.22 c). Obsérvese que éstos, coinciden exactamente con los máximos más importantes del segundo recuadro (máximos 1, 2, 3 y 4). Por lo se puede atribuir que las secuencias de LP's más fuertes son producto de la misma fuente y que esta podría ser diferente pero próxima en cada máximo.

Además, éstas acumulaciones se ven asociadas con el bandedo de los enjambres que en forma de frecuencia pico, pueden observarse en el recuadro superior.

De acuerdo a la figura IV.22 b), existen cuatro máximos importantes, que son numerados según su amplitud de mayor a menor (solo se numeraron los máximos principales). Dos de ellos preceden a la primera y última explosión (máximos 3 y 1 respectivamente, así señalados en la figura). En vista de que los máximos son bastante significativos, es conveniente estimar su tiempo de predicción.

El intervalo temporal entre el pico 3 y la explosión del 21 de marzo es de aproximadamente 5 días. En tanto que el del pico 1 y la explosión del 25 de noviembre es de aproximadamente 3 días. Estos tiempos son importantes en el caso de evaluar una posible explosión. Suponiendo desde luego que los mecanismos de fuente no varían mucho en un evento más intenso.

Han quedado ya correlacionadas dos explosiones, pero restan tres más, las del 21 de abril, 22 de septiembre y 6 de octubre. Obsérvese que los dos máximos importantes que restan se encuentran en el intervalo entre el 21 de marzo y el 21 de abril (máximo 4) y en el intervalo del 27 de abril al 22 de septiembre (máximo 2). No obstante dichos puntos, se encuentran muy lejanos en tiempo de sus respectivas explosiones, por lo que no podrían usarse como premonitores; no es posible con certidumbre diferenciar un máximo o enjambre de LP's que sirve para predecir erupciones, de uno que no.

El máximo 2 ha sido precedido por periodos constantes y fuertes de exhalación (periodos de entre 30 y hasta 70 lp's diarios). Posteriormente, la estructura volcánica entra en un periodo de tranquilidad (los lp's no sobrepasan los 30 diarios) y esto culmina con un evento de gran profundidad y magnitud, alrededor de la segunda quincena de agosto (en el gráfico, el evento más profundo localizado). Esto puede explicarse de la siguiente manera; en la primera etapa (cabe mencionar que empieza después de las explosiones de abril) el gran número de exhalaciones produce depósito de azufre en los conductos, que a su vez reduce el tamaño de estos, hasta casi cerrarlos, lo que sería causa de la segunda etapa. Al cerrar los conductos, la energía empieza a acumularse hasta que la presión en el sistema rebasa los límites de estabilidad y se produce el sismo profundo. Éste evento es un vulcanotectónico, pero por su profundidad en vez de provocar salida intensa de gases y ceniza, comúnmente relacionados con la ocurrencia de eventos LP (Chouet, 1996), provocó en su caso ruptura de la roca circundante y con ello una zona que permite el ascenso de material. Otro escape de energía asociado a este estrangulamiento, pueden ser las exhalaciones ubicadas en el máximo 6 de la gráfica, ya que a partir de aquí se observa una disminución considerable de la profundidad de las fuentes (Figura IV.22 c).

Aceptando que la descripción anterior describe correctamente el comportamiento del volcán, podemos entonces definir al máximo 4 como una serie de exhalaciones que produjo estrangulamiento en los conductos, pero en éste caso los conductos se cerraron menos, así que las exhalaciones posteriores continuaron liberando energía aunque no la suficiente, la acumulación de dicha energía culminó con las erupciones de abril, que en este caso se asocian con movimientos más someros. En éste intervalo, tenemos la presencia del segundo evento más profundo de toda la secuencia de vulcanotectónicos en el año.

De las dos descripciones anteriores y conjuntando los resultados del estudio de las pendientes; es posible ver que existen diferentes etapas eruptivas y que se pueden correlacionar entre ellas. Una etapa similar es la atribuible a las explosiones del 21 de marzo y 25 de noviembre y otra etapa sería la que existe entre ellas, respectivas a las erupciones de abril, septiembre y octubre.

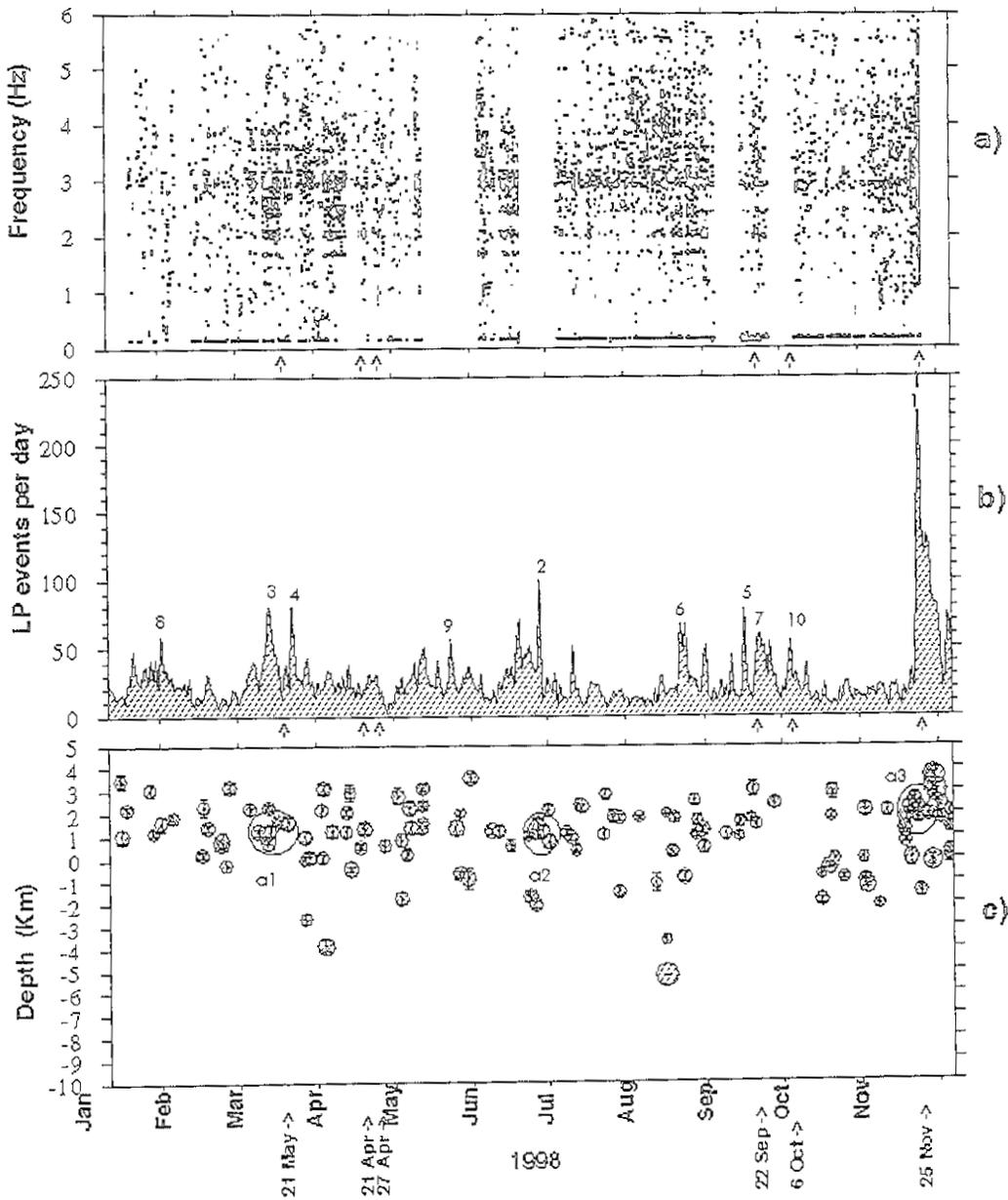


Figura IV.22 a) Relación tiempo frecuencia pico, b) eventos LP registrados diariamente durante el periodo estudiado, se enumeran de mayor a menor los máximos principales, y c) Ubicación de eventos en profundidad, a1, a2 y a3 indican acumulación de eventos a la misma profundidad (b) y c) cortesía de C. Valdés).

V. CONCLUSIONES

Se postula el comportamiento de las frecuencias pico como un buen antecesor indicativo de periodos explosivos del volcán. En el año de 1998 se observó que los eventos LP muestran frecuencias pico entre 1 y 4 Hz. Este intervalo es el mismo en las estaciones PPP y PPQ, de hecho es muy frecuente observar frecuencias pico iguales o similares en eventos registrados por ambas al mismo tiempo. Se justifica que la frecuencia pico responde a la fuente, y esperaríamos encontrar intervalos de frecuencias parecidos en las estaciones restantes.

El comportamiento de las frecuencias pico que antecede a un evento explosivo muestra generalmente un incremento en eventos con f_p dentro de cuatro bandas principales. Los intervalos son: 1.65 a 1.85 Hz, 1.90 a 2.15 Hz, 2.35 a 2.60 Hz y 2.80 a 3.20 Hz. Especialmente la banda de frecuencias más baja, se asocia con la directividad de las explosiones, la hipótesis estaría justificada si se encontrara en nuevos estudios, que los registros de estaciones sobre la ladera sur del volcán muestran un comportamiento similar antes de una explosión.

Vale la pena realizar el estudio del bandeamiento en todas las estaciones, usando un procedimiento estadístico para delimitar las bandas de frecuencias y las posibles modas argumentadas en éste trabajo. Es posible que en futuras ocasiones el bandemiento no se de en las mismas frecuencias, pero que exista como tal, debido a que la longitud y ancho de los conductos podría variar con una fuerte actividad volcánica.

El estudio del promedio diario de f_p no es muy claro en nuestro caso, la causa podría ser el hecho de que el Popocatepetl es un volcán abierto, es decir con liberaciones constantes de energía. Es posible que en volcanes cerrados como el Chichonal o el Santa Helena en donde la acumulación de energía es constate, el comportamiento de los promedios se definido en forma ascendente o descendente con el tiempo. Es decir, habría más consistencia en las pendientes calculadas.

También se encontró que las frecuencias pico responden bien al comportamiento de fluidos en los conductos. Se calcularon longitudes de conductos que van de 500 a 1000 m. La presencia de enjambres de eventos LP con la misma frecuencia es la respuesta a la excitación de una misma fuente, que es el punto de partida de una explosión.

BIBLIOGRAFÍA

- Banks, N. G., Tilling, R. I., Harlow D. H., y Ewert, J. W., 1993. *Vigilancia Volcánica y Pronósticos a Corto Plazo*, en Apuntes para un Curso Breve sobre: Los Peligros Volcánicos, 2 – 3 julio de 1989, Santa Fé, Nuevo México, USA. Ed. Robert I. Tilling. Pub. World Organization of Volcano Observatories. 51- 82.
- Chouet, B. A., Page, R.A., Stephens, C. D., Lahr, J. C., and Power J. A., 1994. *Precursory swarms of long-period events at Redoubt Volcano (1989-1990), Alaska. Their origin and use as a forecasting tool.* J. Volcanol. Geotherm. Res., 62: 95–136.
- Chouet, B. A., 1996. *Long-period Volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting.* Nature, 380 : 309 – 316.
- Chouet, B. A., Saccorotti, G., Martini, M., Dawson, P., De Luca, G., Milana, G. And Scarpa, R., 1997. *Source and path effects in the wave fields of tremor and explosions at Stromboli Volcano, Italy.* J. Geophys. Res., 102 : 15,129 – 15,150.
- CENAPRED, 1999. Página web del Centro Nacional de Prevención de Desastres: <http://www.cenapred.unam.mx>
- Dzurisin, D, 1993. *Inclinómetros Electrónicos para la Vigilancia Volcánica: lecciones de Mount St. Helens.* En *Vigilando Volcanes: Técnicas y Estrategias empleadas por el personal del Observatorio Vulcanológico Cascades, 1980-90*; Eds: Ewert y Swanson. 75-90.
- Furukawa, B. T., Murray, T. L. y McGee, K. A., 1993. *Videovigilancia en Volcanes activos con Televisión de rastreo lento.* En *Vigilando Volcanes: Técnicas y Estrategias empleadas por el personal del Observatorio Vulcanológico Cascades, 1980-90*; Eds: Ewert y Swanson. 203-208.
- Gasperini, P., Gresta, S. and Mulargia, F., 1990. *Statistical analysis of seismic and eruptive activities at Mt. Etna during 1978-1987.* J. Volcanol. Geotherm. Res., 40 : 317 – 325.
- Gil Cruz, F., Chouet, B. A., 1997. *Long-period events, the most characteristic seismicity accompanying the emplacement and extrusion of lava dome in Galeras Volcano, Colombia, in 1991.* J. Volcanol. Geotherm Res , 77 : 121–158.
- Iwatsubo, E. Y. y Swanson, D. A., 1993. *Métodos usados para vigilar la Deformación del piso del Cráter y del Domo de lava en el Mount St. Helens, Washington* En *Vigilando Volcanes: Técnicas y Estrategias empleadas por el personal del Observatorio Vulcanológico Cascades, 1980-90*; Eds: Ewert y Swanson. 57-74.
- IG, 1999 Página web del Instituto de Geofísica, Sección de geomagnetismo: <http://charro.igeofcu.unam.mx/geomag/crusdi.html>

