

# 7. Variabilidad de los movimientos fuertes del suelo según el array «SMART-1»

C. S. OLIVEIRA

Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil. Lisboa

## 1. INTRODUCCION

El estudio de movimientos fuertes del suelo adquirió una nueva dimensión cuando se desarrollaron redes (arrays) de acelerómetros de gran densidad. Estos despliegues, que incluyen el Despliegue de Movimientos Fuertes en Taiwan (Strong Motion Array in Taiwan, SMART-1), permiten por primera vez, entre otras características, la determinación de la correlación espacial del movimiento del suelo para la aceleración y el desplazamiento, la evaluación de la variabilidad del movimiento dentro de un área pequeña y el cálculo de las deformaciones del suelo y de los componentes torsional y rotacional del movimiento del suelo. Estas características son de gran importancia en la definición del movimiento del suelo no sólo en estructuras comunes, sino especialmente para grandes estructuras extensas tales como tuberías de distribución subterráneas, túneles, grandes puentes y presas, y para estructuras altas, tales como edificios altos, torres y chimeneas.

Para ilustrar las características más importantes de los registros de movimiento del suelo, hemos seleccionado los eventos registrados en el array SMART-1 (Bolt *et al.*, 1982 y Oliveira *et al.*, 1985) que cubren las principales situaciones tectónicas y morfológicas que interesan en aplicaciones de ingeniería.

Mecanismos focales de fallas inversa y de desgarre con algunas componente inversa; magnitudes  $M$  en el rango 3.2 a 7.2; distancias epicentrales entre 3 y 200 km; y profundidades entre 4 y 116 km son las características importantes de estos terremotos. Al menos un evento tiene un mecanismo de ruptura de falla propagante; algunos eventos tienen su foco justo debajo del array, causando movimiento del campo cercano asociado con fallas pequeñas y superficiales.

Este trabajo se centra en el significado de las variaciones espaciales de los movimientos sísmicos del suelo registrados en el array SMART-1. Después de presentar los conceptos más importantes de la representación de los movimientos fuertes del suelo y de describir las principales características del array y de los terremotos registrados, utilizaremos los datos del SMART-1 para ilustrar todos estos aspectos significativos en ingeniería tales como variabilidad del movimiento dentro de un área pequeña, componentes torsional y rotacional del movimiento del suelo, deformaciones del terreno, y la importancia de llegadas múltiples (multiple input motion) a cimientos de base rígida.

En la presentación seguimos estrechamente algunas partes de los textos referidos en Oliveira, 1985 y Oliveira, 1987.

## 2. REPRESENTACION DEL MOVIMIENTO FUERTE DEL SUELO

Como el registro de cualquier instrumento de movimientos fuertes es el producto final de un mecanismo complejo de generación y propagación, la señal ha sido tratada como un proceso estocástico dependiente del tiempo obtenido por la superposición de llegadas aleatorias de diferentes ondas generadas en la fuente. Las primeras representaciones consideraron que el proceso era Gaussiano, estacionario y ergódico. La obtención de nuevos registros sísmicos, no obstante, permitió una mejora continua de los modelos introduciendo, sucesivamente, los conceptos de estacionaridad, no estacionaridad y procesos envolventes dependientes del tiempo.

Sin embargo, los registros sísmicos presentan algunas características deterministas comunes que reflejan el mecanismo de la fuente y la influencia de la trayectoria (Bolt, 1981). Estas corresponden a diferentes fases de llegada y no son tan fácilmente identificables como en los registros de telesismos. No obstante, en muchos registros de movimientos fuertes, es posible asignar ciertos trenes de ondas a las llegadas de los pulsos *P* y *S*. Estudios analíticos recientes de simulación de movimiento del suelo próximo a zonas de falla han mostrado la posibilidad de predecir el movimiento con gran éxito en la región espectral desde 1 a 2 Hz (McCann *et al.*, 1984). Otras muchas características, presentes en todos los acelerogramas, especialmente en el rango de las frecuencias más altas, no pueden ser asociadas con llegadas de ondas o cualesquiera otras propiedades vibratorias relativas a la propagación del fenómeno y hasta ahora, deberán ser consideradas como ruido aleatorio con ciertas propiedades. Se deben, esencialmente, a la combinación de perturbaciones múltiples del fenómeno simple, reverberación local, vibraciones transitorias, etc., y deberán superponerse al esqueleto básico de las llegadas de las principales fases.

