



**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS ESTADO DE MÉXICO**

**RECONOCIMIENTO DE FORMAS DE ONDA EN REGISTROS
SISMICOS MEDIANTE REDES NEURONALES**

Trabajo de investigación que para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS
COMPUTACIONALES**

Presentó: Roberto Ortega Ruiz

Siendo integrado el jurado por

Dr. Carlos Miguel Valdés González. Presidente
Dr. Miguel Antonio Bravo Díaz. Secretario
Dr. Oscar Chavoya Aceves. Sinodal y Asesor

BIBLIOTECA



MAYO 1994

INDICE

Introducción	1
I. Redes Neuronales Espacio-Temporales.	2
I.1 Introducción a las redes neuronales.	2
I.2 Redes Neuronales Espacio-Temporales.	4
I.3 Arquitectura de las redes Espacio-Temporales.	4
II. Registros Sísmicos.	12
II.1 El sismómetro.	17
II.2 Discretización de la señal.	21
III. Adquisición de datos.	24
III.1 Base de Datos.	26
III.2 Transmisión y conversión de formatos	29
IV. Preprocesado de los registros.	30
IV.1 Sincronización.	31
IV.2 Suavizado.	34
IV.3 Representación del patrón espacio-temporal.	38
V. Implementación de la red espacio-temporal.	41
V.1 Construcción de la Red.	42
V.2 Representación en código.	43
VI. Resultados.	49
VI.1 Prueba de la red espacio-temporal.	49

VI.2 Calibración.	52
VI.3 Resultados.	56
Conclusiones.	62
Referencias.	63
Apéndices.	65

INTRODUCCIÓN.

Normalmente las arquitecturas de redes neuronales se aplican a patrones espaciales que no se encuentran necesariamente correlacionados en tiempo, por ejemplo: reconocimiento de imágenes, o de caracteres escritos. Pero existen otro tipo de patrones que por su naturaleza, se encuentran ligados fuertemente a su variación temporal, como: reconocimiento de voz, de radar o de registros sísmicos, y se han desarrollado arquitecturas de redes neuronales espacio-temporales que trabajan simultáneamente con la información espacial y temporal.

Este trabajo se dirige al reconocimiento de formas de onda en registros sísmicos para clasificarlos según su origen (telesismos, sismos volcánicos, explosiones, sismos locales, etc.) representando al registro sísmico como un patrón espacio-temporal. Un patrón espacio-temporal es una secuencia de patrones espaciales ligados en el tiempo, el patrón espacio-temporal en un registro sísmico se representa mediante una serie de vectores del espectro de potencia en un intervalo de tiempo.

Los registros sísmicos poseen una gran cantidad de información, mediante ellos se puede estudiar la estructura del subsuelo, la fuente sísmica o efectos del movimiento del terreno y pueden tener una gran variedad de aplicaciones, desde cimentaciones en la ingeniería civil hasta los estudios de las oscilaciones libres de la Tierra en sismología natural. La identificación de un sismo y su clasificación en telesismos, sismos locales, etc. normalmente se realiza por un analista experto, pero en algunos casos la clasificación no es tan sencilla, muchas veces es fácil confundir el arribo de una fase sísmica con la conversión de una onda de cuerpo y clasificarse erróneamente. Mediante este tipo de técnicas de redes neuronales, es posible identificar automáticamente el registro, inclusive mejor que un analista, debido a que hace el reconocimiento en el dominio espectral.

Entre algunas de las aplicaciones de este trabajo están: reconocimiento y detección en tiempo real de los registros sísmicos, automatización del proceso de adquisición de datos de señales sísmicas, apoyo en la clasificación de eventos sísmicos, reconocimiento de explosiones, erupciones volcánicas, avalanchas, etc.

I. Redes Neuronales Espacio-Temporales.

I.1 Introducción a las redes neuronales.

Una red neuronal se puede definir como una serie de procesadores en paralelo conectados entre sí y organizados de tal manera que permitan resolver un problema determinado.

Los elementos individuales se denominan elementos de procesamiento (PES), nodos o simplemente unidades.

La figura 1.1 muestra un modelo general de un PE. Los PES tienen varias entradas y una sola salida, como las neuronas biológicas, que a su vez pueden alimentar otros PES de la red. Cada conexión de entrada tiene asociada una cantidad w denominada peso o fuerza de conexión. El peso de la conexión del nodo j al nodo i se escribe como w_{ij} .

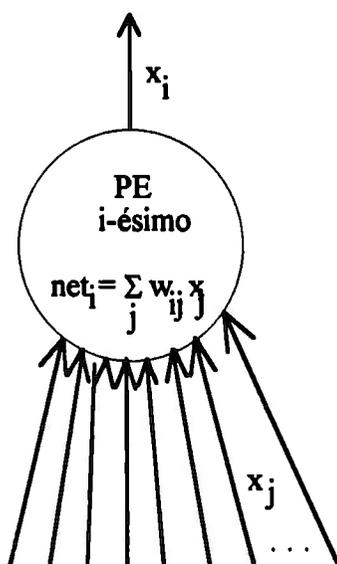


Fig. 1.1 Representación de un elemento de procesamiento en una red neuronal.

Las entradas de los PES pueden ser de varios tipos (exitatorias o inhibitorias). Una conexión exitatoria tiene pesos positivos, y una conexión inhibitoria tiene pesos negativos.

Cada PE determina un valor de entrada de la red basada en todas sus conexiones de entrada. La entrada de la red se puede expresar de la siguiente forma

$$net_i = \sum_{j=1}^n x_j w_{ij} \quad (1.1)$$

Donde n es el número de todas las conexiones del PE. Una vez calculado el valor de entrada, se procede a encontrar el valor de activación del PE, que en general es una función del siguiente tipo

$$a_i(t) = F_i(a_i(t-1), net_i(t)) \quad (1.2)$$

El valor de activación puede depender de un valor de activación previo. En seguida se determina el valor de salida, que corresponde a una función del tipo

$$x_i = f_i(a_i) \quad (1.3)$$

En muchos modelos de redes neuronales, es más útil representar sus cantidades en términos vectoriales, la ec. 1.1 puede expresarse de la siguiente forma

$$net_i = \mathbf{x} \cdot \mathbf{w}_i \quad (4)$$

Donde \mathbf{x} es un vector n -dimensional $\mathbf{x}=(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)^t$, t significa transpuesta. Finalmente una estructura esquemática de una red neuronal se presenta en la figura 1.2.

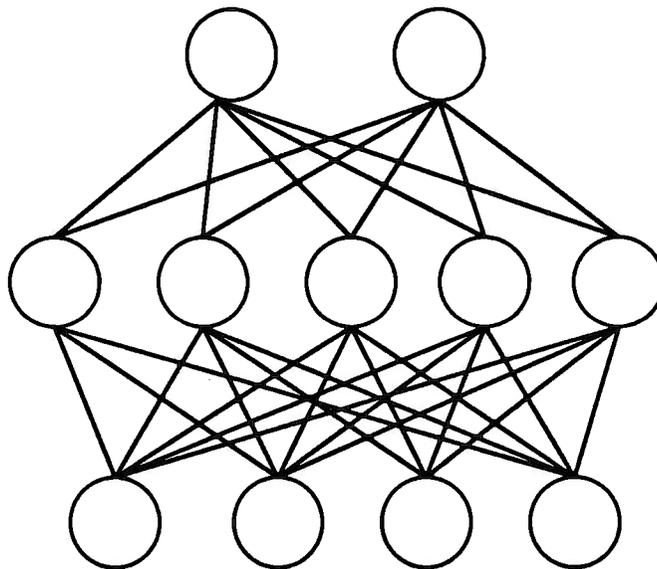


Fig. 1.2 Representación esquemática de una red neuronal de tres capas.

I.2 Redes Neuronales Espacio-Temporales.

Los fundamentos teóricos de las redes neuronales espacio-temporales, se basan en la estructura formal de avalancha desarrollada por Grossberg (1982).

Sea $\mathbf{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))^t$ una función dependiente del tiempo en el intervalo $t_0 < t < t_1$. La red se inicia al activar el nodo t_0 y al aplicar $\mathbf{x}(t_0)$ para entrenar las unidades de salida. La siguiente serie de comandos $\mathbf{x}(t_0 + \Delta t)$ se aplican mientras se activan las siguientes unidades de salida $t_0 + \Delta t$. Este proceso continúa aplicándose sucesivamente a todos los elementos de la función $\mathbf{x}(t)$. Una vez que ha sido entrenada la secuencia, todos los elementos de la función $\mathbf{x}(t)$ pueden ser generados nuevamente en la secuencia correcta si aplicamos un vector cero en las entradas de \mathbf{x} . Para repetir la secuencia solo es necesario estimular el nodo t_0 , el mismo nodo t_0 estimulará al nodo $t_0 + \Delta t$ y así sucesivamente. La forma de la red se muestra en la figura 3.

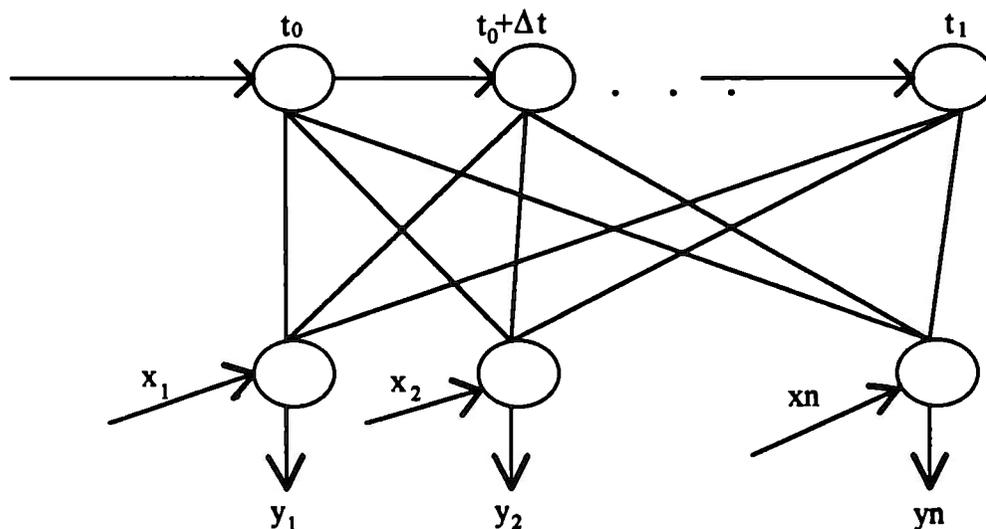


Figura 1.3 Estructura de la Avalancha formal de Grossberg.

I.3 Arquitectura de las redes Espacio-Temporales.

El espectro de potencia de una señal variante en el tiempo se puede representar como un vector cuyos componentes son los valores de potencia para cada banda de frecuencia en un instante determinado. El patrón espacio-temporal de cada señal consiste en una secuencia de vectores $\mathbf{P}(t_j)$, donde $\mathbf{P}(t_j)$ es el vector que corresponde a la j -ésima determinación de la potencia espectral.

Para representar una señal variante en el tiempo, es necesario muestrear el espectro de potencia a una determinada frecuencia, que cuando menos sea dos veces mayor que el ancho de banda original de la señal.

Primero se debe construir una red que identifique un solo patrón. Para esto, es necesario un análisis espectral de la muestra de entrenamiento. Si t es la duración de la señal y v la razón de muestreo entonces se requiere de $m = v t$ espectros para representarla.

Sea

$$P = \{P(t_1), P(t_2), \dots, P(t_m)\} \quad (1.5)$$

el patrón espacio-temporal. Se asignan los vectores de peso de la siguiente forma: $z_1 = P(t_1), z_2 = P(t_2), \dots, z_m = P(t_m)$. La dimensión del vector de pesos y por consiguiente el número de elementos de procesamiento de entrada, se define por el número de bandas en que se divide el espectro de potencia.

Ahora para clasificar una señal definimos el siguiente procedimiento:

Sea

$$Q = \{Q(t_1), Q(t_2), \dots, Q(t_j)\} \quad (1.6)$$

el patrón espacio-temporal que se desea clasificar, asumimos que el patrón se encuentra normalizado, es decir que $|Q(t_i)| = 1$, para toda i , además se simplifica la notación de la siguiente manera: $Q_i = Q(t_i)$.

Cada Q_i se aplica a la entrada de todos los elementos de procesamiento y se mantiene por un tiempo t igual al intervalo de muestreo del espectro. Después de ese tiempo se aplica el siguiente vector de entrada Q_{i+1} y así sucesivamente. Durante el tiempo en el que se aplica un vector de entrada, cada elemento de procesamiento ajusta de manera dinámica sus valores de activación y de salida.

Como cualquier otro elemento de procesamiento de una red neuronal, las unidades reciben el valor de entrada de la red a partir del producto punto del vector de entrada y del vector de pesos, en este caso $Q_i \cdot z_i$, para el i -ésimo elemento.

Además cada elemento recibe en la entrada todas las unidades de salida que lo preceden, figura 1.4.

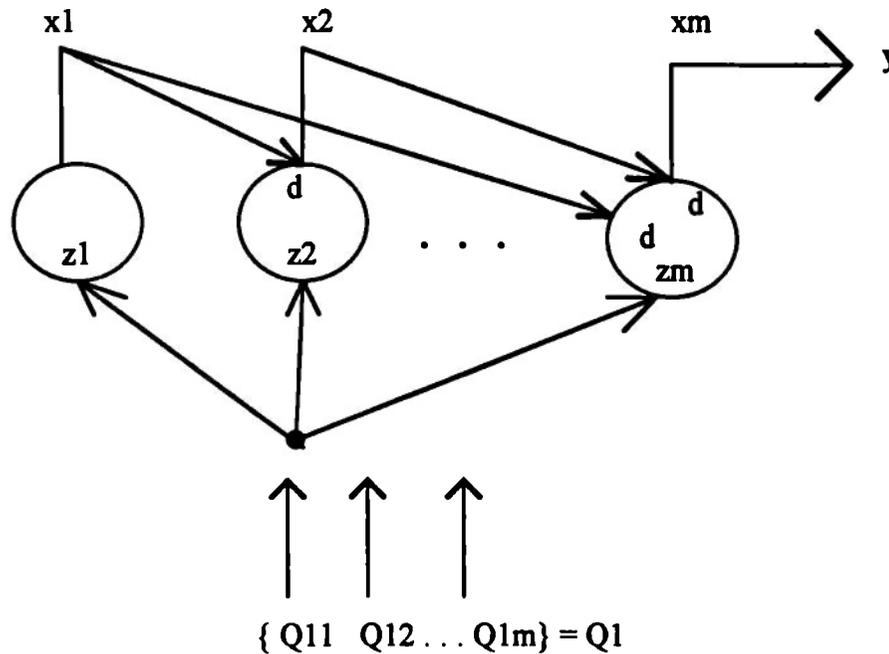


Figura 1.4 Red de avalancha para el reconocimiento de un solo patrón. La salida de cada unidad está conectada de izquierda a derecha a cada unidad posterior mediante un factor d .

Debido a que los pesos asociados a las conexiones subsecuentes se encuentran ponderados mediante una constante $d < 1$, la entrada *total* de la i -ésima unidad es entonces:

$$I_i = Q_i z_i + d \sum_{k=1}^{i-1} x_k \quad (1.7)$$

donde x_k es la salida del k -ésimo elemento. La salida del i -ésimo elemento se modela mediante la siguiente ecuación diferencial:

$$\dot{x}_i = A(-\alpha x_i + b[I_i - \Gamma]^+) \quad (1.8)$$

donde a y b son constantes positivas.

La función $[u]^+$ se define como

$$[u]^+ = \begin{cases} u & \text{si } u > 0 \\ 0 & \text{si } u \leq 0 \end{cases} \quad (1.9)$$

y Γ funciona como un umbral.

La función $A(u)$ se le denomina *función de ataque* (Freeman y Skapura, 1992) y se define mediante la siguiente ecuación

$$A(u) = \begin{cases} u & \text{si } u > 0 \\ cu & \text{si } u \leq 0 \end{cases} \quad (1.10)$$

donde $0 < c < 1$.

La función de ataque tiene el objeto de elevar o decrementar por un factor c el elemento de procesamiento de los valores de salida. La salida de un elemento de procesamiento de un valor de entrada que excede el umbral, se muestra en la figura 1.5.

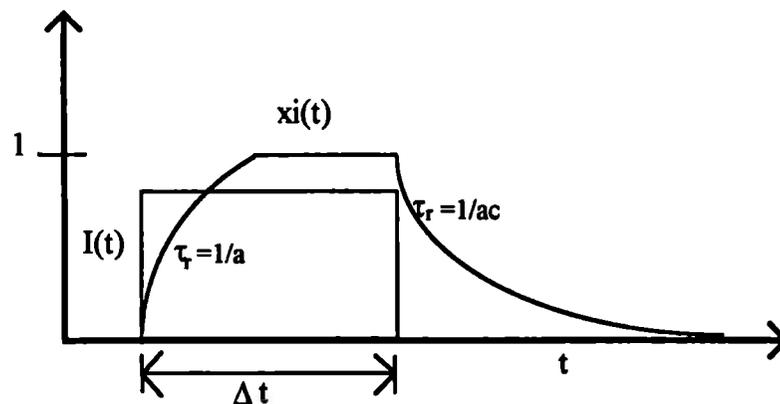


Figura 1.5 Salida de un elemento de procesamiento de un patrón espacio-temporal.

El valor de salida y , corresponde a la salida del último elemento x_m , cuando se trata del último vector de entrada corresponde precisamente a la salida de la red espacio-temporal.

Las ecuaciones de la red se definen con los valores $y(t)$ en cualquier instante t en el que el patrón espacio-temporal concuerde con el patrón previamente almacenado en la red.

A continuación se considera el caso en que $Q=P$, eso significa que $Q_i = P(t_i)$ para toda i , y se analiza la respuesta de la red mientras los vectores de entrada Q_i se aplican sucesivamente. Γ es lo suficientemente grande de manera que al coincidir Q_i con z_i se produzca una salida no nula.

El primer vector de entrada Q_1 , coincide exactamente con z_1 y x_1 se eleva rápidamente. Asumimos que el resto de las unidades de procesamiento permanecen inactivas. Si Q_1 permanece el tiempo suficiente se saturará, cuando Q_1 desaparece y se aplica Q_2 , x_1 empezará a decaer, y al mismo tiempo x_2 empezará a elevarse porque Q_2 coincide con el vector z_2 . Aún más, debido a que x_1 no ha decaído totalmente, éste valor contribuirá al valor de entrada de la unidad 2. Cuando se aplique Q_3 , ambos x_1 y x_2 contribuirán a la entrada de la unidad 3, y así sucesivamente.

Esta forma de avalancha continúa mientras los vectores se aplican a la red. Debido a que los vectores de entrada han sido aplicados en la secuencia apropiada, cada uno de los subsecuentes valores de entrada se encuentran reforzados por las salidas de las unidades que lo preceden. En el momento en que ingresa el vector final, la salida de la red, representada por $y = x_m$, debe haber alcanzado el nivel de saturación a pesar de que las contribuciones de las primeras unidades hayan decaído.

Para ilustrar los efectos en los que un patrón no coincide, examinemos el caso en el que los patrones de Q se apliquen en orden inverso.

Debido a que Q_m , coincide con z_m , x_m se elevará rápidamente hasta la saturación, a pesar de que su salida no está siendo reforzada por ningún otro elemento de la red. Cuando se aplique Q_{m-1} , x_{m-1} se encenderá y su salida continuará hasta x_m . La entrada *total* de la m -ésima unidad es $d \cdot x_{m-1}$ y debido a que $d < 1$ es muy poco probable que alcance el umbral Γ . Por eso x_m seguirá decayendo, cuando se aplique el último vector x_m habrá decaído totalmente indicando que la red no ha reconocido el patrón. Hay que recordar que Q_{m-1} es ortogonal al vector de pesos z_m y por lo tanto no existe ninguna contribución a la entrada de la m -ésima unidad debido al producto punto de ambos vectores. En la práctica estos vectores no son necesariamente ortogonales.

La figura 1.6 muestra una secuencia gráfica de las unidades de salida de un patrón de reconocimiento simple de cuatro unidades. La red que acabamos de

describir solo reconoce un solo patrón, para distinguir varios patrones se debe repetir varias veces el mismo proceso pero con redes entrenadas para cada patrón en particular. La figura 1.7 muestra un sistema en paralelo para identificar m patrones.

Existen muchos problemas por discutir, por ejemplo, la forma de sincronizar las señales, es decir que se encuentren en fase en el mismo instante de tiempo, otro caso puede ser cuando una señal es un subconjunto de otra, o bien cuando una señal se encuentra muestreada a intervalos diferentes del patrón de entrenamiento.

Esta arquitectura parece un poco ineficiente para asignar las capas completas de procesamiento a un simple patrón. Si tuvieramos el caso de que una señal es un subconjunto de otra entonces existe una redundancia debido a la repetición de los mismos elementos de procesamiento. Se pueden eliminar los elementos redundantes conectando simplemente los elementos de procesamiento una sola vez. Eliminando las unidades redundantes, se incrementa la eficiencia de la red, pero complica la interpretación de nuestras salidas de las capas individuales.

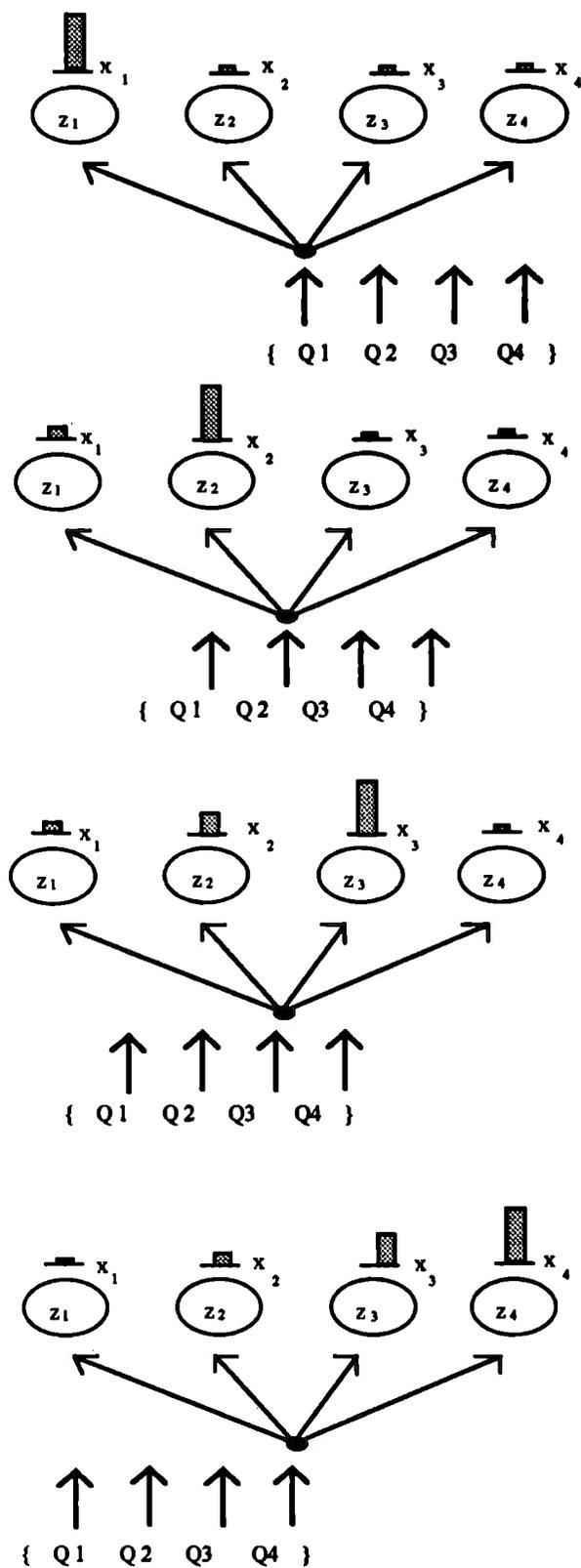


Figura 1.6 Secuencia del reconocimiento de un patrón espacio-temporal .

II. Registros Sísmicos

El registro del movimiento de la Tierra obtenido mediante un sismógrafo contiene información de la fuente sísmica que generó el movimiento y de las propiedades del medio sobre el cual se propaga.

Los datos que utilizan los sismólogos son muy diversos, debido a la variedad de las fuentes sísmicas y al gran rango de valores entre el tamaño de la fuente y la distancia de viaje.

Las fuentes naturales de ondas sísmicas incluyen terremotos, erupciones volcánicas, mareas e impactos meteóricos. Las fuentes sísmicas artificiales más comunes son explosivos enterrados, pero además se encuentran pistolas de aire y vibroseis. Todas estas fuentes generan un diverso rango de intensidades, el sismo mas grande es casi 10^{18} veces mayor que el sismo más pequeño que se haya investigado. El tamaño de las redes sismológicas varía desde 100 metros, para probar cimentaciones en estructuras de ingeniería, hasta más de 10,000 km para estudiar los mecanismos de fuente del interior profundo de la Tierra. Las señales sísmicas varían en un rango de frecuencias entre 0.0001 a 100 Hz.

Debido a este gran rango de frecuencias, dimensión de redes receptoras y tamaño de la fuente existe una gran variedad de datos para analizar.

En marzo de 1881 se obtuvo el primer sismograma de un temblor local mediante un péndulo horizontal en la Universidad de Tokio, algunos investigadores no estuvieron de acuerdo entre la identificación de las ondas compresionales y las ondas de cortante. Sin embargo, durante 20 años la mayoría de la gente ha coincidido en la identificación de las ondas P , S y ondas superficiales. El primer registro de un terremoto distante se realizó en Potsdam por Rebeur-Paschwitz el 17 de abril de 1889, se trató de un terremoto en Japón y la primera curva de tiempos de viaje se publicó en 1900.

La primera red de estaciones sismológicas la diseñó el Comité de Sismología de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia, fundada en 1903. Algunas estaciones no solo reportaron tiempos de arribo, sino además amplitudes de P y S, que después utilizaron Gutenberg y Richter (1954) para la determinación de magnitudes.

En 1918 se fundó el International Seismological Summary (ISS), que contienen los datos de estaciones distribuidas a lo largo del mundo incluyendo el tiempo de origen y los epicentros determinados para esos datos. El número de estaciones que reportó el ISS en 1951 fué de 602, 108 solamente en Japón. En 1975, se reportaron 850 estaciones. Al ISS lo sucedió el International Seismological Center ISC, con sede en Edimburgo hasta 1975, y posteriormente en Newbury, Inglaterra. El boletín de la ISC ha sido publicado desde 1964. En la actualidad cada mes se registran de 50,000 a 100,000 observaciones.

Actualmente existen centros de información electrónica y únicamente se necesita conectar remotamente a estos centros para obtener la información necesaria. Un ejemplo es el sistema Gopher-Guts de localizaciones preliminares en la Universidad de Washington. La figura 2.1 muestra un ejemplo de localización epicentral de un sismo mediante este sistema.

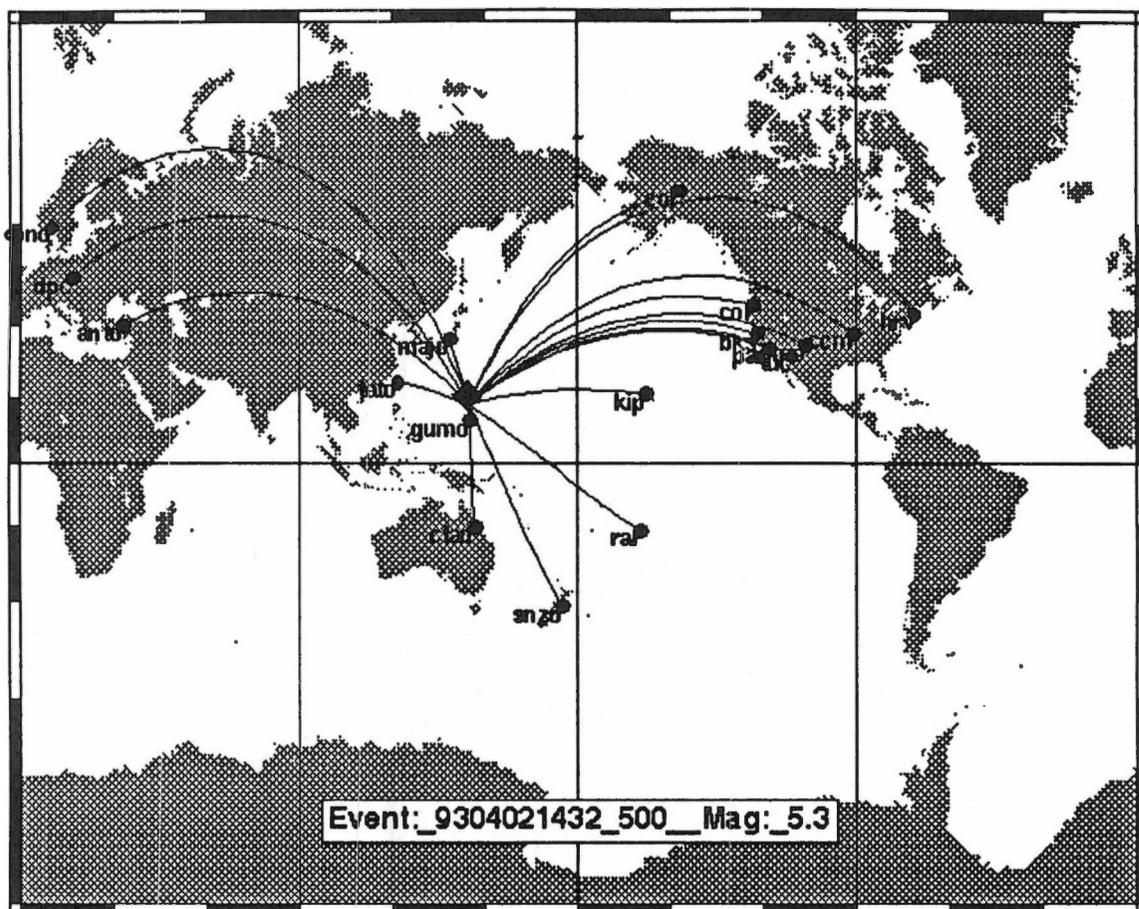


Fig. 2.1 Ejemplo de un reporte de localización del sistema Gopher-Guts.

