

Algunas características espectrales de la sismicidad asociada a la actividad del Volcán de Colima

J. Lermo¹, J. Cuenca², T. Monfret^{2,3}, F.J. Hernández¹ y E. Nava¹.

¹ Instituto de Ingeniería, UNAM.

² Instituto de Geofísica, UNAM.

³ ORSTOM, Mission-Mexique.

Recibido: 15 de noviembre, 1991; aceptado: 11 de agosto, 1991.

RESUMEN

Entre el 5 y 15 de marzo de 1991 se instaló una red de sismógrafos digitales de tres componentes para registrar la actividad sísmica asociada al Volcán de Colima. Estos eventos fueron clasificados por su forma de onda y/o por observaciones directas en campo. Con el objeto de caracterizarlos por su frecuencia dominante se estimaron sus espectros de Fourier, tomando en cuenta el efecto de sitio de las estaciones. Cuatro tipos diferentes de eventos fueron observados: Eventos tipo B de alta y baja frecuencia, tremores armónicos y tremores de avalancha. El tipo B-Alta frecuencia presenta un máximo en 5 Hz. El pico dominante para el tipo B-Baja frecuencia es aproximadamente de 2 Hz que tiene una forma espectral característica y bien definida. La frecuencia dominante de los tremores armónicos varía de 3 a 5 Hz, presentando una forma espectral muy característica compuesta de dos máximos estrechos. El segundo pico de menor amplitud guarda una relación del doble de la frecuencia dominante del primero. Finalmente los tremores de avalancha muestran también una forma espectral característica compuesta de un solo máximo en 3 Hz.

PALABRAS CLAVE: Volcán de Colima, tremores, análisis espectral, frecuencia dominante.

ABSTRACT

A temporary network of digital, three component seismographs was installed from 5th to 15th March in order to monitor the seismicity associated to the activity of the Colima volcano. The events recorded during these ten days were classified by their waveform and/or direct field observations. All the events were analyzed in the frequency domain using FFT to compute Fourier spectra, which were corrected for site effects. Four different types of events were observed: B low and high frequency, harmonic tremors and avalanche tremors. Spectra of type B high frequency events show a maximum at 5 Hz, whereas type B low frequency events show a clear peak at 2 Hz, with a characteristic shape. Harmonic tremor spectra show two well defined peaks, but at frequencies that vary between 3 and 10 Hz. We note that the frequency of occurrence of the second peak, of lower amplitude, is always double that of the main peak. Finally, avalanche tremors show a single maximum at 3 Hz, with frequency content distributed in a wider band than that of the preceding types.

KEY WORDS: Colima Volcano, tremors, spectral analysis, frequency dominant.

INTRODUCCION

El Volcán de Colima (19.51°N, 103.61°W) considerado históricamente como el más activo de México, es uno de los estratovolcanes de la Faja Volcánica Mexicana (FVM) de carácter explosivo. Por medio de los reportes de los cronistas en los años de la colonia, se observa una frecuencia de aproximadamente 100 años entre dos erupciones fuertes: 1611, 1690, 1818, 1913 (Martín y Romero, 1989). No se sabe de sismos importantes directamente relacionados con la actividad de este volcán.

Entre el 1° de noviembre de 1990 y el 28 de enero de 1991 se inició una fuerte actividad fumarólica (CICT y RESCO, 1992). Entre el 14 y 15 de febrero se registró un enjambre sísmico de aproximadamente 100 temblores en 22 horas (5 temblores de tipo B por hora) acompañados por intensas emisiones fumarólicas; del 16 al 18 de febrero esta actividad disminuye y a partir del 19 hasta el 23 del mismo mes se observó nuevamente un segundo enjambre sísmico (Nava *et al.*, 1991). Esta actividad sísmica llamó la atención a varios investigadores que afirman una actividad asísmica durante 1982 y 1986, años de actividad fumarólica semejante a la actual (S. De La

Cruz comunicación personal, 1991). Posterior al 23 de febrero el número de eventos baja considerablemente hasta el 1ro de marzo, que inicia un tercer enjambre sísmico con duración de solamente 4 días (Nava *et al.*, 1991). Este tercer enjambre coincide con la aparición en la cima del volcán, de un domo de rocas andesíticas alimentado por el magma subyacente, creciendo rápidamente para tener una altura de 36 m con un diámetro de 109 m el 16 de abril. Este mismo día a las 15:15 horas se produjo un derrumbe de una parte del domo provocando la emisión de nubes cargadas de ceniza, derrames de lava en la ladera sur y un aumento en la actividad sísmica debida principalmente a tremores de avalancha (Martín del Pozzo *et al.*, 1991). Siguiendo la numeración de los enjambres sísmicos observados en el volcán, éste sería el cuarto enjambre, como lo manifiestan Nuñez-Cornú *et al.*, (1992), quienes llegaron a contar más de 100 eventos por día durante cada enjambre, así como pudieron clasificarlos como tipo B. Meses siguientes, la actividad volcánica ha continuado.

Entre el 5 y 15 de marzo, con el objeto de monitoriar la actividad sísmica, los Institutos de Ingeniería y Geofísica de la UNAM instalaron una red digital de sismó-

grafos alrededor del volcán. Desafortunadamente para la fecha de observación los enjambres cesaron. Sin embargo, los eventos que se analizaron son clasificados de acuerdo con la forma de onda y con observaciones directas en el campo como eventos asociados a los procesos de emisión de gases o fracturamiento, a derrumbes o avalanchas de fragmentos de roca del cráter. Estos han sido corroborados por González *et al.*, (1992), quienes también instalaron una red temporal de sismógrafos analógicos entre el 12 y 24 de abril de 1991 alrededor del Volcán de Colima, observando los mismos eventos relacionados con la emisión de gases y avalanchas; sin embargo ellos lograron clasificar otros eventos como tipo A.

Se ha realizado un análisis espectral de estas señales con el objeto de caracterizarlas observando su frecuencia dominante. Para esto se han utilizado registros de tres estaciones: Yerbabuena, El Fresnal e Izote. (Figura 1).

DATOS

El sistema de adquisición de datos utilizado en este estudio consiste en sismómetros Lennartz de tres componentes de 1 seg de periodo natural y un registrador digital PRS-4 (EDA Instruments), que a través de un algoritmo de disparo almacena la información en una memoria de estado sólido que tiene una capacidad de 1 ó 2 megabytes, la cual es recuperada por medio de una computadora portátil. El control del tiempo se realiza usando un reloj externo marca Nanometrics de alta precisión. El intervalo de muestreo fue de 100 muestras por segundo. La respuesta del sistema es plana para la velocidad entre 1 y 30 Hz (Nava y Mijares, 1991).

Del 5 al 15 de marzo de 1991, se instalaron seis estaciones sísmicas alrededor del volcán, con el objeto de monitorear el tercer enjambre sísmico ya mencionado. La distribución espacial de estas estaciones se puede observar en la Figura 1. Las estaciones de Atenquique, Copala y Piedra Plana fueron descartadas desde un inicio por problemas instrumentales y de señal-ruido. Dado que la actividad del tercer enjambre terminó el 4 de marzo (Nava *et al.*, 1991) como lo pudimos constatar al observar en las tres estaciones restantes (Yerbabuena, El Fresnal e Izote) un solo evento del tercer enjambre y otros aislados en una sola estación, decidimos seleccionar y caracterizar a los tremores armónicos y a los tremores de avalanchas por su forma de onda, forma espectral y frecuencia dominante. Cabe aclarar que también se pudieron registrar eventos regionales, los cuales se utilizarán para analizar el efecto de sitio en estas tres estaciones.

La estación Yerbabuena, se encuentra localizada en la población del mismo nombre al suroeste del volcán sobre una avalancha bien consolidada; El Fresnal, ubicada en la población del mismo nombre al sureste del volcán sobre un depósito aluvial; e Izote, cerca al poblado El Jazmín hacia el noroeste del volcán sobre depósitos de ceniza volcánica (Figura 1).

TIPOS DE EVENTOS SISMICOS OBSERVADOS

La estación de diagnóstico para la selección de los eventos sísmicos asociados a la actividad del Volcán de Colima ha sido Yerbabuena, por encontrarse sobre un suelo más firme que las otras dos (El Fresnal e Izote). En esta estación se pudo distinguir que los eventos del tercer enjambre (clasificados por Nava *et al.*, 1991 y Nuñez *et al.*, 1992 como tipo B) muestran una variación muy clara en cuanto a su frecuencia alta y baja, con fases de onda P impulsiva o emergente de poca amplitud y de onda S difícil de distinguir. Así mismo se pudo seleccionar a los tremores armónicos y a los tremores de avalancha. En la Figura 2 se resume, a manera de clasificación, estos tipos de eventos observados en la componente vertical de la estación de Yerbabuena, donde se ha tratado de esquematizar para cada tipo su probable origen y efecto, los cuales se discutirán más adelante.