- Lahr, J. C., Chouet, B. A., Stephens, C. D., Power, J. A. and Page, R. A., 1994. *Earthquake classification, location and error analysis in a volcanic environment: implications for the magmatic system of the 1989-1990 eruptions at Redoubt Volcano, Alaska*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 62:137-151.
- Leet, R. C., 1988. *Saturated and Subcooled Hydrothermal Boiling in Groundwater Flow Channels as a Source of Harmonic Tremor*. J. Geophys. Res., 93 : 4835 – 4849.
- Minakami, T., 1960. *Fundamental research for predicting volcanic eruptions, Part I*. Bull. Earthquake Res. Inst., 38, 497-544.
- Nakano, M., Kumagai, H., Kumazawa, M., Yamaoka, K. and Chouet, B., 1998. *The excitation and characteristic frequency of long-period volcanic event: An approach based on a inhomogeneous autoregressive model of linear dynamic system*. J. Geophys. Res., 103 : 10,031 – 10,046.
- Pomposo, G y Martínez, G; 1999. *Reporte de explosiones del volcán Popocatépetl de diciembre de 1997 a abril de 1999*. (No publicado).
- Power, J. A., Lar, J.C., Page, R. A., Chouet, B. A., Stephens, C. D., Harlow, D. H., Murray, T. L. and Davies J. N.; 1994. *Seismic evolution of the 1989-1990 eruption of Redoubt Volcano, Alaska*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 62: 69 – 94.
- Quaas, R., González, R., Guevara, E., Ramos, E. y de la Cruz-Reyna, S; 1995. *Monitoreo Volcánico: Instrumentación y Métodos de vigilancia en el Volcán Popocatépetl. Estudios realizados durante la crisis 1994 – 1995*. 24 –76.
- Scarth, Alwyn, 1994. *Volcanoes: an Introduction*. Ed. Texas A&M University Press, The Louise Lindsey Merrik natural environment series: 19.
- Sutton, A. J., McGee, K. A., Casadevall, T. y Stokes, J. B.; 1993. *Técnicas Fundamentales para el estudio de gases Volcánicos: Un acercamiento Integral a la Vigilancia*. En *Vigilando Volcanes: Técnicas y Estrategias empleadas por el personal del Observatorio Vulcanológico Cascades, 1980-90*; Eds: Ewert y Swanson. 195 – 202.
- Topinka, L., 1993. *Fotografía básica en el Mount St. Helens y otros Volcanes de la Cordillera Cascades*. En *Vigilando Volcanes: Técnicas y Estrategias empleadas por el personal del Observatorio Vulcanológico Cascades, 1980-90*, Eds: Ewert y Swanson 209-232.
- USGS, 1999. *Página web del United States Geological Survey, Sección de Volcanes*: <http://volcanoes.usgs.gov>

APÉNDICE A

En éste apéndice se incluyen los registros de las explosiones del 21 de marzo, 21 y 22 de abril, 22 y 23 de septiembre, 6 de octubre y 25 de noviembre de 1998. Se presentan los registros obtenidos por toda la red sismológica del volcán y los espectros de la componente vertical en las estaciones PPP y PPQ. Los espectros de las explosiones se usaron para comparar la intensidad de éstas.

SHEET 1 OF 1
03/21/1998 13:05:14.040

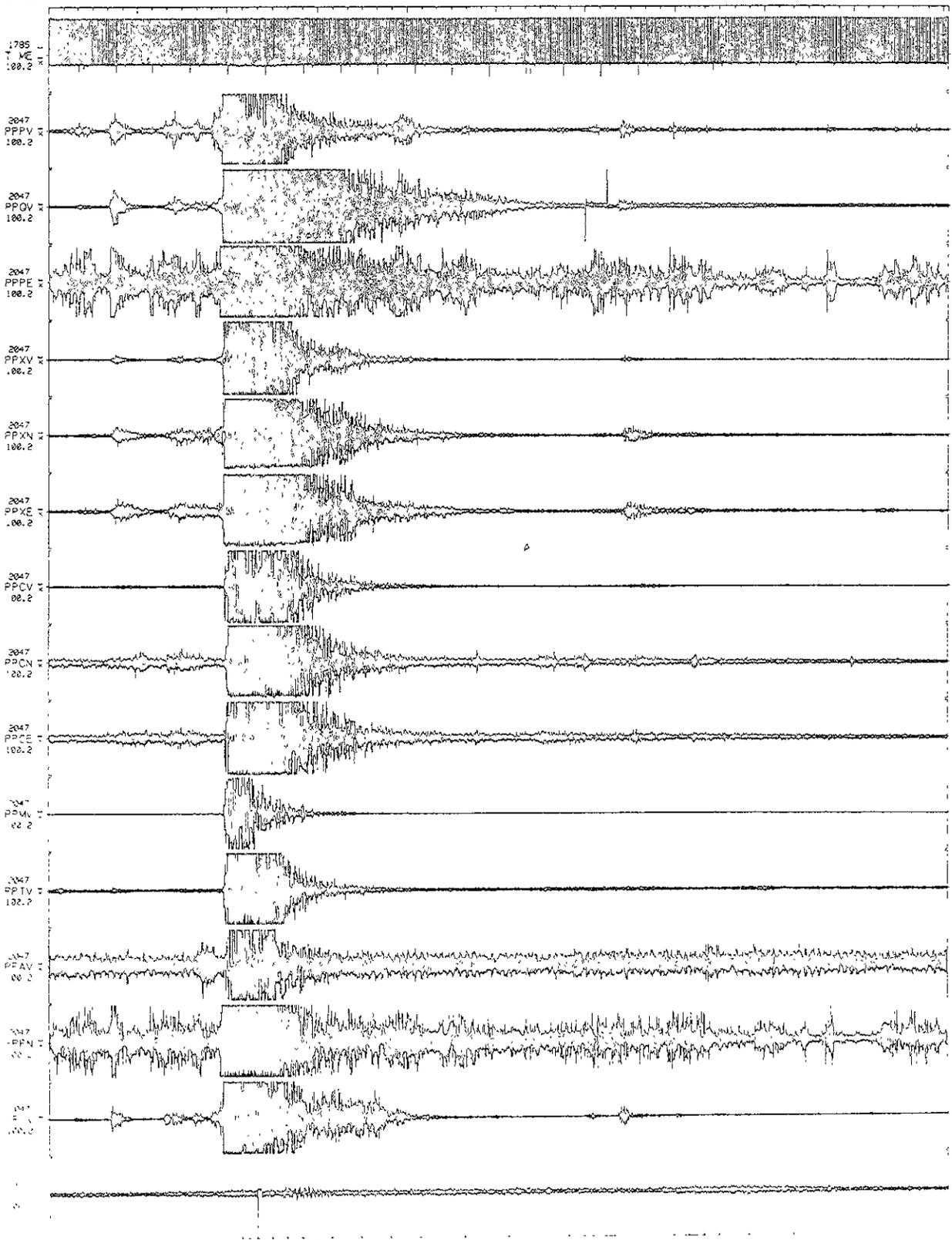


Figura A1 Explosión del 21 de marzo, se muestran los registros obtenidos por todas las estaciones, los registros de las estaciones PPIV y PPOV son los dos primeros renglones, el registro del último renglón corresponde a una estación localizada en Iguala, Guerrero y se utiliza para determinar microsismos de origen tectónico.

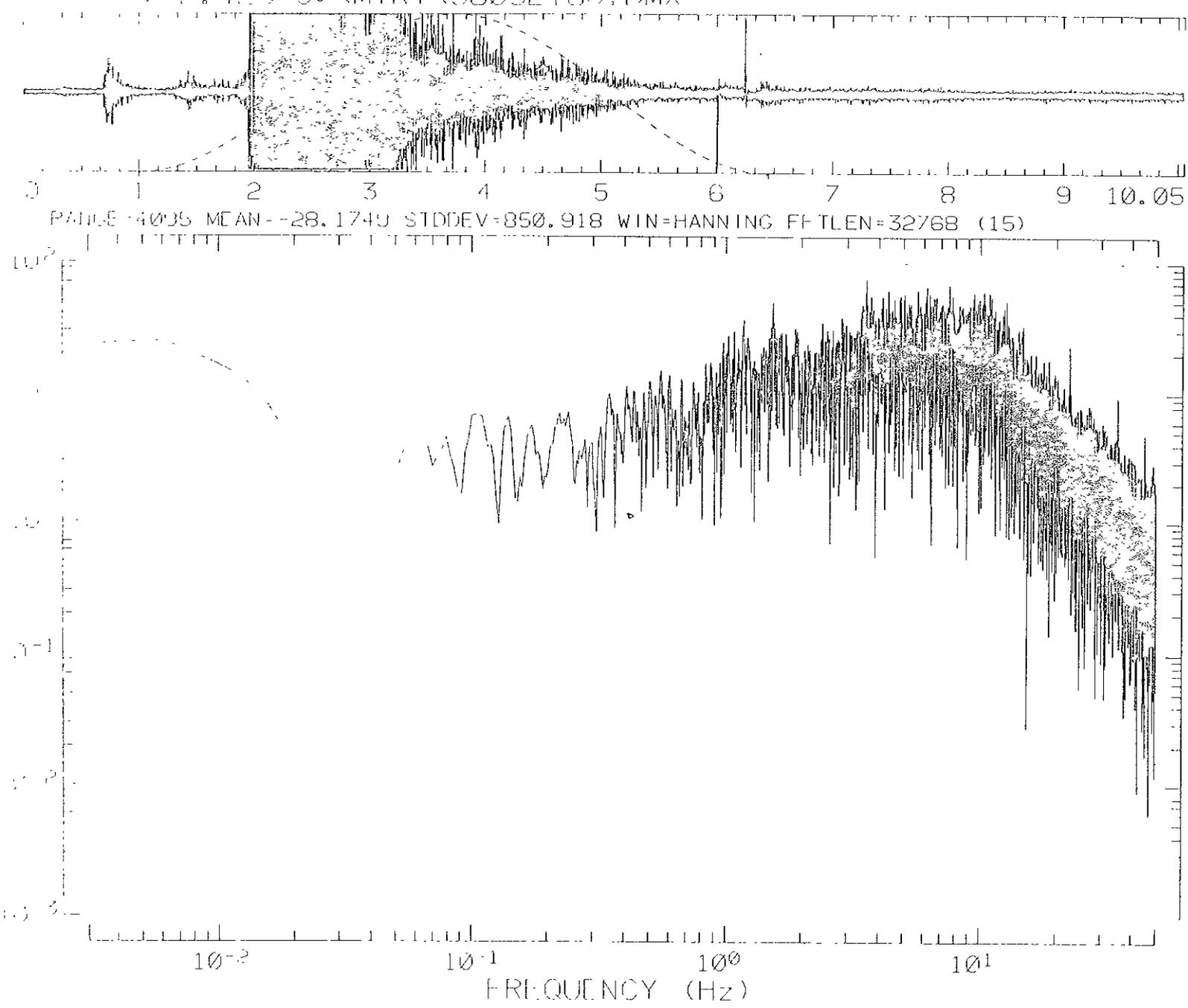


Figura A2
Espectro de amplitudes correspondiente a la explosión del 21 de marzo, registrada en la estación PJP