Por muchos años ha estado operando un programa eficiente de localización epicentral elaborado por la U.S. Coast and Geodetic Survey, que publica la determinación preliminar de epicentros (PDE). Se reciben casi 40,000 lecturas al mes de más de 700 estaciones distribuidas a lo largo de la Tierra.

La calidad de los datos de los tiempos de arribo en estos boletines se ha ido mejorando a lo largo de los años mediante procesos iterativos. En el inicio la localización de epicentros se determinó por efectos macrosísmicos observados por el ojo humano, y el tiempo de origen mediante el tiempo de inicio del movimiento en el área epicentral. Las curvas de tiempo de viaje se construyeron mediante tiempos medidos del origen conocido y las distancias de las estaciones. Para cada terremoto nuevo existen cuatro parámetros desconocidos (longitud, latitud, profundidad focal y tiempo de origen). Si se conoce la curva de tiempo de viaje, la simple identificación de la onda P en cuatro estaciones, puede determinar estos parámetros. Asimismo una gran cantidad de estaciones puede proporcionar información adicional para la revisión de las curvas de tiempos de viaje.

Cuando se encuentra una curva de tiempo de viaje, es fácil buscar una estructura del interior de la Tierra para explicar las observaciones. El primer modelo cuantitativo se construyó por Wiechert y colaboradores en el año de 1910. Y algunos de sus resultados todavía siguen siendo válidos. Por ejemplo la profundidad del manto interno (2900 km) encontrada por Gutenberg en 1913 está muy cerca de los últimos valores estimados (2885-2890 km).

Una vez que se ha especificado un modelo de la Tierra, se calculan tiempos de viaje teóricos y se comparan con los observados. Gracias a este tipo de procesos se pueden identificar nuevas fases y el residual del tiempo relativo al tiempo predicho se puede utilizar para un modelo posterior de la Tierra .

De esta manera se ha descrito un proceso iterativo, empezando con la identificación del tipo de onda y seguido por la medición de sus tiempos, localización epicentral, cálculos residuales, corrección de la curva de tiempo de viaje, y la revisión del modelo de la estructura terrestre.

La distribución temporal y espacial de una gran cantidad de terremotos pequeños en una zona tectónicamente activa se han reconocido como los datos básicos para el estudio de procesos tectónicos. La red más extensa de este tipo se encuentra operada por la U.S. Geological Survey en California Central desde 1966. Para la mayoría de los eventos la exactitud de la

localización y profundidad focal son de 2.5 y 5 km respectivamente. Esta red tiene la esperanza de monitorear cualquier evento que pudiera predecir un terremoto fuerte.

Los datos generales de los patrones del primer movimiento han sido estudiados exhaustivamente por Hodgson y colaboradores en los años 50's, utilizando el método de Byerly de proyección focal esferoidal en las estaciones sismológicas. Debido a que normalmente no se reportan los primeros arribos en los boletines sismológicos, recolectaron sus datos mediante cuestionarios a los simólogos de las estaciones. Y los datos recopilados aparentemente no fueron adecuados. Esta inconsistencia se pudo reducir hasta los años 60's cuando se pudo obtener el primer arribo de la partícula en forma consistente a partir de los registros estandarizados de periodo largo de los sismógrafos de la WWSSN(World-Wide Standard Seismograph Network). El resultado de este trabajo dió un incremento considerable a las soluciones de planos de falla.

La WWSSN se creó a principios de los 60's. Esta red consiste de 120 estaciones distribuidas a lo largo de la Tierra. Cada una de estas estaciones está equipada con tres simógrafos de periodo corto y tres sismógrafos de periodo largo. Estos aparatos están compuestos por péndulos de bobinas móviles acoplados con galvanómetros de registro.

Los datos de la WWSSN tienen utilidad a largo plazo. La facilidad de tener sismogramas bien calibrados en una escala global ha generado la posibilidad de utilizar formas de onda o espectros para estudios de la estructura de la Tierra y sus mecanismos de fuente. Esto hace que la sismología sea una ciencia completamente cuantitativa, y se basa en la teoría de la propagación de ondas.

Esta teoría de propagación de ondas tiene sus inicios con un trabajo del Lamb (1904), sobre la generación de ondas sísmicas mediante una fuerza puntual en un semiespacio. Ewin, Jardetzky y Press (1957) conjuntaron los resultados teóricos y discutieron su aplicación en varios experimentos. Su aplicación exitosa, junto con el advenimiento de computadoras digitales fortaleció la teoría de propagación de ondas en los años 60's.

Esta teoría ha sido útil sobre todo en ondas de periodo largo, debido a que son menos sensibles a detalles finos de la estructura de la Tierra, y de esta manera se pueden aplicar modelos más sencillos.

La forma de datos más sencilla en la teoría de propagación de ondas puede ser un registro sísmico en sí. Además se pueden calcular sismogramas sintéticos mediante un modelo que incluya respuesta instrumental y se pueden comparar ambos resultados. Probablemente la primera comparación exitosa es la de Pekeris(1948) en un trabajo de ondas acústicas sobre el océano. La forma más común de datos es una porción seleccionada de un sismograma que se cree que sea consistente para algunos tipos de onda como ondas de Rayleigh u ondas de Love.

Si la porción del sismograma se encuentra compuesta por un solo modo de propagación entonces la onda observada $f(x,t)$ se puede aproximar por esta sencilla expresión (Aki, 1980).

$$f(x,t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |f(x,\omega)| \exp \left[-i\omega \left(t - \frac{x}{c(\omega)} \right) + i\phi(\omega) \right] d\omega \quad (2.1)$$

donde t es tiempo, x es la distancia de la fuente al receptor, $\phi(\omega)$ es el decaimiento de fase, $c(\omega)$ es la velocidad de fase y $|f(x,\omega)|$ es la densidad de amplitud espectral.

Esta expresión ha sido ampliamente utilizada para la medición de la atenuación, velocidad de fase, y la fuente de fase. De esta manera el espectro de amplitud y de fase de una porción seleccionada de un sismograma son datos muy importantes en la sismología.

Press(1956) hizo las primeras mediciones de velocidad de fase utilizando registros de sismógrafos de periodo largo en la red del sur de California. Y logró la precisión necesaria para el estudio de la estructura de la corteza sobre la red.

En los inicios de los 60's, las transformadas de Fourier de los sismogramas completos se convirtieron en una serie importante de datos desde que Benioff(1961), Ness(1961), y Alsop(1961) descubrieron valores en los registros de los espectros de potencia que corresponden a varios modos de oscilación libre de la Tierra. A pesar de que la mayor parte de los datos utilizados para mediciones espectrales fueron de terremotos de magnitud

cercana a 8, sismógrafos modernos de bajo ruido pueden proveer datos útiles para el análisis de oscilación libre a partir de terremotos de tamaño medio.

II.1 El sismómetro.

Con el fin de entender un como varía un registro al pasar por un sismómetro con relación al verdadero movimiento de la tierra podemos modelar un sismómetro como un sistema lineal invariante en el tiempo. De manera simplificada lo podemos representar en la figura 2.2.

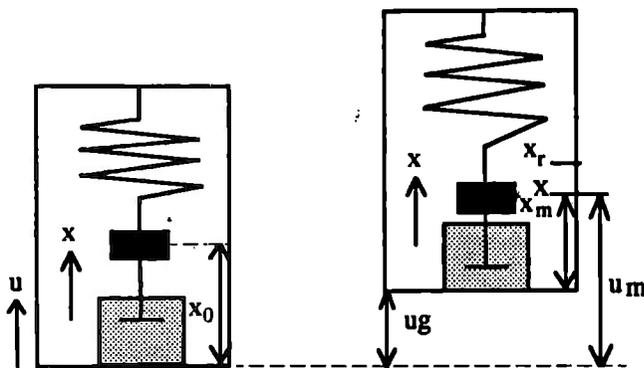


Figura 2.2 Representación de un sismómetro de péndulo.

Existen tres fuerzas que actúan juntas:

La fuerza inercial de la masa $f_i = -m\ddot{u}_m(t)$, la fuerza del resorte $f_{res} = -kx_r(t)$ y la fuerza de fricción $f_f = -D\dot{x}_m(t)$ donde D es la constante de fricción y k la constante del resorte.

En equilibrio todas estas fuerzas se igualan a cero

$$-m\ddot{u}_m(t) - D\dot{x}_m(t) - kx_r(t) = 0 \quad (2.2)$$

Tomando las siguientes consideraciones

$$u_m(t) = u_g(t) + x_m(t) \quad (2.3)$$

$$\dot{x}_m(t) = \dot{x}_r(t) \text{ y } \ddot{x}_m(t) = \ddot{x}_r(t) \quad (2.4)$$

Sustituyendo 2.3 y 2.4 en 2.2

$$\ddot{x}_r(t) + \frac{D}{m} \dot{x}_r(t) + \frac{k}{m} x_r(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (2.5)$$

Y reescribiendo las constantes

$$\ddot{x}_r(t) + 2\varepsilon \dot{x}_r(t) + \omega_0^2 x_r(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (2.6)$$

Una función arbitraria en condiciones muy generales se puede representar como la superposición de sus armónicos, y una señal armónica de entrada puede ser $u_g(t) = A_j e^{i\omega t}$. Por lo que la ecuación anterior se convierte en

$$\ddot{x}_r(t) + 2\varepsilon \dot{x}_r(t) + \omega_0^2 x_r(t) = \omega^2 A_j e^{i\omega t} \quad (2.7)$$

Tomando la siguiente solución

$$\begin{aligned} x_r(t) &= A_o e^{i\omega t} \\ \dot{x}_r(t) &= i\omega A_o e^{i\omega t} \\ \ddot{x}_r(t) &= -\omega^2 A_o e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (2.8)$$

se tiene

$$-\omega^2 A_o + 2\varepsilon i\omega A_o + \omega_0^2 A_o = \omega^2 A_j \quad (2.9)$$

y

$$U(i\omega) = \frac{A_o}{A_j} = \frac{\omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\varepsilon\omega} \quad (2.10)$$

$U(i\omega)$ se le conoce como función de respuesta en frecuencias. Que puede ser expresada de la siguiente forma:

$$U(i\omega) = \frac{\omega^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\varepsilon^2\omega^2}} e^{i\Phi} \quad (2.11)$$

con:

$$\Phi(\omega) = \arctan \frac{-2\varepsilon\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (2.12)$$

La función de respuesta se puede interpretar como la forma en la que se altera el movimiento del terreno al pasar por un sensor que lo registra.

La figura 2.2 muestra la función $|U(i\omega)|$ y de $\Phi(\omega)$ para un sismómetro de periodo corto con ($T_0 = 1$ seg). Se observa que se cuenta con un rango de frecuencias limitado y un filtro pasa bajos con $f_c=10\text{Hz}$ de segundo orden no permite el paso de altas frecuencias.

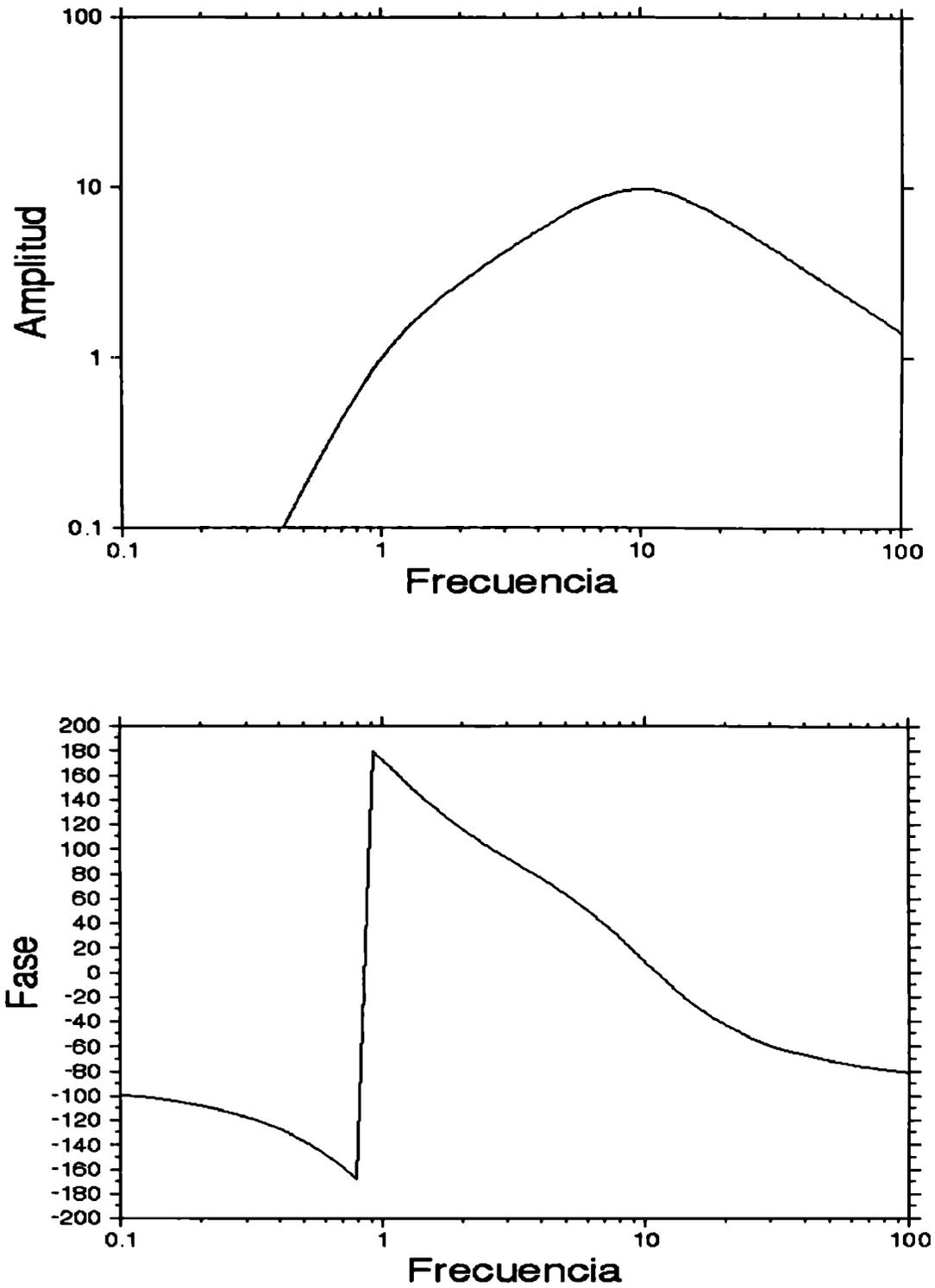


Fig. 2.2 Espectros de Amplitud y de Fase de la función de respuesta del sismómetro.

BIBLIOTECA



II.2 Discretización de la señal.

Se considera un sismograma como función del tiempo $f(t)$, en la que la transformada de Fourier $F(\omega)$ existe. Es decir

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \exp(-i\omega t) d\omega \quad (2.13)$$

$f(t)$ se encuentra limitado en un rango de frecuencias no mayor a W y se define una señal muestreada como

$$f_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(n\Delta T) \delta(t - n\Delta T) \quad (2.14)$$

donde $\delta(t - n\Delta T)$ es la función Delta de Dirac en el tiempo $t = n\Delta T$. Y ΔT es el intervalo de muestreo.

La transformada de Fourier de la ec. 2.14 se puede expresar como

$$F_s(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(n\Delta T) \exp(-ian\Delta T) \quad (2.15)$$

Si se muestrea a un intervalo $\Delta T = 1/2W$ entonces la ec. 2.15 se convierte en

$$F_s(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f\left(\frac{n}{2W}\right) \exp\left(-\frac{i\omega n}{2W}\right) \quad (2.16)$$

Es decir

$$F(\omega) = \frac{1}{2W} \sum_{n=-\infty}^{\infty} f\left(\frac{n}{2W}\right) \exp\left(-\frac{i\omega n}{2W}\right) \quad (2.17)$$

Esto significa que una señal $f(t)$ en un rango de frecuencias no mayor a W , se encuentra determinada completamente al muestrear una secuencia de puntos espaciados $1/2W$ segundos.

Es así como los sismogramas $f(t)$, se pueden expresar completamente mediante muestras discretas tomadas en intervalos de $1/2W$. Si el tiempo en el que ocurre $f(t)$ es de T segundos, el número total de muestras que se requieren es de $2WT$. La cantidad de información en el sismograma $f(t)$ se puede medir mediante los requerimientos de memoria que se necesitan para almacenarlos en un sistema de cómputo. Si los datos de cada muestra se digitizan en enteros del 0 a 2^m-1 , entonces se requieren $2WTm$ bits para almacenar $f(t)$. En la figura 2.3 se muestra un registro sísmico típico con $W = 10$ Hz y $T = 180$ seg.

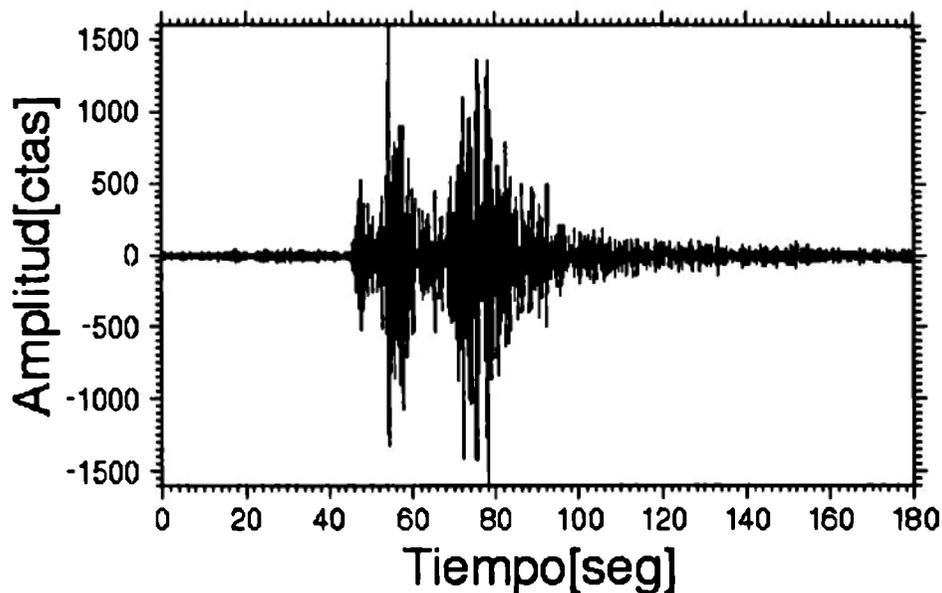


Fig. 2.3 Registro sísmico típico con frecuencia $W=10$ Hz.

El factor más importante para determinar la calidad de una señal sísmica es la relación señal a ruido. La señal se define como la parte deseada de los datos y el ruido es la parte que no queremos tener pero se encuentra presente (fluctuaciones eléctricas, cambios en el voltaje de alimentación de los sensores, vibraciones locales, etc). Este ruido no se puede eliminar y se recomienda tener registros de buena calidad.

Para explicar como se elimina la parte instrumental, hay que recordar que la transformada de Fourier de una señal $h(t)$ se define como

$$H(i\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-i\omega t} dt \quad (2.18)$$

y la transformada inversa

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(i\omega)e^{i\omega t} dt \quad (2.19)$$

La transformada de Fourier es una transformada lineal y un concepto muy importante es la convolución de dos señales que se define de la siguiente manera

$$g * h = \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau)h(t - \tau) dt \quad (2.20)$$

Es fácil demostrar que la transformada de Fourier de $g * h$ es:

$$g(t) * h(t) \Leftrightarrow G(i\omega)H(i\omega)$$

donde $G(i\omega)$ y $H(i\omega)$ son las Transformadas de Fourier de $g(t)$ y de $h(t)$ respectivamente.

El proceso de deconvolución consiste en la división del espectro de una señal entre la función de respuesta del sistema. En el dominio del tiempo esta operación no tiene ninguna representación equivalente.

Las ecuaciones 2.10 y 2.11 pertenecen a la función de respuesta instrumental y se deconvolucionan a partir de los registros de campo para obtener el desplazamiento o velocidad real del terreno.

III. Adquisición de datos

La formación de redes sismológicas locales y regionales ha sido el logro más grande en la sismología observacional. En los años 70's se implantaron unas 70 redes en varias partes del mundo para estudiar sismos locales, especialmente para la predicción de terremotos.

Existen muchos sistemas computarizados para la adquisición de datos sísmicos. Por ejemplo: Stewart, Lee e Eaton (1971), describieron un sistema de adquisición de datos en tiempo real, para la detección y localización de terremotos en California Central. Johnson (1983) es el pionero en sistemas automáticos de procesamiento de redes sísmicas de gran escala.

La mayoría de los sistemas computarizados utilizan hardware especial y tomaron varias décadas para completarse. Un mismo sistema era utilizado solamente por un grupo muy pequeño de personas, la mayoría de los sistemas computarizados tenían un costo que iba de cientos a miles de dólares, pero en la actualidad es posible implantar un sistema de este tipo a un costo razonablemente bajo gracias a la tecnología de las computadoras personales.

Existen trabajos más recientes que utilizan sistemas expertos en el proceso de detección y análisis automático de los registros sísmicos como el de Bache (1993).

El presente trabajo se implementó utilizando el modelo propuesto por Lee y Stewart (1981) con las siguientes características:

- Discretización de 100 o más muestras por segundo. Con resolución de 12 bits.
- 16 canales de datos.
- Despliegue de las señales sísmicas en tiempo real.
- Datos registrados de forma continua o por algoritmos de disparo.

Un Puesto Central de Registro (PCR) ubicado en el campus universitario de la Universidad Nacional Autónoma de México y nueve estaciones distribuidas dentro y en el entorno de la cuenca de México componen la red simotelemétrica (SISMEX). Ocho estaciones tienen sismómetro vertical de período corto ($T_0=1.0$ s) y una estación, en el cerro Tuxpan (III), cuenta con un sismómetro triaxial que registra las componentes Vertical, Norte-Sur y Este-Oeste del movimiento del terreno, también con sismómetros de periodo $T_0=1.0$ s. La figura 3.1 muestra una representación esquemática de sus componentes.

El PCR registra de manera continua la señal enviada por cada estación, se describe a continuación el proceso de registro digital desarrollado en el presente trabajo.

Se implantó un sistema de adquisición digital de datos sísmicos, las partes de las que consta este sistema son un ordenador PC compatible, una tarjeta conversora y software que los controla, la tarjeta conversora tiene las siguientes características:

Tarjeta conversora análogo-digital.

Entradas analógicas: 16

Rangos de entrada: cero a 1.25, 2.5, 5, 10 Volts unipolar

+1.25, 2.5, 5., 10 volts bipolar

Rangos de ganancia: 1, 2, 4 y 8.

Impedancia de entrada: 100 megaohms, 10pF; canal apagado.

100 megaohms, 10pF; canal encendido.

Máximo voltaje de entrada sin provocar daño:

+35 Volts sistema encendido.

+20 Volts sistema apagado.

Ruido de entrada por el amplificador: 0.1 LSB rms

Error de voltaje canal-canal: +5 V.

Resolución: 12 bits

Nolinealidad: menor de +1/2 LSB

Tiempo de conversión A/D: 10 ns.

Esta tarjeta incluye un panel de tornillos terminales que conectan las señales de las estaciones con el ordenador PC compatible, el cual debe tener las siguientes características mínimas: procesador 80286, coprocesador matemático, disco duro de 30 MB, 1.5 MB de memoria RAM de 120 ns, 640 KB de RAM principal y 768 KB de memoria extendida y monitor EGA.

El procedimiento para analizar los registros sísmicos se basa en el modelo propuesto por Havskov y Lindholm (1994) y consta de dos etapas (figura 3.2), la primera corresponde a la obtención de los registros, se utilizó el algoritmo de detección de Lee y Stewart (1989) para obtener los eventos sísmicos y se programaron todas las rutinas necesarias de transferencia y conversión de formatos de la computadora de detección hacia un servidor de estaciones de trabajo, todo esto de forma automática. La segunda etapa se desarrolla en la estación de trabajo, clasificando los registros (telesismos, regionales, explosiones, etc.) y se incorpora la forma de onda a la base de datos, se identifican las fases importantes y finalmente se obtiene la localización hipocentral asignándole además su magnitud.

III.1 Base de Datos.

Se seleccionó una base de datos jerárquica, con objeto de tener acceso simple y una distribución eficaz de la información. La unidad de esta base es un sismo, identificado mediante la fecha y la estación de registro. Para combinar la información de los registros analógicos y digitales se crean archivos compactos de sismos que contienen la información básica, esto es; la lectura

de los tiempos de llegada, la amplitud máxima y la duración de la señal. Además se incorporan automáticamente los parámetros adicionales estimados en el análisis (tiempos de corrección, localización de las estaciones de la red, etc.) para localización hipocentral, magnitud y la eventual solución de plano de falla.

El respaldo en cinta magnética de la base se hace cada tres meses, sin embargo, no se elimina la información de seis meses de registro. Se necesitan cerca de 600 MB por año para respaldo de la información.

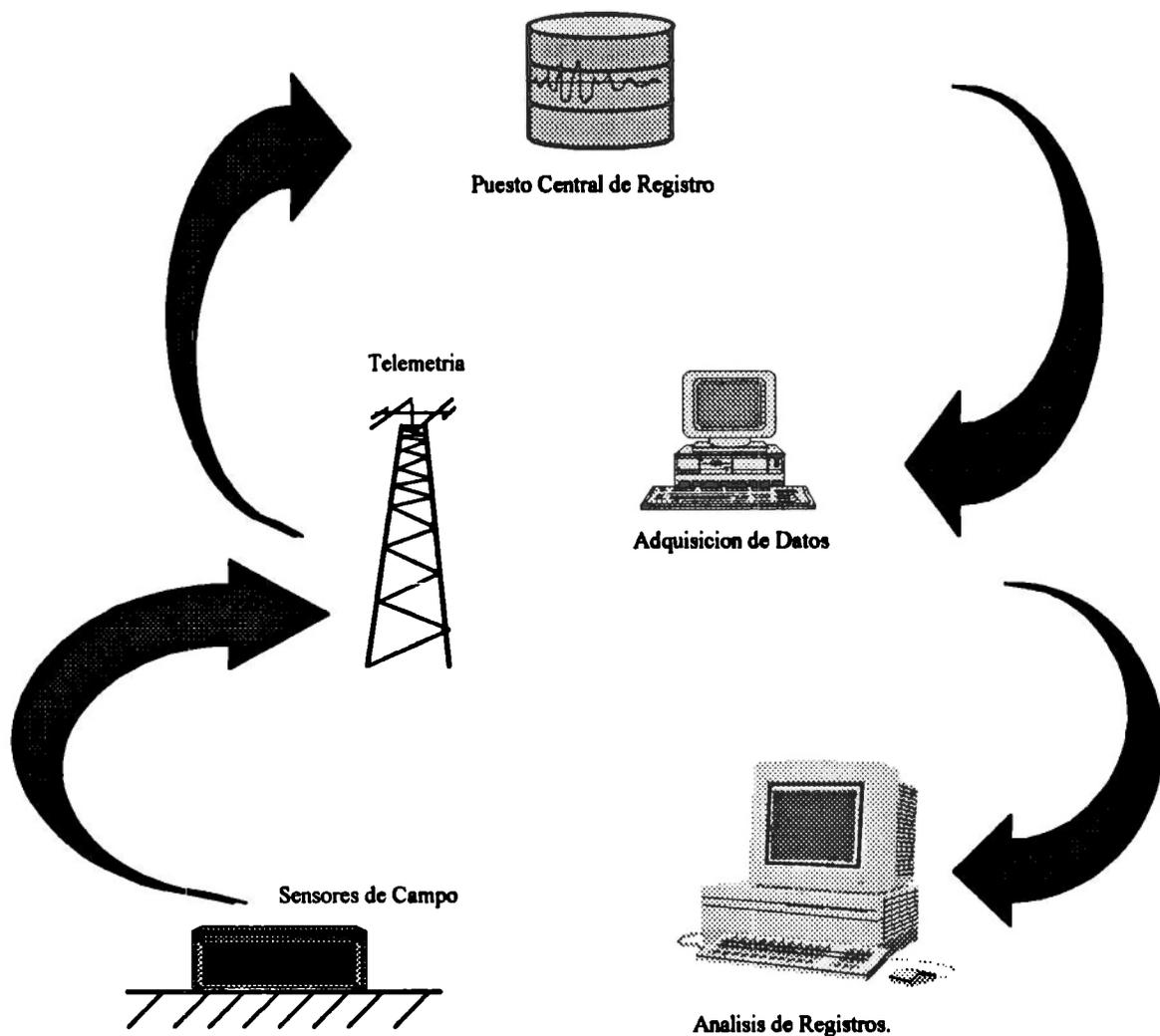


Fig. 3.1 Representación esquemática de la Adquisición y Análisis de Datos del Sistema, propuesto por Lee y Stewart (1981).