Eventos tipo B

En la Figura 2a y 2b las señales son similares a los temblores descritos por Minakami (1974) como tipo B o como tipo 2 clasificado por Havskov *et al.* (1983) para el volcán Chichonal. Estos autores además mencionan que estos eventos están limitados a profundidades superficiales alrededor del cráter volcánico, y la coda es anormalmente larga en relación con su máxima amplitud.

Havskov *et al.* (1983) proponen un posible mecanismo de su origen como el resultado de las intrusiones magmáticas y la liberación de gases a una profundidad de 2 km aproximadamente. Gresta y Patané (1987) en un estudio en el Monte Etna mencionan que estos eventos tienen una envolvente de forma de cigarro de corta duración, asociados a microfracturas o procesos de emisión de gas dentro de conductos volcánicos nuevos y reactivados.

Se ha correlacionado este tipo de evento con la observación visual en el instante en que ocurren emisiones de gases en el Volcán de Colima (A. Martín del Pozzo comunicación personal, 1991; González *et al.*, 1992).

En la Figura 2a se muestra un evento tipo B que tiene un arribo bien definido y un contenido mayor de frecuencias altas con respecto al evento de la Figura 2b. Estas diferencias muestran que el primer evento podría estar relacionado con microfracturas a mayor profundidad que el evento de baja frecuencia (Malone, 1983). Estas diferencias nos permiten clasificar estos eventos como tipo B-Alta frecuencia (Figura 2a) y tipo B-Baja frecuencia (Figura 2b).

El tipo B-Alta frecuencia también se registró en las estaciones de El Fresnal e Izote (Figuras 1 y 4), donde las ondas muestran una mayor amplificación sobre todo en las componentes horizontales con respecto a la amplitud de la estación de Yerbabuena, la cual puede estar asociado al efecto de sitio. Este efecto se evalúa en el siguiente inciso. Como este evento se registró en las tres

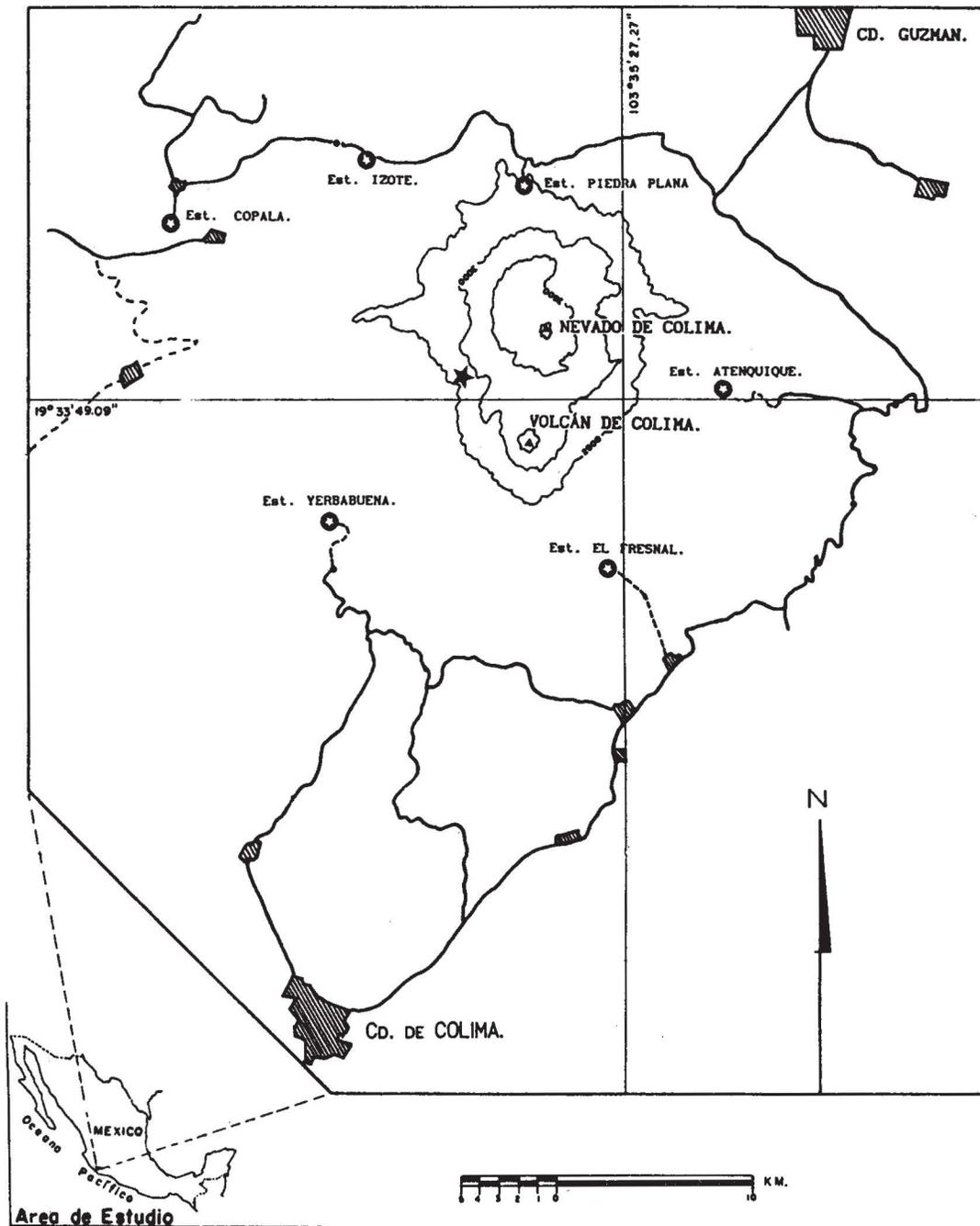


Fig. 1. Mapa de localización del Volcán de Colima, mostrando la ubicación de los sismógrafos digitales. El epicentro del evento tipo B-Alta frecuencia se muestra con una estrella negra.

estaciones seleccionadas, se le pudo asignar una localización aproximada, tomando en cuenta el inicio del registro y los primeros arribos de la componente vertical en las tres estaciones. Este evento se encuentra aproximadamente a 7 km hacia el noroeste del cráter del volcán (estrella negra, Figura 1).

El tipo B-Baja frecuencia también ha sido registrado en la estación de El Fresnal (Figura 6) mostrando el mismo comportamiento que el anterior en cuanto a su amplificación.

Tremores armónicos

Otro evento sísmico característico comúnmente observado en volcanes activos son los tremores armónicos (Figura 2c), que reflejan una continua vibración del suelo (Minakami, 1970). Kubotera (1974) describe en detalle las características de cuatro tipos de tremores armónicos para el volcán Aso. El tipo 4 de Kubotera (1974) concuerda con los seleccionados en la estación de Yerbabuena y El Fresnal, por tener una frecuencia dominante entre 3 y 5 Hz (Figura 8). McNutt (1986) relaciona

TIPOS DE EVENTOS SÍSMICOS OBSERVADOS EN LA ESTACION YERBABUENA (Z)