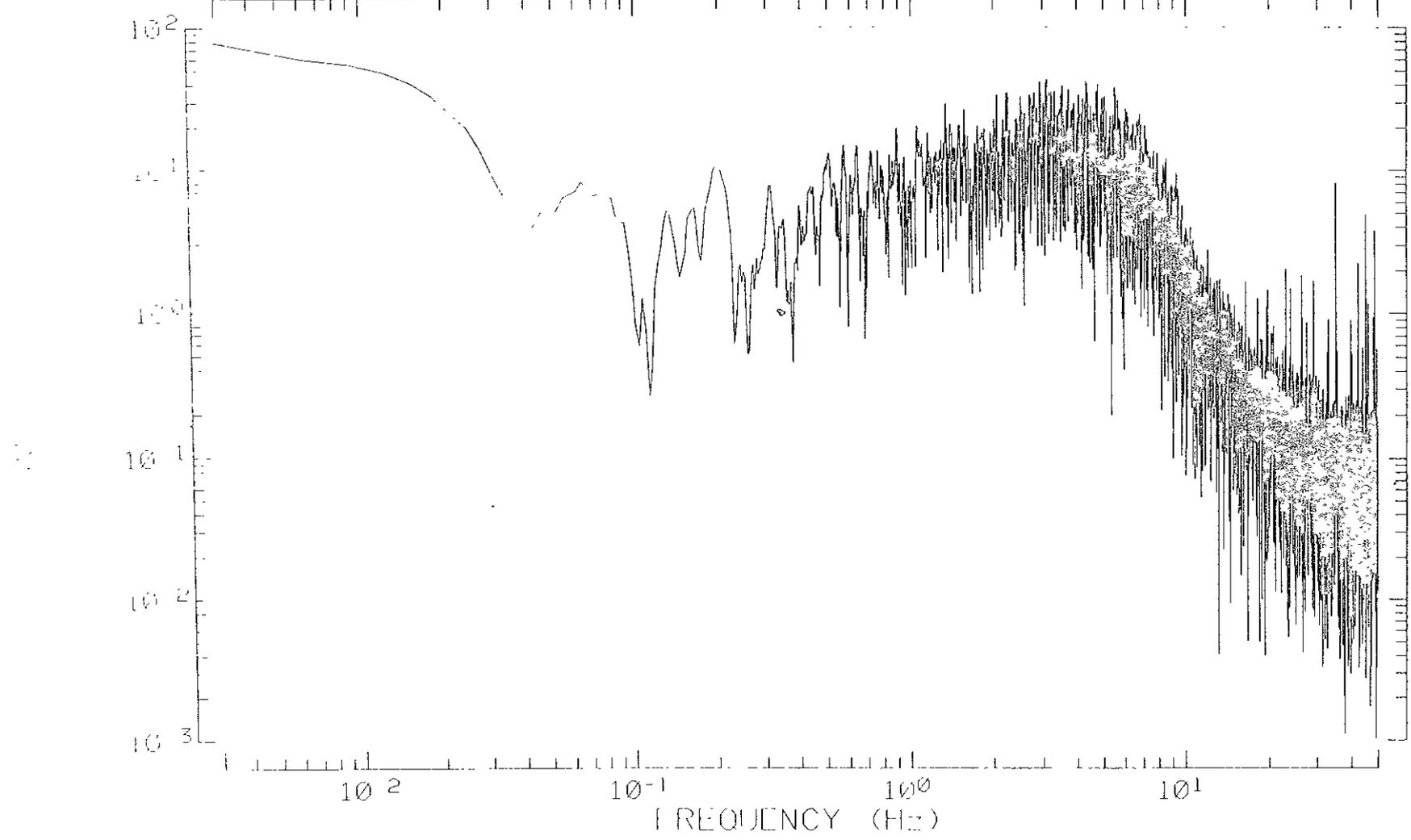
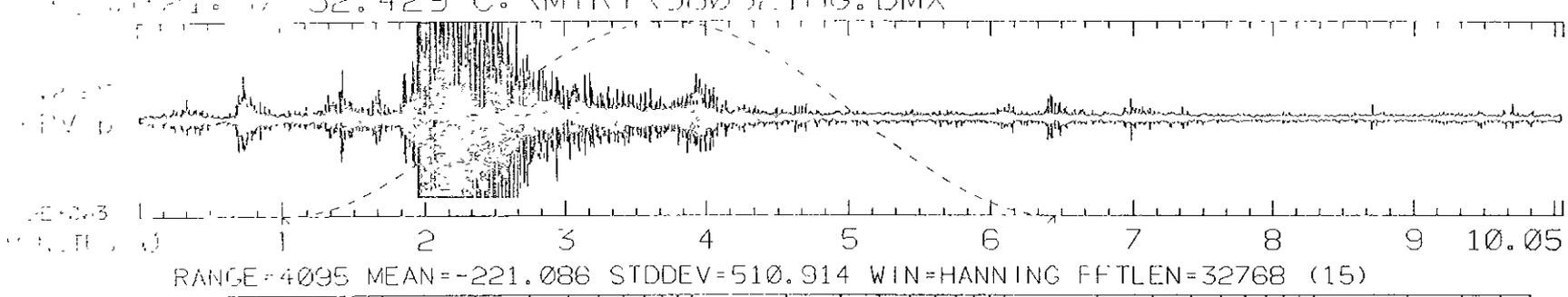


Figura A3
 11/01/2000

Espectro de amplitudes correspondente à frequência que foi de 100 a 10000 Hz.

SHEET 1 OF 1 01/13/100 11:22:21.070

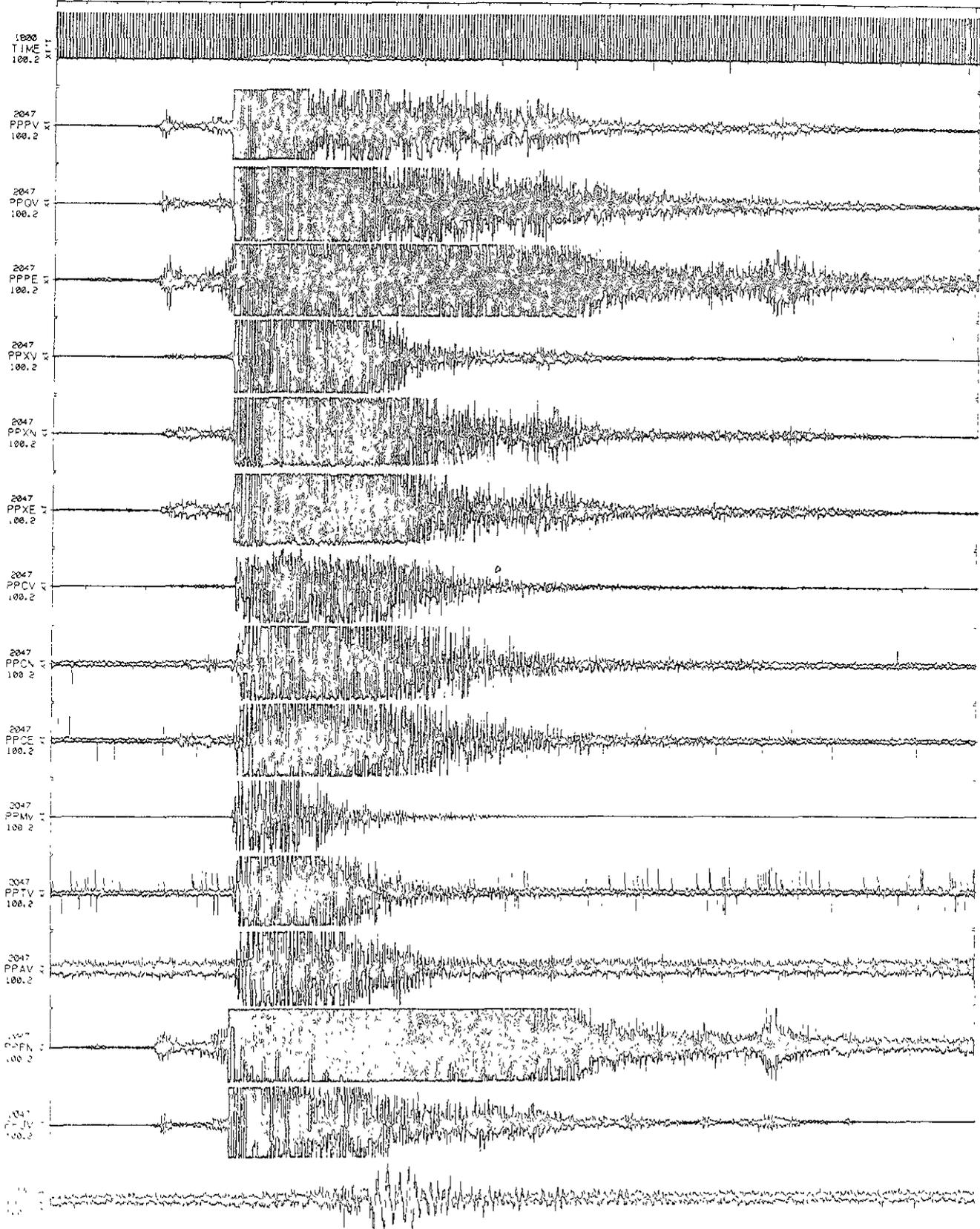
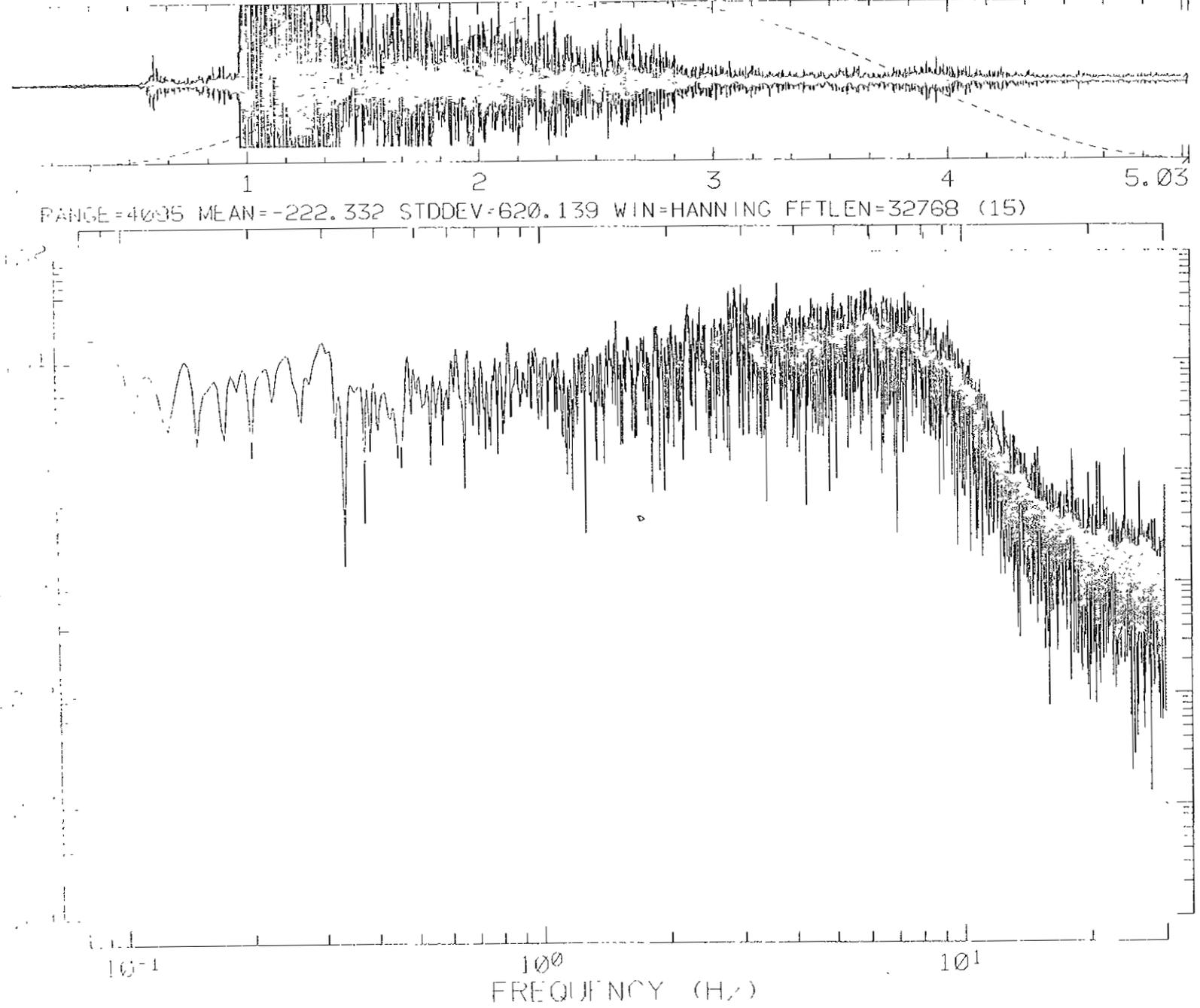
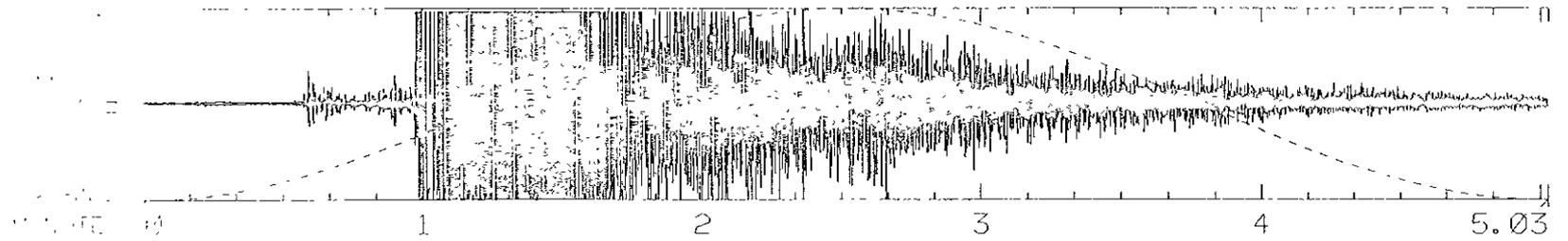


Figura A4 Explosión del 21 de abril: se muestran los registros obtenidos por todas las estaciones, los registros de las estaciones PPPV y PPQ son los dos primeros renglones, el registro del último renglón corresponde a la estación en la zona en guila. El evento se caracteriza por ser un microsismo de origen tectónico.