La selección de movimientos fuertes en lugares próximos a las trazas de falla ha sido un problema difícil, debido a la complejidad de los fenómenos terrestres y la falta de datos fiables en el campo cercano. La

dispersión en las curvas empíricas de atenuación es muy grande y consecuentemente, los criterios de diseño basados en los valores superiores más altos pueden conducir a estimaciones altas poco razonables. Esto es particularmente relevante en la evaluación de movimientos fuertes con probabilidad de excedencia muy baja, como es el caso de centrales nucleares, presas y grandes puentes que pueden localizarse cerca de fallas activas.

## 2.1. Descripciones del Movimiento Sísmico del Suelo

El movimiento generado por el paso de ondas sísmicas en un punto (Figura 1) puede descomponerse en 6 componentes, tres de traslación  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$  y tres de rotación  $\theta_x$ ,  $\theta_y$ ,  $\theta_z$ . Los ejes de referencia son  $x$ ,  $y$ ,  $z$  y  $u$  puede representar bien aceleración o velocidad o desplazamiento. Las representaciones en el tiempo  $u(t)$  y en frecuencia  $U(\omega)$  (Figura 2) son la descripción completa del movimiento en un punto. Como el fenómeno ondulatorio es también función del espacio, necesitamos otras relaciones para definir la dependencia entre el movimiento registrado en cualquier número de sitios, 1, 2, ...,  $i$ , ...,  $j$ , próximos entre ellos.

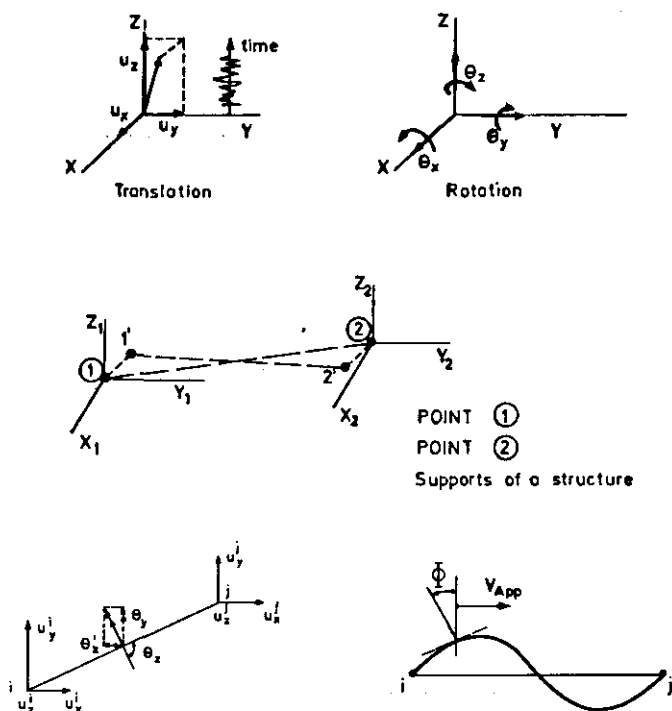


Figura 1.—Representación esquemática del movimiento del suelo.

Las representaciones en frecuencia están basadas esencialmente en el algoritmo Fast Fourier Transform (FFT), que calcula la transformada de Fourier discreta numérica de la señal de tiempo  $u(t)$ :

$$U(i\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \exp(-i\omega t) dt \quad [1]$$

La cantidad compleja  $U(i\omega)$  se representa, usualmente, por el espectro de amplitud y el de fase. El primero (Figura 2a) indica la diferencia entre las amplitudes de las componentes sinusoidales, y el segundo las fases entre sí. El espectro de las fases se ignora, generalmente, en las aplicaciones prácticas, pero es muy importante para estudiar la variabilidad del movimiento del suelo y puede jugar un papel muy importante en la simulación del movimiento sísmico. Otra representación en frecuencia es la función densidad de potencia espectral;  $S_o$  definida como

$$S_o(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\int_{-T/2}^{T/2} u(t) e^{-i\omega t} dt \cdot \int_{-T/2}^{T/2} u(t) e^{i\omega t} dt}{2\pi T} \quad [2]$$