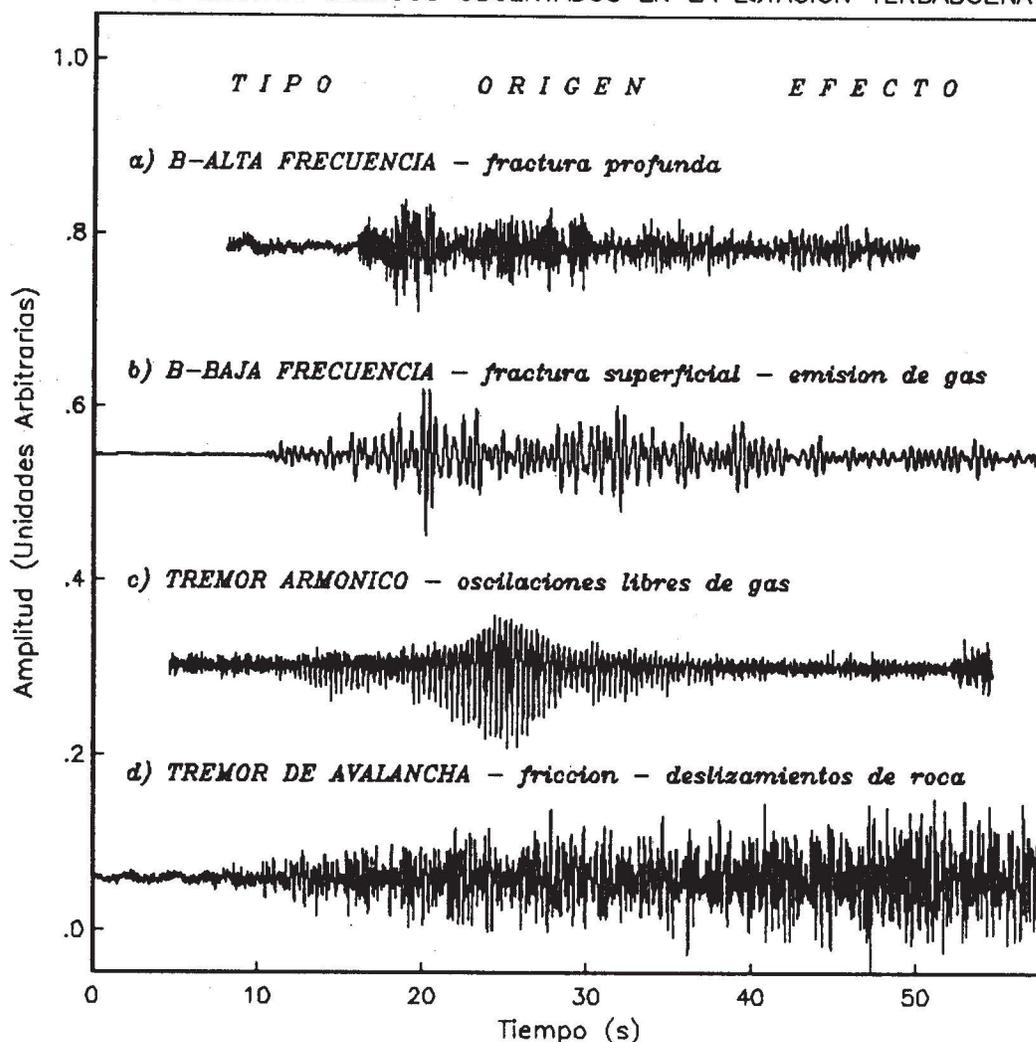


Fig. 2. Tipos de eventos sísmicos observados en la componente vertical (Z) de la estación Yerbabuena.

el origen de los tremores y de los eventos tipo B con la desgasificación en el volcán Pavlof. El tremor armónico es cercanamente monocromático y presenta una variación en frecuencia y/o amplitud en el tiempo (Aki *et al.*, 1977; Banks *et al.*, 1989), como se ha observado en la estación Yerbabuena.

Tremores de avalancha

Un tercer tipo registrado en las estaciones de Yerbabuena y El Fresnal son los tremores de avalancha de fragmentos de roca del cráter (Figura 2d, Figura 9). No son comúnmente clasificados en la literatura científica (Malone, 1983). Estos eventos presentan una forma muy característica: las amplitudes a partir del inicio del evento aumentan lentamente con el tiempo, sin fases pronunciadas.

Las avalanchas fueron observadas y correlacionadas con los registros por los autores en la ladera suroeste del volcán (observación hecha desde la estación de Yer-

babuena) cuando se desprendían fragmentos de roca desde la cima del cráter, causadas por el crecimiento del domo andesítico (para esta fecha el domo tenía aproximadamente 15 metros de altura y 50 metros de diámetro, A. Martín del Pozzo, comunicación personal, 1991).

ANÁLISIS ESPECTRAL DE LOS EVENTOS

Se calcularon los espectros de Fourier de velocidad para diferentes ventanas según lo requería el análisis para cada tipo. El suavizado se realizó por medio de una rutina que calcula el promedio de las amplitudes en una banda de 1/3 ó 1/6 de octava. Para estimar la frecuencia dominante y subdominante se toma un promedio de la frecuencia asociada a la máxima amplitud en las tres componentes. Estos máximos se tomarán en cuenta solamente entre 1 y 10 Hz, ya que la respuesta instrumental de nuestro sistema de adquisición de datos decae para frecuencias más bajas que 1 Hz. El análisis se desarrollará de acuerdo con los tipos de eventos sísmicos seleccionados en el inciso anterior.

Análisis de efecto de sitio

Antes de obtener los espectros para cada uno de los tipos de eventos seleccionados, se analiza el efecto de sitio de la estación El Fresnal, cuyos registros al ser comparados con los de la estación Yerbabuena, se observa una amplificación en las componentes horizontales. En recientes estudios se ha observado que este efecto se manifiesta principalmente en estas componentes (Lermo *et al.*, 1988; Singh *et al.*, 1988).

El objetivo de este análisis es ver si este efecto influye en las frecuencias dominantes de los eventos registrados en la estación de El Fresnal. Para esto se utilizó un temblor tectónico de magnitud $M_c = 3.5$, localizado aproximadamente a 100 km hacia el sur de la ciudad de Colima y registrado en estas dos estaciones (Figuras 3a y 3b). Se calculó su espectro de Fourier de velocidad a las componentes horizontales (Figuras 3c y 3e), para estimar la razón espectral para cada una de las dos componentes entre el espectro de El Fresnal con respecto al de Yerbabuena. En la Figura 3d se muestra esta razón espectral, donde la componente Norte-Sur (línea continua) y la componente Este-Oeste (línea discontinua) presentan una amplificación de más de 2 veces para el rango de 2 a 8 Hz aproximadamente, y de 3 veces para la frecuencia de 3 Hz. Probablemente relacionado con el depósito aluvial en el cual está ubicada la estación El Fresnal. Se tomará en cuenta este efecto en el análisis espectral siguiente.

Eventos tipo B

Se analizó la evolución en tiempo del contenido frecuencial de los registros de los eventos de tipo B. Ntepe y Dorel (1990) observaron en el volcán Stromboli que el ruido sísmico de fondo o vibración ambiental, tiene las mismas frecuencias dominantes que los eventos tipo B. Por lo que se tomaron para el tipo B-Alta frecuencia tres ventanas que cubren: el ruido sísmico de fondo, el arribo de un conjunto de fases P y S, y la coda; mientras que para el tipo B-Baja frecuencia se analizaron cuatro ventanas que delimitan el ruido sísmico de fondo, el arribo de ondas P, de ondas S, y la coda. Se obtuvieron sus espectros de Fourier para cada ventana, cada componente, y para cada estación.

Tipo B-Alta frecuencia

En la Figura 4 se pueden observar los registros de Yerbabuena, El Fresnal e Izote, para las tres componentes, con los límites de las tres ventanas seleccionadas. En la Figura 5 se muestran sus correspondientes espectros de amplitud, siguiendo el mismo orden en cuanto a la posición de la ventana en cada estación.

Si se observan los espectros de amplitud para el ruido sísmico de fondo en las tres componentes para las tres estaciones (Figura 5a, 5d y 5g), se observa que en la estación de Yerbabuena resaltan unas frecuencias dominantes para las componentes horizontales aproximada-

mente en 12 y 4 Hz: la primera puede estar relacionada con un efecto de sitio (componentes horizontales más excitadas que la vertical), la segunda que se manifiesta con una amplitud similar en las tres componentes, podría estar asociada a la frecuencia dominante de la señal (Ntepe y Dorel, 1990). Para El Fresnal la frecuencia dominante se presenta amplificada entre 2 y 4 Hz para las componentes horizontales, mientras que en el Izote se encuentra en 10 Hz en estas mismas componentes. Por lo tanto estas frecuencias dominantes podrían estar asociadas al efecto del sitio de cada una de las estaciones como fue comprobado en El Fresnal.

Si se comparan los espectros correspondientes a la ventana que abarca las fases P y S para las tres componentes en las tres estaciones (Figuras 5b, 5e y 5h), se puede ver una frecuencia dominante en 5 Hz en las estaciones de Yerbabuena e Izote, mientras que para El Fresnal la frecuencia dominante es menor que la anterior y se encuentra entre 2 y 5 Hz (Figura 5e). Una posible razón de esta diferencia en cuanto a la frecuencia dominante de El Fresnal con respecto a las otras dos estaciones, sería el efecto de sitio o la trayectoria de la propagación de la señal al atravesar el aparato volcánico antes de arribar a la estación (note la ubicación de la localización de este evento en la Figura 1).

Con respecto a la coda (Figuras 5c, 5f y 5i), se observa en Yerbabuena una frecuencia dominante en 2.2 Hz, de igual manera que en la estación de Izote. A diferencia de El Fresnal que se presenta entre 2 y 5 Hz, probablemente debido a un efecto de sitio más importante.