FIGURE 16
SPECTRUM OF THE SIGNAL





RANGE=4095 MEAN=28.2162 STDDEV=790.634 WIN=HANNING FFTLEN=32768 (15)

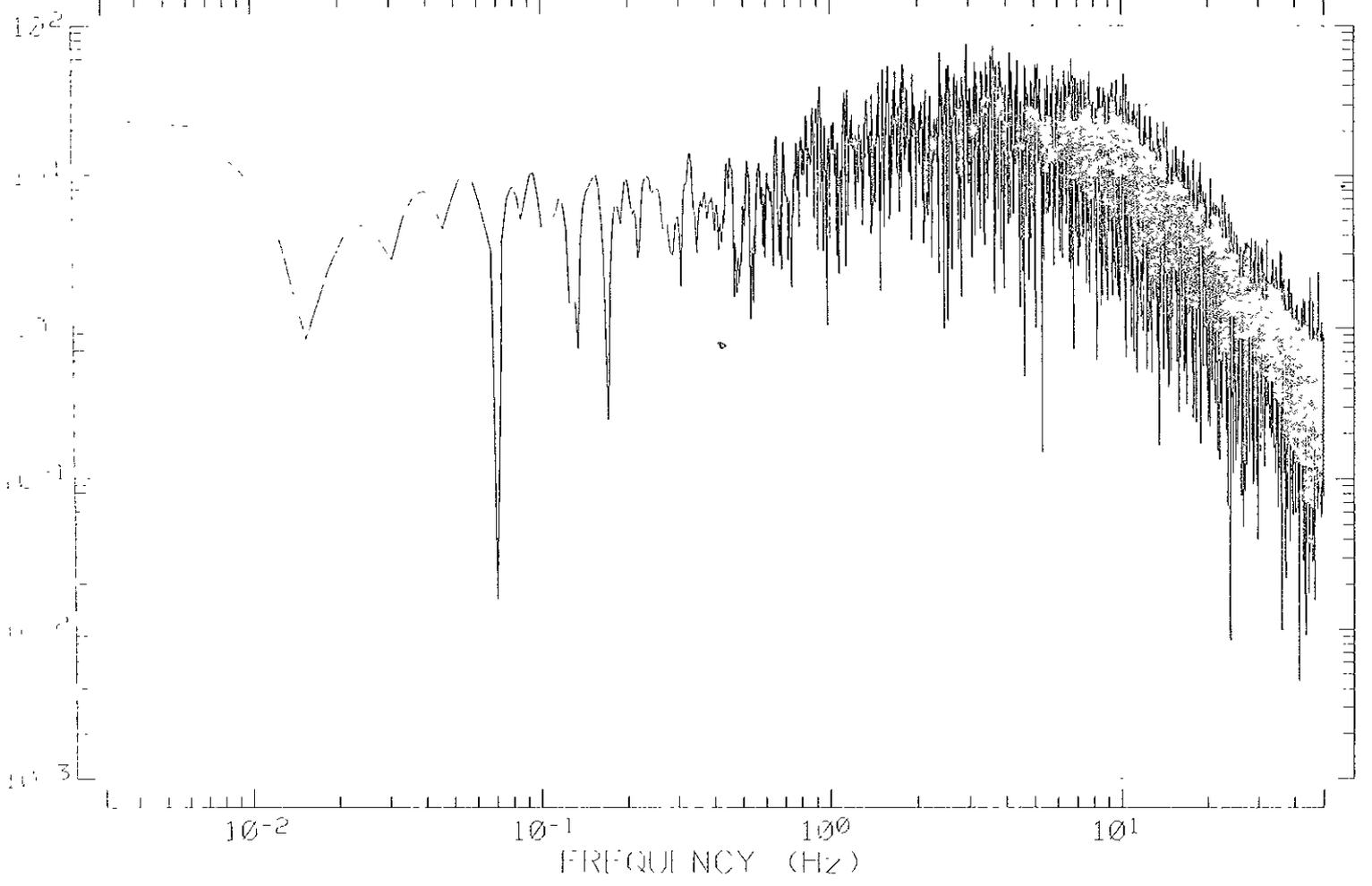


Figura A6
oscilacion PPG

Espectro de amplitudes correspondiente a la explosion del 21 de abril, registrada en la

SHEET 1 OF 1 01/13/100 12:29:53.920

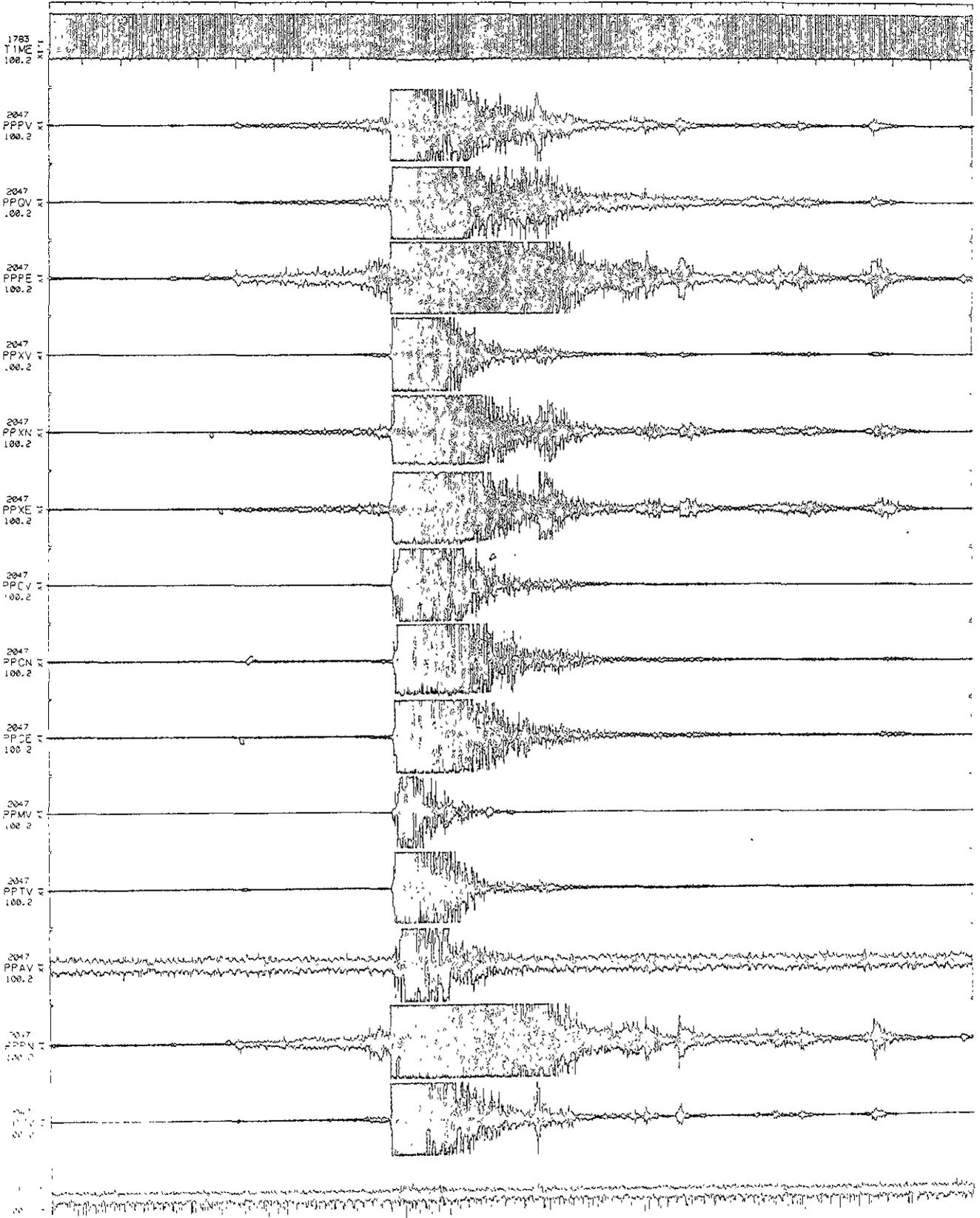


Figura A7 Explosión del 27 de abril, se muestran los registros obtenidos por todas las estaciones, los registros de las estaciones PPP y PPQ son los dos primeros renglones, el registro del último renglón corresponde a una estación localizada en Iguala, Guerrero y se utiliza para discriminar microsismos de origen tectónico

Figura A8

Processo de amplitude correspondente a 10 pulsos de 27 ms cada, registrados em

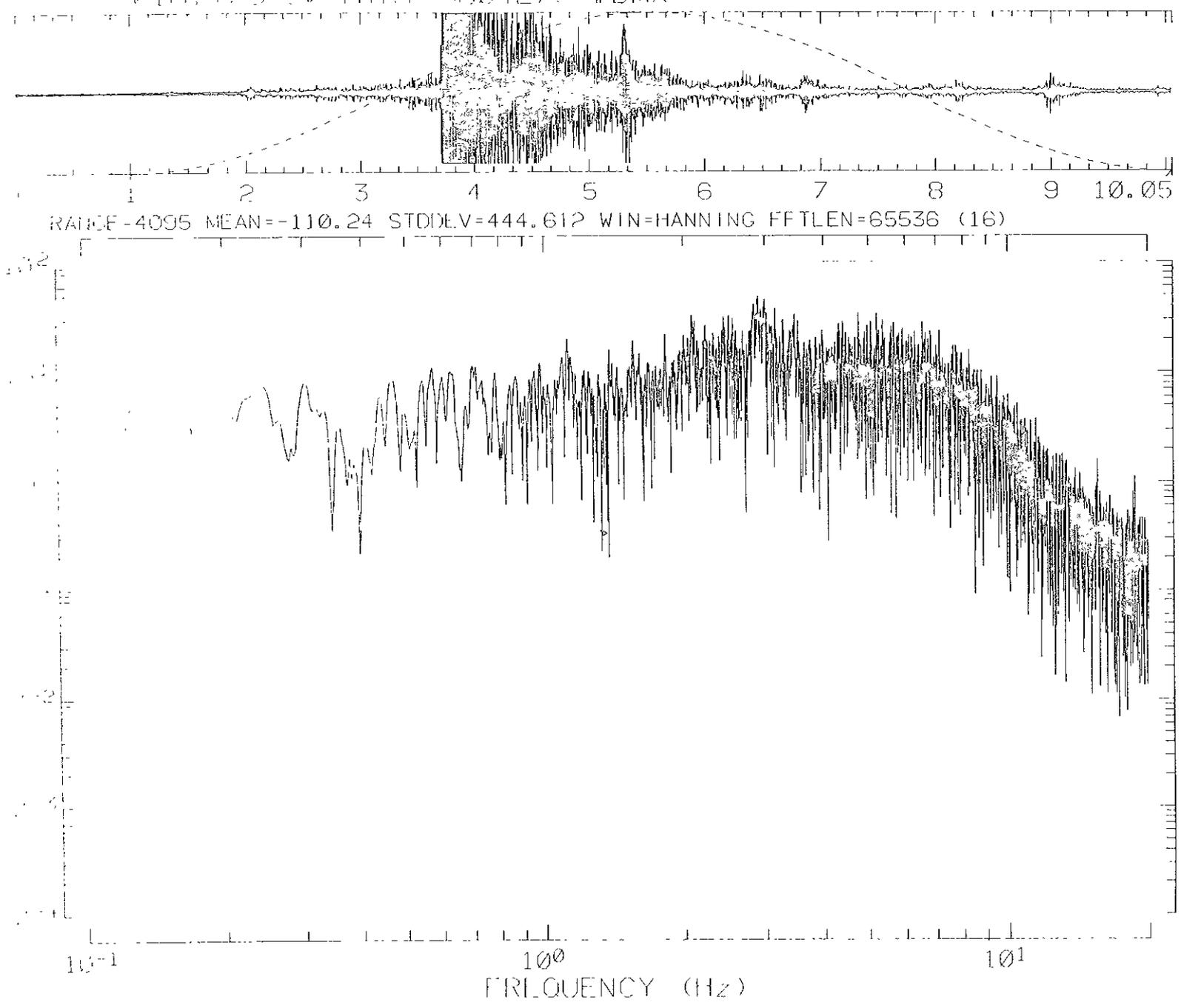
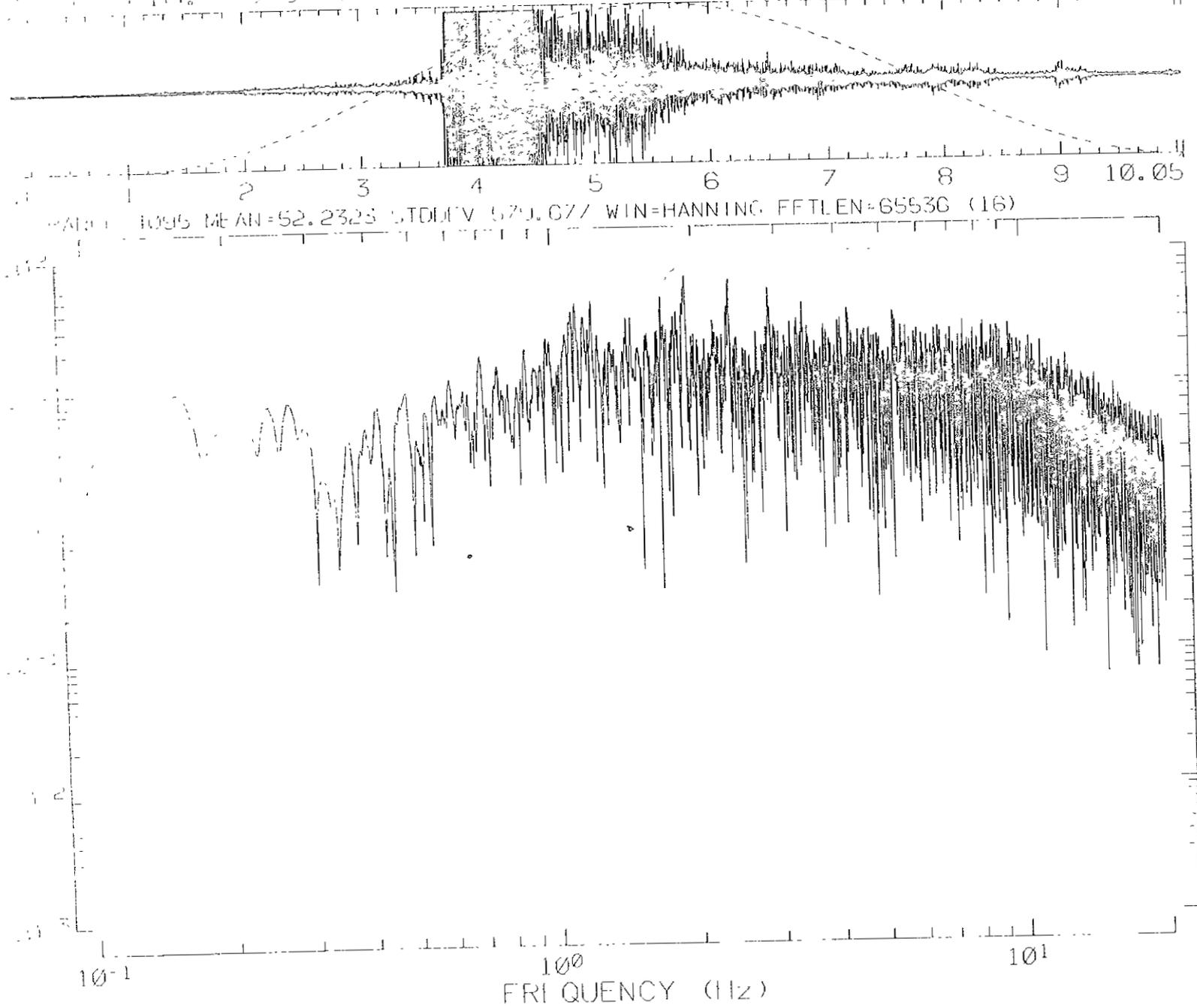