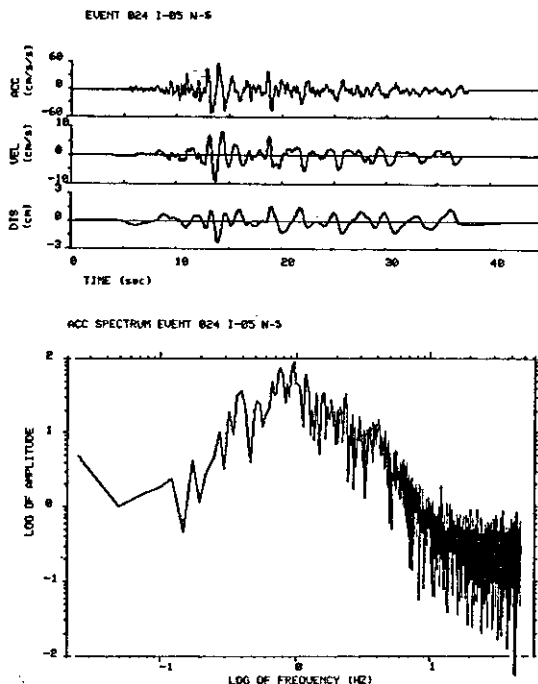


Figura 2.—Función temporal típica de la aceleración, la velocidad y el desplazamiento correspondientes a: a) Espectro de Amplitud de Fourier; b) Espectro de Respuesta.

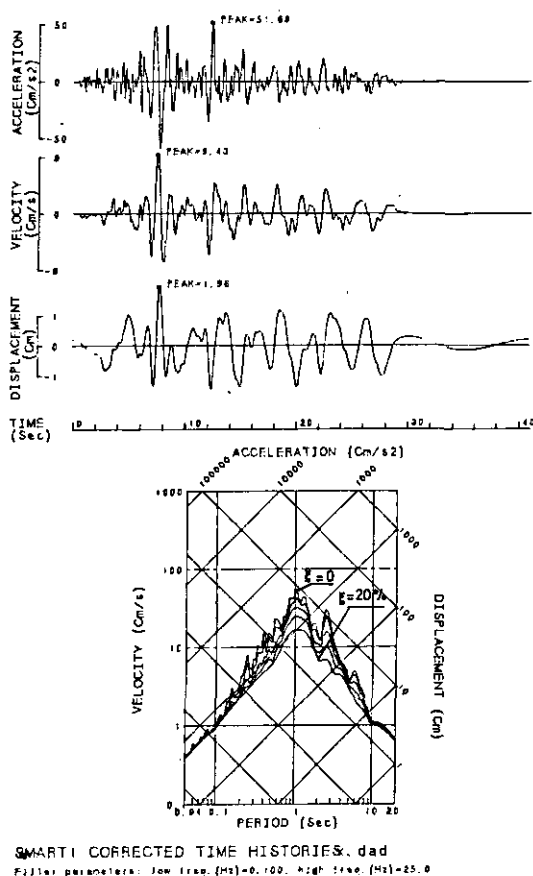


Figura 2 (Continuación).

$S_0$  es una medida de la distribución de las amplitudes a lo largo del dominio de frecuencias, y ésta relacionada, obviamente, con el espectro de amplitudes de Fourier. Se ha comprobado que  $S_0$  es muy importante en el estudio de respuestas de estructuras.

Uno debe ser consciente de las limitaciones, tanto en el campo teórico como numérico, de la aplicabilidad de las ecuaciones 1 y 2 (es decir, estacionaridad, existencia de límite), y de los errores introducidos por el algoritmo (Kanasewich, 1981). En algunos casos, otras técnicas de análisis han producido mejores resultados que la FFT. Este es el caso de los métodos de entropía (Barrodale *et al*, 1980) muy útiles para analizar señales cortas.