Por lo tanto el tipo B-Alta frecuencia observado para este volcán, presenta una frecuencia dominante en 5 Hz en la parte inicial del evento (P y S), mientras que para la última parte (coda) esta frecuencia cambia notoriamente hacia 2.2 Hz. La alta frecuencia al inicio del evento puede estar ligado a fracturamiento de roca, mientras que la baja frecuencia de la última parte, puede ser atribuida al fenómeno mismo de la coda y al medio de propagación de las ondas sísmicas (Martinelli, 1990).

Tipo B-Baja frecuencia

En la Figura 6 se pueden observar los registros de Yerbabuena y El Fresnal, para las tres componentes, indicando los límites de las cuatro ventanas seleccionadas. En la Figura 7 se muestran sus correspondientes espectros de amplitud, siguiendo el mismo orden en cuanto a la posición de la ventana en cada estación.

Los espectros de amplitud para el ruido sísmico de fondo en las tres componentes para Yerbabuena (Figura 7a), presentan una forma espectral similar al del análisis anterior, sin embargo este no presenta una frecuencia dominante. Mientras que El Fresnal mantiene su forma y frecuencia dominante aún cuando se trata de otro evento (Figura 7e). Este hecho corrobora una vez más que esta frecuencia está asociada al efecto de sitio de esta estación.

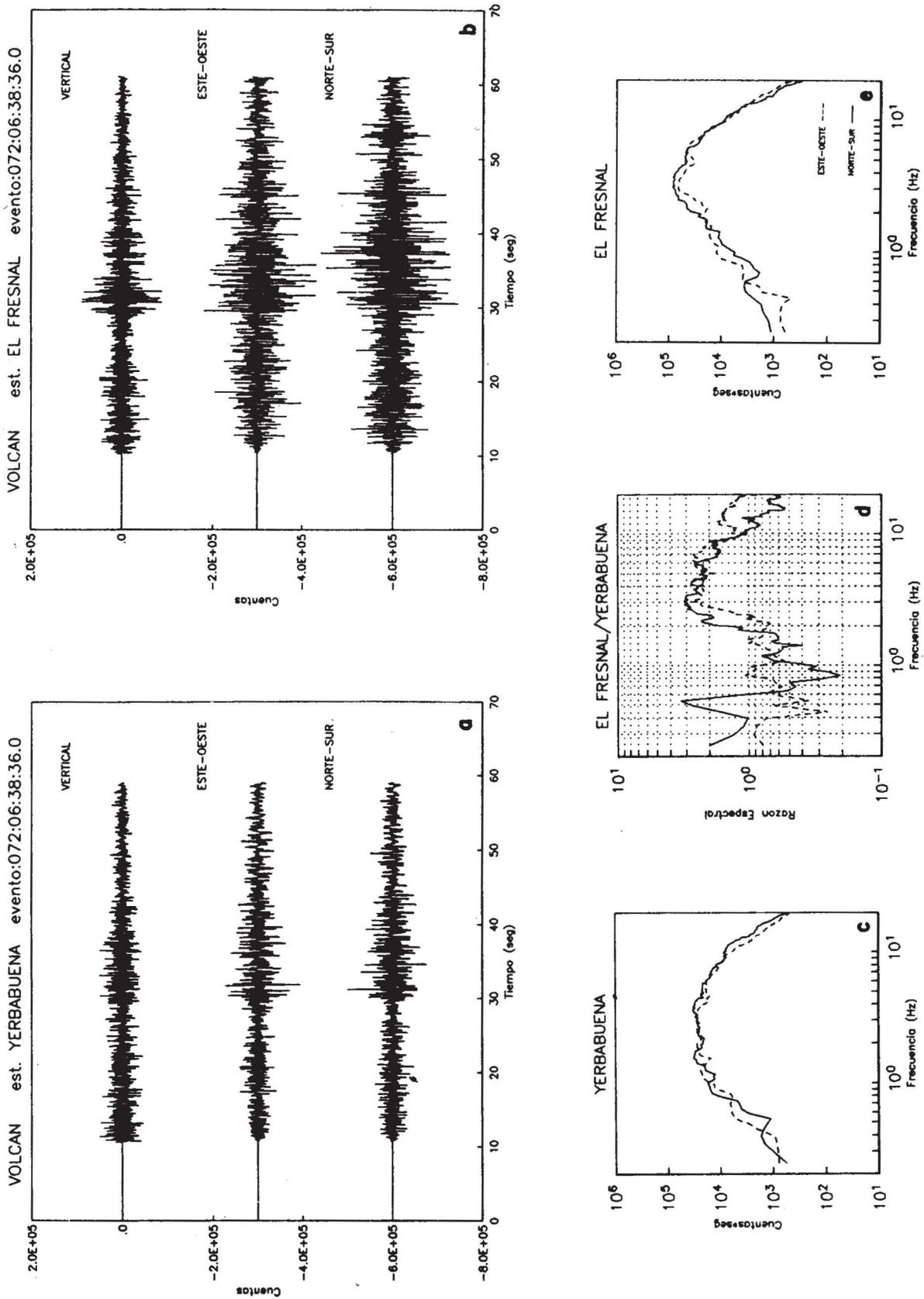


Fig. 3. Parte superior, registros de un temblor tectónico ($M_c=3.5$) en las estaciones de Yerbabuena y El Fresnal. Parte Inferior, espectros de amplitud de Fourier de las componentes horizontales (Norte-Sur, línea continua; Este-Oeste, línea discontinua) y su razón espectral.

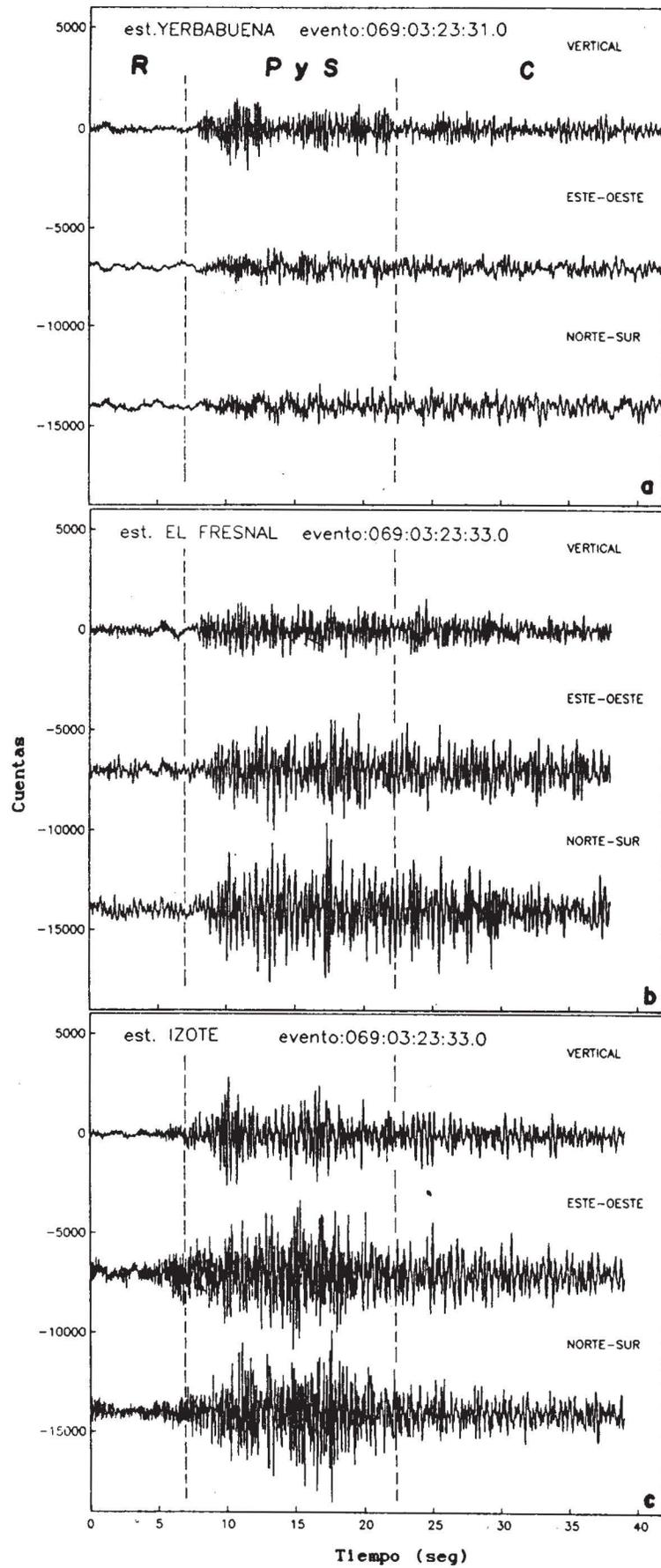


Fig. 4. Registros de un evento tipo B-Alta frecuencia en las estaciones de Yerbabuena, El Fresnal e Izote. Las líneas discontinuas marcan las ventanas del ruido de fondo (R), ondas P y S (P y S) y coda (C). La escala vertical es la misma para todas las componentes y estaciones. El inicio del registro empieza en la hora superior de cada estación.