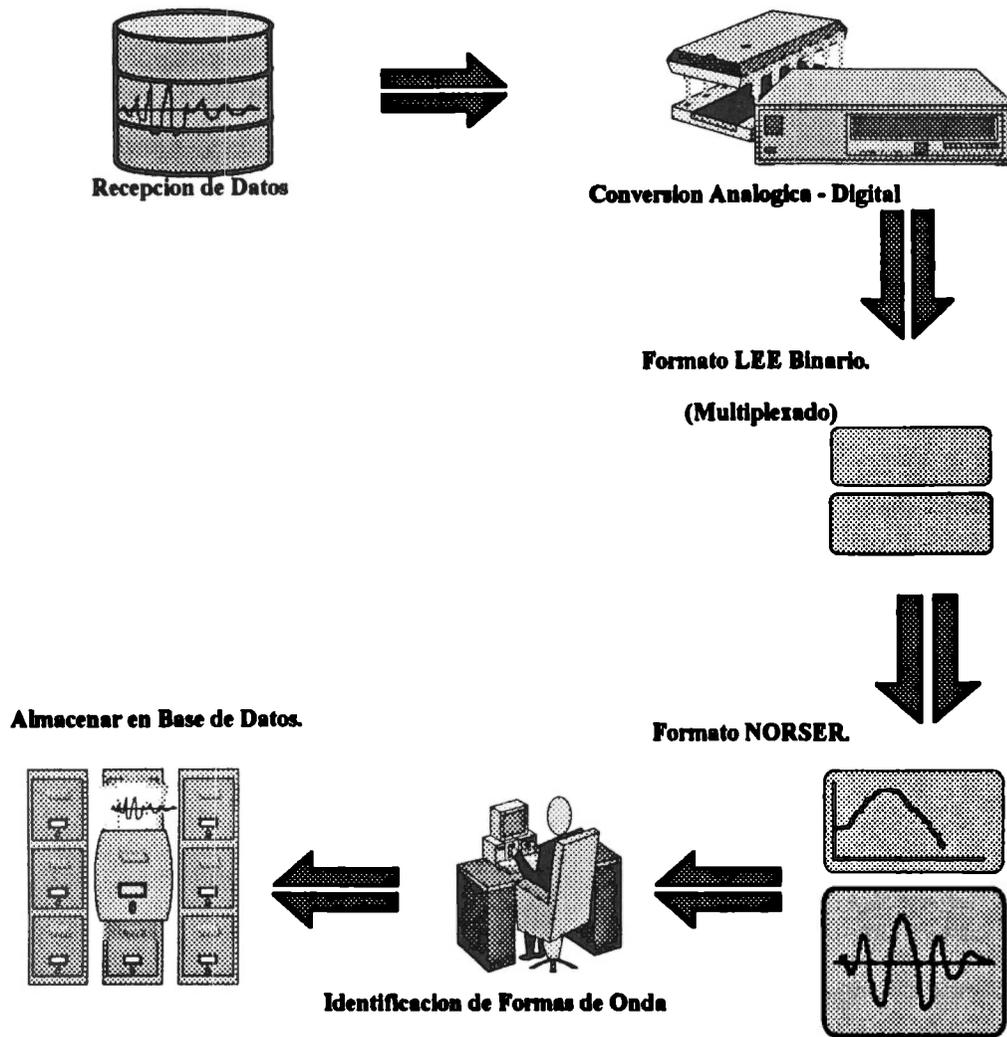


Fig 3.2 Representación del Sistema de Análisis de Datos sísmicos SEISAN propuesta por Havskov y Lindholm (1994).

III.2 Transmisión y conversión de formatos.

Una vez que se han detectado los eventos sísmicos, se almacenan en la computadora de detección. Cuando ha terminado de registrarse el sismo, se puede almacenar temporalmente en la computadora de detección y enviar todos los eventos del día a una hora predeterminada, o bien enviar inmediatamente el registro hacia el servidor. La computadora de detección se encuentra conectada a una red local de área, y transmite automáticamente los registros. Por otro lado el servidor, se encuentra esperando continuamente los datos sísmicos, y una vez que se reciben, transforma inmediatamente los registros de un formato binario multiplexado en 16 canales, a un formato estandar de registros sísmicos (SEISAN, Formato Noruego de Registros Sísmicos). La tarjeta conversora A/D tiene conectada en el primer canal una señal de tiempo WWV, del National Bureau of Standards Radio Stations, que sirve para corregir la deriva del reloj interno de la computadora de detección, esto permite que los registros se encuentren referenciados a un tiempo absoluto.

Los registros se guardan de manera temporal, y esperan a que un analista confirme su detección. Una vez confirmada es posible realizar cualquier tipo de análisis al registro, desde la localización hipocentral y estimación de magnitud, hasta análisis espectrales o de polarización.

Se programaron una serie de rutinas de acceso a la base de datos, para poder usar directamente los archivos de forma de onda de los registros y probar los resultados.

Además el sistema cuenta con rutinas de despliegue visual de epicentros, elaboración de boletines sismológicos, graficación de registros, etc. (Havskov, 1994).

IV. Preprocesado de los registros.

Una vez que se ha obtenido la señal, se genera el patrón espacio-temporal. La figura 4.1 muestra las etapas de preprocesado de la señal.

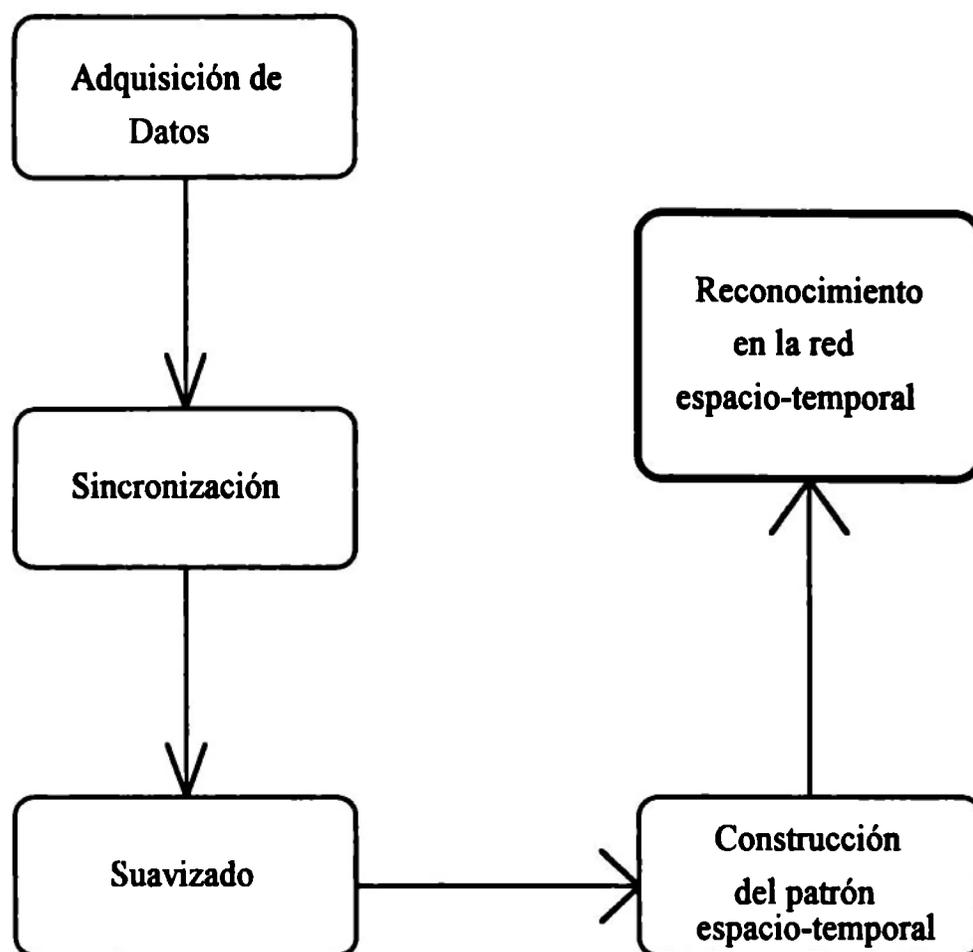


Fig. 4.1 Etapas del preprocesado del registro.

IV.1 Sincronización.

La sincronización de una traza sísmica consiste en la identificación del primer arribo de la señal y presentarla ante la red espacio-temporal en un mismo instante de tiempo. Es decir que no se presente retrasada o adelantada con respecto al patrón de entrenamiento.

Para la identificación del primer arribo nos basamos principalmente en la siguiente ecuación recursiva:

$$y(n) = \left(\frac{1}{k}\right) \cdot x(n) + \left(\frac{k-1}{k}\right) \cdot y(n-1) \quad (4.1)$$

donde x representa la entrada y y la salida. Los índices n representan el instante de tiempo.

Esta ecuación en diferencias corresponde a un filtro pasa bajos normalizado cuya frecuencia de corte está controlada por la constante k . Una k grande significa una frecuencia de corte baja. De esta expresión podemos calcular dos valores:

$$y_1(n) = y_1(n-1) + \frac{1}{k_1} \cdot \{|x(n)| - y_1(n-1)\} \quad (4.2)$$

$$y_2(n) = y_2(n-1) + \frac{1}{k_2} \cdot \{|x(n)| - y_2(n-1)\} \quad (4.3)$$

Y k_2 es en la práctica 100 veces mayor que k_1 .

Al valor de y_1 se le conoce como STA y al valor de y_2 como LTA.

Si el valor de STA/LTA excede de un umbral predefinido, entonces se confirma en una pequeña ventana de tiempo para que esto mismo ocurra nuevamente N veces, si esto sucede entonces se considera un arribo y se marca el primer instante en el que $STA/LTA > \text{Umbral}$.

Las figuras 4.2 y 4.3 muestran un registro antes del algoritmo de sincronía y después de éste.

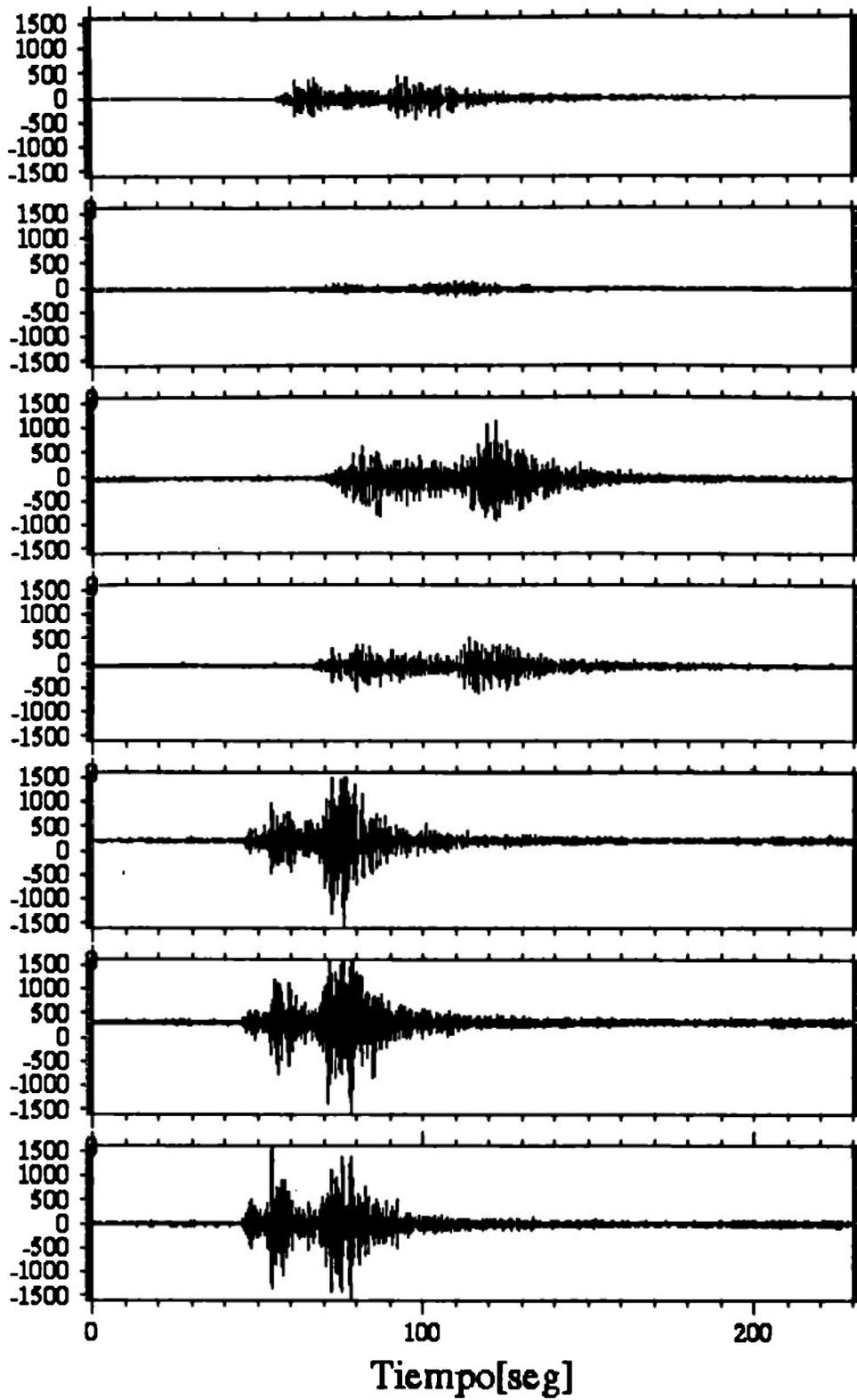


Fig. 4.2 Registros sísmicos antes del algoritmo de sincronía.

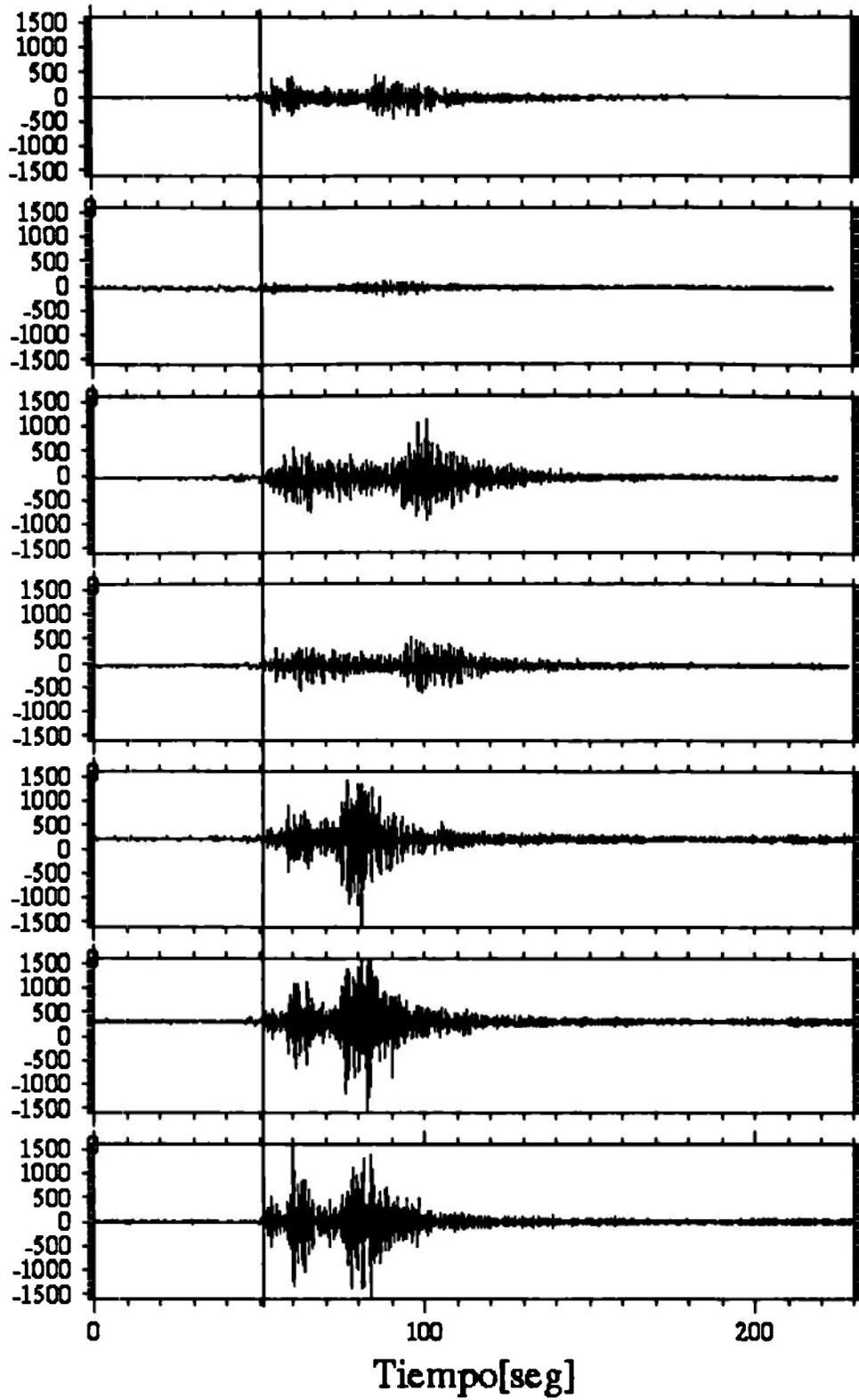


Fig. 4.3 Registros sísmicos sincronizados a los 51.20 segundos.

IV.2 Suavizado.

Una vez que se encuentra sincronizada la señal se procede a preparar el patrón espacio-temporal, este consiste básicamente en una serie temporal de espectros de potencia.

Consideremos ahora el problema de estimar el espectro de potencia cuando tenemos un tiempo $N\Delta t$ de datos $x_j (j = 0, 1, 2, \dots, N-1)$. La transformada de Fourier discreta de x_j se puede escribir como:

$$N_k = F_k X_k \quad (4.4)$$

donde F_k es la respuesta en frecuencias de un filtro digital y X_k es la transformada discreta de Fourier de ruido blanco x_k . N_k es una variable estadística porque X_k es una variable estadística. Tomando el cuadrado de los valores absolutos de N_k podemos escribir:

$$|N_k|^2 = |F_k|^2 \left[\left(\Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cos \frac{2\pi k n}{N} \right)^2 + \left(\Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x_n \sin \frac{2\pi k n}{N} \right)^2 \right] \quad (4.5)$$

Cada término entre paréntesis es una combinación de x_n , y por lo tanto obedece a una distribución Gaussiana. Sus medias son cero y cuando N es grande, los términos sin y cos comparten la misma varianza $N\sigma^2\Delta t^2/2$.

Debido a que $|N_k|^2$ es la suma de dos variables Gaussianas al cuadrado, el valor normalizado con respecto a la varianza

$$\aleph_k^2 = \frac{2|N_k|^2}{|F_k|^2 N\sigma^2\Delta t^2} \quad (4.6)$$

obedece a la distribución chi-cuadrada con dos grados de libertad.

En general la media de \aleph_k^2 , que obedece a la distribución chi-cuadrada con n grados de libertad, es n y la desviación cuadrática media de \aleph_k^2 , con respecto a la media es $\sqrt{2n}$. El error cuadrático medio es por lo tanto $\sqrt{2}/\sqrt{n}$ que es mayor de uno para $n=2$.

Podemos reducir este error estimando $|N_k|^2$ al promediar las frecuencias de sus vecinos cercanos. Tomando la suma entre $2m$ puntos vecinos se hace que $|F_k|^2$ varíe lentamente

$$\aleph_{2(2m+1)}^2 = \frac{2 \sum_{l=-m}^m |N_k|^2}{|F_k|^2 N \sigma^2 \Delta t^2} \quad (4.7)$$

obedecerá a la distribución chi-cuadrada con $2(2m+1)$ grados de libertad. Entonces el error cuadrático medio de $\aleph_{2(2m+1)}^2$ es $1/\sqrt{2m+1}$. Y el mismo error cuadrático medio se aplica al espectro de potencia estimado después de suavizar $2m+1$ puntos

$$\frac{1}{n \Delta t} \cdot \frac{1}{2m+1} \sum_{l=-m}^m |N_{k+l}|^2 \quad (4.8)$$

para un error fraccional $\varepsilon = 1/\sqrt{2m+1}$ el estimado espectral debe ser suavizado en el siguiente intervalo

$$\Delta f = \frac{\Delta \omega}{2\pi} \left(m + \frac{1}{2} \right) = \frac{m + \frac{1}{2}}{N \Delta t} = \frac{1}{2N \Delta t \varepsilon^2} \quad (4.9)$$

Esto quiere decir que para estimar un espectro de potencia estable, ε debe ser pequeño. Y el estimado debe ser suavizado sobre un rango de frecuencias. En la Figura 4.4 se muestra un espectro de potencia estimado sin suavizar y en la Figura 4.5 el mismo espectro de potencia suavizado con un filtro de Hanning. Finalmente en la figura 4.6 se muestra la representación completa de un patrón espacio-temporal.

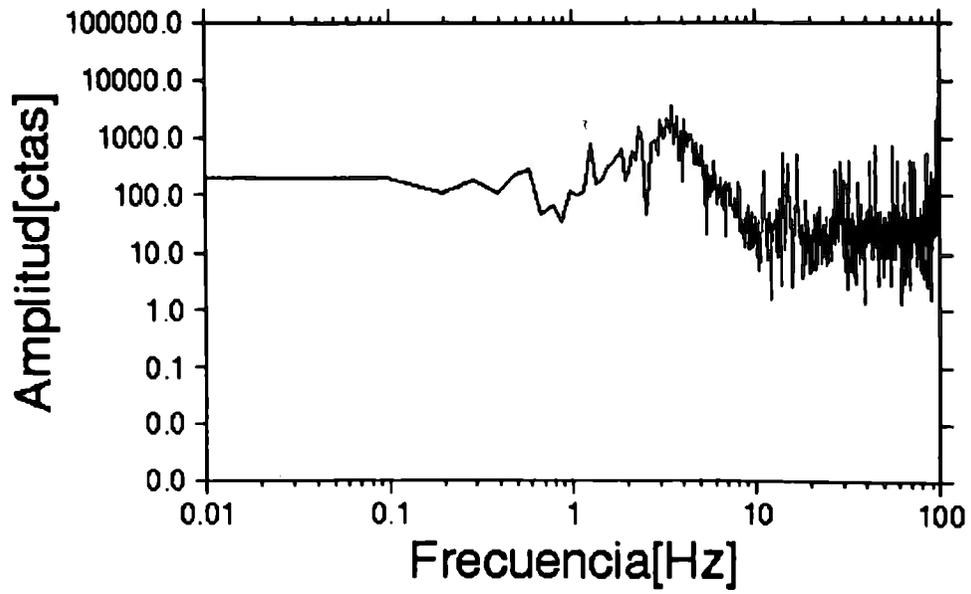


Fig. 4.4 Espectro de potencia estimado sin suavizar.

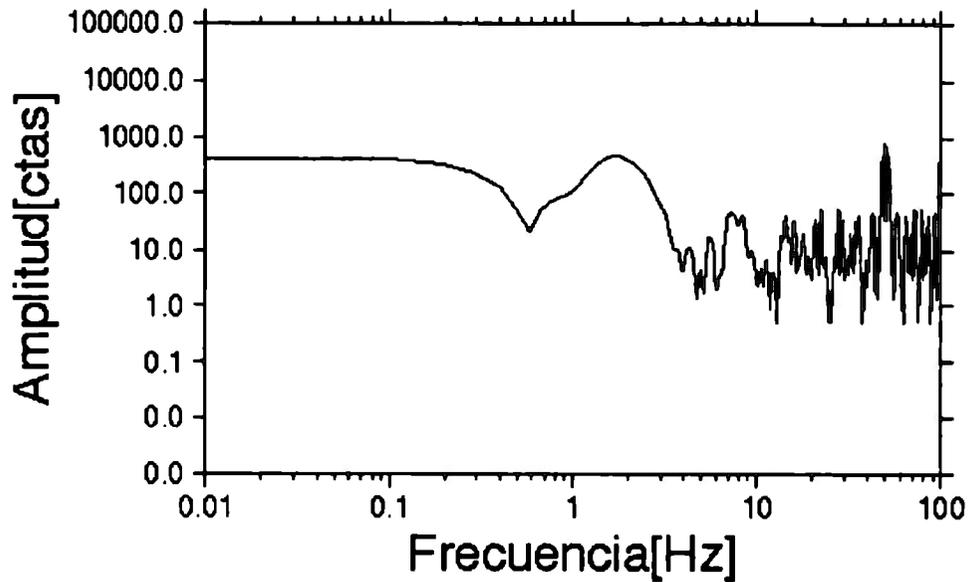


Fig. 4.5 Espectro de potencia suavizado con un filtro de Hanning.

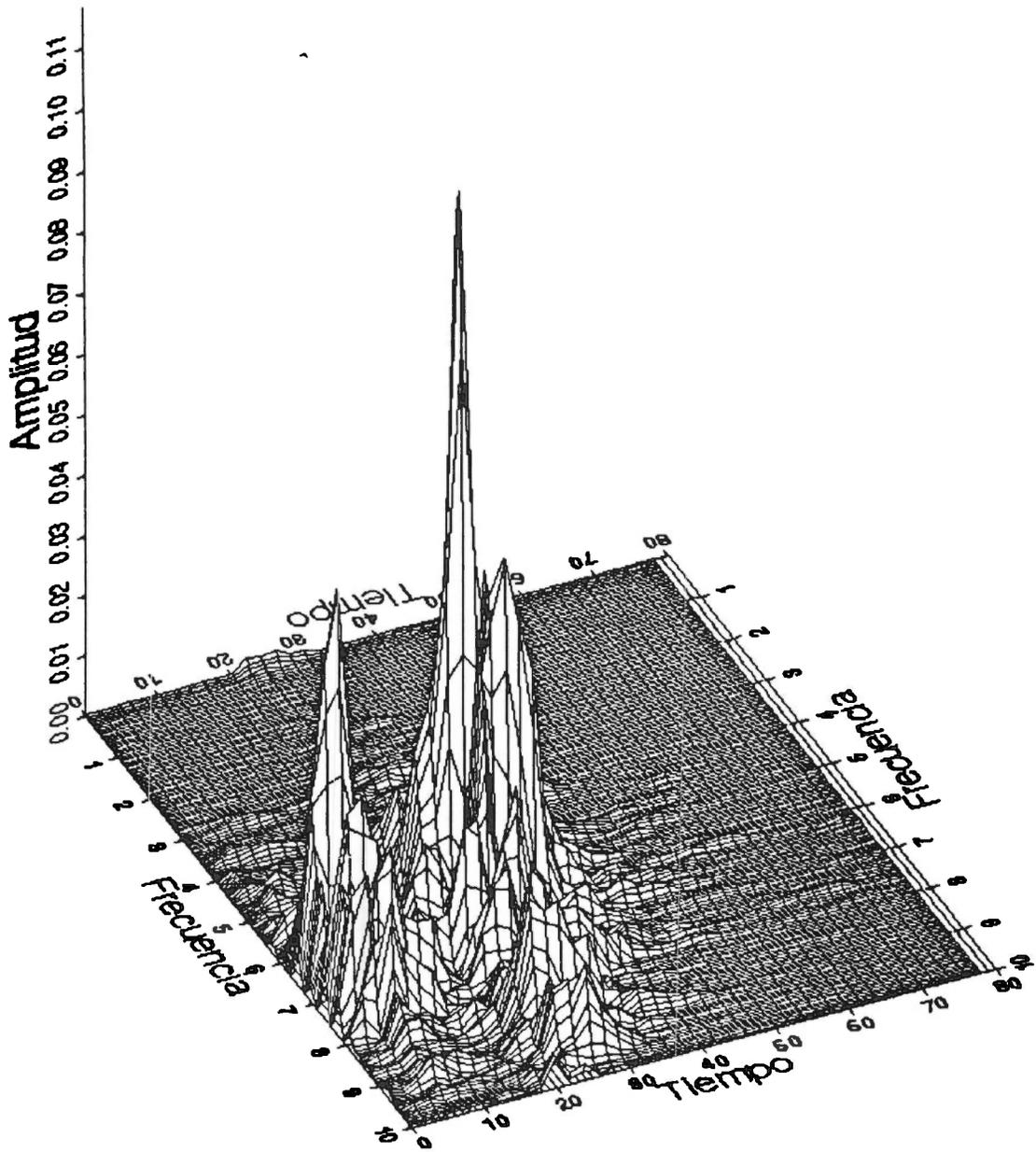


Fig. 4.6 Representación del patrón espacio-temporal.

IV.3 Representación del patrón espacio-temporal.

Es muy importante representar correctamente el patrón espacio-temporal, debido a que es el elemento básico de identificación de la red. Para poder representar el patrón espacio-temporal es necesario conocer el fenómeno físico del problema, y los sensores que registran las señales.

Si se desea construir un patrón espacio-temporal de un registro sísmico para clasificar eventos regionales y telesismos, es necesario representar el patrón de manera que se puedan diferenciar ambos eventos. Debido a la naturaleza dispersiva de las ondas sísmicas, éstas se propagan a diferente velocidad y los eventos lejanos tienen una duración mucho mayor a los registros locales. Es muy probable que se desarrolle un evento regional en un periodo mucho menor que un telesismo, y la totalidad del registro puede ocurrir en un tiempo en el que solo aparecen ondas P de un telesismo.

Otra característica importante de los sismos es su atenuación. Eventos muy lejanos pierden gran parte de su energía en su recorrido.

Es necesario conocer el rango en frecuencias de este tipo de registros. Hay que recordar además que los transductores de los sismómetros filtran la señal, y en este caso se pueden observar frecuencias hasta 10 Hz, por eso es suficiente con muestrear a 20Hz.

En el tiempo en el que se desarrollan las ondas P , S y ondas superficiales de un registro regional, en un telesismo solo se observan ondas P y sus conversiones (PkP, pP, etc.). En las figuras 4.7 y 4.8 se muestran patrones espacio-temporales de sismos regionales y telesismos respectivamente. Se observa que los registros regionales tienen un contenido de frecuencias entre 2 y 7 Hz principalmente y muy bajo contenido de frecuencias bajas, en cambio en un telesismo el contenido en frecuencias va de 0.01 a 4 Hz y en la parte final del registro contiene frecuencias bajas.