Figura 19

Espectro de amplitud correspondiente a la explosión de 27 de abril registrada en la



SHEET 1 OF 1 01/21/100 13:03:14.410

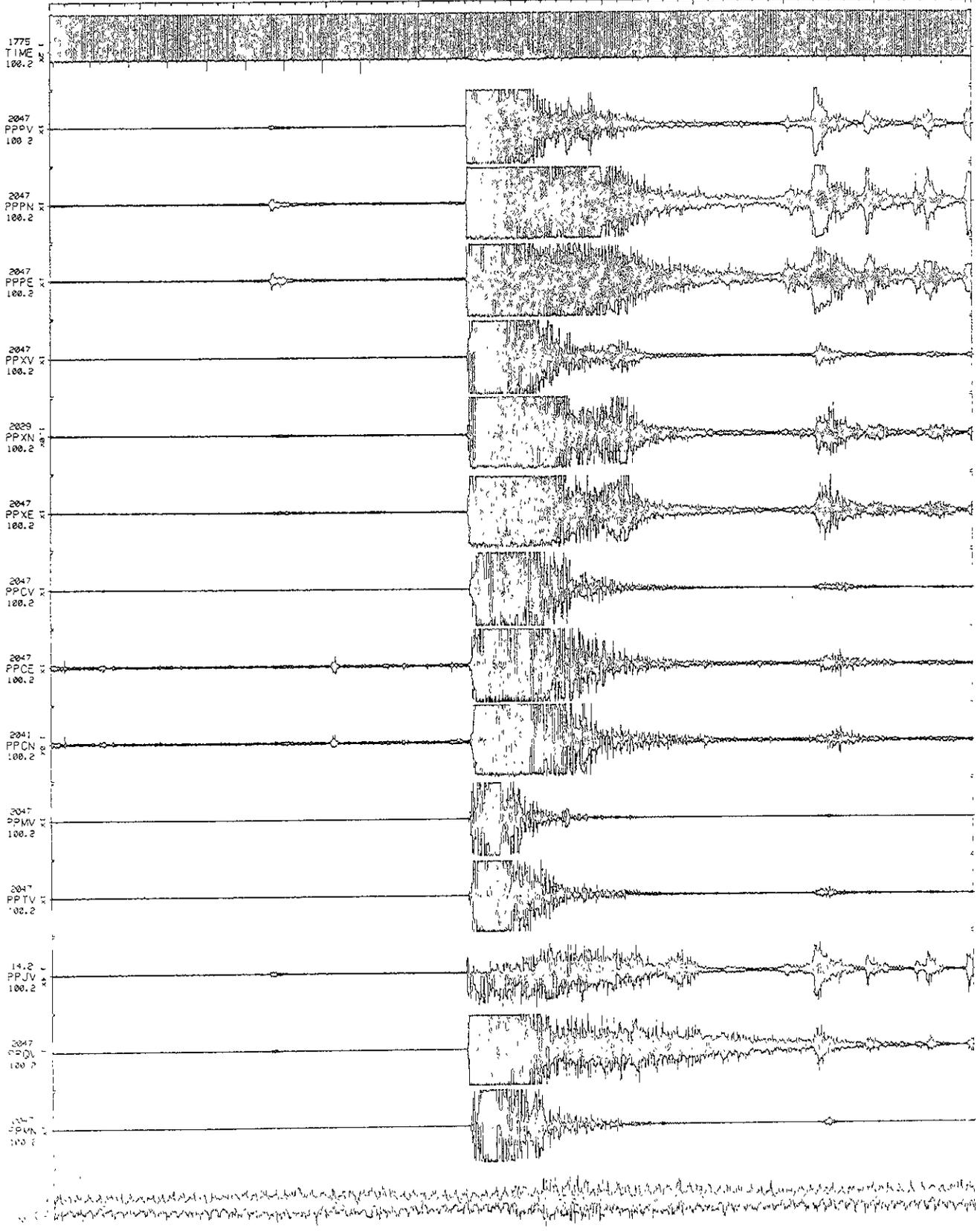


Figura A10 Explosión del 22 de septiembre, se muestran los registros obtenidos por todas las estaciones, los registros de las estaciones PPP y PPQ son los dos primeros renglones, el registro de último renglón corresponde a una estación localizada en Iguala, Guerrero y se utiliza para discriminar los sismos de origen local.

LIQUID 111
P-P-1.3
P-P-1.1

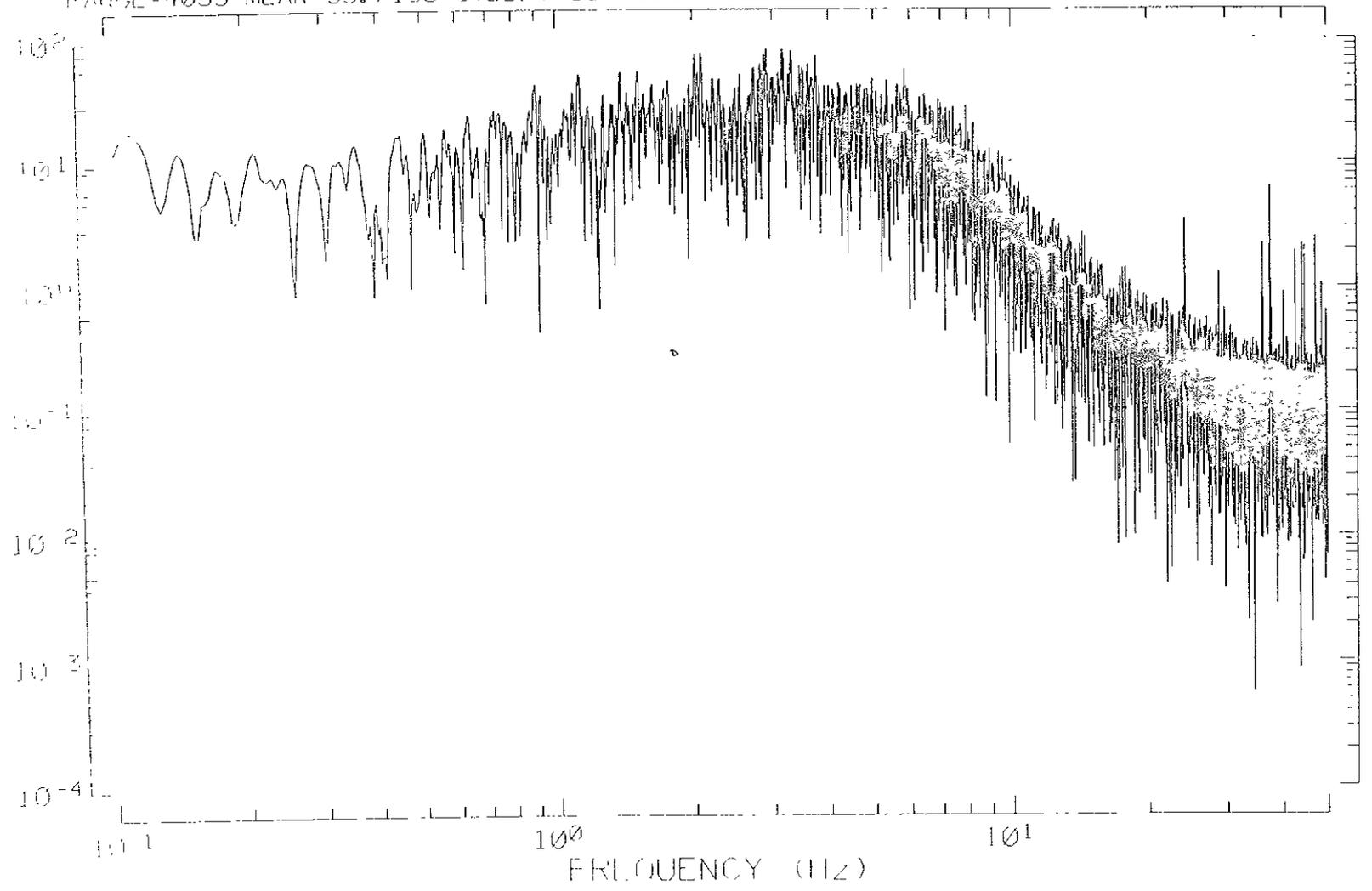
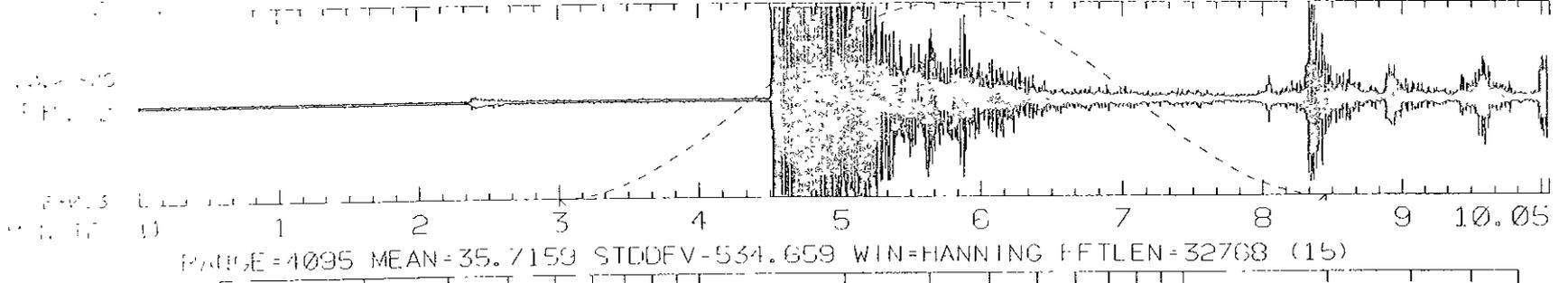
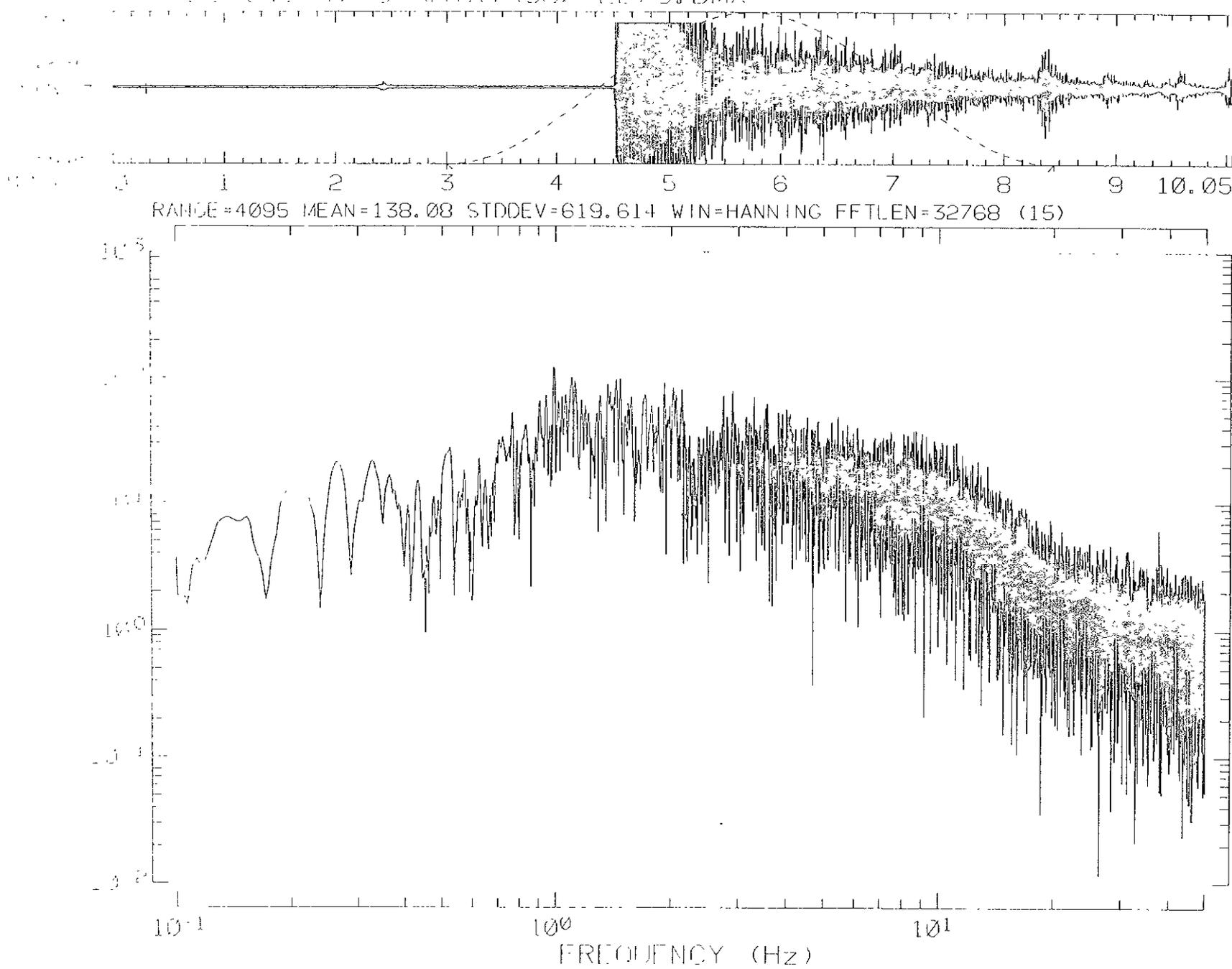