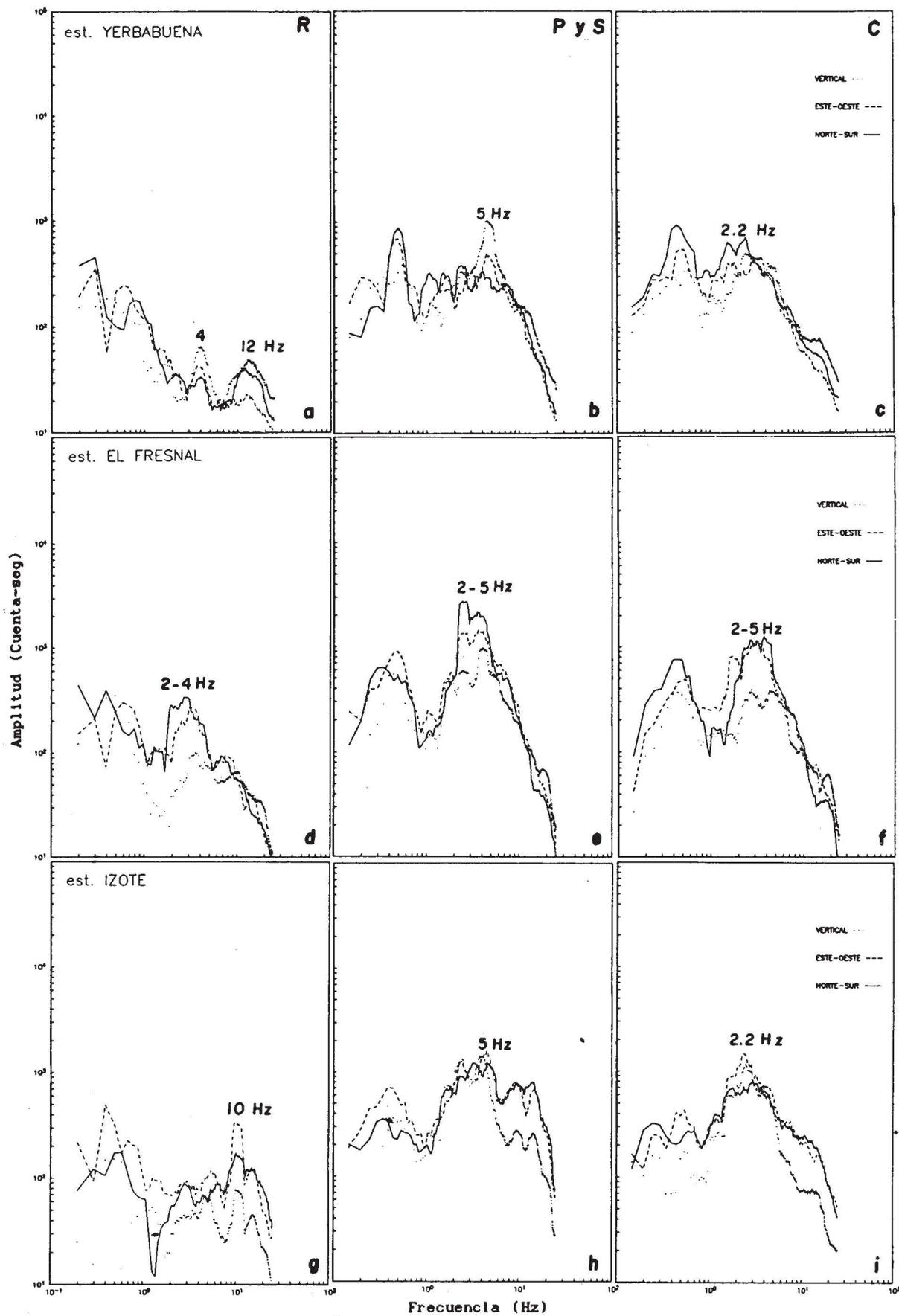


Fig. 5. Espectros de amplitud de Fourier para cada ventana y para cada componente siguiendo el orden de la Figura 4.

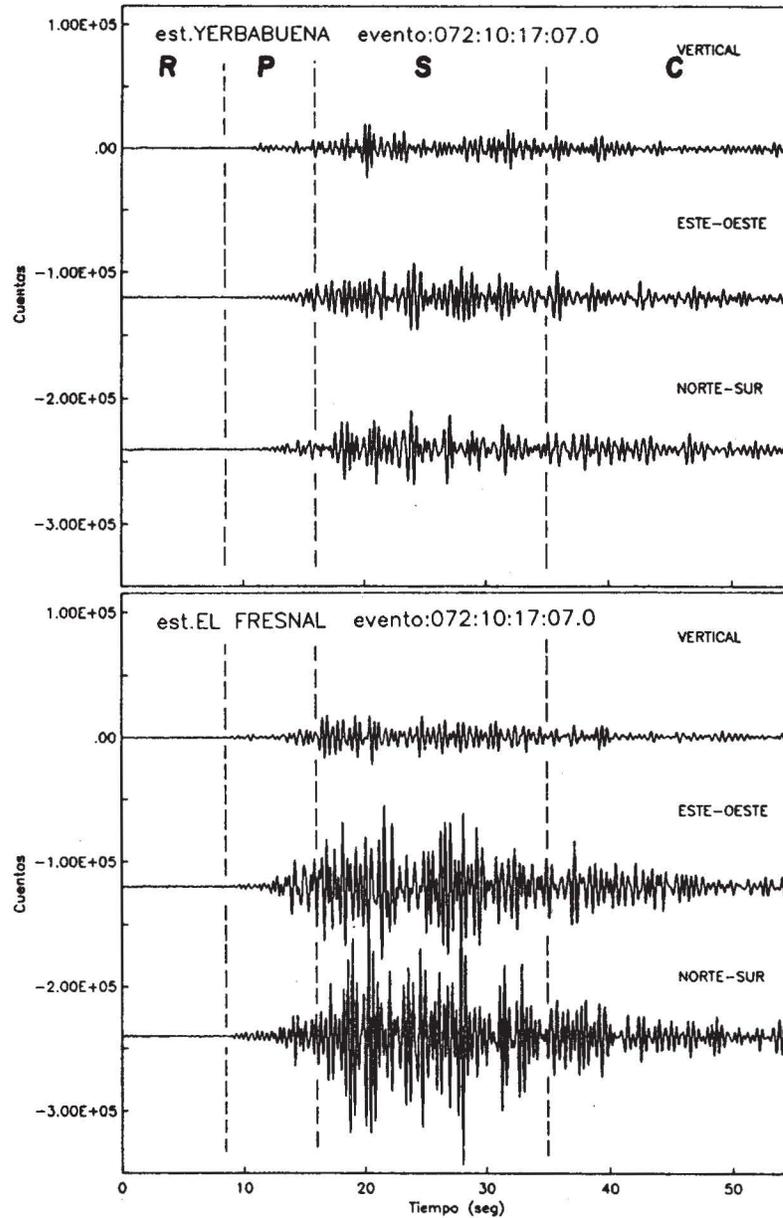


Fig. 6. Registros de un evento tipo B-Baja frecuencia en las estaciones de Yerbabuena y El Fresnal. Las líneas discontinuas marcan las ventanas del ruido de fondo (R), ondas P (P), ondas S (S) y coda (C).

Ahora si comparamos los espectros de amplitud correspondientes a las ventanas que abarcan las ondas P, S y la coda para las tres componentes en la estación de Yerbabuena (Figuras 7b, 7c y 7d), se observa un espectro bien definido y característico, de forma semejante a una curva parabólica centrada en una frecuencia dominante aproximadamente en 2 Hz. Esta característica particular en cuanto a su forma espectral para este tipo de evento se repite también en la estación El Fresnal (Figuras 7f, 7g y 7h), donde se observa una mayor amplificación en las componentes horizontales, y una frecuencia dominante de 2.2 Hz en las tres componentes para las tres ventanas. Este corrimiento de 0.2 Hz en la frecuencia dominante con respecto a Yerbabuena, podría estar asociado al efecto de sitio.

Por lo tanto el tipo B-Baja frecuencia para este volcán presenta una forma parabólica angosta definida, centrada en una frecuencia de 2 Hz, la cual no cambia en toda la señal. La diferencia de la forma del espectro de amplitud y la frecuencia dominante de los eventos tipo B-Alta frecuencia y tipo B-Baja frecuencia podría deberse a mecanismos de fracturamiento ubicados a distintas profundidades (Martinelli, 1990 y I. Yokoyama, comunicación personal, 1991).