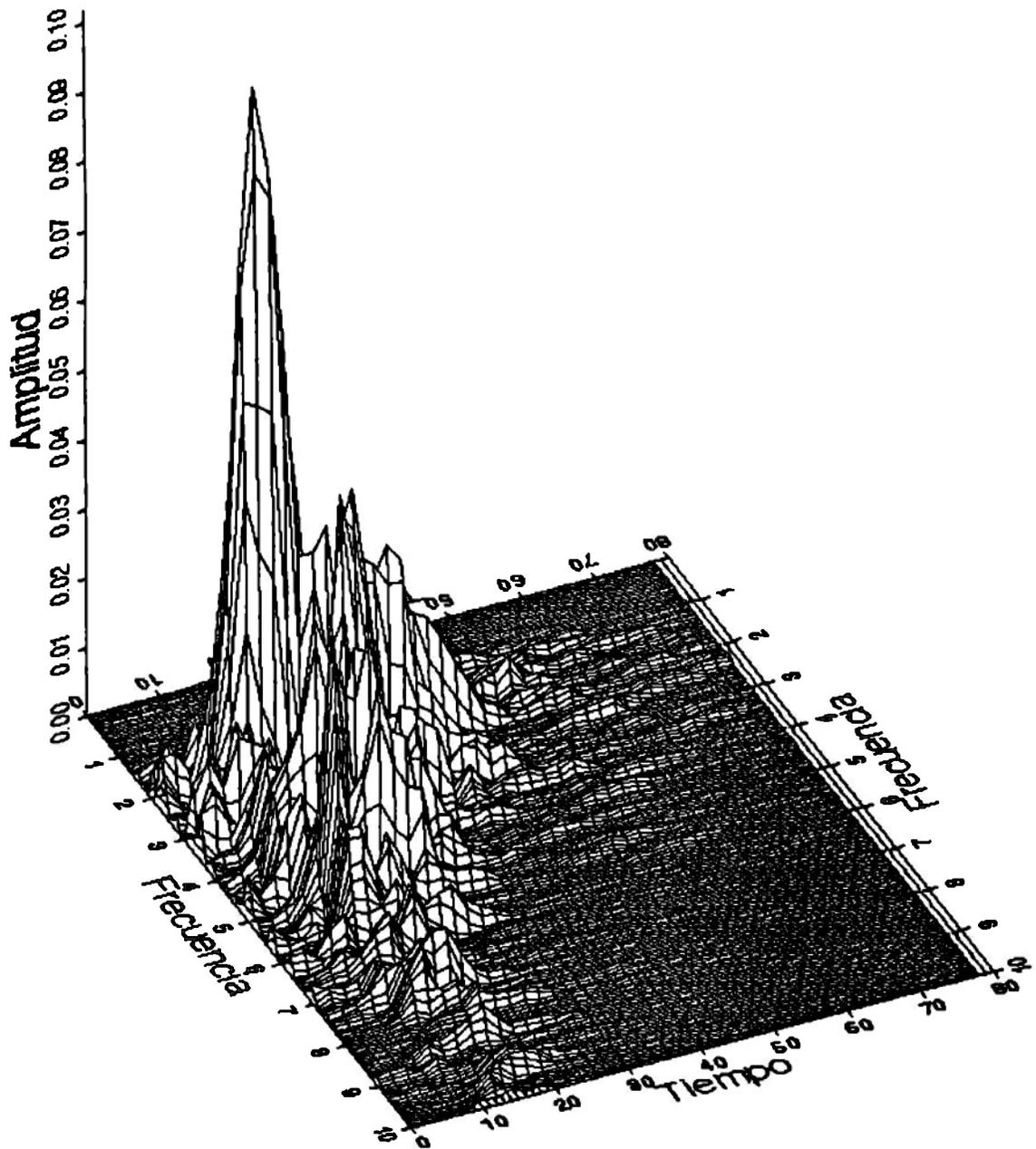


Fig. 4.7 Patrón espacio-temporal de un registro sísmico regional.

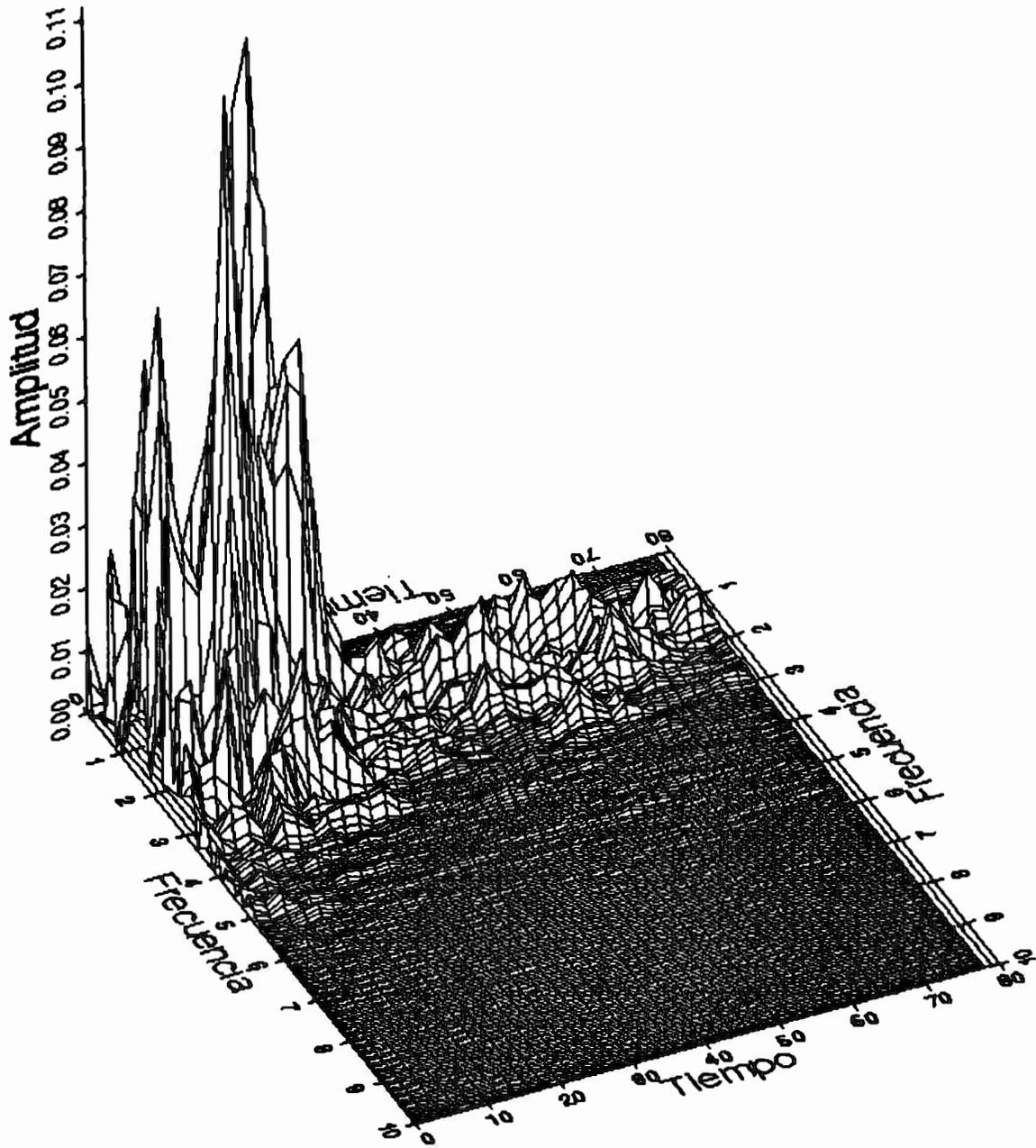


Fig. 4.8 Patrón espacio-temporal de un terremoto.

V. Implementación de la red espacio-temporal.

Primero se construye la red con los apuntadores apropiados a las estructuras de más bajo nivel, y además los parámetros necesarios. La estructura básica de la red se representa en la figura 5.1.

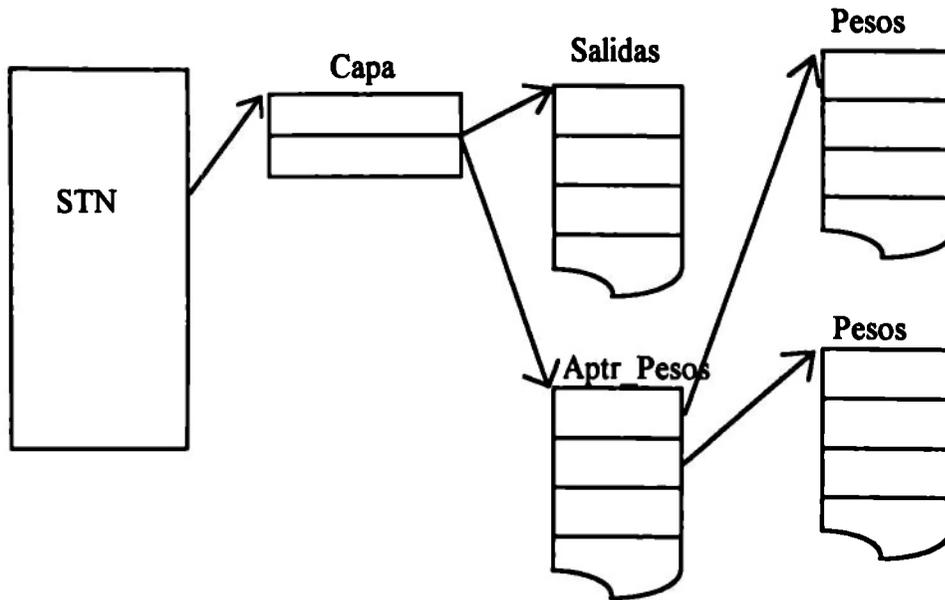


Fig. 5.1 Estructura de Datos para le red Espacio-Temporal.

Estas estructuras representadas en código C:

```
typedef struct layer {
    float activation;
    float *outs;
    float **weights;
};
```

```
typedef struct stn {  
    struct layer units;  
    float a,b,c,d;  
    float gamma;  
    int length;  
    int patterns;  
    float y;  
};
```

V.1 Construcción de la Red.

Primero se muestra la secuencia de operaciones que se debe de realizar para simular la red Espacio-Temporal.

- 1.- Construir la red, e inicializar las conexiones de entrada a las de salida de manera que la primera capa tiene los primeros patrones normalizados, la segunda capa los segundos patrones y así sucesivamente.
- 2.- Iniciar el proceso de prueba, inicializando las salidas con ceros y aplicar el primer vector normalizado a las entradas de la red.
- 3.- Calcular el producto interno entre el vector de entrada y el vector de pesos a la primera unidad no procesada.
- 4.-Calcular la suma de las salidas de todas las unidades de la capa desde la primera hasta la anterior a la unidad actual, y multiplicar el resultado por el factor d.
- 5.-Sumar el resultado del paso tres al resultado del paso 4 para producir la entrada de la unidad de activación.
- 6.-Restar el valor del umbral Γ del resultado del paso 5. Si este resultado es mayor de cero multiplicarlo por el término b de la red; de otra manera cambiar por cero el resultado.
- 7.-Multiplicar el término de -a por la salida anterior de la red y sumar el resultado al valor producido en el paso 6.

8.-Si el resultado del paso 7 era menor o igual a cero, multiplicarlo por la constante c , para producir \dot{x} . En el otro caso usar el resultado del paso 7 sin modificaciones como el valor de \dot{x} .

9.-Calcular el valor de ataque de la unidad multiplicando el valor de \dot{x} calculado en el paso 8 por un valor δt para producir el valor de salida. Actualizar la salida de la unidad sumando el ataque calculado al valor actual de la salida.

10.-Repetir los pasos del 3 al 9 para cada unidad de la red.

11.-Repetir los pasos del 3 al 10 en la duración de tiempo Δt . El numero de repeticiones que ocurre en esta etapa debe ser una función de la frecuencia de muestreo para cada aplicación en específico.

12.-Aplicar el siguiente vector temporal a la red de entrada, y repetir los pasos del 3 al 11.

13.-Después de aplicar toda la secuencia temporal utilizar la salida de la última capa como salida de la red.

V.2 Representación en código.

Las primeras 2 etapas se representan en C de la siguiente forma:

```
void initnet(capa)
struct stm *capa;
{
    float *p, **q, input;
    char filename[20];
    int i, j, k, length;
    FILE *fil;
    if((fil=fopen("original.net", "rb"))==NULL){
        printf("Error no existe archivo de entrenamiento\n");
    }
    fread(&i, sizeof(int), 1, fil);
    fread(&length, sizeof(int), 1, fil);
    fread(&df, sizeof(float), 1, fil);
```

```

fread(&dt, sizeof(float), 1, fil);
p=(float *) calloc(i, sizeof(float));
q=(float **) calloc(i, sizeof(float));
capa->units.outs=p;
capa->units.weights=q;
capa->length=length;
capa->patterns=i;

for(j=0; j<i; j++){
    *(capa->units.weights+j)=(float *) calloc(length, sizeof(float));
}

for(j=0; j<i; j++){
    *(capa->units.outs+j)=0;
}

for(j=0; j<i; j++){
    for(k=0; k<length; k++){
        fread(&input, sizeof(float), 1, fil);
        PESO(capa, j, k) = input;
    }
}

}

```

void initparam(*capa*)

struct stn **capa*;

```

{
float a, b, c, d, gamma, y;
char filename[20], dummy[60];
int i, j, k;
FILE *fil;
    strcpy(filename, "param.net");
if((fil=fopen(filename, "rt"))==NULL){
printf("Error no existe archivo de parametros de la red\n");
}
}

```

fscanf(*fil*, "%f%", &*a*);

```

fscanf(fil, "%f%", &b);
fscanf(fil, "%f%", &c);
fscanf(fil, "%f%", &d);
fscanf(fil, "%f%", &gamma);
fscanf(fil, "%f%", &y);
capa->a=a;
capa->b=b;
capa->c=c;
capa->d=d;
capa->gamma=gamma;
capa->y=y;
}

```

```

void inivect(fvectors, length, invec)
FILE *fvectors;
int length;
struct vector *invec;

{
float input;
int i,j,k;
for(j=0;j<length;j++){
fread(&input, sizeof(float), 1, fvectors);
*(invec->value+j)=input;
}
}

```

Las rutinas 3 a 5 se pueden representar en C de la siguiente forma:

```

float activation(net, unnumber, invec)
struct stn *net;
struct vector *invec;
int unnumber;
{
int i;
float sum, others;

```

```

sum=others=0;

for(i=0;i<(invec->length);i++){
sum=sum+PESO(net,unumber,i)*VECTVAL(invec,i);
}

for(i=0;i<unumber-1;i++){
others=others+OUTVAL(net,i);
}

return(sum+net->d*others);
}

```

La rutina de activación permite calcular el valor de entrada para cualquier unidad de la red. Lo que se necesita es una rutina que convierta el valor de entrada en su salida apropiada. Este servicio lo realiza la función Xdot que se define a continuación.

```

float xdot(net,unumber,inval)
struct stn *net;
float inval;
int unumber;
{
float outval;

outval=inval - net->gamma;
if(outval > 0){
outval=outval * net->b; }
else {
outval=0; }

outval= outval + OUTVAL(net,unumber) * -(net->a);

if(outval<=0){
outval = outval * net->c;
}
if(outval>=1){
outval = 1;
}
}

```

```

}

return(outval);
}

```

Hasta el momento falta por definir un procedimiento de más alto nivel para enlazar las rutinas de propagación, e iterar cada valor de la red. Esta función se denomina *propagate* y se define a continuación.

```

void propagate(net, invec)
struct stn *net;
struct vector *invec;
{
float dt,dx,inval,y;
int i,how_many;
dt=0.02;
how_many = net->patterns;
for(i=0;i<how_many;i++){
inval=activation(net,i,invec);
dx=xdot(net,i,inval);
y=OUTVAL(net,i)=OUTVAL(net,i)+(dx*dt);
if(i==0)fprintf(fil,"%f\n",y);
}

net->y= OUTVAL(net,how_many-1);
}

```

Finalmente una rutina principal que enlaza toda la secuencia temporal:

```

void main(){
int i,j,k,length,patterns,dumi;
float inval,*p,dumf;
struct stn capa;
struct vector invector;
char filnam[30];
FILE *fvectors,*salida;
salida=fopen("salida.net","wt");

```

```

fil=fopen("activa.net","wt");
initnet(&capa);
initparam(&capa);
    strcpy(filnam,"power.net");
if((fvectors=fopen(filnam,"rb"))==NULL){
printf("Error en el archivo de vectores\n");
}
p=(float *) calloc(capa.length,sizeof(float));
invector.length=capa.length;
invector.value=p;
length=capa.length;
patterns=capa.patterns;
for(j=0;j<patterns;j++){
    printf("%d de %d \n" j,patterns);
inivect(fvectors,length,&invector);

for(i=0;i<20;i++){
    propagate(&capa,&invector);
}
for(k=0;k<patterns;k++){
    fprintf(salida,"%f %f
%e\n",(dti*j),(dti*k),*(capa.units.outs+k));
}
}
fclose(fil);
fclose(fvectors);
}

```

Una vez generadas las rutinas básicas de la red, se conectan con los programas que generan el patrón espacio-temporal y los programas de acceso a la base de datos.

El simulador de la red espacio-temporal tiene una complejidad computacional muy alta, esto se debe principalmente a que todos los elementos de procesamiento permanecen activos en un intervalo de tiempo igual al intervalo de muestreo de la señal, además que los últimos vectores requieren de la información de salida de todos los elementos de procesamiento que los preceden, por esta razón se recomienda generar un patrón espaciotemporal lo más sencillo posible, que nada más contenga la información necesaria para el reconocimiento.

VI. Resultados

VI.1 Prueba de la red espacio-temporal.

Una vez construido el algoritmo de la red espacio-temporal, se procedió a probarlo identificando telesismos (eventos sísmicos registrados a más de 1000km de distancia) de sismos regionales. Normalmente no es sencillo identificar los telesismos de eventos regionales debido a que se pueden confundir ciertas conversiones de onda con arribos de otras fases sísmicas. Por ejemplo: se puede interpretar el arribo de la pP como el arribo de la fase S y de esta forma asignar un telesismo como un evento regional. Otra razón por la que se confunden estos registros es debido a que los transductores filtran una gran cantidad de frecuencias y no se observan los registros en todo el espectro completo. Por otro lado, el elemento que falta en el sistema propuesto por Havskov y Lindholm (1994) para automatizar completamente el registro en una base de datos, es el reconocimiento de formas de onda para telesismos, sismos locales y sismos regionales, por eso resulta de gran utilidad el poder reconocer automáticamente este tipo de registros y dejar todo el sistema de adquisición de datos de forma automática.

Lo primero que se hace una vez construida la red es entrenarla. Para entrenar la red espacio-temporal, es necesario tener una serie de registros que correspondan a una sola categoría. Desgraciadamente en sismología no es posible asignar los registros de esta manera debido a que cada evento es un registro individual con características de densidad espectral propia. Pero existe un caso que nos permite tomar un conjunto de muestras de una misma categoría, y es el de las réplicas de un evento mayor. En la figura 6.1 se muestran una serie de réplicas del sismo del 24 de Octubre de 1993 ($M_s=6.9$) localizado en la brecha sísmica de San Marcos, se puede observar claramente una gran similitud en las formas de onda, además que sus localizaciones epicentrales corresponden al mismo sitio.

Son pocos los eventos que registran réplicas, por lo que no es posible entrenar la red de esta manera para todos los eventos.

Una forma alternativa de entrenar la red espacio-temporal, es generar una nueva conexión para identificar otro patrón, y conectarlo a la red. Es decir, si la red no identifica el patrón que deseamos, entonces a este patrón se le asignan los pesos de una nueva red espacio-temporal.

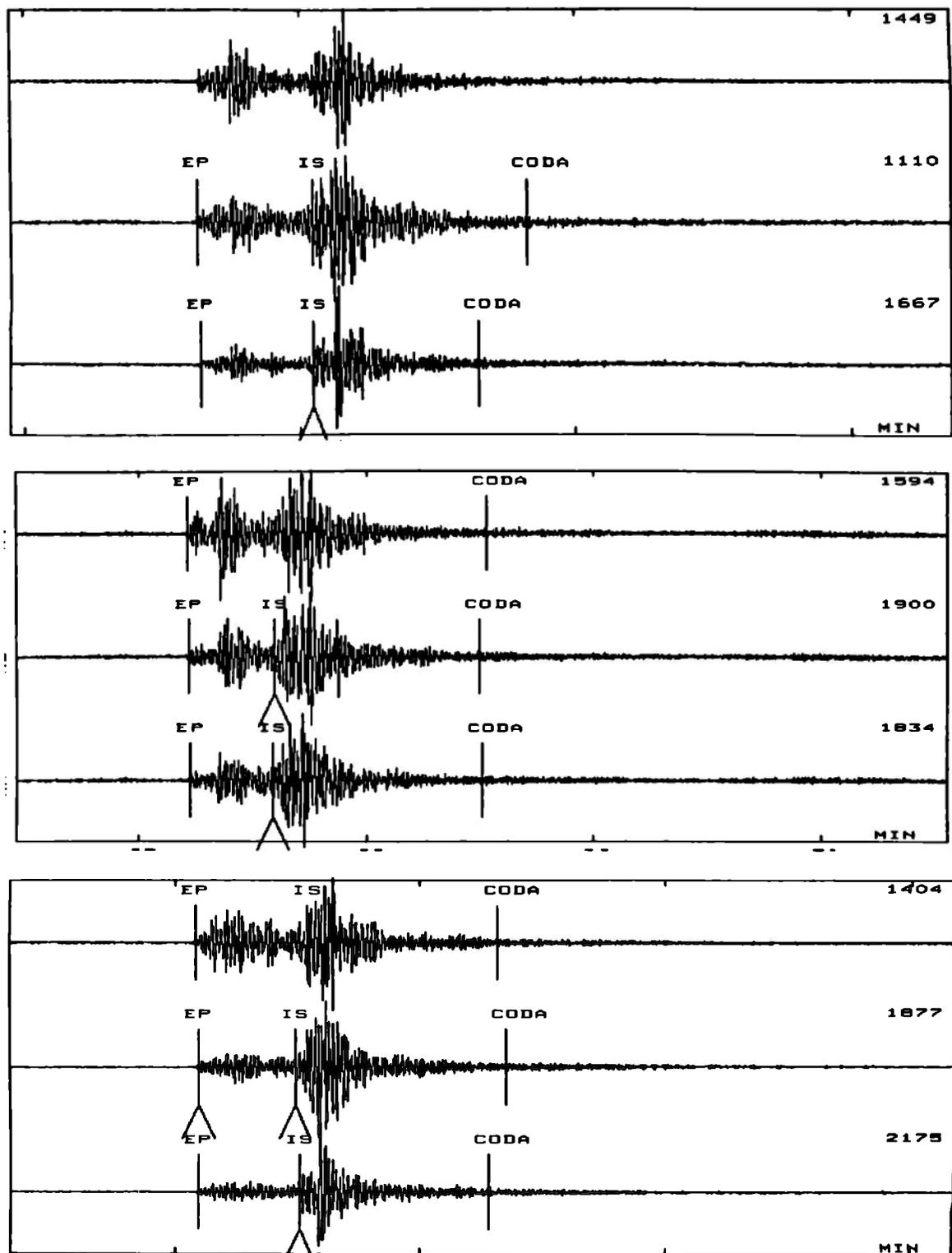


Fig. 6.1 Réplicas del sismo del 24 de Octubre de 1993.

Primero se prueba la red con el mismo registro de entrenamiento y después con registros de la misma categoría. En la figura 6.2 se representa la salida de la red espacio-temporal para el mismo registro de entrenamiento y de prueba.

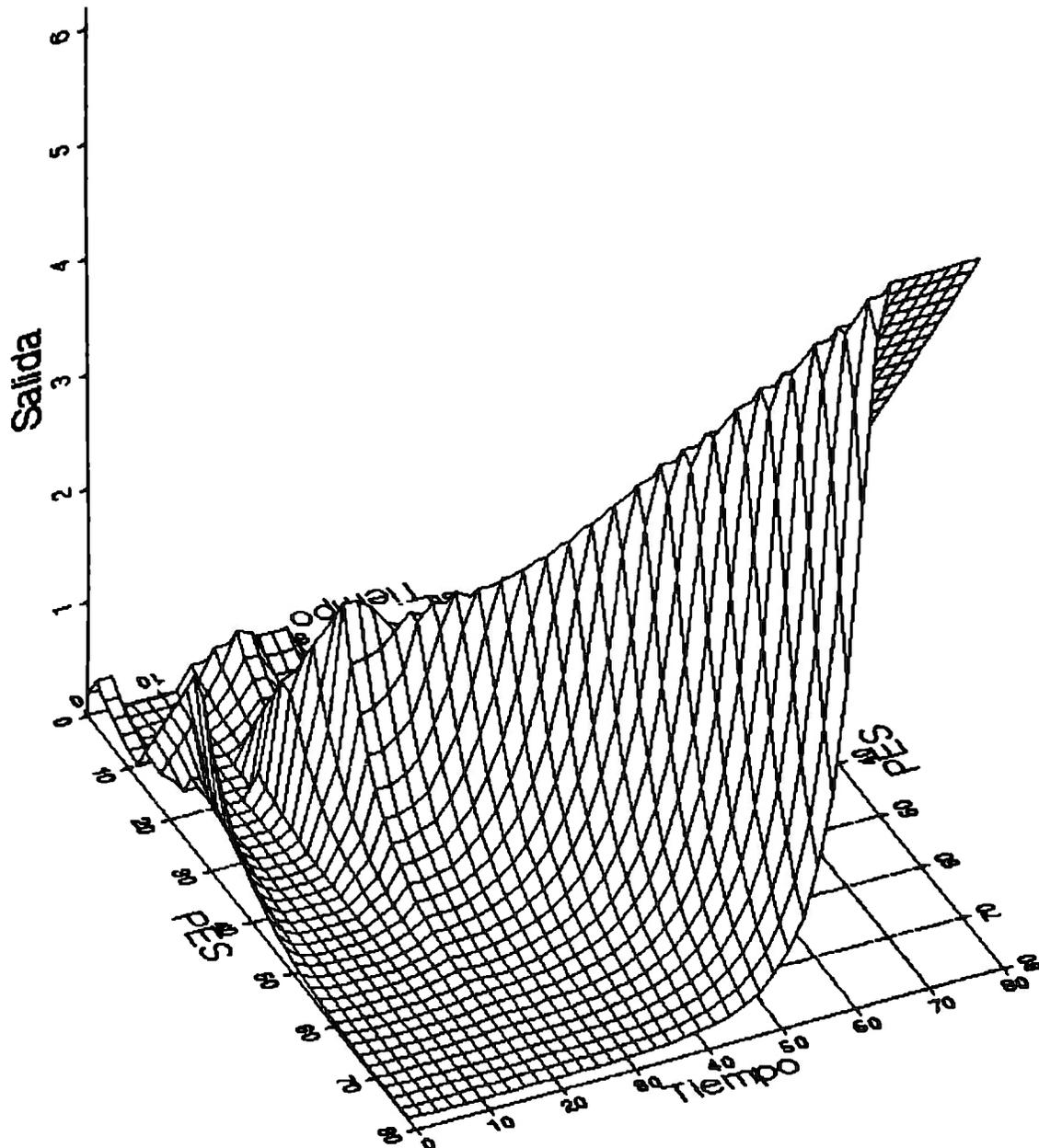


Fig. 6.2 Salida de la red espacio-temporal. PES son los elementos de procesamiento de la red. El patrón de entrada de la red coincide con el patrón de entrenamiento.

VI.2 Calibración.

La etapa más sensible del entrenamiento es la calibración de la red, entendiéndose como calibración al proceso de encontrar las constantes que mejor se ajusten para la identificación del patrón. Este proceso se realiza mediante una gran cantidad de ensayos con los patrones a identificar y variando poco a poco cada uno de los parámetros de la red (a, b, c, d, Γ , etc). Cada uno de estos parámetros controla alguna característica de la función de activación o de la salida de la red. En la figura 6.3 se muestra un patrón con un valor muy alto de a que controla el decaimiento de la función de activación, y por lo tanto provoca un decremento muy acelerado en el reconocimiento.