Figura A12

Espectro de amplitudes de la respuesta de la evolución del 22 de septiembre 1971, 14:00:00



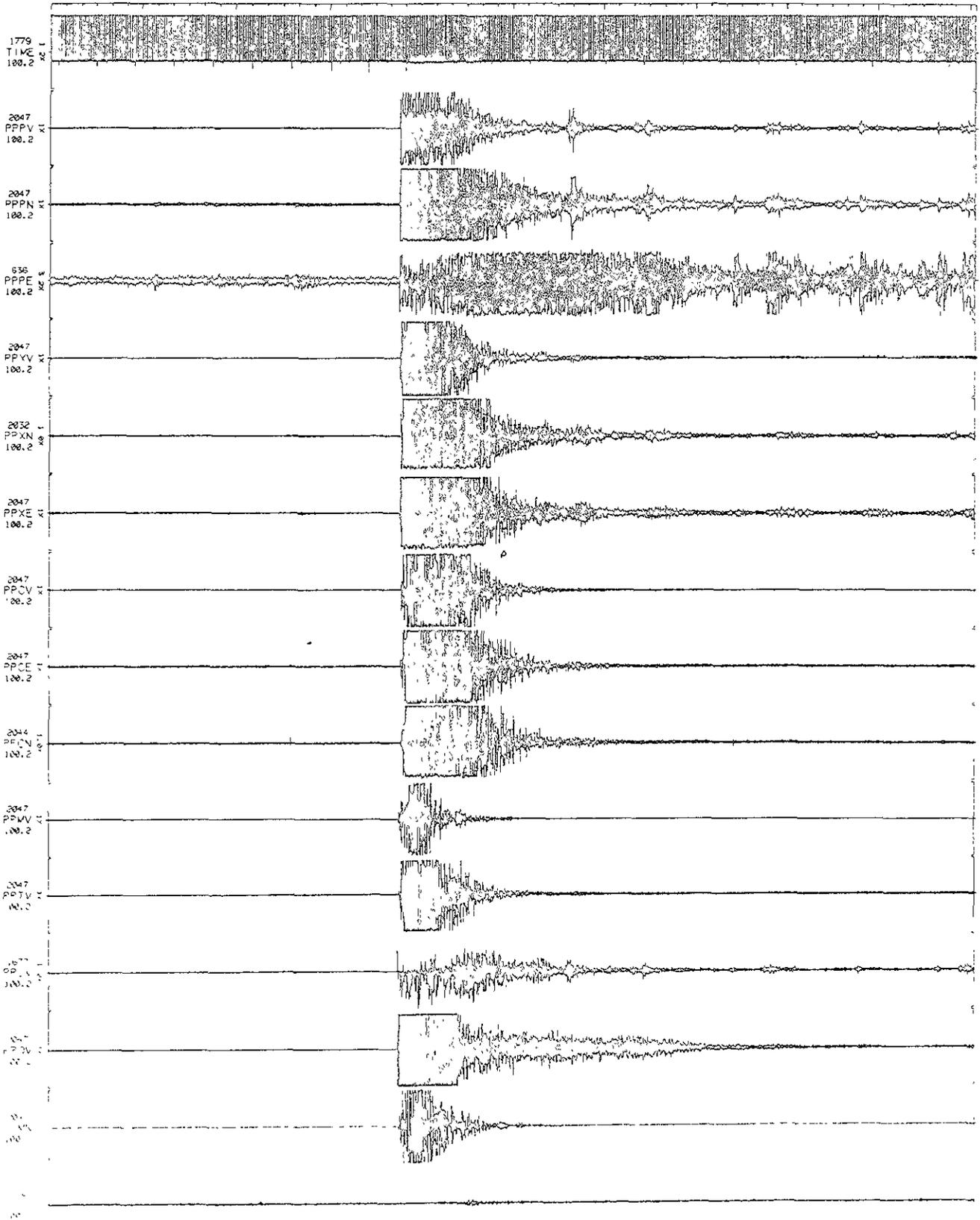
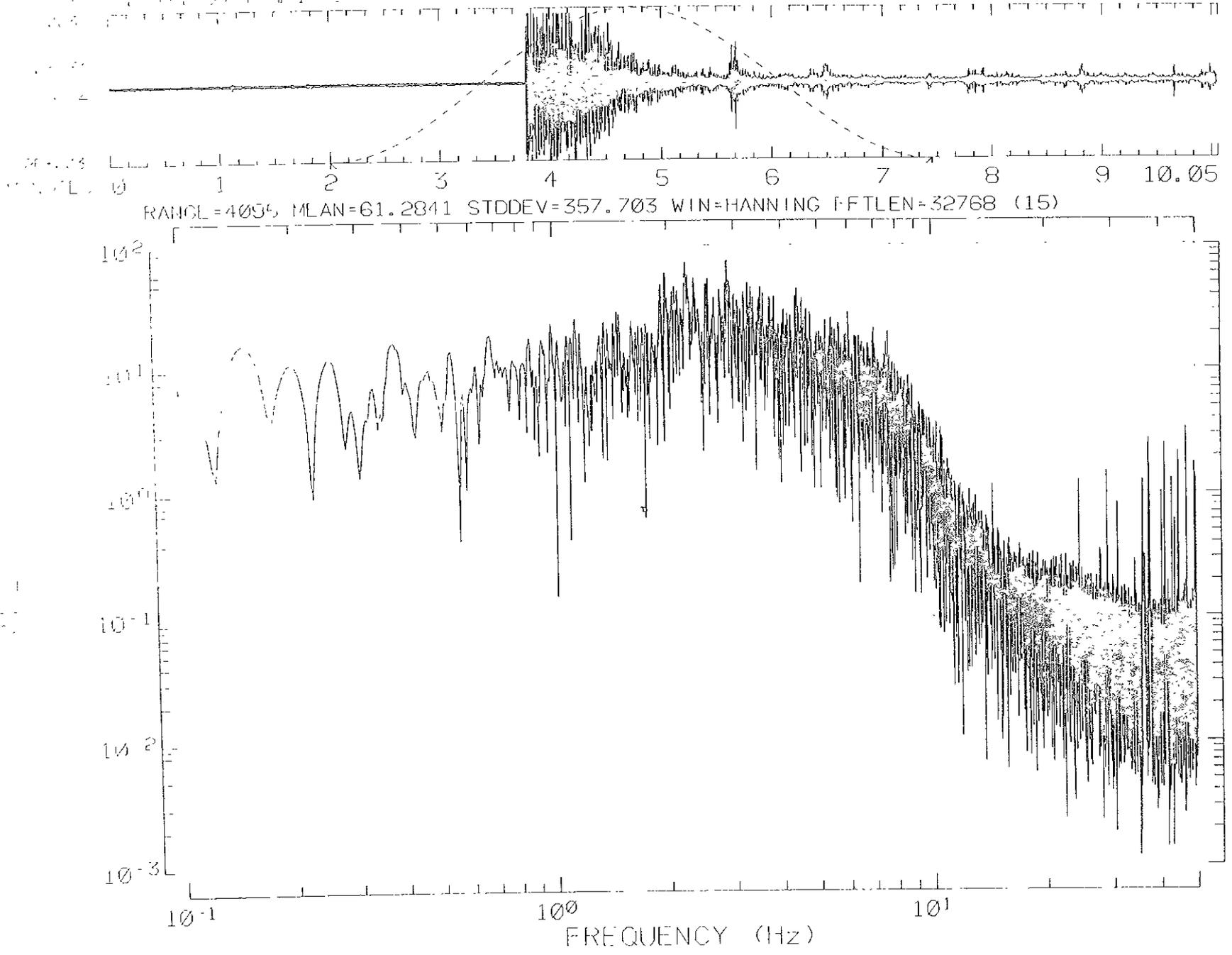
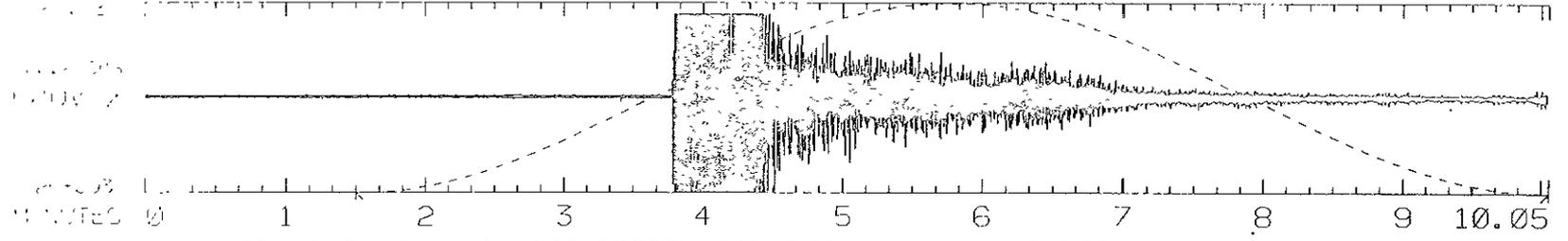


Figura A13 Explosión del 23 de septiembre, se muestran los registros obtenidos por todas las estaciones, los registros de las estaciones PPP y PPQ son los dos primeros renglones, el registro del último renglón corresponde a una estación localizada en Iguala, Guerrero y se utiliza para discriminar microsismos de origen tectónico

Figure A14. Fast Fourier Transform (FFT) of a vibration test signal. The signal is a random vibration test signal with a power spectral density (PSD) of 0.01 g²/Hz. The test was conducted at 23.00 rpm. The signal was sampled at 1000 Hz and the FFT was computed using a Hanning window. The plot shows the magnitude spectrum of the signal, with the x-axis representing frequency in Hz and the y-axis representing magnitude. The magnitude is plotted on a logarithmic scale, ranging from 10⁻³ to 10². The x-axis is also on a logarithmic scale, ranging from 10⁻¹ to 10¹ Hz. The plot shows a noisy signal with a peak magnitude of approximately 10^{1.5} at a frequency of approximately 5 Hz. The signal is centered around a mean value of 61.2841, with a standard deviation of 357.703. The range of the signal is 4095. The FFT length is 32768 samples, and the window used is Hanning. The plot is labeled with the following parameters: RANGE=4095 MLAN=61.2841 STDDEV=357.703 WIN=HANNING FFTLEN=32768 (15).