Tremores armónicos

Para el análisis espectral de estos eventos se tomó una sola ventana que cubra al tremor armónico, como se muestra en la Figura 8 para tres eventos seleccionados

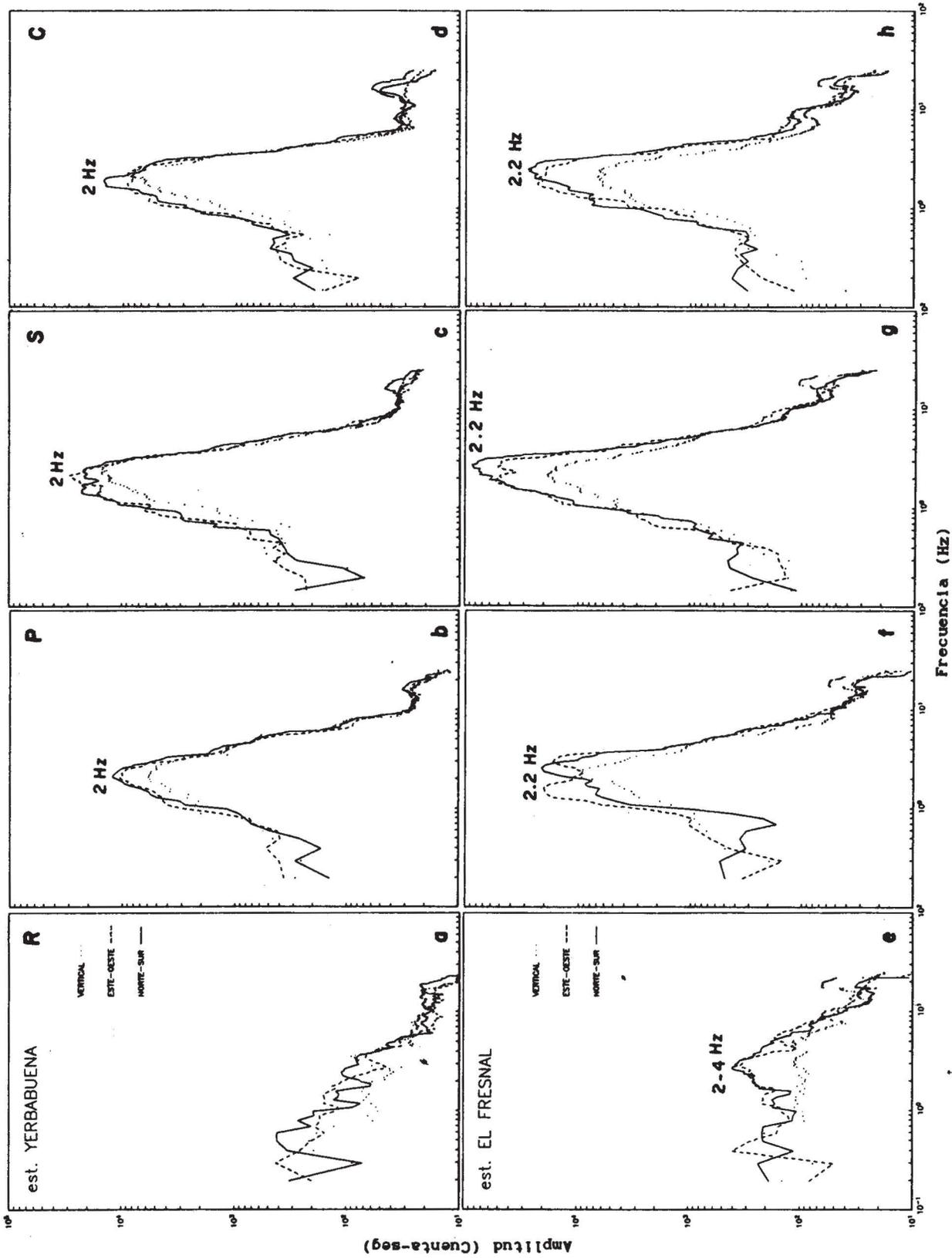


Fig. 7. Espectros de amplitud de Fourier para cada ventana y para cada componente siguiendo el orden de la Figura 6.

que muestran frecuencias dominantes dentro de un rango entre 3 a 5 Hz.

En El Fresnal se seleccionó un evento cuya frecuencia dominante (f_0) en las tres componentes se encuentra aproximadamente en 5 Hz (Figura 8a), mientras que en Yerbabuena se seleccionaron dos eventos que presentan una frecuencia dominante (f_0) en 4 y 3 Hz respectivamente para las tres componentes (Figuras 8b y 8c). Aún cuando se presenta esta variación de la frecuencia, la forma espectral de los tres eventos para todas sus componentes presentan una característica similar. Esta variación de la frecuencia para estos tres eventos puede estar relacionada con el tiempo, ya que si observamos la fecha de ocurrencia para cada uno, estas aumentan (día juliano 68, 70 y 72) a medida que las frecuencias disminuyen (5, 4 y 3 Hz). Se ha observado en algunos volcanes que horas antes de que ocurra una explosión o erupción, disminuya la frecuencia de las ondas sísmicas (Yokoyama, 1988).

Riuscetti *et al.* (1977) observaron que los tremores armónicos asociados a los volcanes Etna y Stromboli, presentan dos frecuencias dominantes en sus espectros (2.7 y 4 Hz). De igual manera nosotros también observamos una segunda frecuencia dominante (f'_0) bien definida pero de menor amplitud que la primera. Estas se presentan al doble de la primera frecuencia dominante (f_0), así tenemos que para:

Estación	(f_0)	(f'_0)
El Fresnal	5	10
Yerbabuena	4	8
Yerbabuena	3	6

Los picos agudos dominantes (f_0) y subdominantes (f'_0) de banda estrecha representan la interacción de modos individuales de vibración (Chouet, 1988). Estos modos pueden ser atribuidos a oscilaciones libres de gas, autoexcitadas en el aparato volcánico (I. Yokoyama, comunicación personal, 1991).

Tremores de avalancha

Para el análisis espectral se seleccionó un evento, que fue registrado simultáneamente en las estaciones de Yerbabuena y El Fresnal, lo cual se muestra en la Figura 9. Se tomaron dos ventanas para analizar si existe una posible variación de la frecuencia dominante al inicio del evento (I) y después de éste (F). Sin embargo los espectros de estas dos ventanas presentan una forma espectral parabólica similar, con una frecuencia dominante centrada aproximadamente en 3 Hz para todas las componentes en las dos estaciones (Figura 9a y 9b para Yerbabuena, 9c y 9d para El Fresnal).

Esta frecuencia dominante alrededor de 3 Hz puede ser una característica de los tremores de avalancha originadas en el volcán, porque el efecto de sitio en la esta-

ción de Yerbabuena tiene otra frecuencia natural de vibración (Figuras 5a y 7a), aún cuando para la estación de El Fresnal no se puede decir lo mismo, esta frecuencia dominante también ha sido reportada por Kadomura *et al.*, 1983 al analizar espectros de potencia de avalanchas en el Mt. Usu a partir de acelerogramas.

DISCUSION

En este trabajo se pudo reconocer y caracterizar espectralmente los siguientes eventos sísmicos asociados a la actividad del Volcán de Colima: tipo B-Alta frecuencia, tipo B-Baja frecuencia, tremores armónicos y tremores de avalancha. Sin embargo reconocemos que por el período corto de observación (10 días) existan otros tipos de eventos (tipo A) o subclasificaciones del tipo B, que pudieran estar presentes en esta actividad sísmica del Volcán de Colima.

Nava *et al.*, 1991 mencionan que durante todo el episodio eruptivo del Volcán de Colima tuvieron una sismicidad tipo B, con enjambres tipo Bs (Bsitos) en abril 12-13 y tremores volcánicos en junio 6-8. Cabe aclarar que para el análisis de estos eventos utilizaron los registros de la Red Sismológica Telemetrizada de Colima (RESCO), la cual consta de 8 estaciones analógicas, cinco de estas alrededor del volcán (Castellanos *et al.*, 1989). Esta red se encuentra operando desde 1989, lo que sugiere un registro continuo de actividad sísmica del volcán durante 1991.