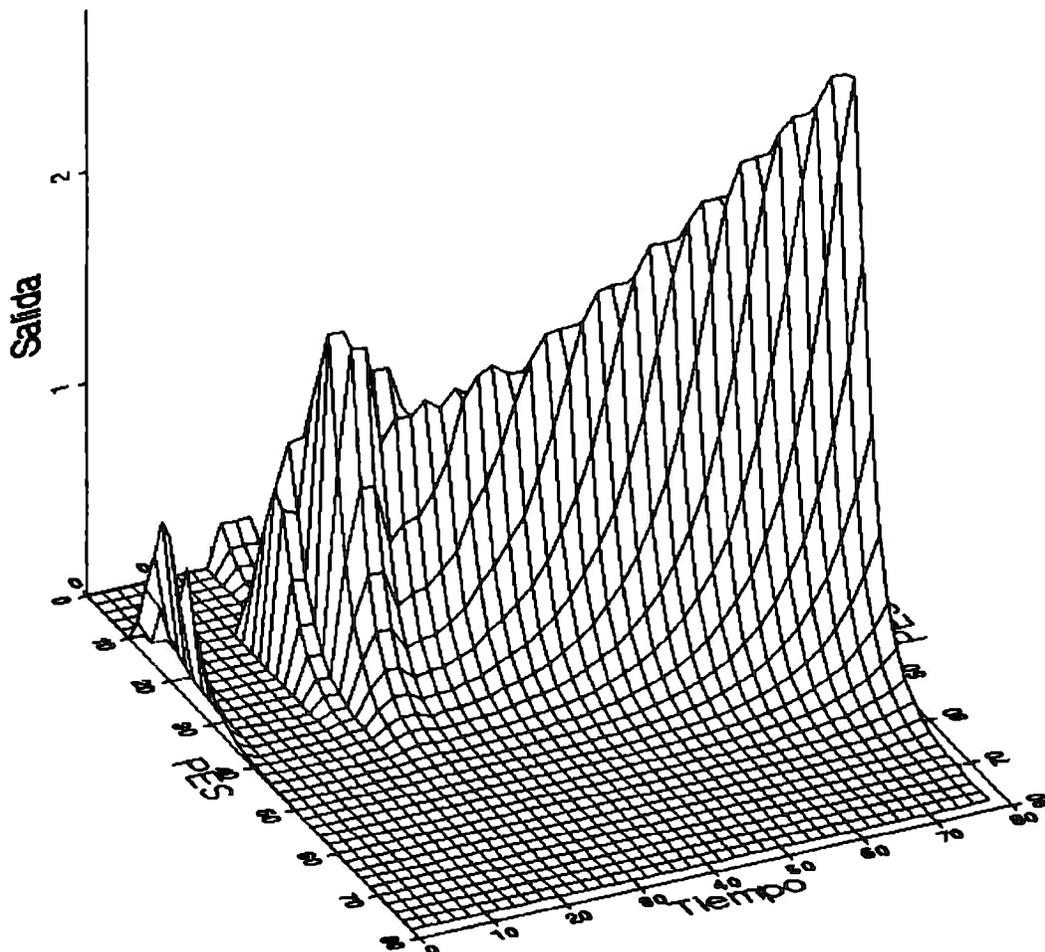


Fig. 6.3 Salida del patrón espacio-temporal para un valor muy alto de a . El patrón de entrada es el mismo que el patrón de entrenamiento, pero la red no lo puede identificar.

El valor de d controla la conexión entre cada vector temporal. En la fig. 6.4 se muestra la salida de un patrón espacio-temporal donde el valor de d es muy bajo y el reconocimiento es casi nulo.

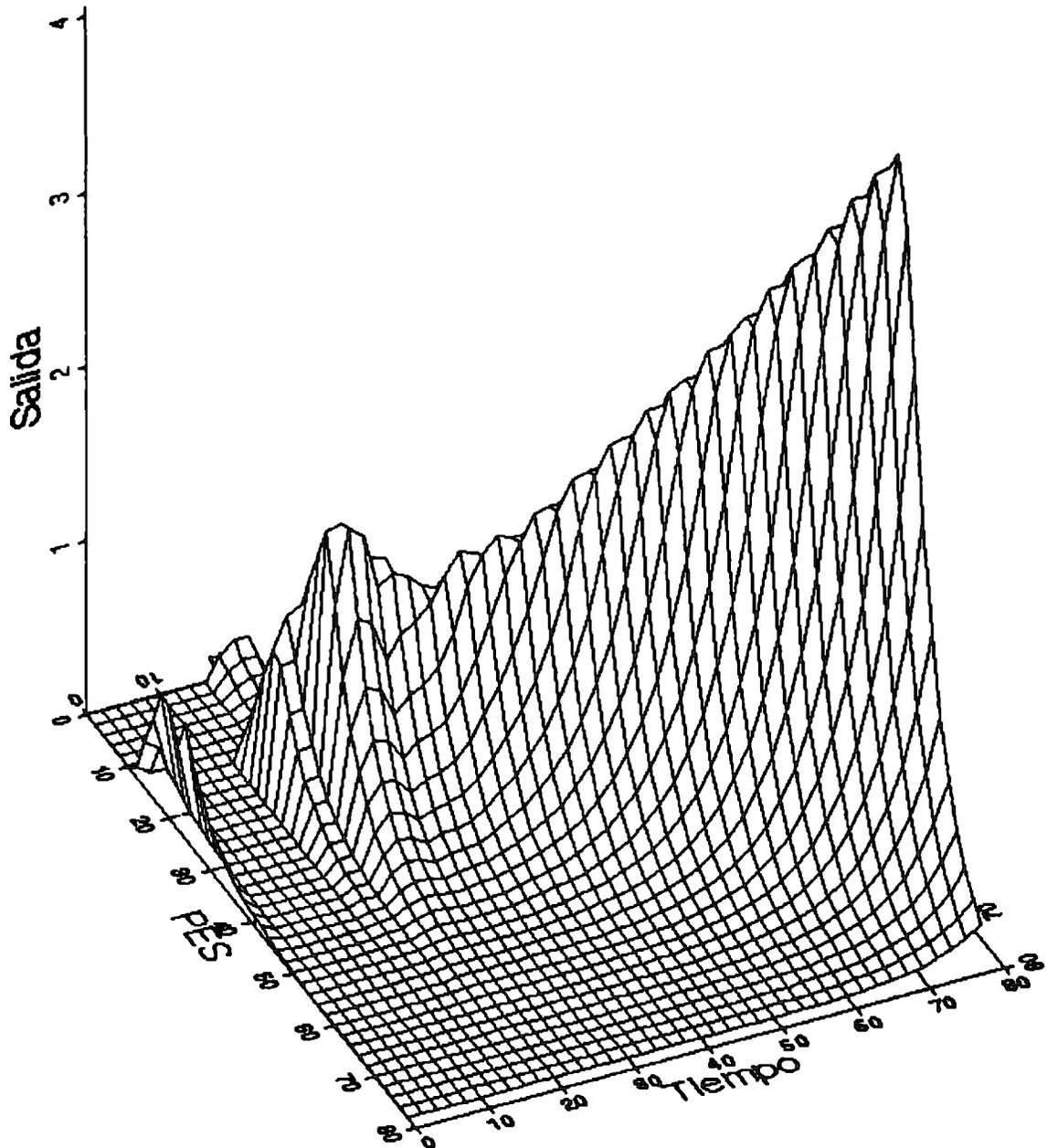


Fig. 6.4 Salida del patrón espacio-temporal para un valor muy bajo de d . El patrón de entrada es el mismo que el patrón de entrenamiento y el reconocimiento es muy bajo.

Por otro lado para valores muy bajos de a y muy altos de b los elementos de procesamiento de la red espacio-temporal se encienden muy rápido, y es

posible identificar erróneamente cualquier otro patrón debido a su crecimiento tan acelerado. La Fig. 6.5 muestra este caso.

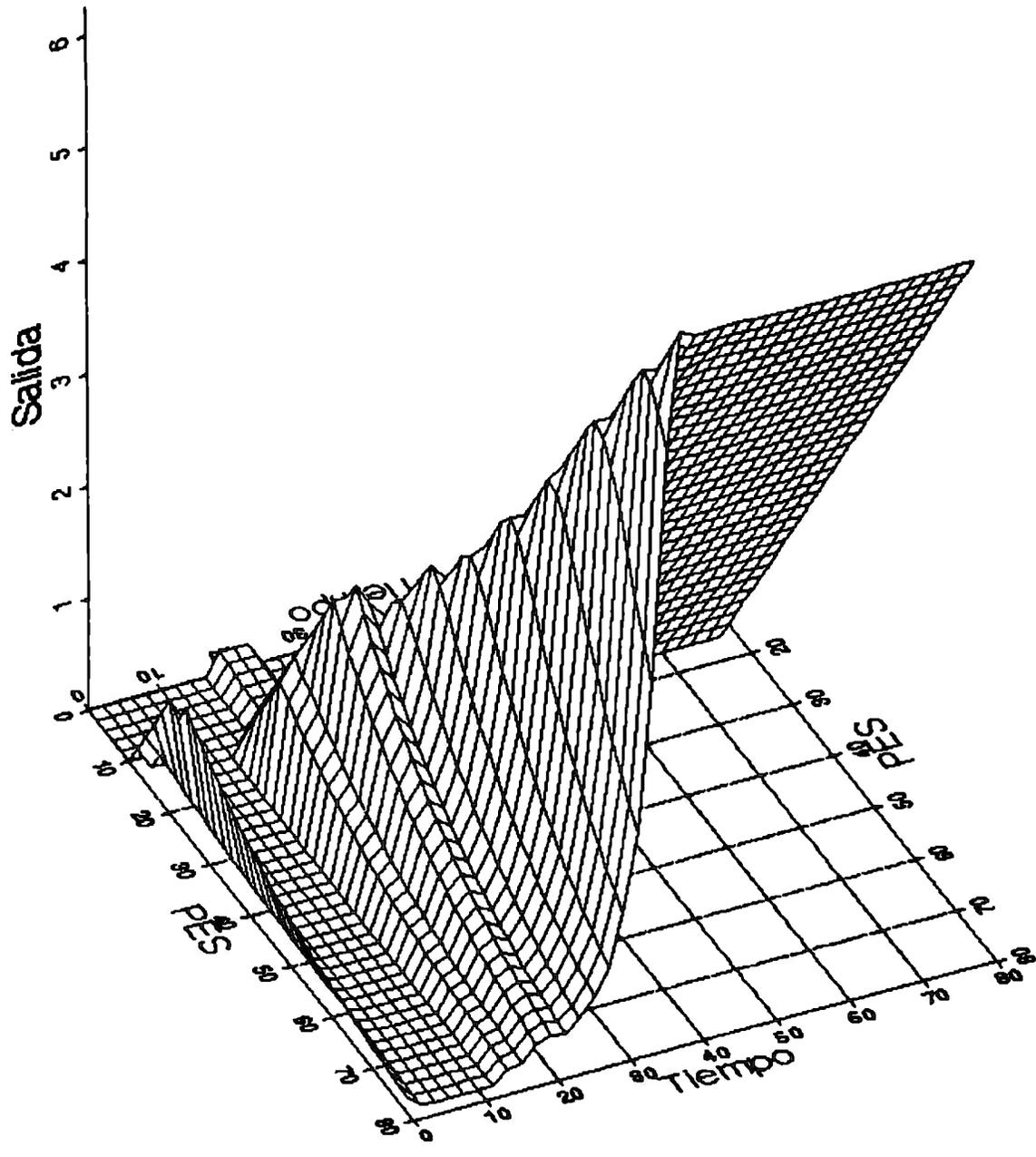


Fig. 6.5 Salida del patrón espacio-temporal para un valor bajo de a y alto de b . El patrón de entrada corresponde a un registro de ruido y el de entrenamiento es un sismo regional. La red lo reconoce como bueno.

El proceso de calibración de la red es muy delicado, y requiere de mucho cuidado porque cualquier variación sin control puede ser causante de una identificación errónea en la red.

Además se probó la red, mediante otro tipo de señales que no corresponden a eventos sísmicos para observar su comportamiento. La fig. 6.6 muestra la salida de la red ante ruido eléctrico.

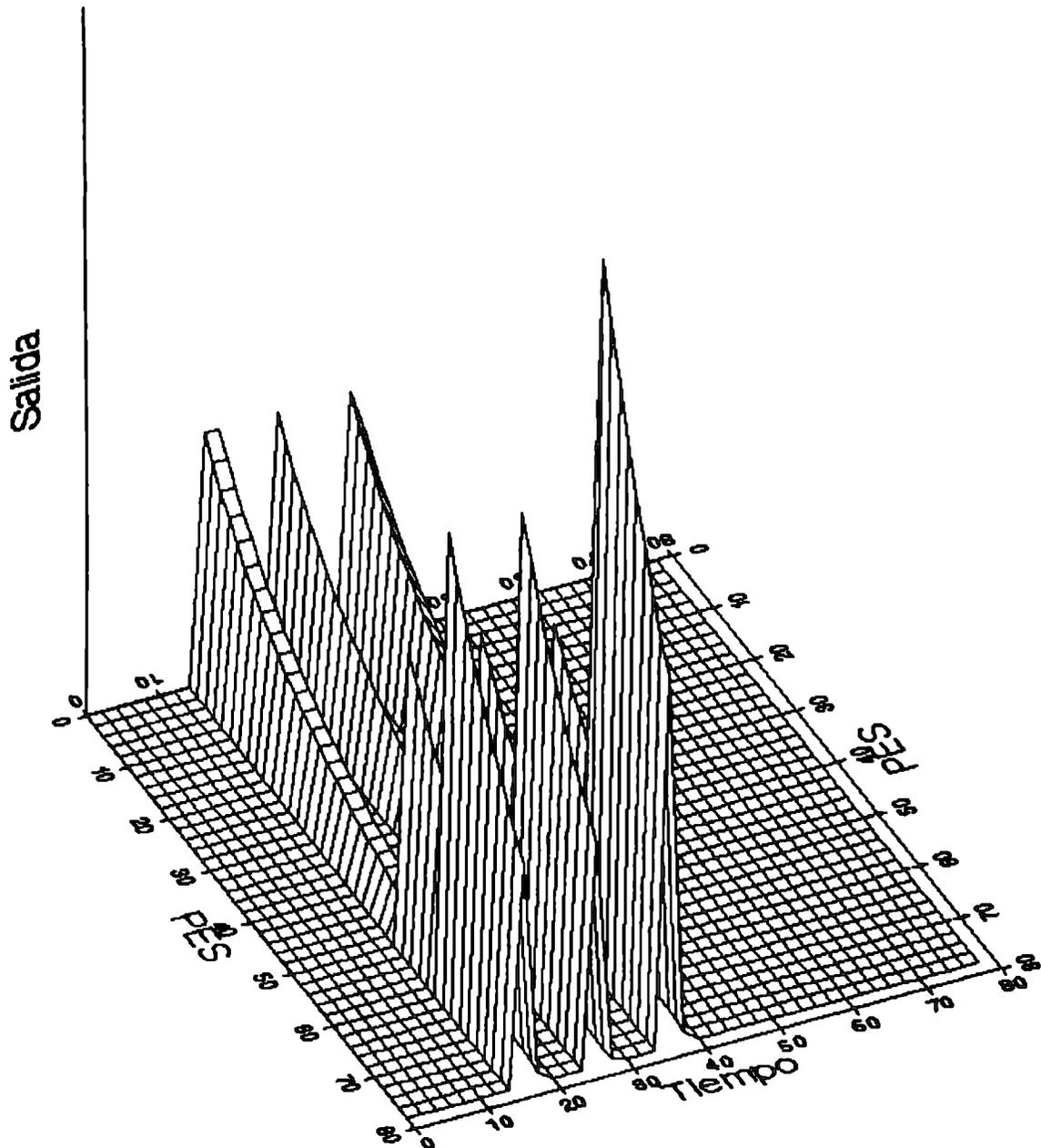


Fig. 6.6 Salida de la red espacio-temporal ante ruido eléctrico.

VI.3 Resultados.

Finalmente se obtuvieron resultados con sismos reales. Se procedió a identificar los registros telesísmicos capturados entre Agosto y Diciembre de 1993 (Tabla 6.1). De los 15 eventos de prueba, se identificaron 14 mediante la red espacio-temporal y solo uno fué rechazado. El evento rechazado es el sismo más profundo de todos, es de esperar que sismos muy profundos casi no presenten ondas superficiales y probablemente por esta razón no haya sido identificado.

Tabla 6.1

Relación de Telesismos utilizados para probar la red espacio-temporal. La última columna indica si fué identificado.

Año	Mes	Día	Hora	Min.	Seg	Lat	Long	Prof.	Mb	Ms	Id.
93	07	13	04	58	12	11.689N	87.064W	49	4.7	4.9	Si
93	07	22	04	57	07	6.470N	71.210W	20	6.1	5.9	Si
93	08	24	00	46	18	12.087N	86.539W	171	4.9	4.7	No
93	09	27	13	37	32	53.649S	51.518W	33	6.1	5.9	Si
93	10	11	13	07	29	17.797S	178.756W	56	5.9	4.7	Si
93	10	11	15	54	22	32.003N	137.852E	65	6.5	6.4	Si
93	10	13	19	40	12	13.805N	91.731W	33	5.0		Si
93	10	21	09	17	30	10.598N	87.081W	28	4.7	6.9	Si
93	10	28	04	29	28	11.687N	87.788W	31	4.9		Si
93	10	30	17	59	02	31.749N	68.206W	109	5.9		Si
93	11	11	00	28	34	50.224N	177.232W	23	6.3	4.7	Si
93	11	19	01	43	23	54.245N	164.187W	31	6.2	6.3	Si
93	11	22	22	43	26	11.725N	86.179W	108	5.5	5.7	Si
94	11	26	09	03	49	12.390N	86.612W	149	4.7		Si
94	12	01	17	24	27	12.100N	86.512W	126	4.7		Si

Además de la correcta identificación de registros telesísmicos, es importante probar que la red no identifique erróneamente otro tipo de eventos y se asignen como telesismos. De los registros obtenidos en el mismo período (Agosto a Diciembre de 1993) se pudieron localizar 94 sismos regionales (fig. 6.7) y al pasar por la red espacio-temporal 5 se identificaron erróneamente como telesismo, debido principalmente a la pobre calidad del registro. La tabla 6.2 muestra los registros regionales utilizados. En el Apéndice 1 se muestran todas las formas de onda de los registros escogidos.

Tabla 6.2

Eventos regionales probados con la red espacio-temporal de sismos telemétricos. La última columna indica si fué reconocida erróneamente.

No	Año	Mea	Día	Hora	Min	Seg	Lat.	Long.	Prof.	Rms	Mag	Id. Tel
1	1993	8	1	4	59	19.4	14.050	-96.832	7.9	6.8	5.5	Si
2	1993	8	3	6	51	31.8	16.393	-99.795	4.9	2.7	3.6	No
3	1993	8	3	7	50	10.1	16.057	-99.572	0.4	2.8	4.2	No
4	1993	8	6	13	59	2.6	16.179	-98.816	19.1	4.1	4.4	No
5	1993	8	6	19	24	11.9	16.610	-101.030	0.0	5.2	4.6	No
6	1993	8	17	20	42	40.4	17.421	-95.313	65.3	0.4	4.5	No
7	1993	8	23	21	28	6.4	18.755	-105.083	81.2	0.8	5.2	No
8	1993	8	25	0	46	47.4	16.276	-99.525	5.1	0.8	4.1	No
9	1993	8	26	0	49	57.5	17.109	-102.167	29.7	2.2	4.5	No
10	1993	8	26	21	38	53.2	16.353	-100.568	23.6	0.1	3.8	No
11	1993	9	1	9	5	35.2	17.632	-97.393	140.6	0.9	4.0	Si
12	1993	9	3	12	55	41.9	18.659	-97.205	70.5	0.2	4.1	No
13	1993	9	5	4	54	40.7	18.611	-99.740	237.2	0.1	2.5	No
14	1993	9	5	20	37	13.9	15.155	-94.584	68.3	0.4	4.9	Si
15	1993	9	6	7	8	58.7	16.746	-94.228	74.0	0.6	4.7	No
16	1993	9	9	0	14	47.7	17.840	-102.746	19.6	0.4	4.0	No
17	1993	9	10	13	26	56.3	16.203	-99.085	23.6	4.1	3.7	No
18	1993	9	10	19	12	34.7	14.250	-94.089	75.5	1.3	3.3	No
19	1993	9	19	4	59	42.9	13.957	-92.120	70.5	0.9	7.1	No
20	1993	9	19	5	40	16.1	13.652	-94.085	70.5	0.4	6.2	No
21	1993	9	21	6	13	9.9	15.200	-99.942	64.6	0.8	4.8	No
22	1993	9	26	20	13	4.2	20.212	-99.036	6.8	0.6	2.6	No
23	1993	9	30	18	28	5.2	16.795	-96.183	0.1	0.6		No
24	1993	10	1	15	13	42.9	18.652	-98.353	138.8	1.0	3.3	No
25	1993	10	2	2	26	43.8	17.780	-102.407	32.1	0.8	4.5	No
26	1993	10	3	4	22	55.9	18.184	-98.761	4.7	2.4	2.6	No
27	1993	10	3	5	54	40.1	16.689	-101.126	16.7	1.9	4.3	No
28	1993	10	3	21	49	36.5	15.079	-95.081	85.5	0.9	5.3	No
29	1993	10	5	3	12	20.2	14.840	-95.199	24.7	0.9	5.4	No
30	1993	10	6	0	4	47.2	15.375	-94.830	77.8	1.0	5.6	No
31	1993	10	6	1	10	4.0	14.735	-90.589	72.1	2.1	7.0	No
32	1993	10	9	22	5	37.1	15.841	-97.617	52.1	0.4	4.3	No
33	1993	10	10	21	8	46.7	14.457	-95.312	56.2	0.9	5.7	No
34	1993	10	11	16	10	28.0	20.353	-103.113	70.5	3.2		Si
35	1993	10	13	19	42	0.9	18.813	-98.979	24.9	0.4	1.2	No
36	1993	10	15	12	54	24.0	15.790	-97.902	31.1	1.1	4.2	No
37	1993	10	16	17	50	33.1	19.587	-98.530	26.4	0.6	3.1	No
38	1993	10	18	19	50	57.6	19.634	-99.109	33.2	1.0	2.3	No
39	1993	10	24	3	46	43.6	18.951	-97.425	107.2	0.0	2.7	No
40	1993	10	24	7	52	20.1	16.170	-98.787	3.2	1.0		No
41	1993	10	24	10	26	35.5	16.063	-98.716	0.2	1.2	4.3	No
42	1993	10	24	12	32	28.1	16.049	-99.053	0.0	2.5	4.3	No

Tabla 2 continuación.

No	Año	Mes	Día	Hora	Min	Seg	Lat.	Long.	Prof.	Rms	Mag.	Id. Tel
43	1993	10	24	13	28	9.9	16.402	-98.847	0.0	0.8	4.2	No
44	1993	10	24	13	42	18.0	15.755	-98.856	0.0	0.8	4.7	No
45	1993	10	25	15	1	30.0	16.500	-99.653	78.1	0.5	2.0	No
46	1993	10	25	15	46	39.1	15.657	-99.058	18.9	0.9	2.7	No
47	1993	10	26	3	7	32.6	15.969	-98.662	0.0	2.0	4.3	No
48	1993	10	26	5	28	35.5	16.264	-98.186	44.4	1.3	2.1	No
49	1993	10	26	7	2	0.9	15.684	-99.049	38.5	1.9	3.5	No
50	1993	10	27	9	40	54.0	16.036	-99.201	7.3	3.0	3.7	No
51	1993	11	1	0	4	59.7	17.928	-101.943	44.4	0.6	4.1	No
52	1993	11	2	9	14	12.0	15.072	-95.201	66.6	0.9	5.0	No
53	1993	11	4	6	37	24.5	16.143	-98.611	157.3	0.9	4.2	No
54	1993	11	4	15	11	27.9	15.759	-99.079	16.3	0.7	4.4	No
55	1993	11	5	1	51	13.2	15.599	-99.217	213.7	0.1	4.9	No
56	1993	11	6	7	45	14.6	16.083	-98.689	39.5	0.1	4.9	No
57	1993	11	6	16	7	25.8	15.008	-97.826	26.7	1.0	4.9	No
58	1993	11	6	18	22	39.6	15.258	-93.452	72.2	0.2	5.7	No
59	1993	11	10	10	55	4.6	16.444	-99.532	35.1	0.3	3.2	No
60	1993	11	10	12	58	2.8	17.154	-94.304	70.6	0.1	5.1	No
61	1993	11	11	16	46	10.8	13.312	-90.087	79.9	0.8	5.3	No
62	1993	11	11	16	46	10.8	13.312	-90.087	79.9	0.8	2.4	No
63	1993	11	13	0	15	47.7	14.020	-98.570	29.8	0.7	5.5	No
64	1993	11	13	1	14	33.8	16.058	-99.052	76.2	0.4	3.5	No
65	1993	11	13	1	40	14.0	14.474	-98.989	23.0	1.5	4.5	No
66	1993	11	13	1	55	44.0	15.798	-100.001	0.2	2.9	0.5	No
67	1993	11	13	5	10	10.9	15.238	-99.558	0.0	4.2	4.8	No
68	1993	11	13	8	29	10.5	20.189	-99.553	0.0	99.0	1.4	No
69	1993	11	14	3	18	14.8	15.052	-102.736	70.5	0.1	5.2	No
70	1993	11	14	11	22	39.5	14.952	-95.791	84.0	2.3	5.4	No
71	1993	12	1	12	43	49.7	14.482	-99.042	37.7	1.1	3.3	No
72	1993	12	2	12	54	1.2	15.885	-93.638	69.6	1.0	5.2	No
73	1993	12	3	12	52	44.8	18.071	-97.430	96.0	0.9	3.6	No
74	1993	12	5	9	32	34.9	17.452	-101.972	10.5	1.5	3.1	No
75	1993	12	6	8	35	45.9	17.889	-95.325	23.1	0.4	1.2	Si
76	1993	12	6	12	3	45.2	15.904	-99.604	72.4	1.0	3.1	No
77	1993	12	7	17	6	43.8	16.478	-99.617	48.9	1.3	2.0	No
78	1993	12	7	17	24	19.5	23.395	-95.802	83.2	0.8	2.8	No
79	1993	12	7	18	44	24.3	17.798	-102.656	82.9	0.6	4.8	No
80	1993	12	8	11	23	50.2	15.434	-100.562	65.3	1.2	5.8	No
81	1993	12	8	12	45	2.6	16.771	-100.071	40.9	0.9	2.7	No
82	1993	12	9	5	17	23.0	19.046	-96.331	70.5	0.4	3.4	No
83	1993	12	11	22	1	18.1	15.178	-96.820	65.8	2.5	3.4	No
84	1993	12	14	3	26	40.7	14.354	-99.062	59.1	0.8	5.2	No
85	1993	12	15	9	28	52.1	18.035	-102.491	91.5	0.6	3.1	No
86	1993	12	16	16	34	38.2	15.262	-96.317	97.7	0.9	3.3	No
87	1993	12	18	19	55	53.0	17.313	-102.658	126.9	0.9	4.2	No
88	1993	12	19	0	4	41.7	16.348	-100.754	36.0	0.3	4.1	No
89	1993	12	19	18	53	45.2	15.368	-96.425	73.6	0.9	5.3	No
90	1993	12	21	13	48	20.1	14.939	-99.472	74.2	0.7	5.5	No
91	1993	12	22	4	29	5.5	22.144	-102.916	70.5	0.9	4.7	No
92	1993	12	27	5	30	17.5	18.968	-100.057	106.7	0.6	3.7	No
93	1993	12	30	1	21	11.9	15.553	-99.518	18.6	0.7	4.9	No
94	1993	12	30	2	22	48.2	15.750	-99.334	20.1	0.5	3.7	No

Eventos identificados

EV TOT: 95

EV SEL: 94

M=2 ■

M=3 □

M=4 □

M=5 □

M=6 □

NONE +

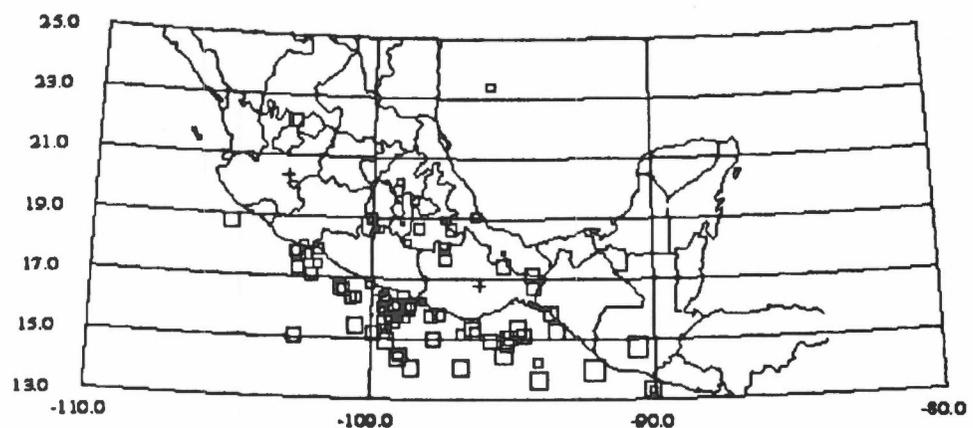


Fig. 6.7 Localización de los eventos regionales escogidos para probar la red espacio-temporal.

Desafortunadamente el fenómeno sísmico se presenta de forma aleatoria, y no es posible obtener muestras frecuentes de cierto tipo de registros, esto pasa con eventos telesísmicos, o eventos muy locales, que son registrados raramente, principalmente por que los algoritmos de detección solamente se disparan con la confirmación de umbrales, y no son capaces de ver más características de la señal (contenido espectral, forma de onda, etc.). Una solución es implantar este tipo de redes espacio-temporales al nivel de detección del sistema de adquisición de datos.

Los eventos telesísmicos se entrenaron con un evento que se muestra en la figura 6.8.