2003-03-25:45.193 C:\MIR\08092399.DMX



RANGE=4095 MEAN=121.222 STDDEV=503.702 WIN=HANNING FFTLEN=65536 (16)

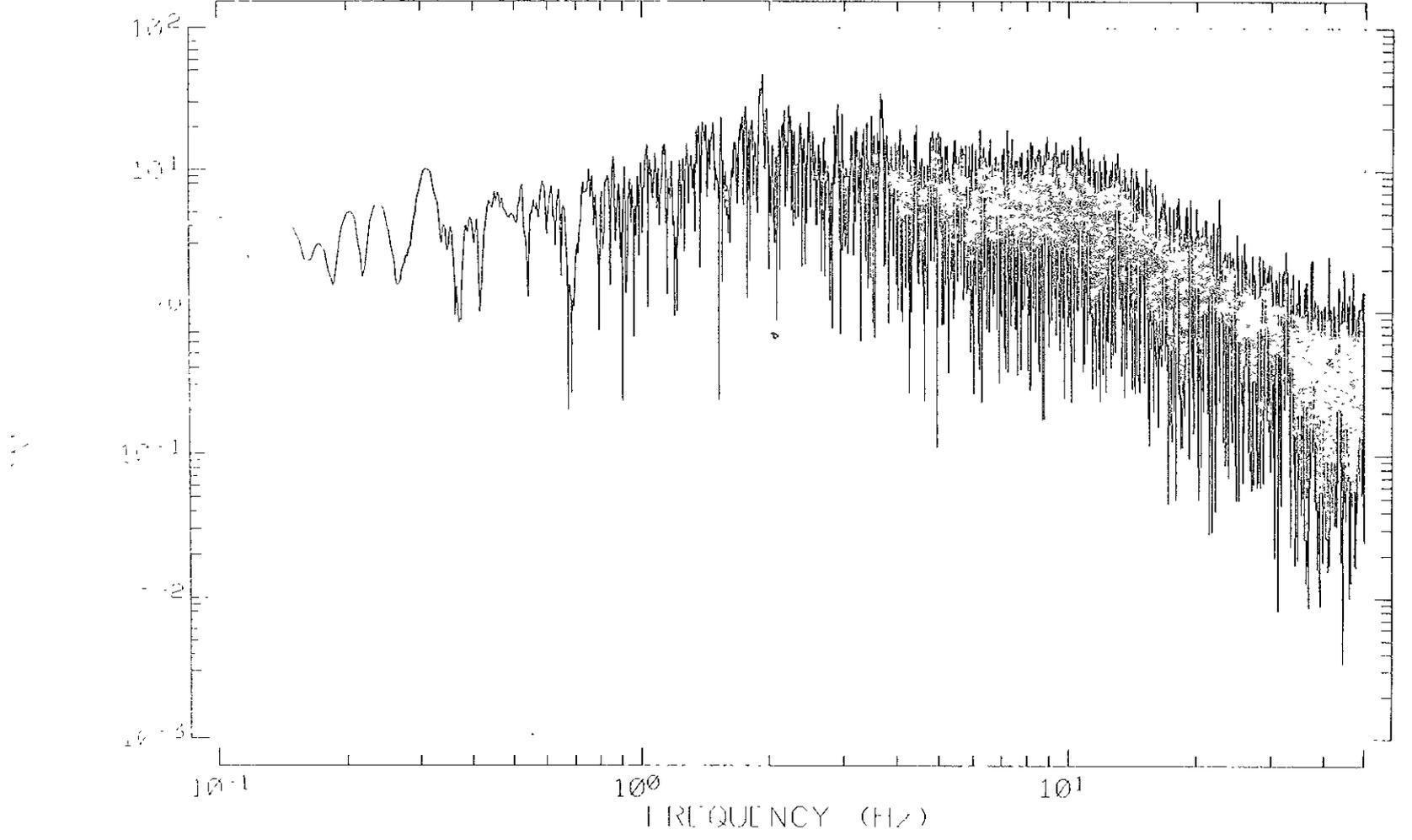


Figura A13
Espectro de amplitudes correspondiente a rd explosion del 23 de septiembre, registrada en la estación PPS

SUF1 1 0E1 01731100 174104 3 470

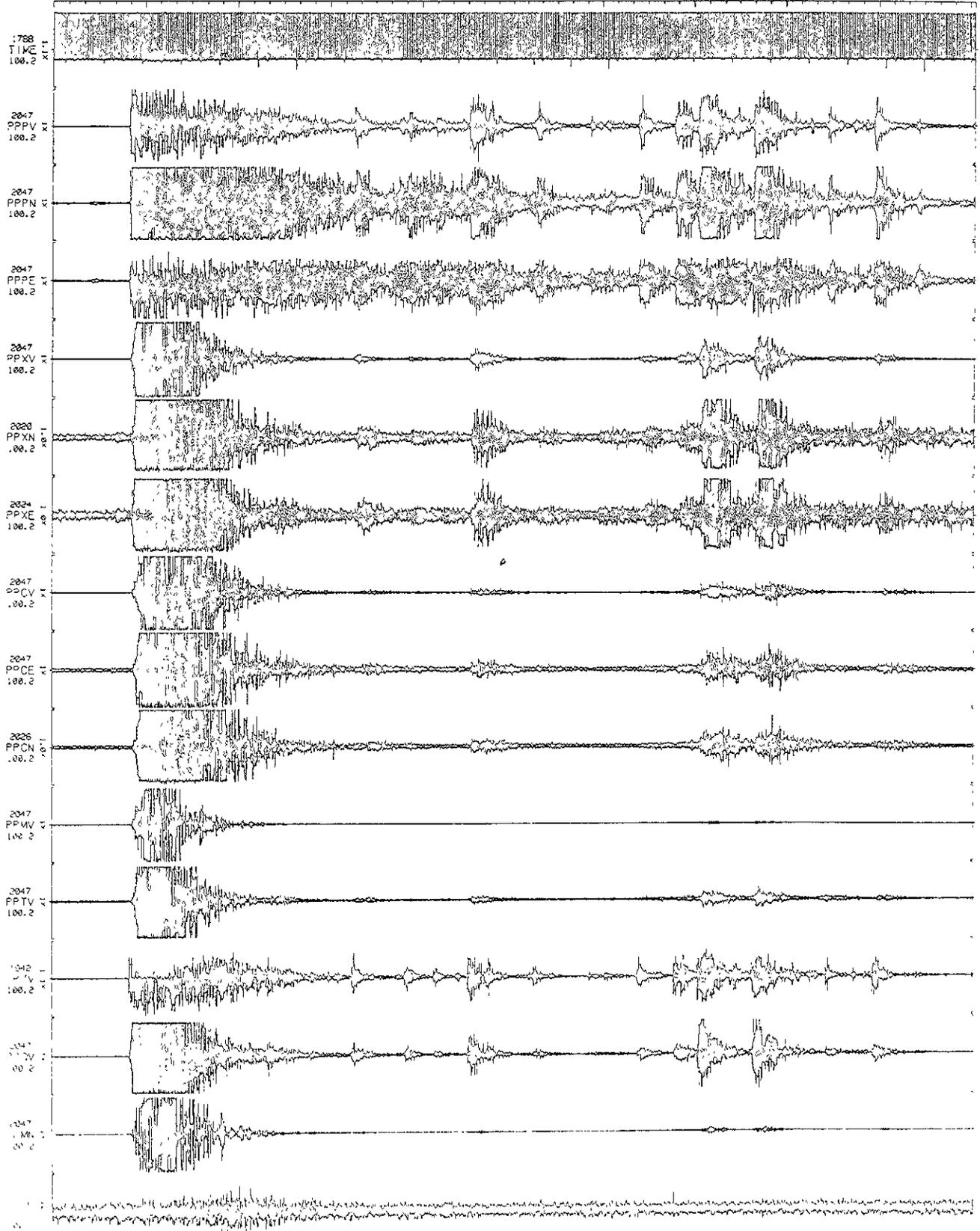
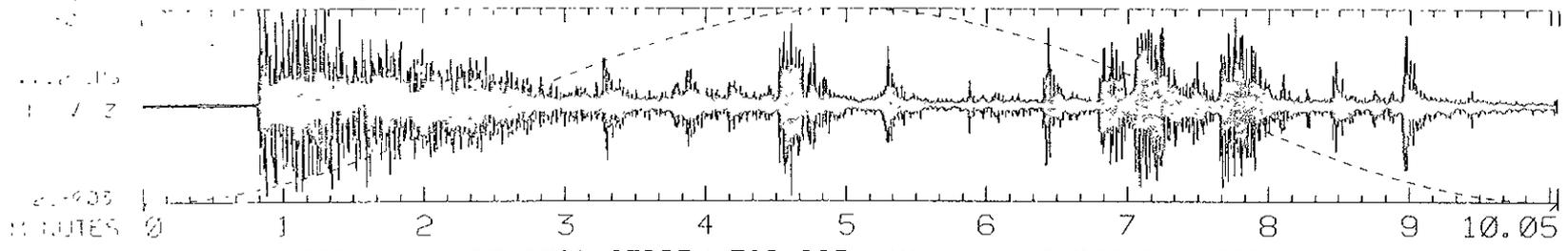


Figura A16 Explosión del 6 de octubre: se muestran los registros obtenidos por todas las estaciones; los registros de las estaciones PPPV, PPN, con los dos primeros renglones; el registro del último renglón del estándar de una hora en local, sea en grado. Que hay un cambio de a las 11:00:00 y a las 11:00:00.



RANGE=4095 MEAN=-50.2783 STDDEV=326.885 WIN=HANNING FFTLEN=65536 (16)

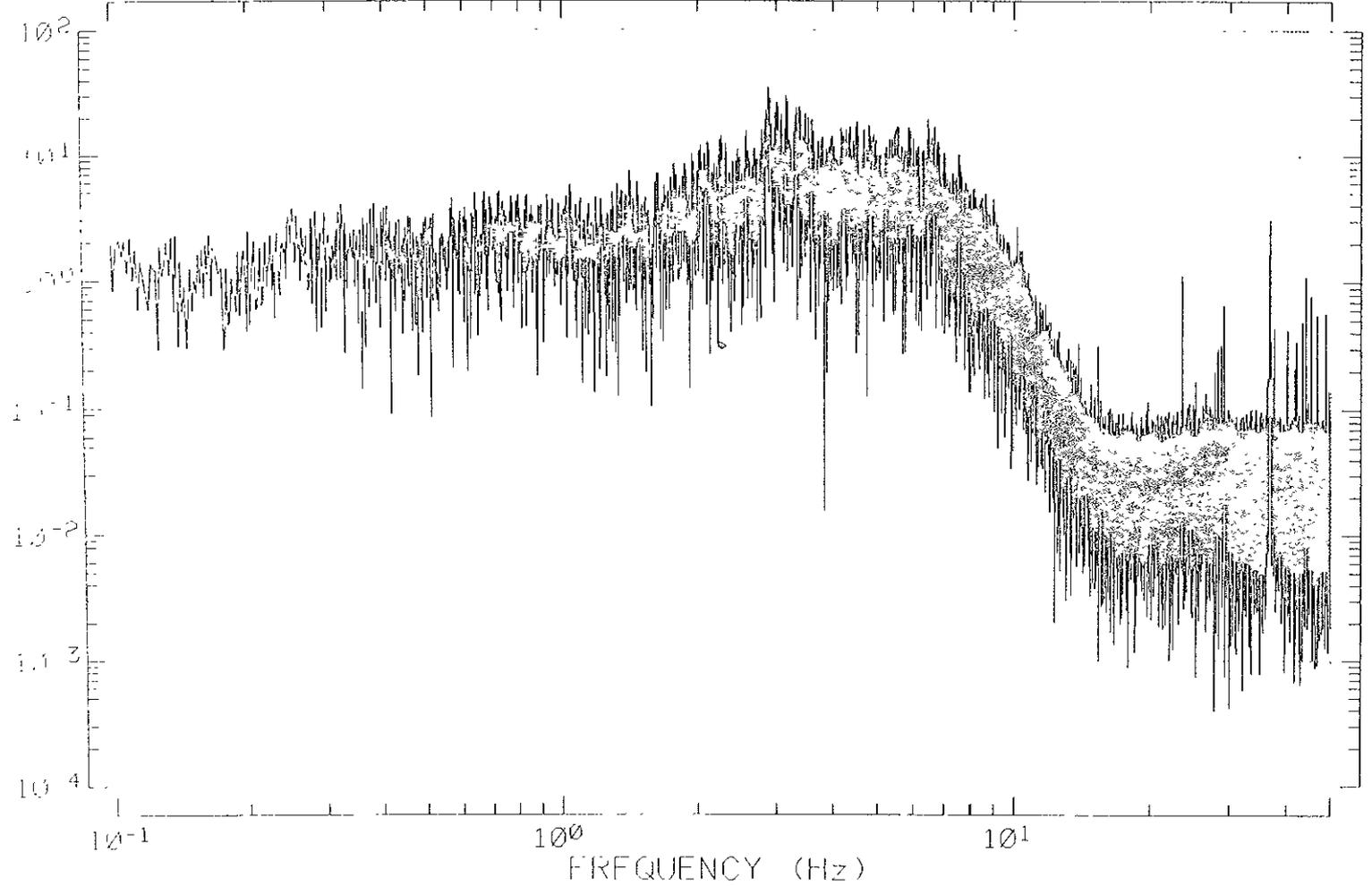


Figura A17
amocion pap

Espaciro de amplitudes correspondiente a la explosion del 6 de octubre, registrada en la