Por otro lado González *et al.* (1993) también realizaron un monitoreo de la actividad sísmica del Volcán de Colima, del 12 al 24 de abril de 1991 (12 días). Siguiendo las crisis o enjambres mencionados en la introducción, esta correspondería al cuarto enjambre del volcán. Su red sismológica estuvo compuesta por cuatro estaciones autónomas analógicas alrededor del volcán. Ellos clasifican la actividad sísmica del volcán en cuatro diferentes tipos de eventos: A, B, derrumbes (D) y gas (G). Los dos primeros fueron clasificados de acuerdo con la literatura y los últimos con observaciones directas en el campo. Ellos reportan que los eventos tipo A sólo aparecieron los días 13-15 de abril, mientras que los de tipo B se registraron en todo el período del monitoreo.

Si tratamos de resumir y buscar una posible clasificación de los eventos producidos en esta etapa eruptiva del Volcán de Colima durante 1991 (que incluye las cuatro crisis o enjambres sísmicos observados), coincidimos con lo observado por Nava *et al.*, 1991, que manifiesta una sismicidad tipo B.

CONCLUSIONES

Las conclusiones principales del presente estudio son:

1) Para el período de observación se pudo reconocer los siguientes eventos sísmicos asociados a la actividad del Volcán de Colima: tipo B-Alta frecuencia, tipo B-Baja frecuencia, tremores armónicos y tremores de avalancha.

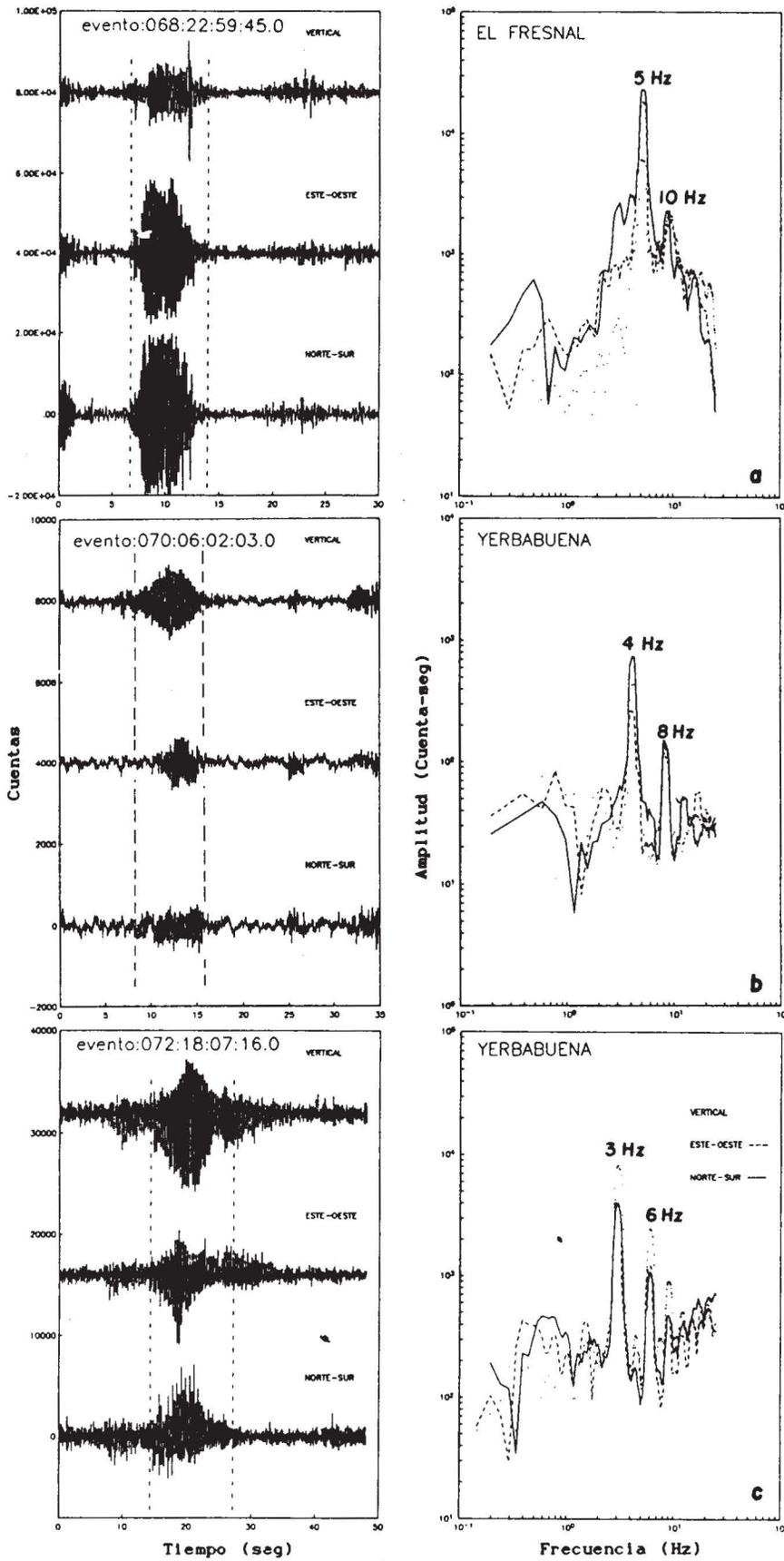


Fig. 8. Registros de tremores armónicos en las estaciones El Fresnal (un evento) y Yerbabuena (dos eventos). Las líneas discontinuas marcan la ventana que cubre al tremor. A la derecha de cada evento se muestran sus respectivos espectros de amplitud de Fourier para las tres componentes.

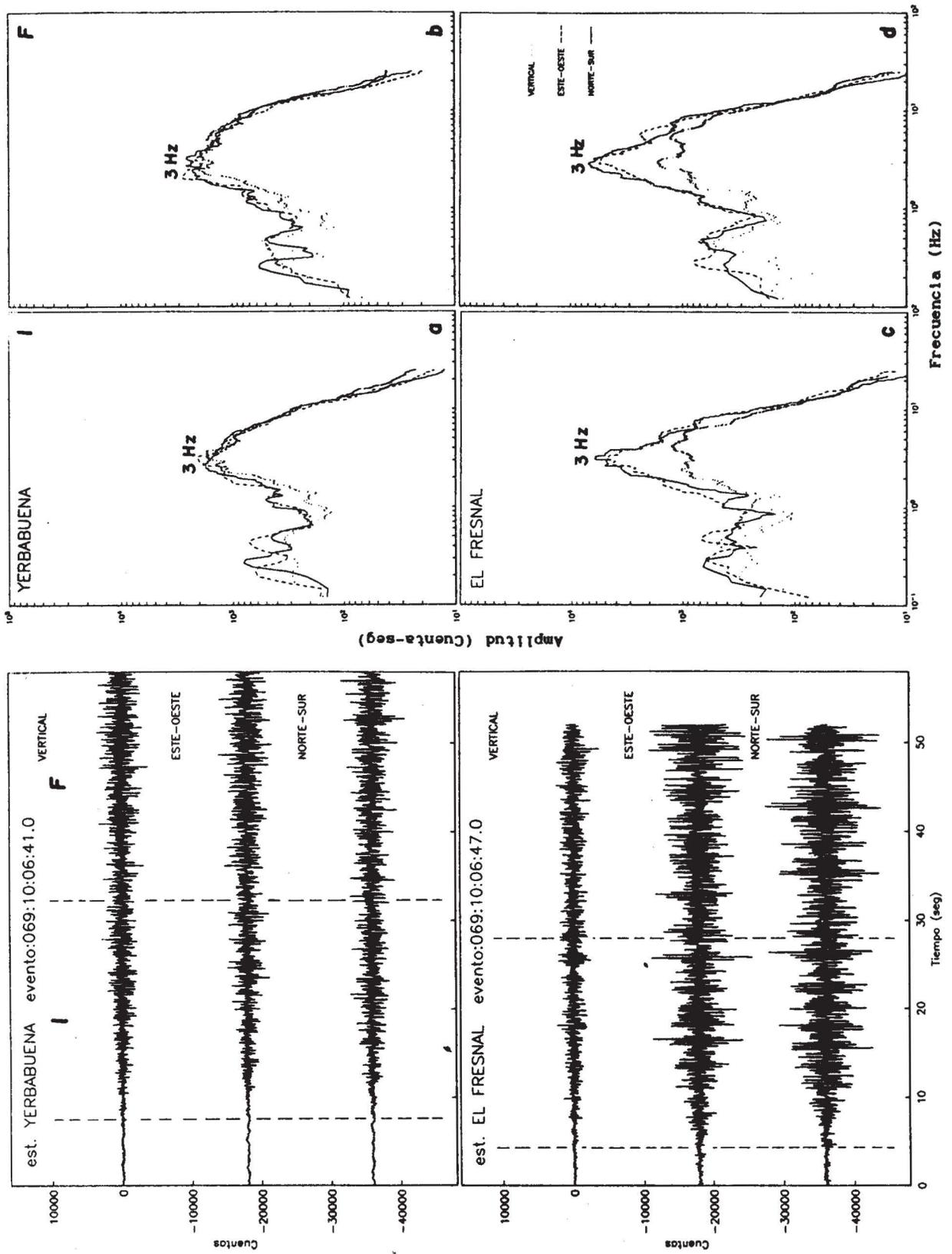


Fig. 9. Registros de eventos asociados a tremores de avalancha para las estaciones de Yerbabuena y El Fresnal. Las líneas discontinuas marcan dos ventanas sobre la parte inicial (I) y final (F) de la señal. Se presentan a la derecha sus respectivos espectros de amplitud de Fourier para cada componente.