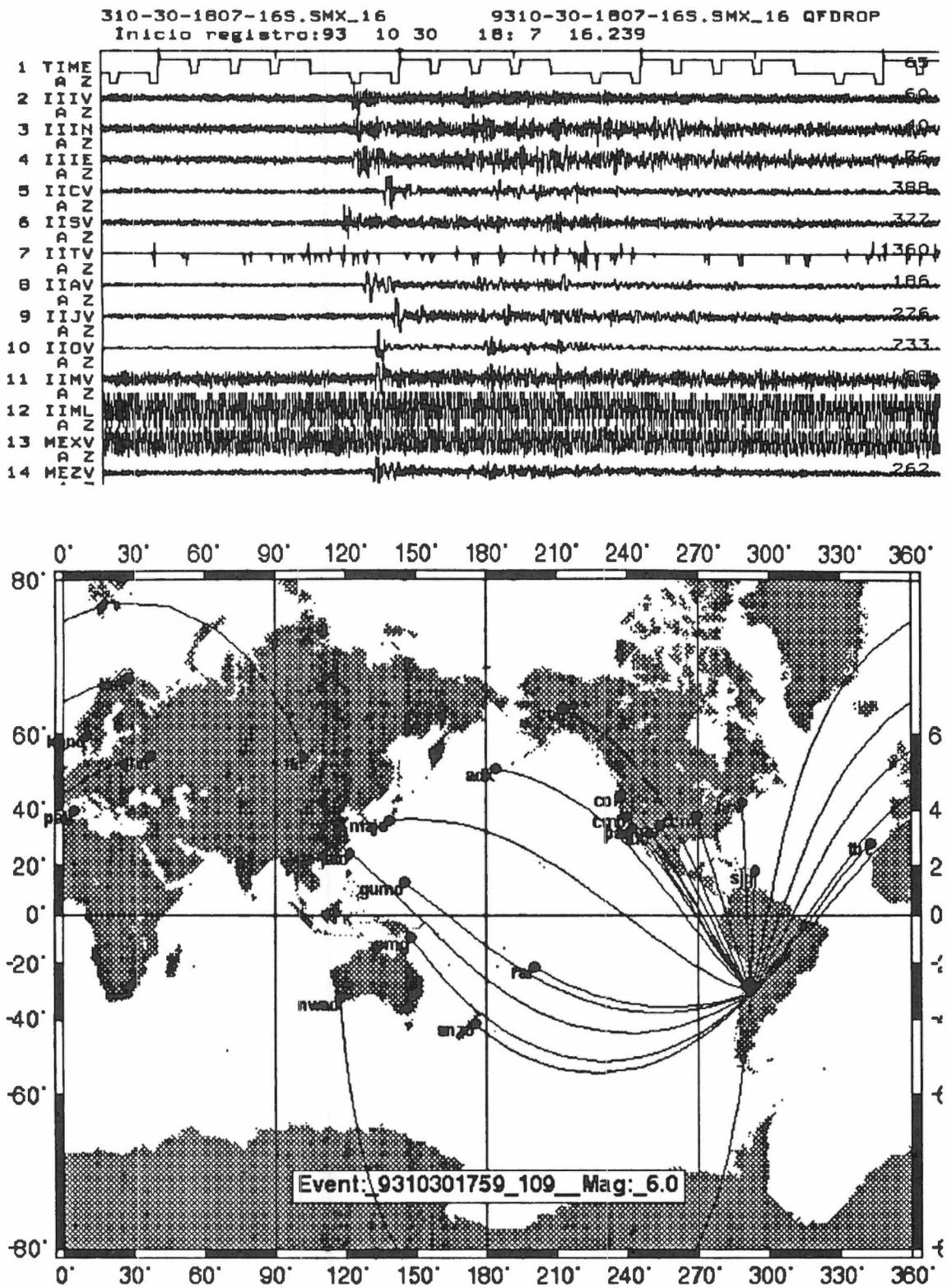


Fig. 6.8 Telesismo utilizado para entrenar la red espacio-temporal.

La identificación de sismos locales y regionales todavía se encuentra en etapa de entrenamiento debido a que presenta una gran diversidad de formas de onda en lo que se refiere a sismos regionales (Los sismos de Oaxaca presentan una forma de onda diferente a los de Guerrero, de Michoacán o del Istmo de Tehuantepec) y además los sismos locales requieren de una representación distinta del patrón espacio temporal, porque se necesita muestrear a frecuencias más altas a causa de su corta duración.

Es claro que el fenómeno es mucho más complicado, pero a pesar de eso los resultados son muy buenos. Debido a la forma como se entrenan las redes espacio-temporales, si después de haber presentado un patrón, la red no lo reconoce, entonces es muy sencillo entrenarla para que lo reconozca posteriormente, el problema aparece cuando la red identifica un patrón erróneamente, (por ejemplo si dice que se trata de un evento local cuando se le presenta un telesismo) esto significa que se ha representado mal el patrón espacio-temporal y que la secuencia de vectores de densidad espectral no define completamente al registro en las categorías que se desean clasificar, entonces es necesario hacer un análisis más detallado de las señales (aumentar el intervalo de muestreo, el tamaño de la señal, filtrar, suavizar, etc.).

El entrenamiento requiere de un conjunto de muestras de una misma categoría, pero en sismología no es tan sencillo obtener este tipo de muestras, en cambio a partir de la teoría de propagación de ondas y bajo ciertas consideraciones (capas estratificadas, medios homogéneos, etc.) es posible generar registros sísmicos sintéticos que pueden ser utilizados fácilmente para entrenar la red, con la ventaja de que se pueden generar en cualquier momento y en gran cantidad.

Es posible extender el reconocimiento de formas de onda al reconocimiento preliminar de magnitud, de lugar de origen, tipo de fuente, etc. Desafortunadamente no se cuenta con el equipo necesario para resolver este tipo de problemas, los sismómetros de periodo corto tienen un rango dinámico muy bajo y se saturan muy rápido en eventos de magnitud considerable ($M > 6$). Se espera contar con acelerómetros de varias ganancias que mejoren estas deficiencias de los aparatos.

Conclusiones.

- **Se observa una gran confiabilidad en la identificación de telesismos mediante la red espacio-temporal, que llega a superar por mucho a la de analistas humanos.**
- **La identificación es muy sensible a la relación señal a ruido del registro, y depende fuertemente de una buena calibración de los parametros de la red.**
- **Es muy importante una buena representación del patrón espacio-temporal, en términos de los vectores de densidad espectral, además es importante conocer el fenómeno físico de los transductores y de la señal para una correcta representación del patrón.**
- **Además de la clasificación del tipo de evento, se propone utilizar este tipo de técnicas de reconocimiento de patrones en la etapa de detección, que actualmente depende únicamente de umbrales de disparo.**
- **Debido a la característica aleatoria de los eventos sísmicos es difícil entrenar la red espacio-temporal. Se propone entrenar la red utilizando modelos matemáticos para generar sismogramas sintéticos a partir de la teoría de propagación de ondas.**
- **Para poder extender el trabajo de identificación de formas de onda en eventos de mayor intensidad, es necesario contar con sensores de mayor rango dinámico, como acelerómetros en varios rangos de ganancia.**

Referencias.

Aki K. and P. G. Richards. 1980. *Quantitative Seismology. Theory and Methods*. Vol II. W. H. Freeman and Co. p 932.

Alsop L. E., G. H. Sutton and M. Ewin 1961. Free oscillation of the Earth on strain and pendulum seismographs. *Journal of Geophysical Research* 66 631-641.

Bache T. C., S. R. Bratt, H. J. Swanger, and F.K. Dashiell. 1993. Knowledge-based interpretation of seismic data in the intelligent monitoring system. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83, 1507-1526.

Benioff H. F. 1961. Excitations of the free oscillations of the earth by earthquakes. *Journal of Geophysical Research* 66. 605-620.

Domany E., J. L. van Hemmen and K. Schulten. 1992. *Models of Neural Networks*. Springer-Verlag Ed. pp. 347.

Ewin M., W. Jaradetzky and F. Press. 1957. *Elastic waves in layered media*. New York: McGraw-Hill, p. 380.

Freeman James A. and David M. Skapura. 1992. *Neural Networks, Algorithms, Applications, and Programming Techniques*. Addison Wesley Ed. pp 341-371.

Grossberg Stephen. 1982. *Learning by neural networks*. Stephen Grossbergs editor. *Studies of mind and Brain*. D. Reidel Publishing. Boston MA, pp 65-156, 1982.

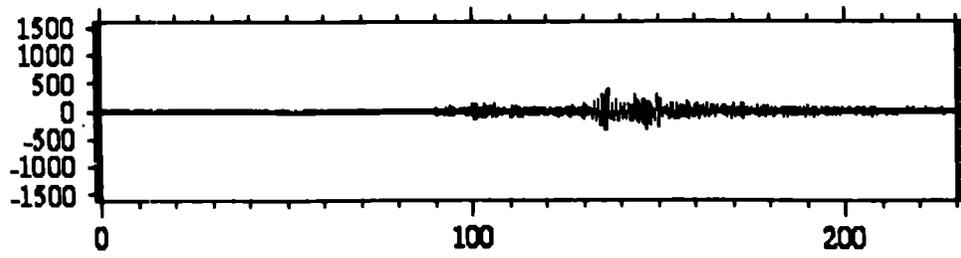
Gutenberg B. and C. F. Richter. 1954. *Seismicity of the Earth*. Princeton University Press.

- Havskov J. and Lindholm C. 1994. The SEISAN earthquake analysis system. Institute of Solid Earth Physics. pp139.
- Johnson C. E. 1983. CUSP. Automated processing and management for large regional seismic networks. Earthquake Notes, 54, 13.
- Lamb H. 1904. On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid. Philosophical transaction of the Royal Society of London A203:1-42.
- Lee W. H. K. and S. W. Stewart. 1981. Principles and Applications of Microearthquake Networks, Advances in Geophysics, Supplement 2, Academic Press, Neew York, pp.293.
- Lee W. H. K. 1989. Toolbox for data acquisition, processing and analysis. International Association of Seismology and Physics of the Earth's interior. Volume 1. pp 281.
- Ness N.F., J. C. Harrison and L. B. Slichter 1961. Observations of the free oscillations if the Earth. Journal of Geophysical Research 66 621-629.
- Pekeris C. L. 1948. Theory of propagation of explosive sound in shallow water. Geological Society of America. Memoirs No. 27.
- Press F. 1956. Determination of crustal structure from phase velocity of Rayleigh waves, Part 1. Southern California. Bulletin of Geological Society of America 67, 1647-1658.
- Stewart, S. W., W. H. K. Lee and J. P. Eaton 1971. Location and real time detection of microearthquakes along the San Andreas fault system in central California. Roy. Soc. New Zeland Bull. 9, 205-209.

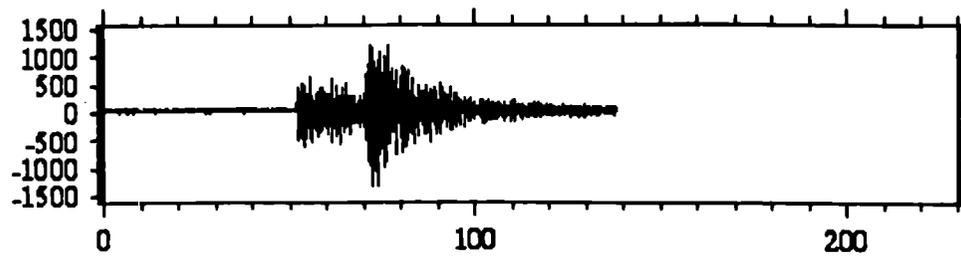
APENDICE

**REGISTROS SISMICOS REGIONALES
UTILIZADOS PARA PROBAR LA RED NEURONAL
ESPACIO-TEMPORAL**

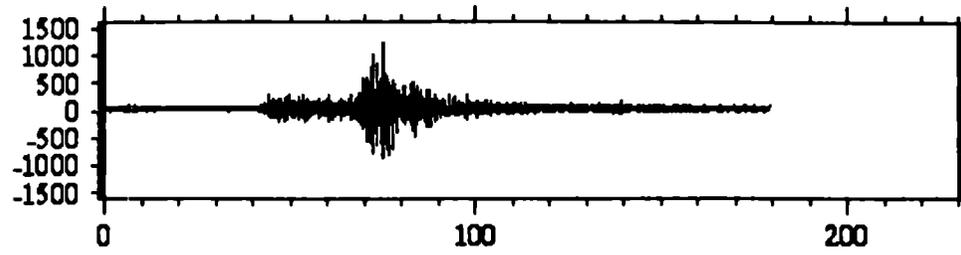
9308-01-0459-16S.SMX_16



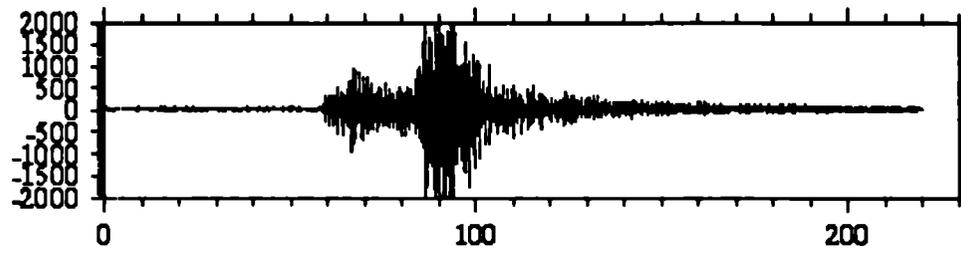
9308-03-0651-08S.SMX_1



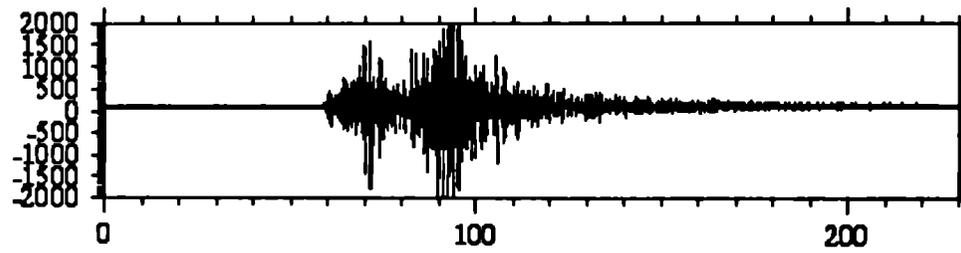
9308-03-0750-03S.SMX_16



9308-06-1358-36S.SMX_16

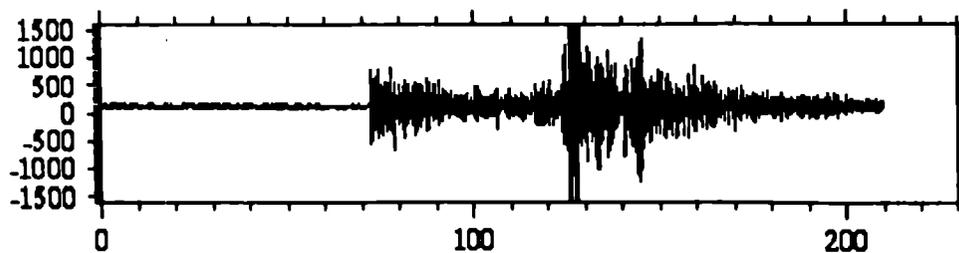


9308-06-1923-46S.SMX_160

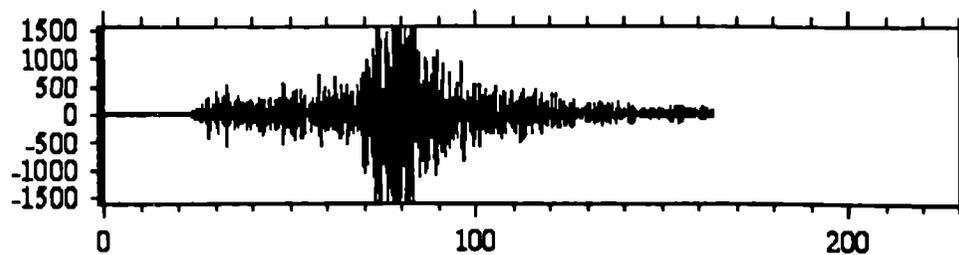


Tiempo[seg]

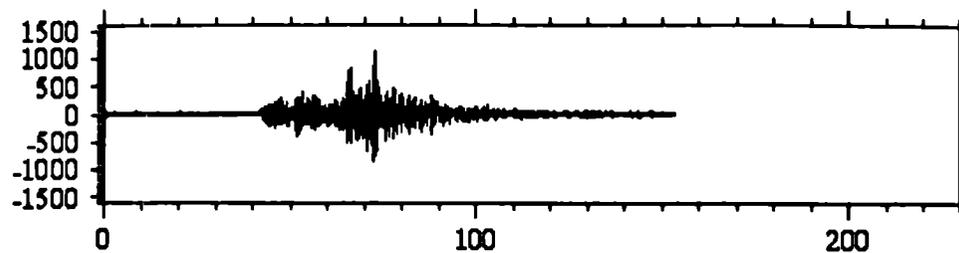
9308-17-2042-28S.SMX_16



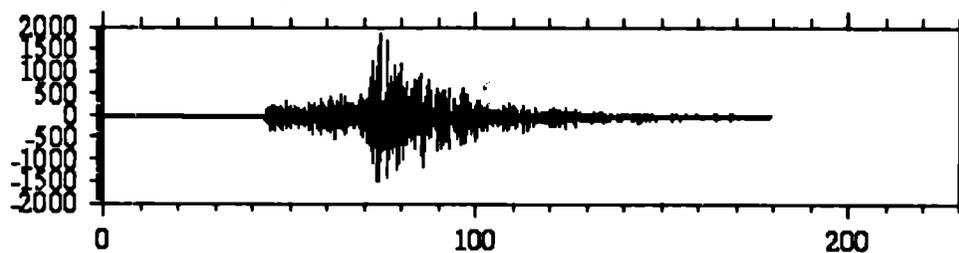
9308-23-2128-55S.SMX_16



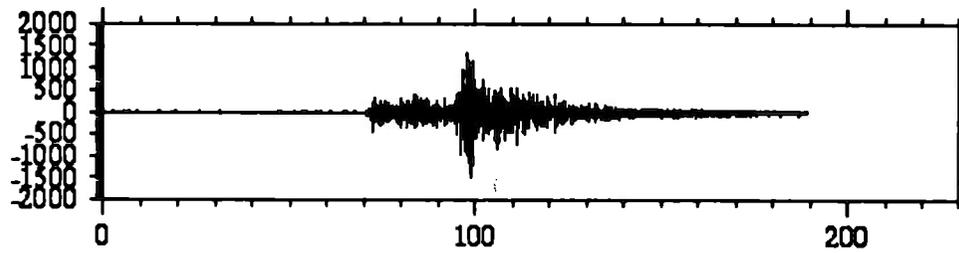
9308-25-0046-33S.SMX_16



9308-26-0049-58S.SMX_16

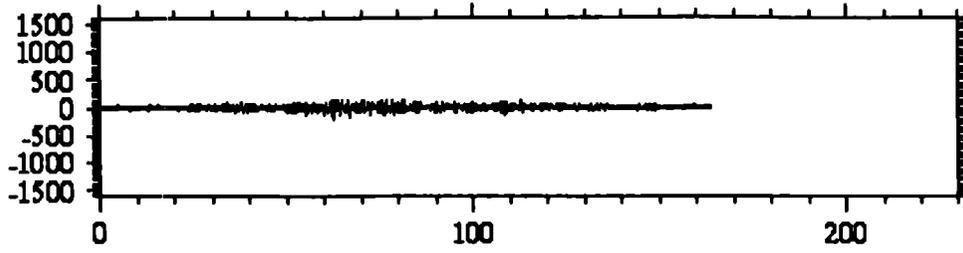


9308-26-2138-18S.SMX_16

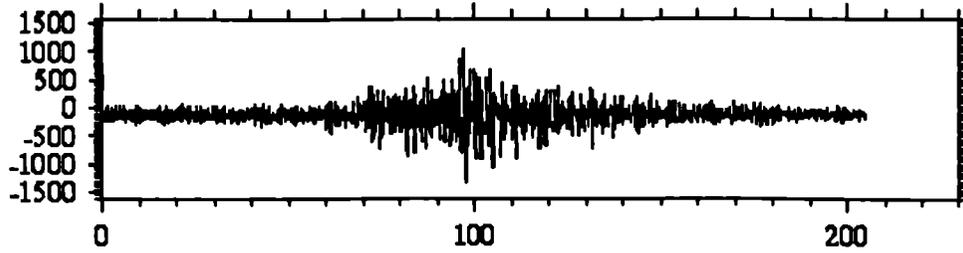


Tiempo[seg]

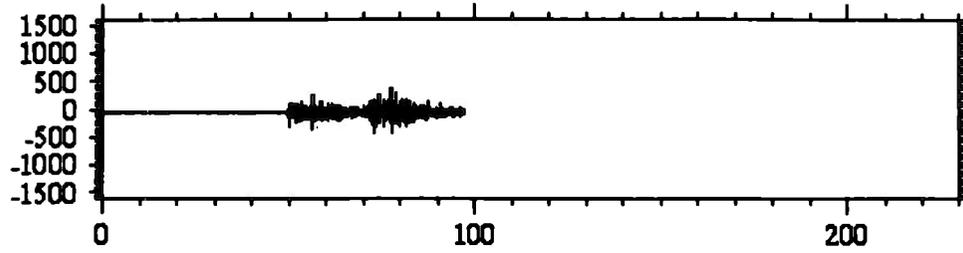
9309-01-0905-25S.SMX_16



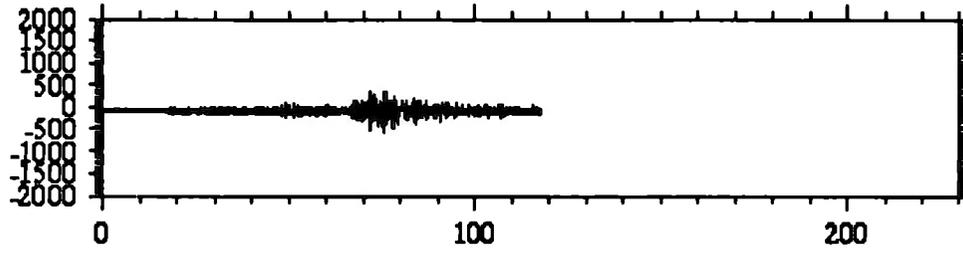
9309-03-1255-17S.SMX_16



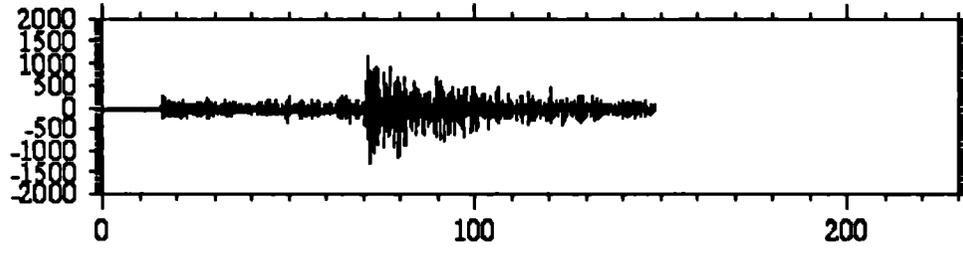
9309-05-0454-21S.SMX_16



9309-05-2058-11S.SMX_16

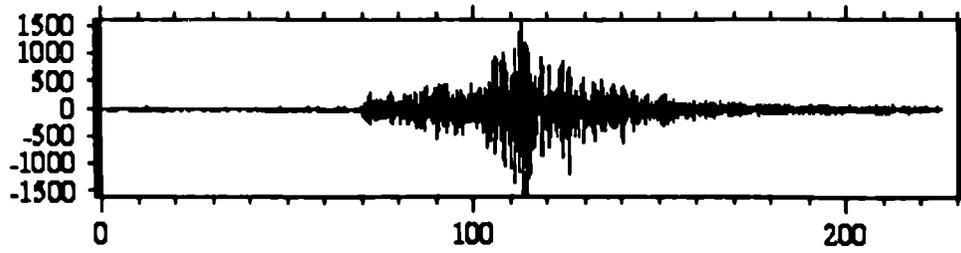


9309-06-0709-58S.SMX_16

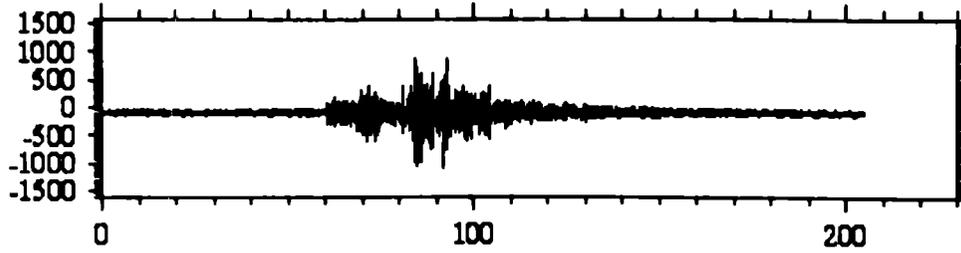


Tiempo[seg]

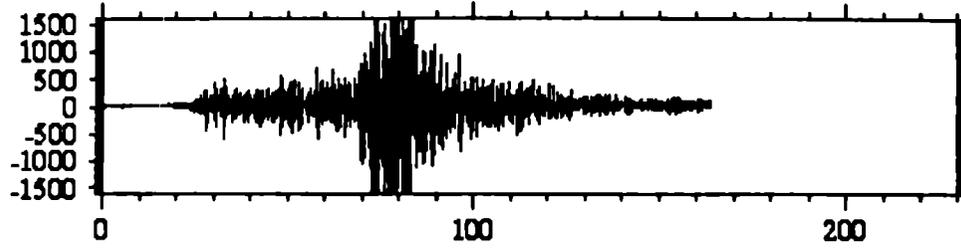
9309-09-0014-25S.SMK_16



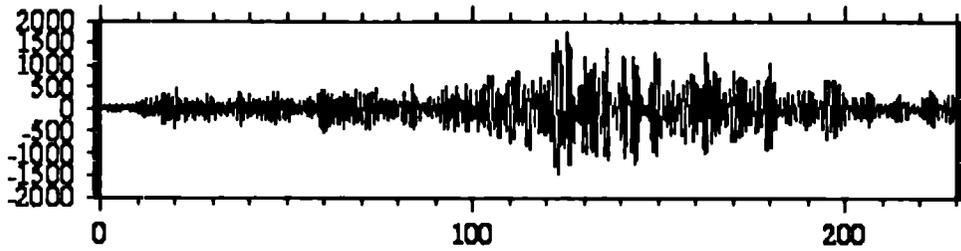
9309-10-1326-26S.SMK_16



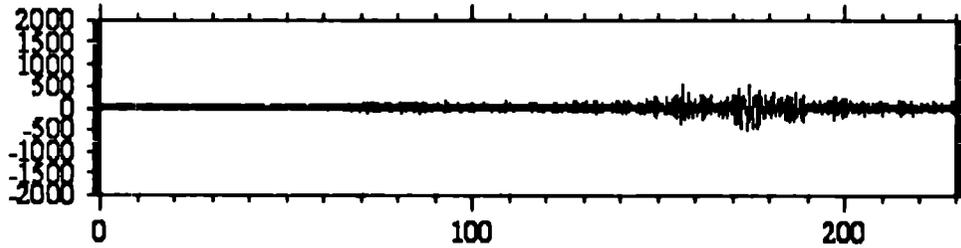
9309-10-1912-52S.SMK_16



9309-19-0501-19S.SMK_16

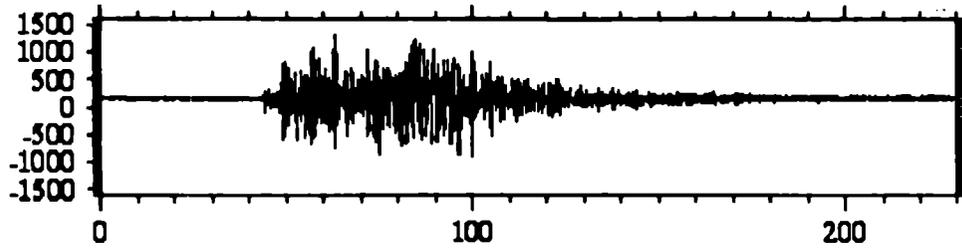


9309-19-0540-41S.SMK_16

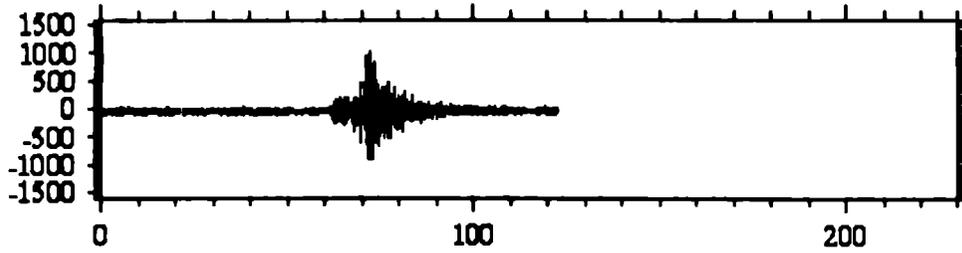


Tiempo[seg]