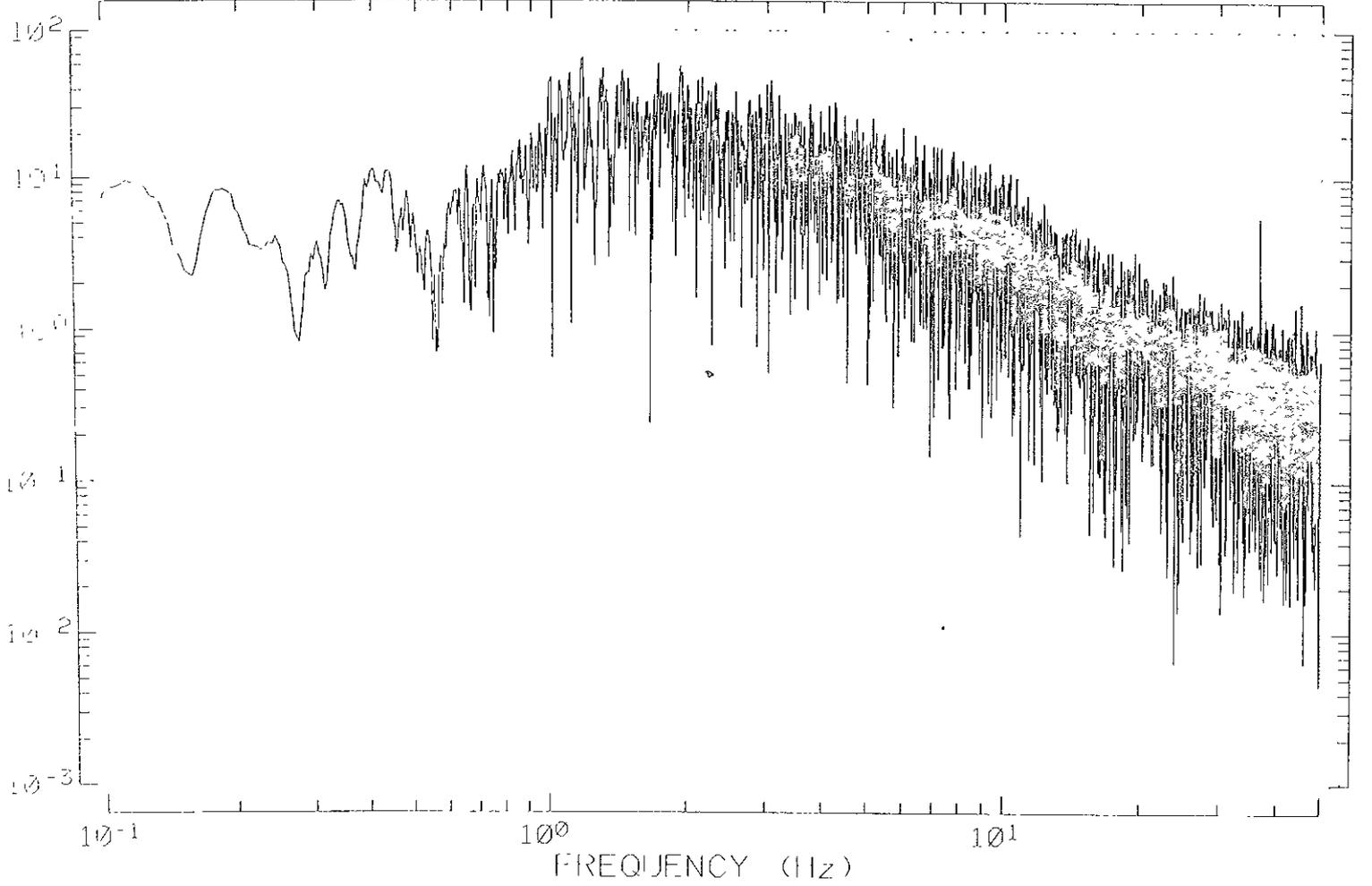
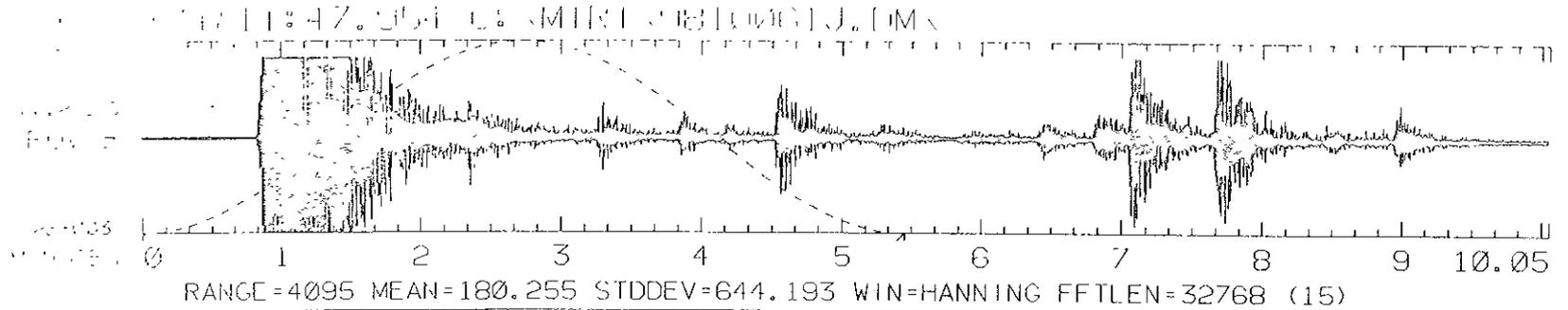


Figura A18. Espectro de amplitudes correspondiente a la explosión del 9 de octubre, registrada en la estación P2C.

SHEET 1 OF 1 01/13/100 15:45:04.180

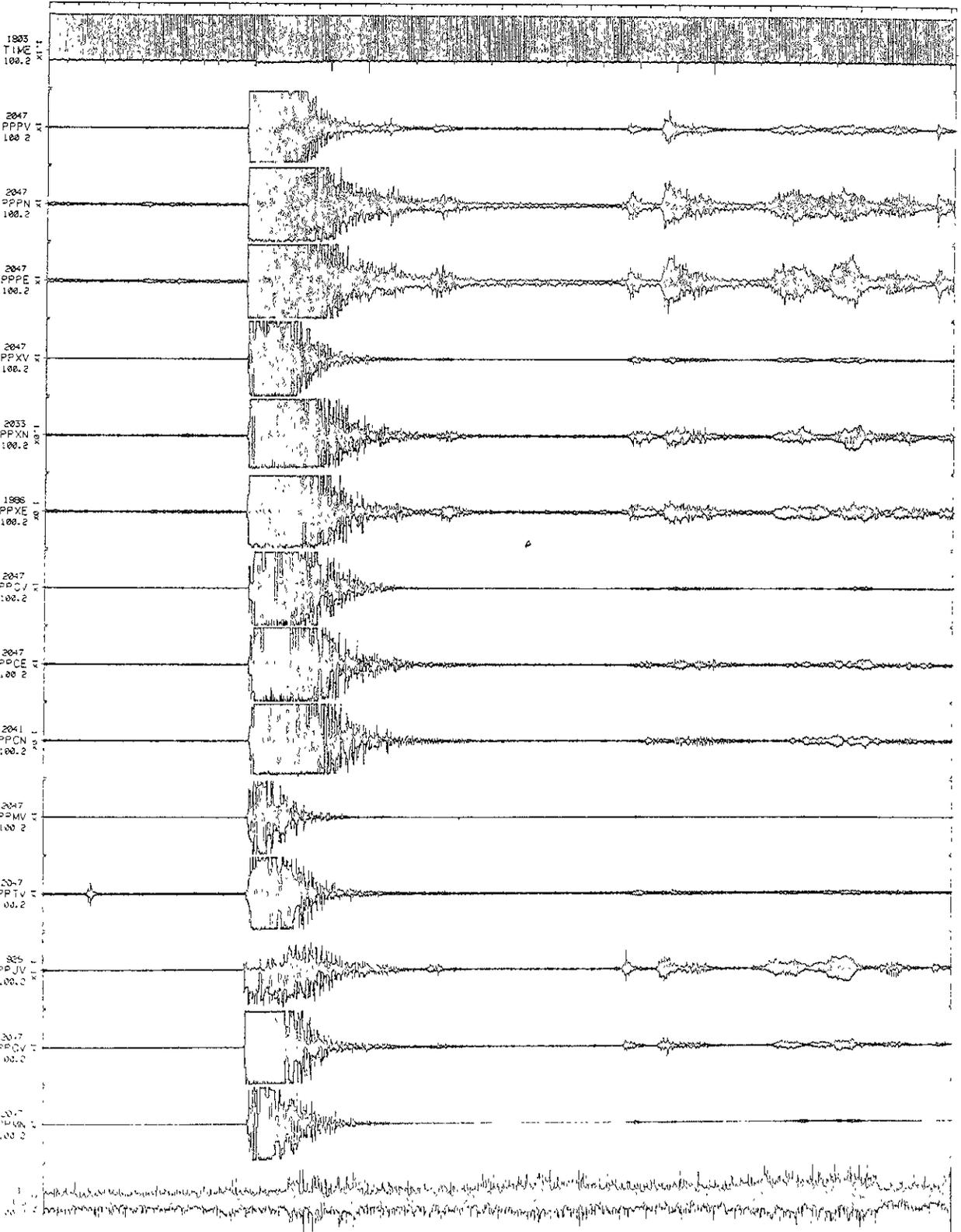
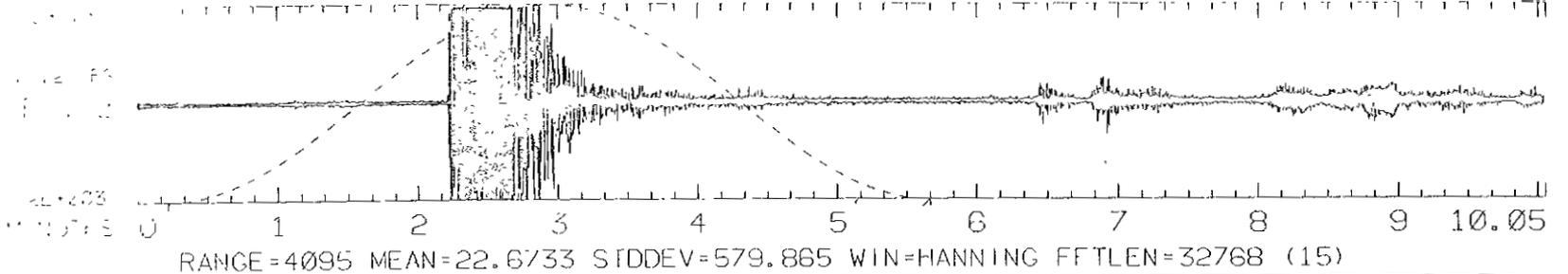


Figura A19 Explosión del 25 de noviembre, se muestran los registros obtenidos por todas las estaciones, los registros de las estaciones PPP v PPQ son los dos primeros renglones, el registro del último renglón corresponde a una estación localizada en Iguala, Guireo v se utiliza para discriminar microsismos de origen tectónico.



RANGE=4095 MEAN=22.6733 STDDEV=579.865 WIN=HANNING FFTLEN=32768 (15)

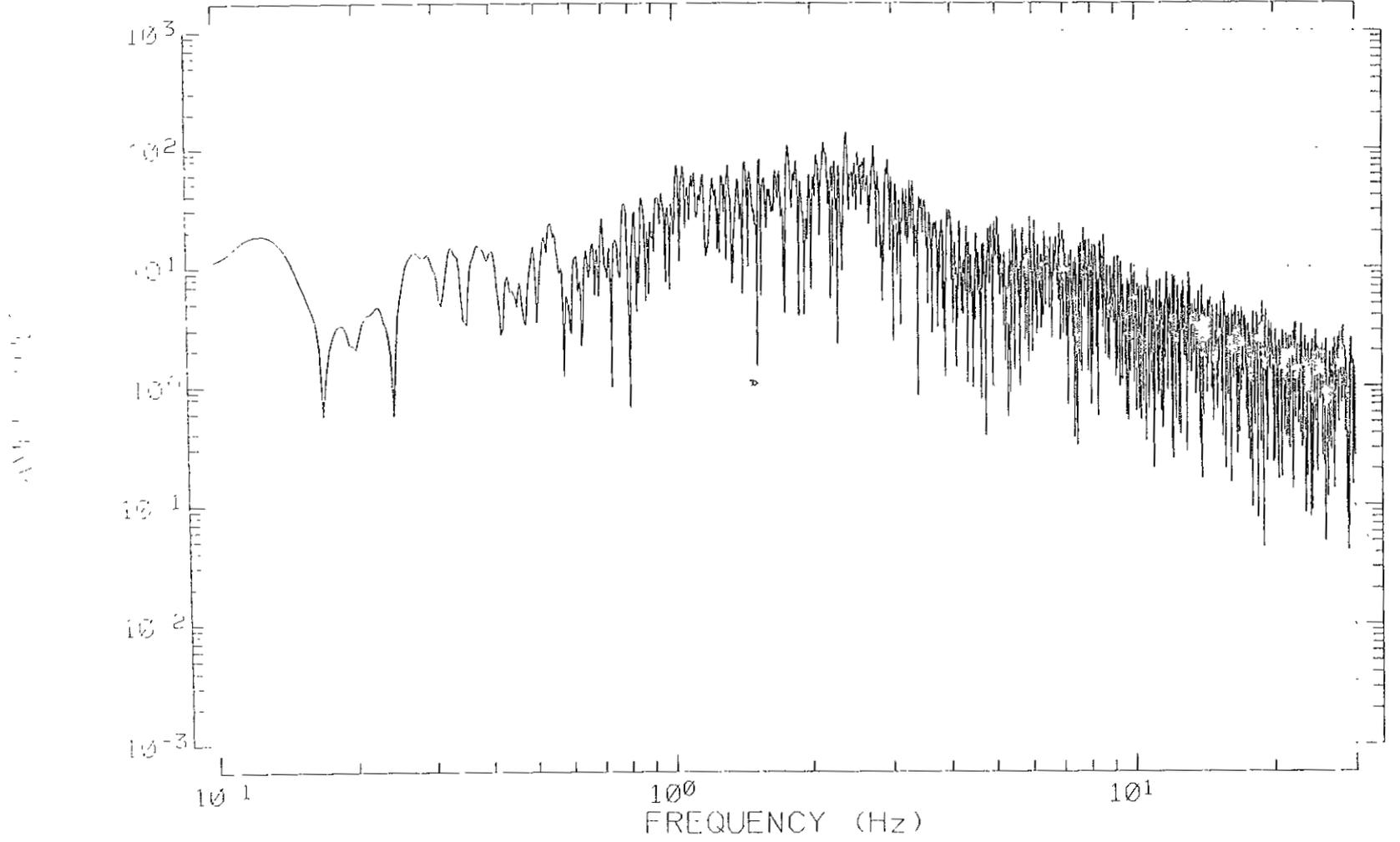


Figura A2.1
 Estación 9PS

Espectro de amplitudes correspondiente a la explosión del 25 de noviembre, registrada en la