- 2) En el análisis espectral es importante evaluar el efecto de sitio de las estaciones, ya que ésta influye tanto en la forma espectral como en las frecuencias dominantes.
- 3) El tipo B-Alta frecuencia para este volcán presenta una frecuencia dominante en 5 Hz, sin mostrar una forma espectral definida. El tipo B-Baja frecuencia muestra una forma espectral parabólica, centrada en una frecuencia dominante de 2 Hz.
- 4) Los tremores armónicos observados presentan una forma espectral característica compuesta de dos lóbulos estrechos. El segundo lóbulo de menor amplitud guarda una relación del doble de la frecuencia dominante del primero. Se observó una variación de la frecuencia dominante del primer lóbulo entre 3 y 5 Hz.
- 5) Los tremores de avalancha muestran también una forma espectral parabólica, centrada en una frecuencia dominante de 3 Hz.

Siendo el análisis espectral una forma de obtener información del edificio volcánico y mejorar la clasificación de eventos sísmicos asociados a la actividad volcánica, este estudio ha de contribuir en alguna forma a futuros estudios espectrales en volcanes mexicanos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a los Doctores Izumi Yokoyama y Shri Krishna Singh, por sus valiosas sugerencias y correcciones al texto.

De igual manera expresamos nuestro agradecimiento a las autoridades civiles y militares de la ciudad de Colima por las facilidades otorgadas en el trabajo de campo, de manera especial al Lic. Carlos De La Madrid Virgen, gobernador del Estado de Colima; al Ing. José Luis Torres Medina, presidente de la delegación Colima de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, A. C.; al Arq. Jorge Piza Espinosa encargado de la Coordinación General de Investigación Científica de la Universidad de Colima; y al Sr. Miguel Rivera E. Agradecemos también al Arq. Elías A. Huamán por el diseño de las gráficas, de igual manera al Ing. Horacio Mijares por su apoyo en la parte del instrumental sísmico utilizado.

Este estudio fue parcialmente financiado por los Institutos de Ingeniería y Geofísica de la UNAM, y por el Ayuntamiento de la ciudad de Colima, Col.

BIBLIOGRAFIA

- AKI, K., S. FEHLER y S. DAS, 1977. Source mechanism of volcanic tremor: fluid-driven crack models and their application to the 1963 Kilauea eruption. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2, 259-287.
- BANKS, N. G., R. I. TILLING, D. H. HARLOW y J. W. EWERT, 1989. Volcano monitoring and short-term forecasts, *In: R. I. Tilling (Editor), Volcanic Hazards: American Geophysical Union, Washington*, p. 51-80.

- CASTELLANOS, G., G. ORNELAS, C. RAMIREZ, G. REYES, H. TAMEZ, Z. JIMENEZ y F. NUÑEZ-CORNU, 1989. Resultados preliminares de la Red Telemetrizada de Colima (RESCO), *GEOS*, 9-4, 479-487.
- CHOUET, B., 1988. Resonance of a fluid-driven crack: Radiation properties and implications for the source of long-period events and harmonic tremor. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 93, 4375-4400.
- CICT y RESCO, 1992. Colima, *Bulletin of the Global Volcanism Network*, 17-2, 9-10.
- GONZALEZ, G., A. MARTIN DEL POZZO, J. PANOHAYA y J. DE GANTE, 1993. Estudio de la sismicidad y deformación del volcán de Colima durante la crisis de abril de 1991, *Geofís. Int.* 32, 4.
- GRESTA, S. y G. PATANE, 1987. Review of seismological studies at Mount Etna, *Pageoph*, 125-6, 951-970.
- HAVSKOV, J., S. DE LA CRUZ, S. K. SINGH, F. MEDINA y C. GUTIERREZ, 1983. Seismic activity related to the March-April, 1982 eruption of El Chichon volcano, Chiapas, Mexico, *Geophys. Res. Lett.*, 10, 293-296.
- KADOMURA, H., H. OKADA, T. IMAGAWA, I. MORIYA y H. YAMAMOTO, 1983. Erosion and mass movements on Mt. Usu accelerated by crustal deformation that accompanied its 1977-1982 volcanism, *Natural Disaster Science*, 5-2, 33-62.
- KUBOTERA, A., 1974. Volcanic tremors at Aso volcano, *In: L. Civetta, P. Gasparini, G. Luongo and A. Rapolla (Editors), Physical Volcanology: Elsevier, Amsterdam*, p. 29-48.
- LERMO, J., M. RODRIGUEZ y S. K. SINGH, 1988. Natural period of sites in the valley of Mexico from microtremor measurements. *Earthquake Spectra*, 4, 805-814.
- MALONE, S. D., 1983. Volcanic earthquakes: examples from Mount St. Helens, *In: Earthquakes: Observation, Theory and Interpretation, LXXXV Corso, Soc. Italiana di Fisica, Bologna, Italy*, p. 436-455.
- MARTIN DEL POZZO, A. L. y V. H. ROMERO, 1989. El Volcán de Colima: Un estudio sobre el riesgo, *Litosfera*, 2, 43-55.
- MARTIN DEL POZZO, A. L., D. BARRERA, J. GONZALEZ, R. MACIEL, J. PANOHAYA y F. SANCHEZ. (UNAM, U. de G.), 1991. Reporte de la actividad del Volcán de Colima.

- MARTINELLI, B., 1990. Analysis of patterns observed at Nevado del Ruiz volcano, Colombia during August-September 1985, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 41, 297-314.
- MINAKAMI, T., S. UTIBORI, S. HIRAGA, T. MIYAZAKI, N. GYODA y T. UTSUNOMIYA, 1970. Seismometrical studies of volcano Asama, pt. 1: *Earthquake Research Institute Bulletin, Tokyo University*, 48, 235-301.
- MINAKAMI, T., 1974. Seismology of volcanoes in Japan, *In: L. Civetta, P. Gasparini, G. Luongo y A. Rapolla (Editors), Physical Volcanology*, Elsevier, Amsterdam, p. 1-27.
- NAVA, E. y H. MIJARES, 1991. Calibración y acondicionamiento de sismógrafos digitales PRS4-EDA, Informe interno del Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D. F., en preparación.
- NAVA, F., F. NUÑEZ-CORNU, Z. JIMENEZ, I. YOKOYAMA, S. DE LA CRUZ, G. ORNELAS, G. REYES, J. HERNANDEZ, R. GARCIA-ARTHUR, A. RAMIREZ y H. TAMEZ (1991). Hipos, Bsites y tremores del Volcán de Colima durante el episodio eruptivo de 1991, *GEOS*, 11, 23-24.
- McNUTT, S. R., 1986. Observations and analysis of B-type earthquakes, explosions, and volcanic tremor at Pavlof volcano, Alaska, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 76, 153-175.
- NUÑEZ-CORNU, F. y A. NAVA, 1992. Sismicidad en el Volcán de Colima durante la erupción de 1991, *GEOS*, 12, 32.
- NTEPE, N. y J. DOREL, 1990. Observations of seismic signals at Stromboli volcano, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 43, 235-251.
- RIUSCETTI, M., R. SCHICK y D. SEIDL, 1977. Spectral parameters of volcanic tremors at Etna, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2, 289-298.
- SINGH, S. K., J. LERMO, T. DOMINGUEZ, M. ORDAZ, J. M. ESPINOSA, E. MENA y R. QUAS, 1988. A study of relative amplification of seismic waves in the valley of Mexico with respect to a hill zone site. *Earthquake Spectra*, 4, 653-674.
- YOKOYAMA, I., 1988. Seismic energy releases from volcanoes, *Bull. Volcanol.* 50, 1-13.
-
- J. Lermo¹, J. Cuenca², T. Monfret^{2,3}, F. J. Hernández¹ y E. Nava¹.
- ¹ Instituto de Ingeniería, UNAM.
² Instituto de Geofísica, UNAM.
Cd. Universitaria
04510 México, D.F., México
³ ORSTOM, Mission-Mexique.