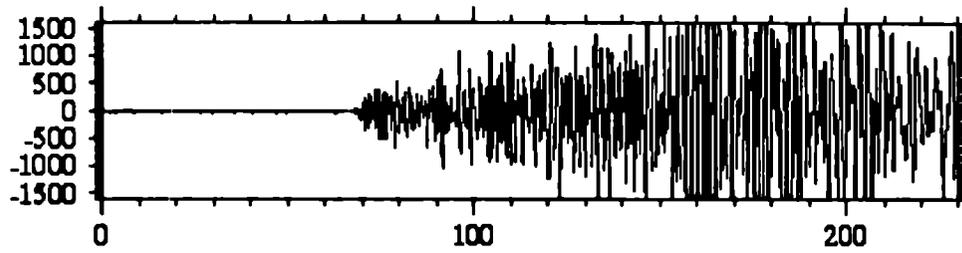
9309-21-0613-04S.SMX_16



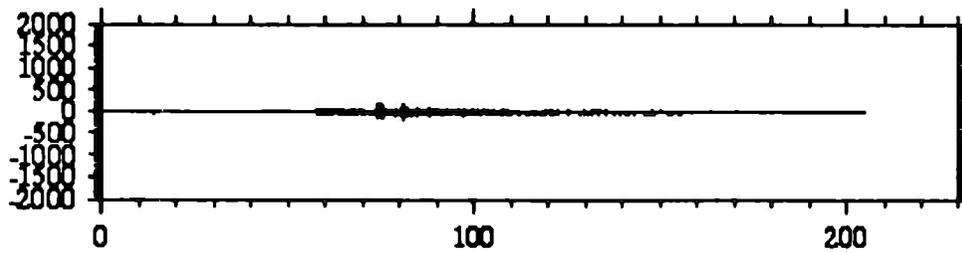
9309-21-0613-04S.SMX_16



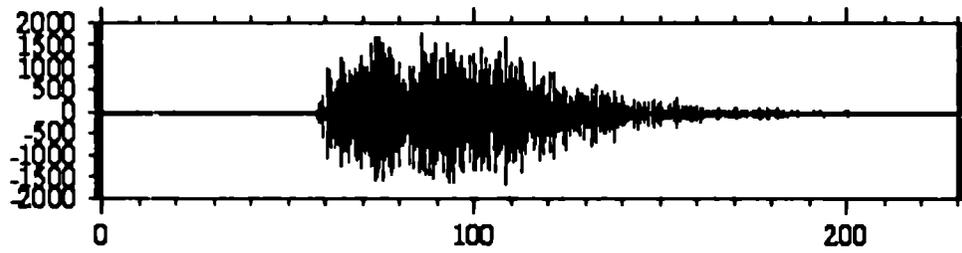
9309-30-1627-49S.SMX_16



9310-01-1513-10S.SMX_16

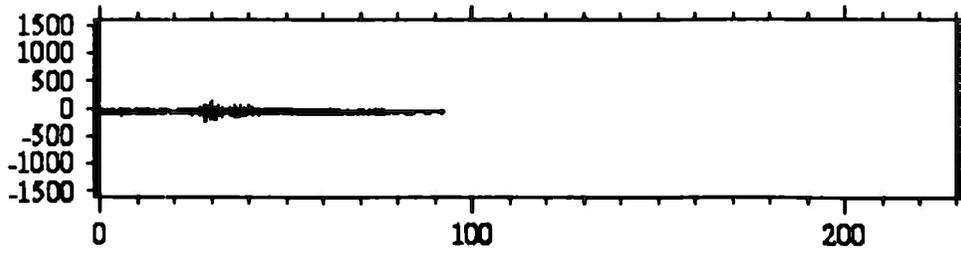


9310-02-0226-28S.SMX_16

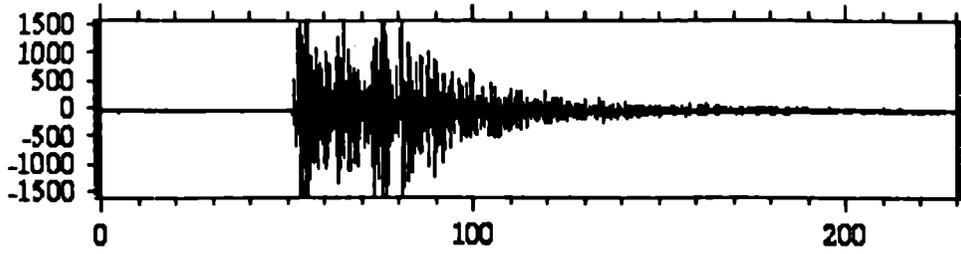


Tiempo[seg]

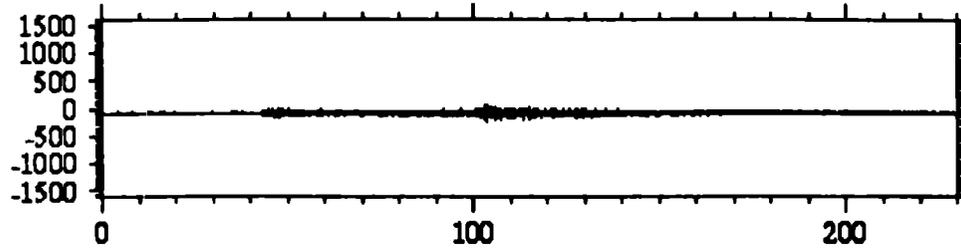
9310-03-0422-50S.SMK_16



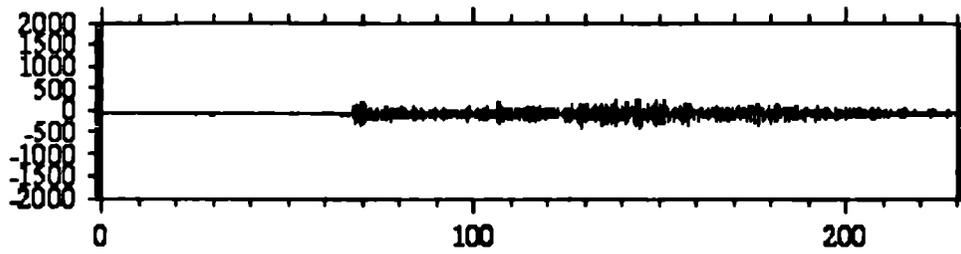
9310-03-0554-26S.SMK_16



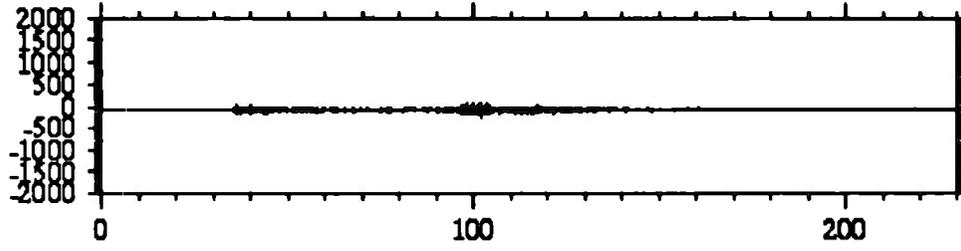
9310-03-2150-08S.SMK_16



9310-05-0312-31S.SMK_16

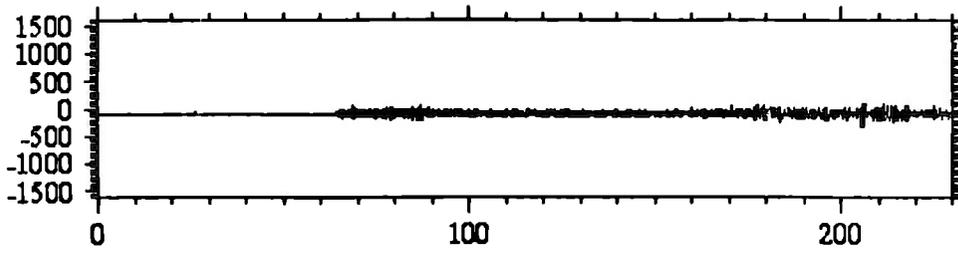


9310-06-0005-25S.SMK_16

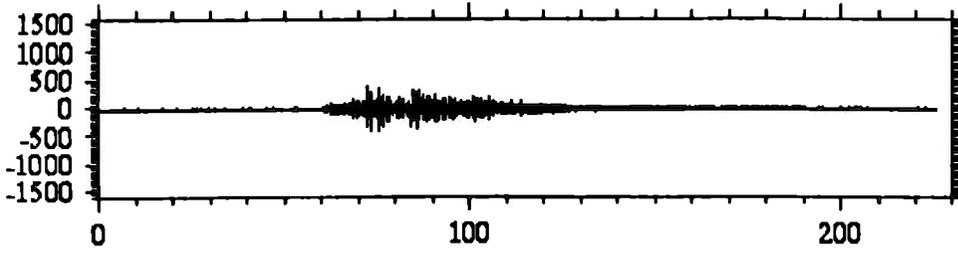


Tiempo[seg]

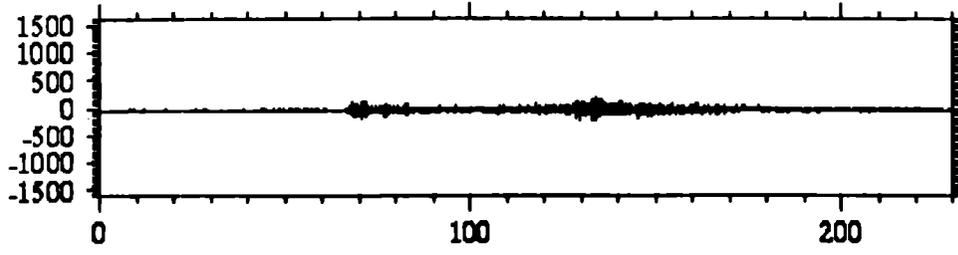
9310-06-0111-06S.SMK_16



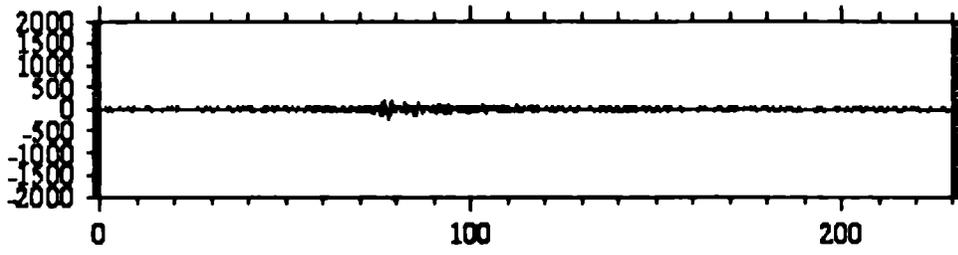
9310-09-2205-18S.SMK_16



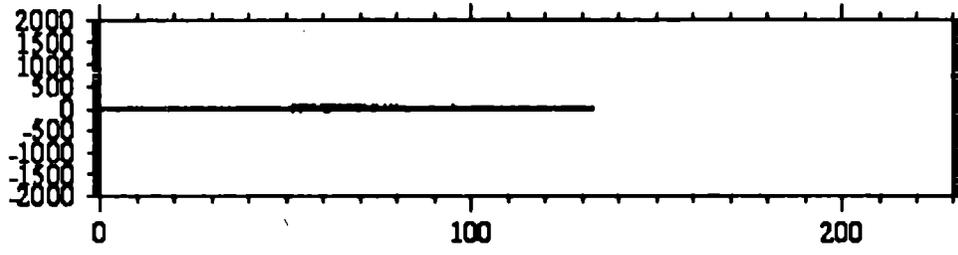
9310-10-2108-59S.SMK_16



9310-11-1611-00S.SMK_16

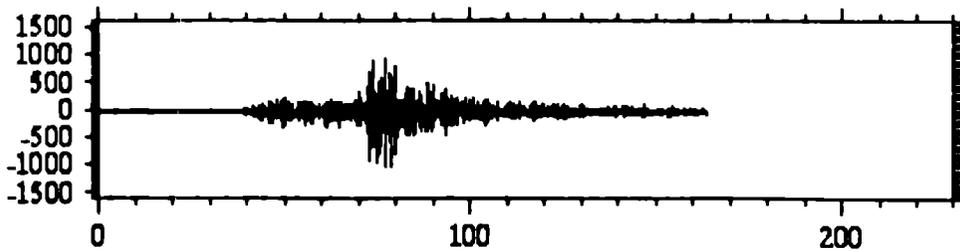


9310-13-1941-23S.SMK_16

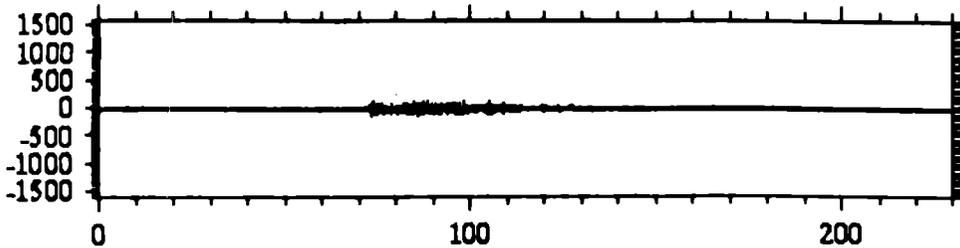


Tiempo[seg]

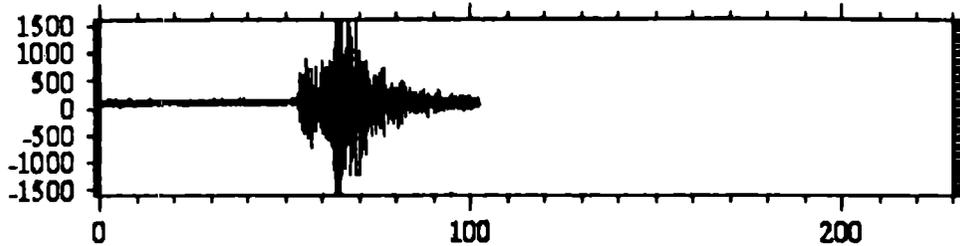
9310-15-1254-20S.SMX_16



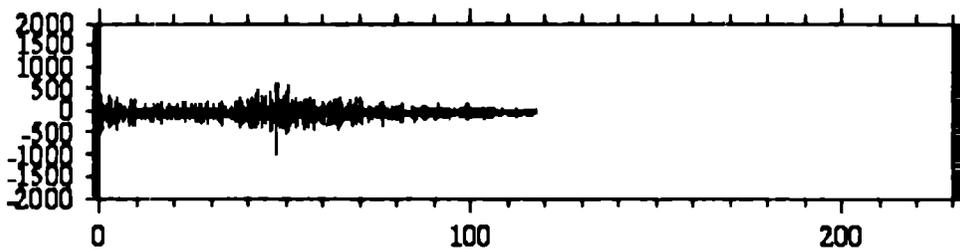
9310-16-1749-29S.SMX_16



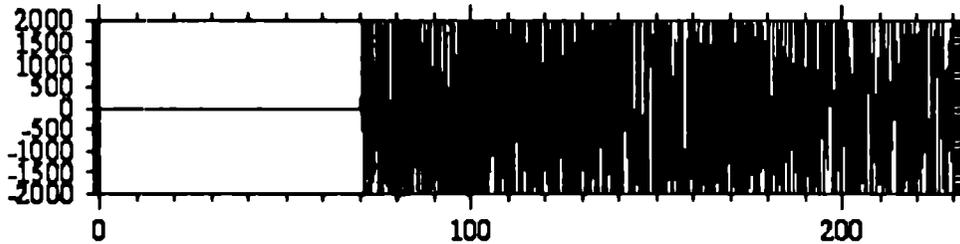
9310-18-1950-09S.SMX_16



9310-24-0346-29S.SMX_16

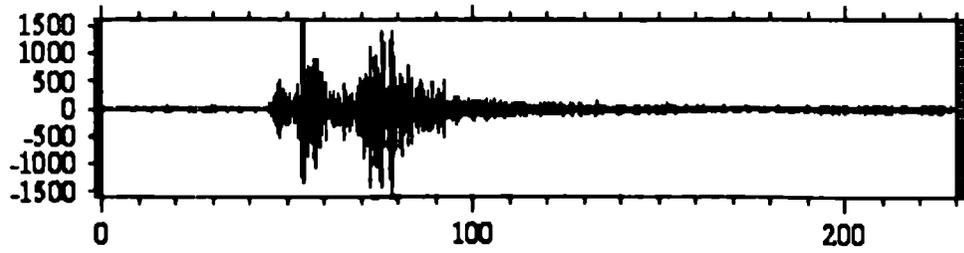


9310-24-0751-48S.SMX_16

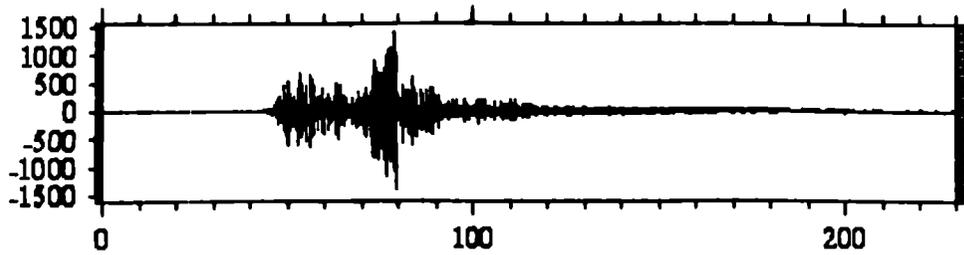


Tiempo[seg]

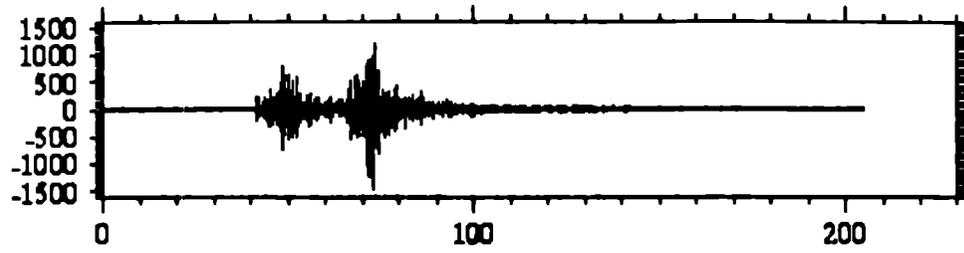
9310-24-1026-27S.SMK_16



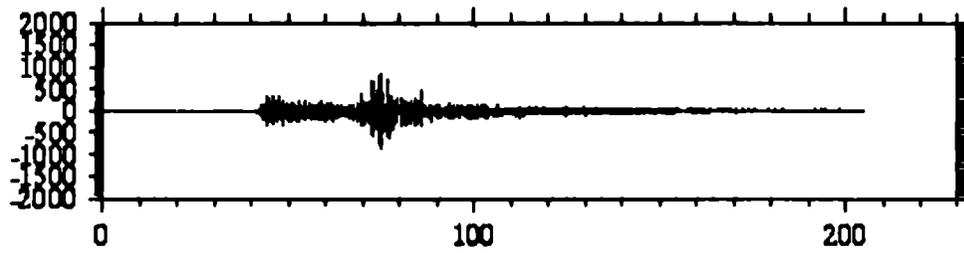
9310-24-1232-19S.SMK_16



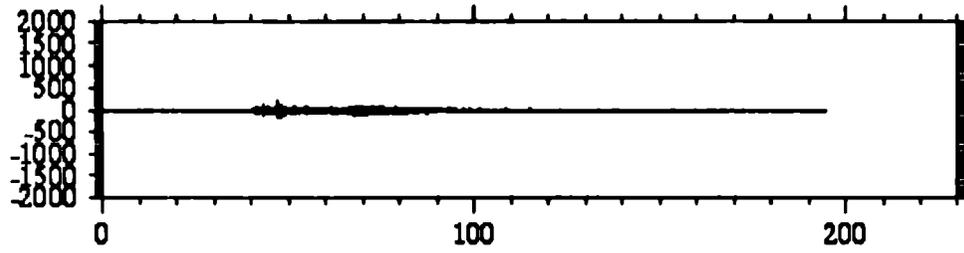
9310-24-1327-56S.SMK_16



9310-24-1342-15S.SMK_16

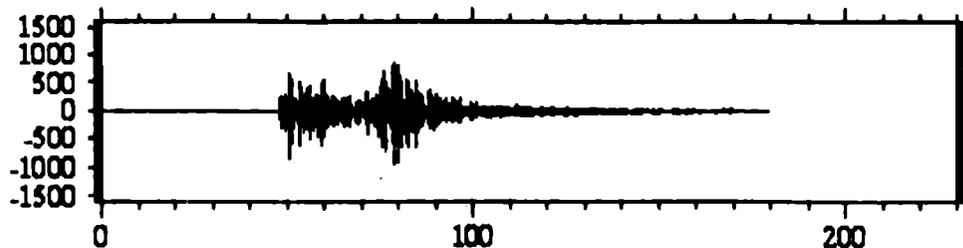


9310-25-1501-37S.SMK_16

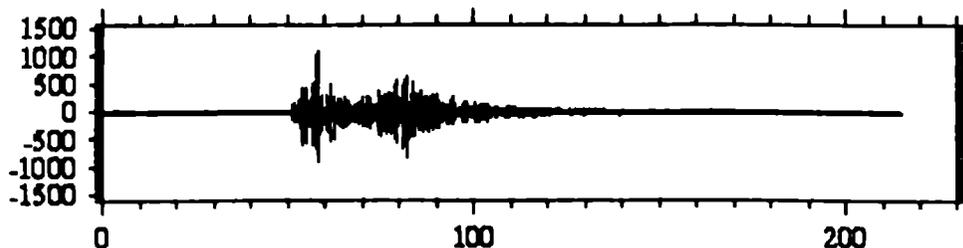


Tiempo[seg]

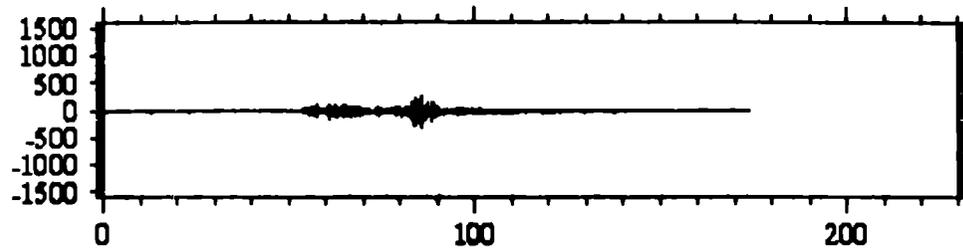
9310-25-1546-49S.SMX_16



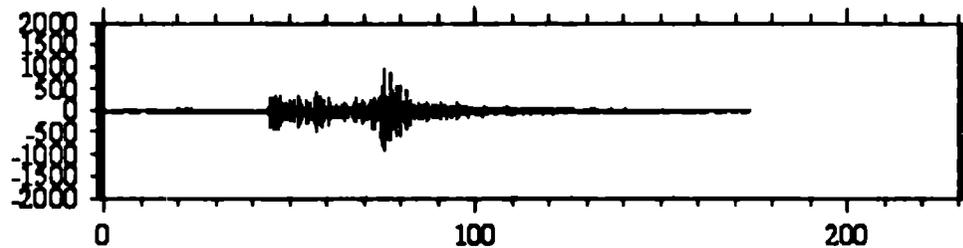
9310-26-0307-38S.SMX_16



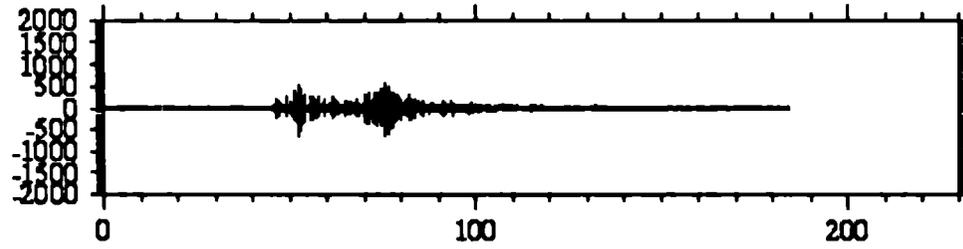
9310-26-0528-09S.SMX_16



9310-26-0701-52S.SMX_16

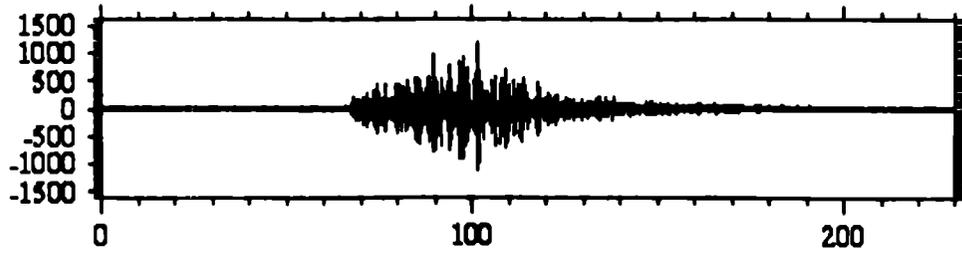


9310-27-0940-43S.SMX_16

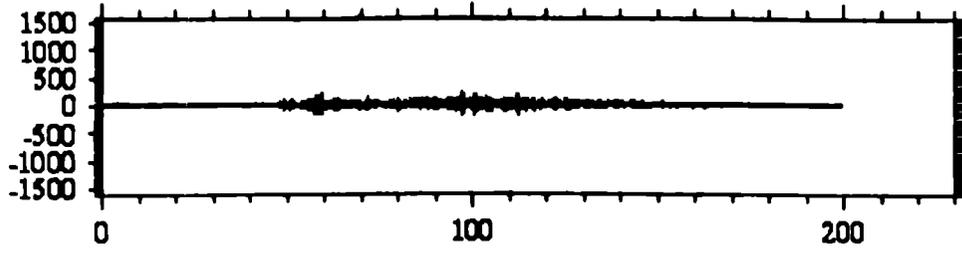


Tiempo[seg]

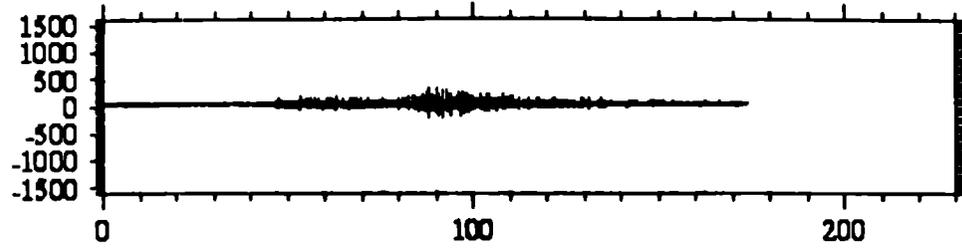
9311-01-0004-29S.SMK_16



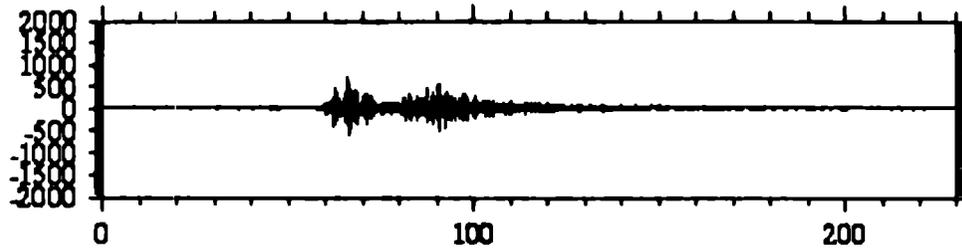
9311-02-0914-48S.SMK_16



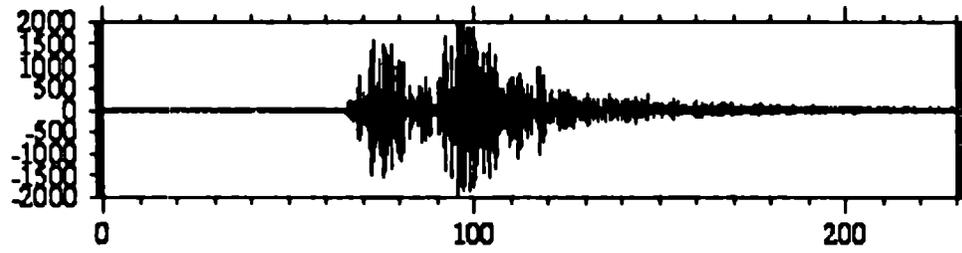
9311-04-0637-22S.SMK_16



9311-04-1511-07S.SMK_16

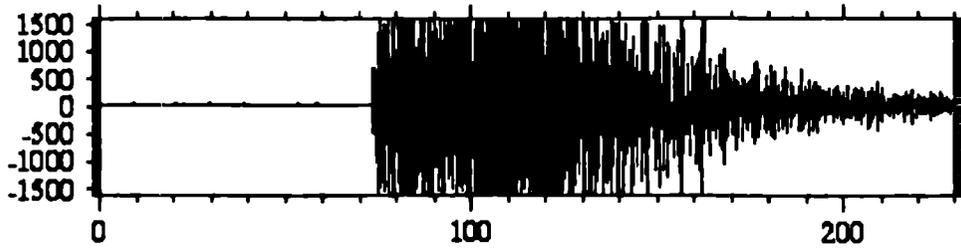


9311-05-0150-54S.SMK_16

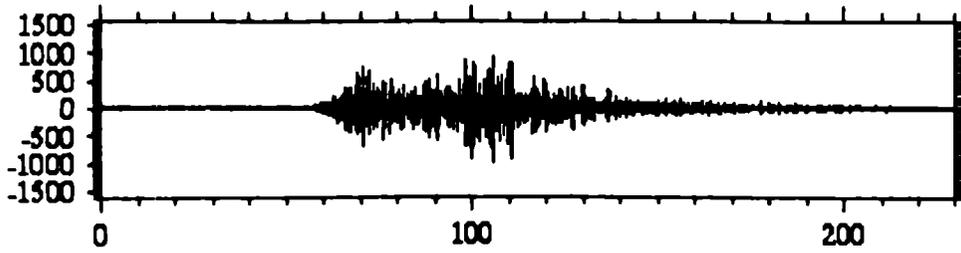


Tiempo[seg]

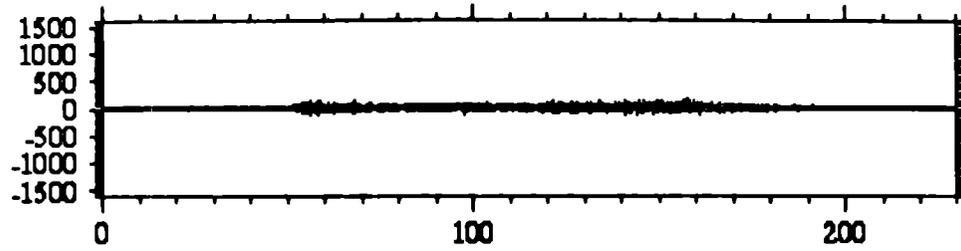
9311-06-0744-38S.SMK_16



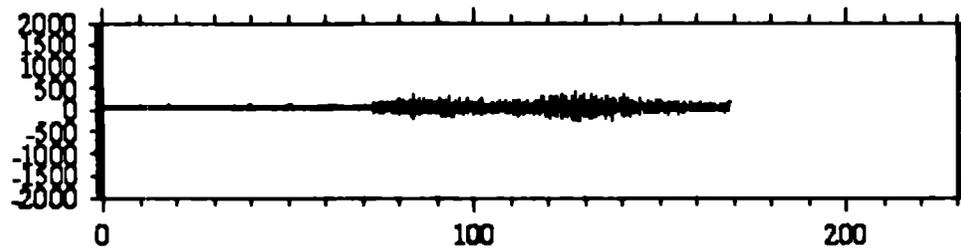
9311-06-1607-22S.SMK_16



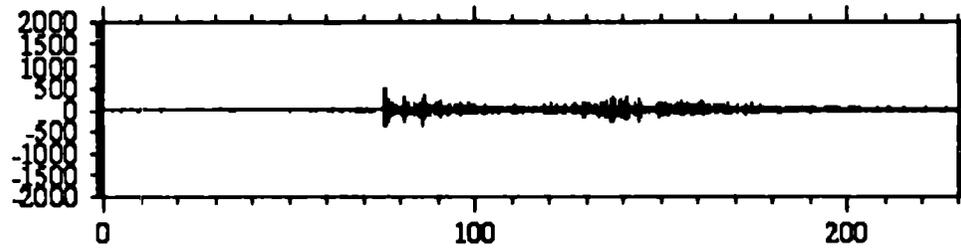
9311-04-0637-22S.SMK_16



9311-10-1054-40S.SMK_16

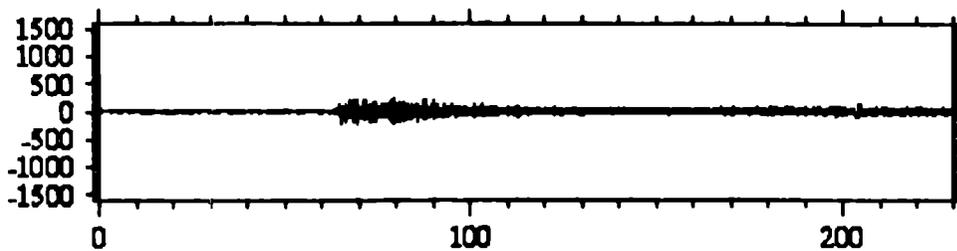


9311-10-1258-00S.SMK_16

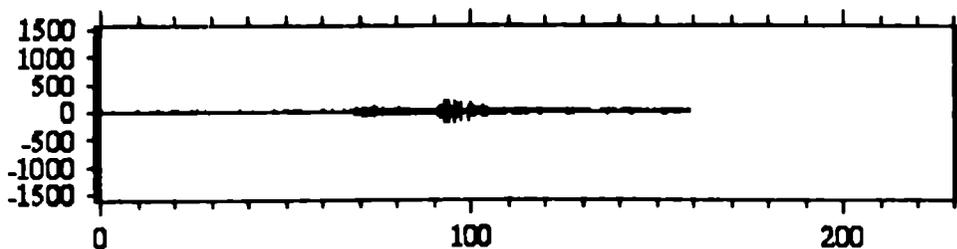


Tiempo[seg]

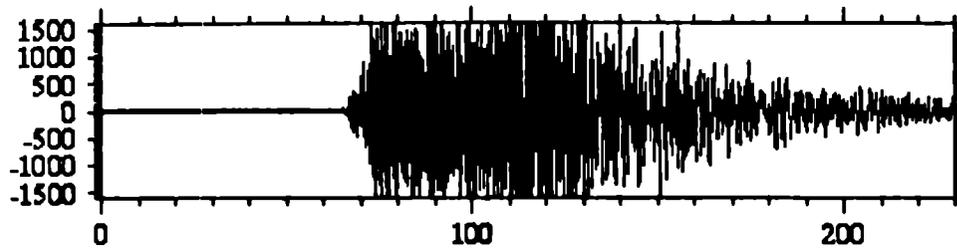
9311-11-1647-28S.SMK_16



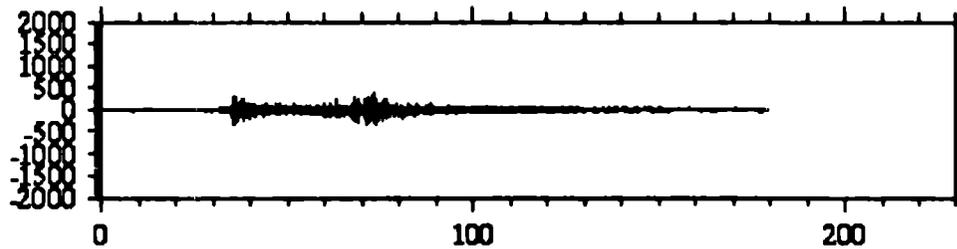
9311-12-0444-47S.SMK_16



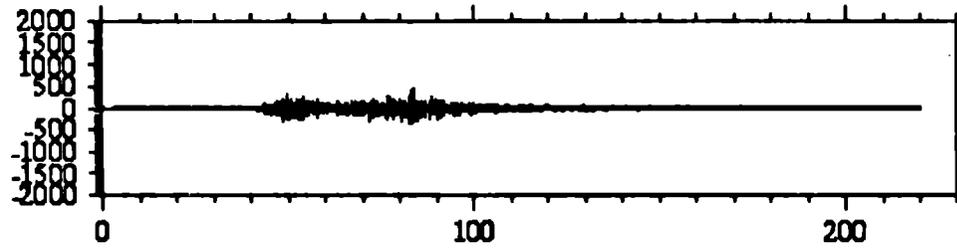
9311-13-0015-44S.SMK_16



9311-13-0114-34S.SMK_16

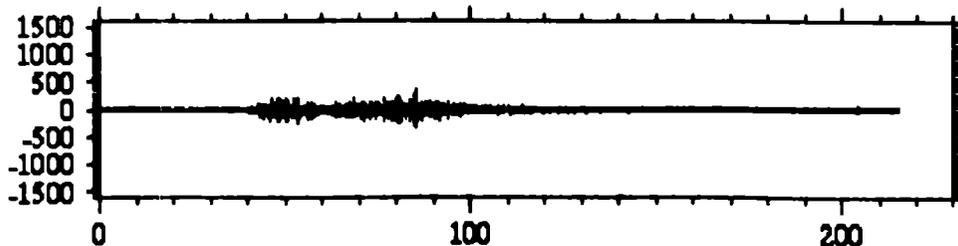


9311-13-0140-29S.SMK_16

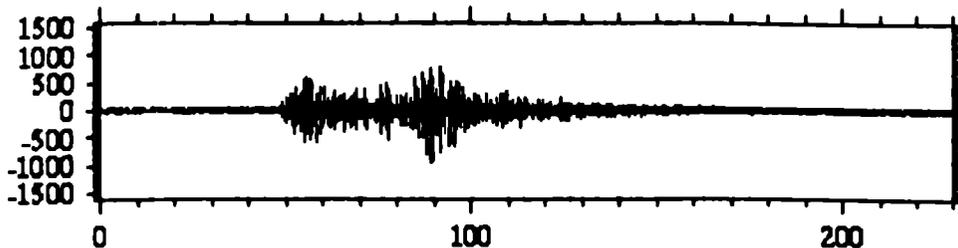


Tiempo[seg]

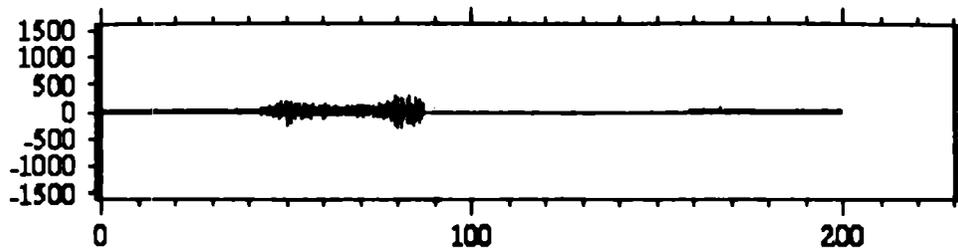
9311-13-0155-53S.SMX_16



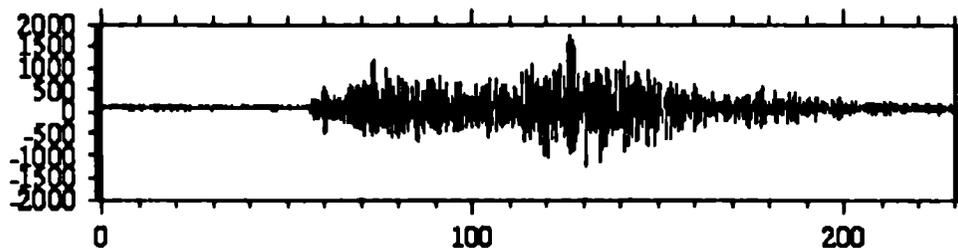
9311-13-0510-14S.SMX_16



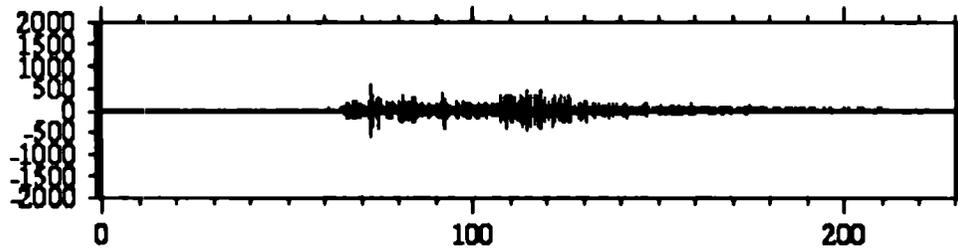
9311-13-0604-30S.SMX_16



9311-14-0318-49S.SMX_16

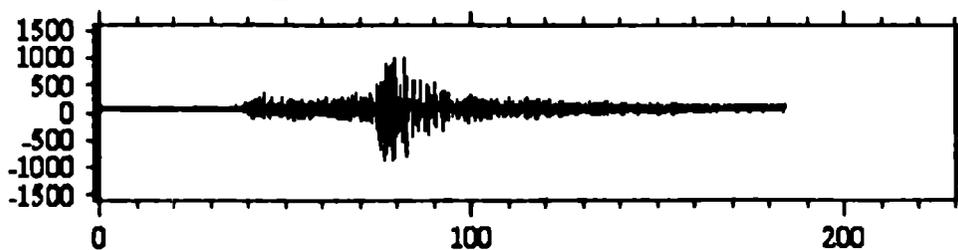


9311-14-1122-46S.SMX_16

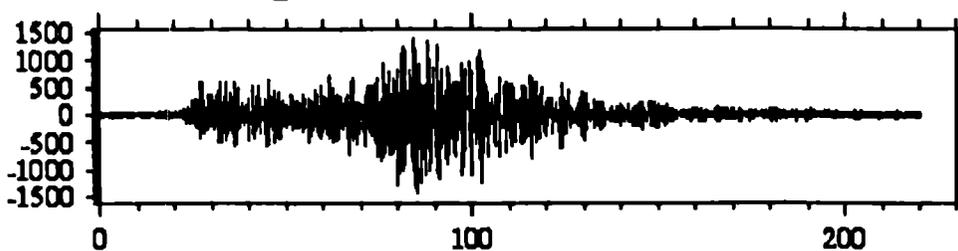


Tiempo[seg]

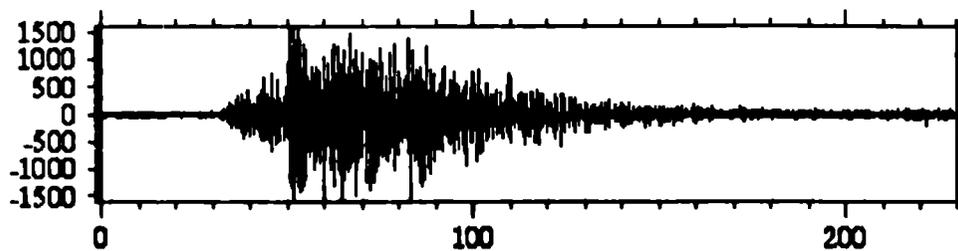
9312-01-1244-06S.SMX_16



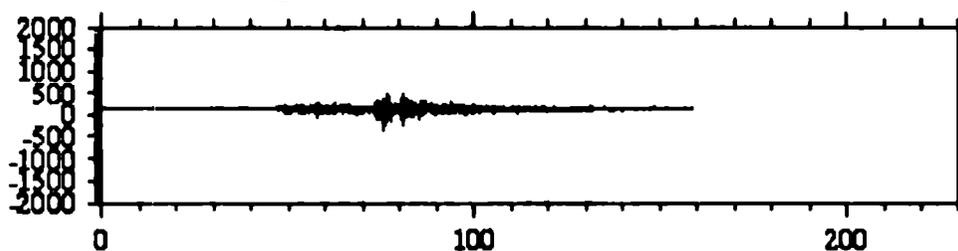
9312-02-1254-44S.SMX_16



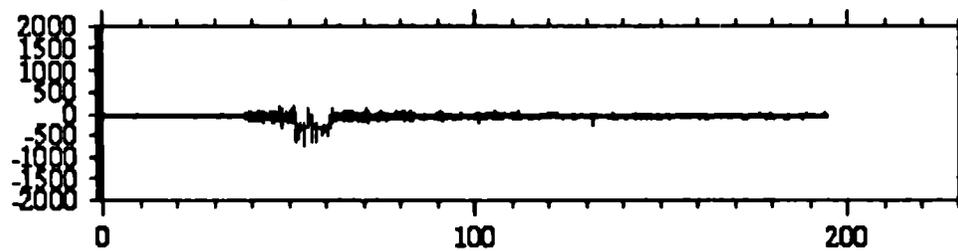
9312-03-1252-28S.SMX_16



9312-05-0932-21S.SMX_16

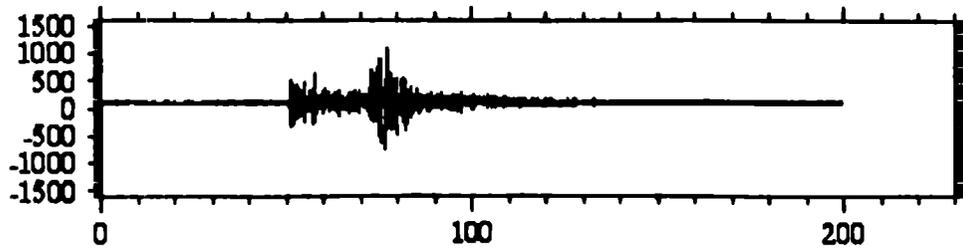


9312-06-0835-42S.SMX_16

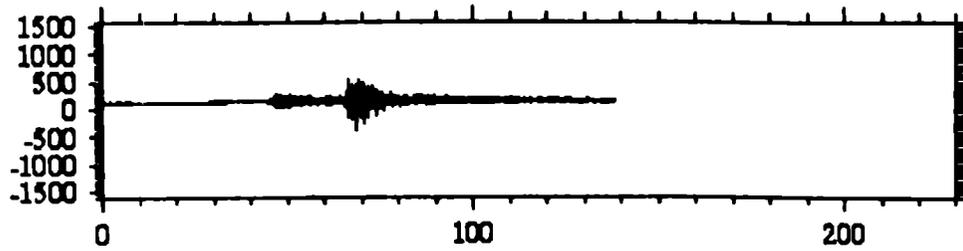


Tiempo[seg]

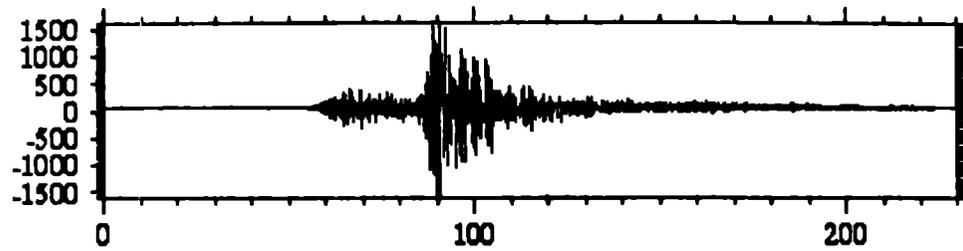
9312-01-1244-06S.SMK_16



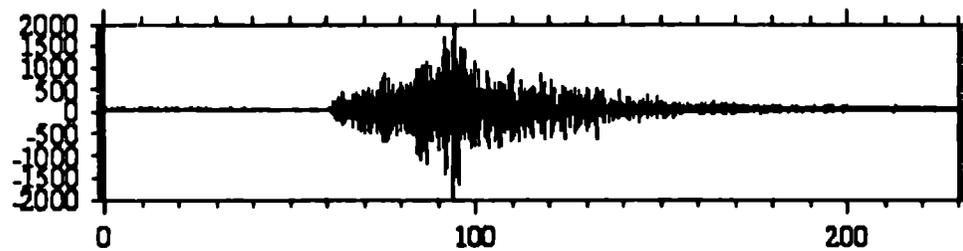
9312-06-1203-26S.SMK_16



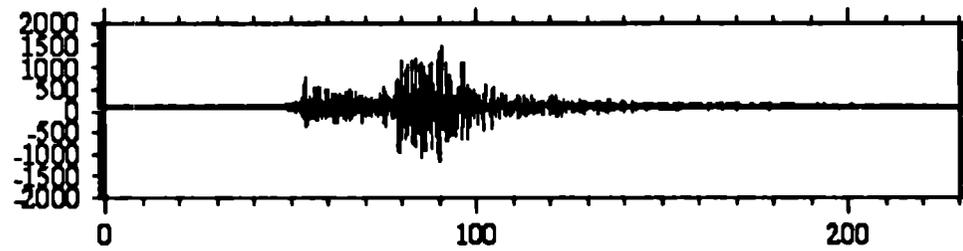
9312-07-1706-22S.SMK_16



9312-07-1844-08S.SMK_16

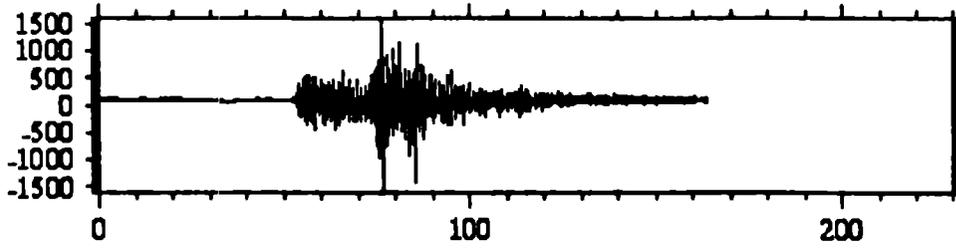


9312-08-1123-41S.SMK_16

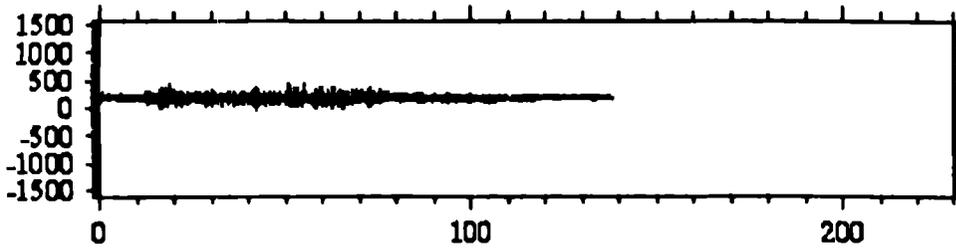


Tiempo[seg]

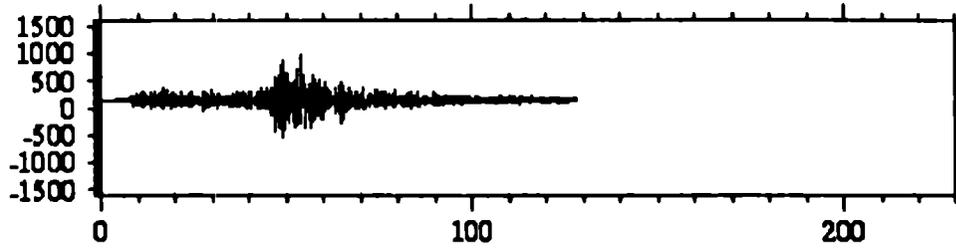
9312-08-1244-31S.SMK_16



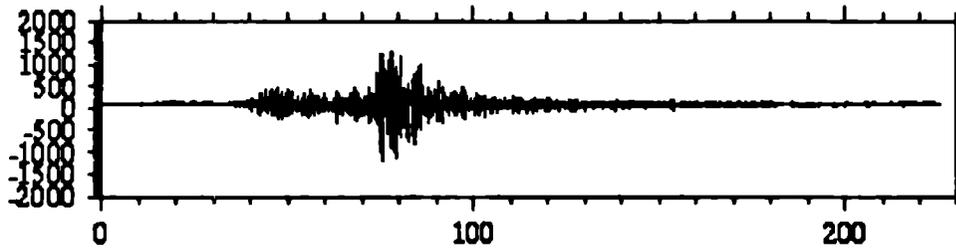
9312-09-0517-30S.SMK_16



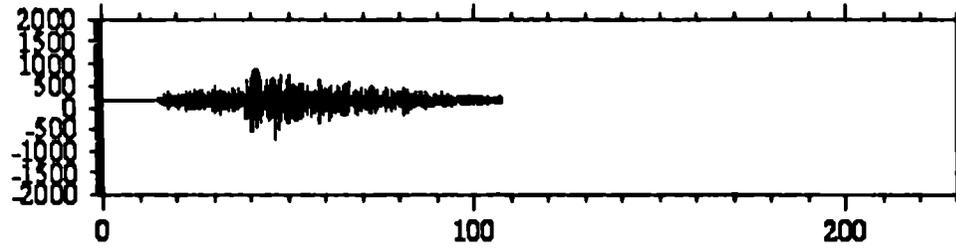
9312-11-202-08S.SMK_16



9312-14-0326-56S.SMK_16

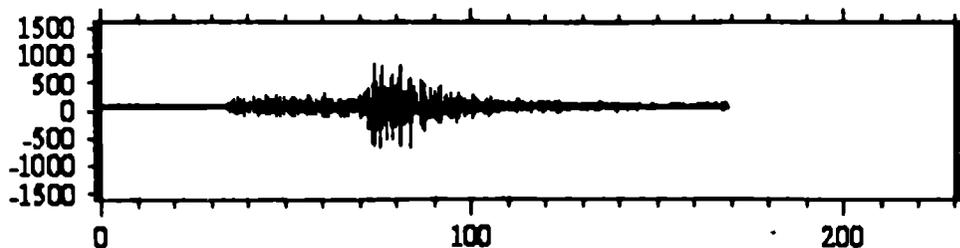


9312-15-0929-18S.SMK_16

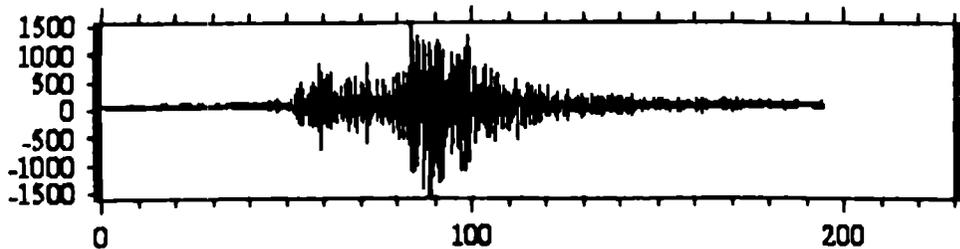


Tiempo[seg]

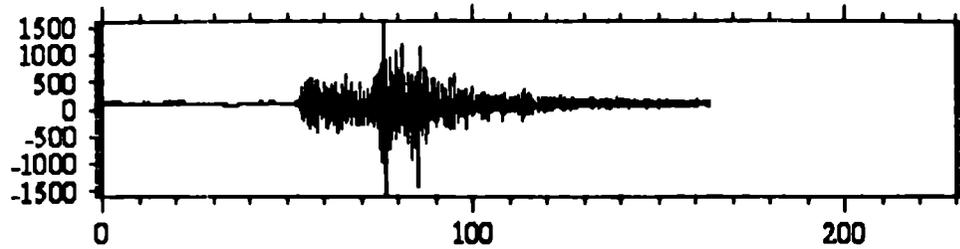
9312-15-0929-16S.SMX_16



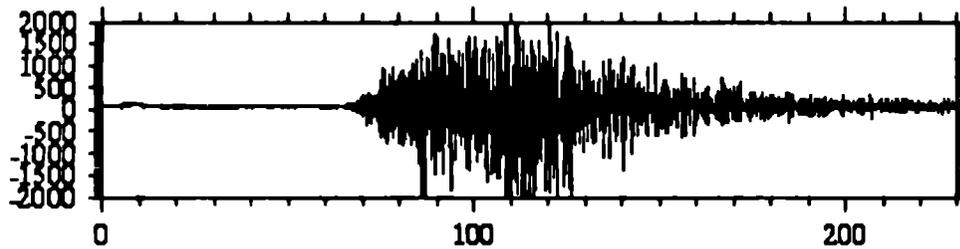
9312-16-1955-44S.SMX_16



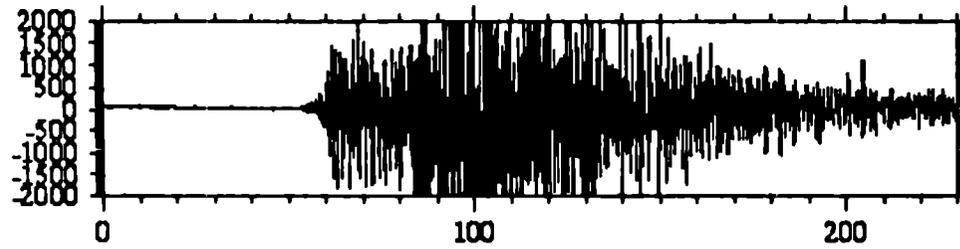
9312-19-0004-21S.SMX_16



9312-19-1653-40S.SMX_16

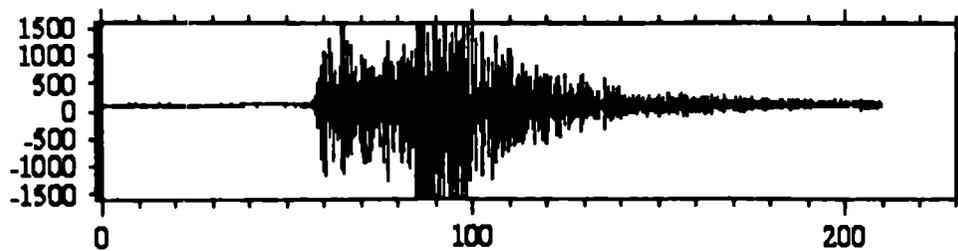


9312-19-1653-40S.SMX_16

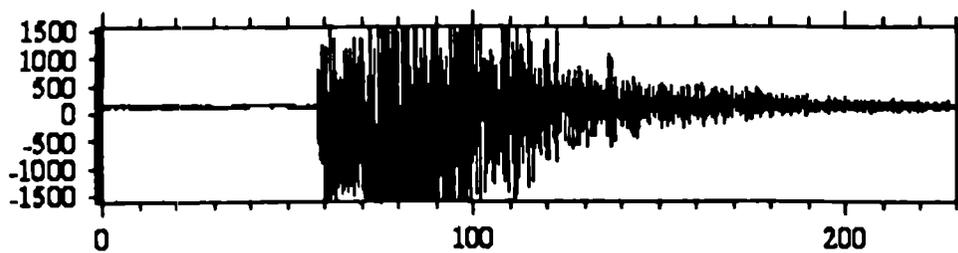


Tiempo[seg]

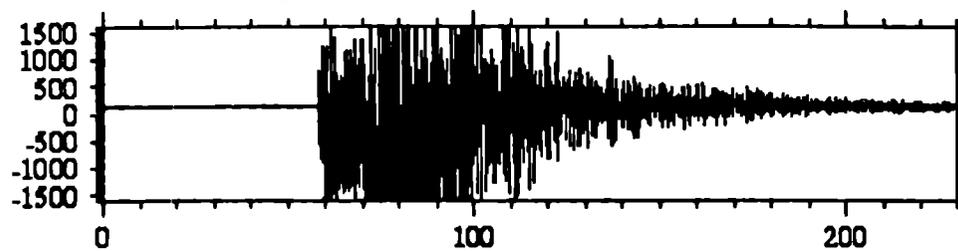
9312-22-0428-57S.SMK_16



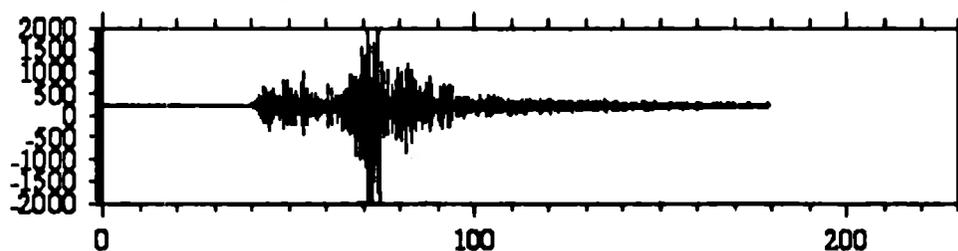
9312-27-0529-28S.SMK_16



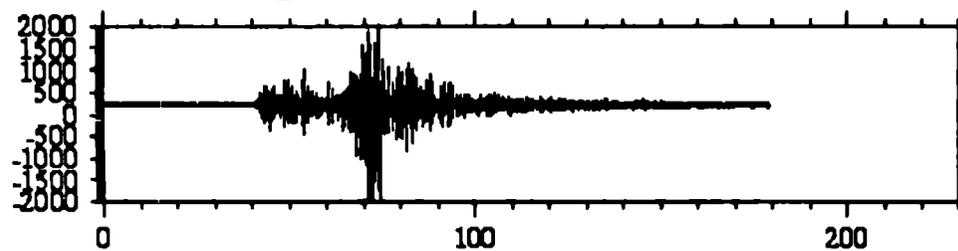
9312-30-0121-01S.SMK_16



9312-30-0222-44S.SMK_16



9312-30-0222-44S.SMK_16



Tiempo[seg]