El concepto de espectro de respuesta (RS), introducido por Housner,  $S_v(\omega, \xi)$ , es otra representación en frecuencia del movimiento del suelo, que

ha sido utilizado con gran éxito.  $S_v(\omega, \xi)$  se define como la respuesta máxima de un sistema de un solo grado de libertad de masa unidad, frecuencia  $\omega_o$  y amortiguamiento  $\xi$ , cuando se le somete a un movimiento del suelo,  $u(t)$ , dado (Fig. 2b)

$$S_{pv}(\omega, \xi) = \max \left| \int_0^t u(r) \exp [\xi \omega (t-r)] \sin \omega_d (t-r) dr \right| \quad [3]$$

$$(\omega_d = \omega_o (1 - \xi^2)^{1/2}; \text{ para cuestiones prácticas } \omega_o \approx \omega)$$

Notar que  $S_{pv}$  es un *RS* de pseudo-velocidad (espectro de respuesta de pseudo-velocidad) ya que se obtiene a partir de espectro de respuesta de desplazamiento relativo verdadero multiplicado por  $\omega_d$ . El espectro de respuesta relativo verdadero tiene una expresión mucho más compleja, pero para amortiguamiento bajo y lejos de los largos periodos, ambas expresiones conducen a los mismos valores prácticamente. Una forma simple y elegante de representar el espectro de respuesta es mediante un gráfico logarítmico de cuatro entradas  $S_{pv}$  frente  $T_o$  o  $\omega$  en papel bilogarítmico (Figura 2b); las líneas a  $45^\circ$  representan valores constantes de pseudo-aceleración absoluta,  $S_{pa}$ , cuando la pendiente es 1 y desplazamientos constantes relativos  $S_d$  cuando la pendiente es  $-1$ . Puede demostrarse que los valores asintóticos del espectro de respuesta vienen dados por

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} S_d = \max |u(t)|$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} S_{pa} = \max |\ddot{u}(t)|$$

Debido a su simple significación física y su aplicabilidad inmediata al estudio de la respuesta de estructuras complejas a empujes sísmicos, el espectro de respuesta es, con mucho, la representación de movimiento sísmico del suelo más utilizada. En la siguiente sección veremos cómo relacionar los valores pico de movimiento del suelo con las características principales del espectro de respuesta a través del concepto de espectro de potencia.

Varias representaciones del movimiento del suelo intentan expresar la «energía» total contenida en el registro por un parámetro univaluado. Esto puede obtenerse integrando el espectro de potencia  $S_o$  (valor cuadrático medio), o el espectro de respuesta  $S_{pv}$ , sobre una banda de frecuencia ancha (Intensidad Arias *SI*)

$$SI = \int_{0.1}^{2.5} S_{pv}(\xi, T_o) dT_o \quad (T_o \text{ período en segundo}) \quad [4]$$

o utilizando el concepto de valor eficaz (raíz de la media cuadrática) de la aceleración o de la velocidad, definido como

$$RMS^2 = \int_0^T u(t)^2 dt^T \quad [5]$$

El valor eficaz de la aceleración ha sido utilizado para medir la cantidad de trabajo producida por el paso de ciclos sísmicos por diferentes sistemas de un grado de libertad con masa unidad y frecuencias que abarca desde 0 a infinito; el valor eficaz de la velocidad está directamente relacionada con el flujo de energía de las ondas.

La idea clara de que, en la mayoría de los casos, el movimiento del suelo es un proceso no estacionario, ha conducido a refinamientos en el tratamiento de los datos. Se han considerado los siguientes modelos.

- Ruido blanco estacionario.
- Ruido blanco de banda limitada.
- Ruido blanco modulado en el tiempo (con parámetros de filtro constantes).
- Ruido blanco filtrado (con parámetros de filtro dependientes del tiempo).
- Forma arbitraria (en tiempo y en frecuencia).

Una ventana de tiempo, o técnica de la ventana móvil, utilizada antes de aplicar la transformada de Fourier permite el estudio de la evolución del contenido de frecuencias con el tiempo de acuerdo con la representación

$$\ddot{u}(t) = \sum_k^m \zeta_k(t) \dot{b}_k(t) \quad [6]$$

donde  $\zeta(t)$  es una función de intensidad determinista y  $\dot{b}(t)$  la parte estocástica estacionaria; la suma tiene lugar en  $m$  diferentes ventanas de tiempo, cada una con su propio contenido en frecuencias.

La extensión del análisis del movimiento del suelo en 1 componente a los casos de 2 componentes horizontales y 3 componentes, implica el establecimiento de funciones de densidad espectral cruzada o la correspondientes funciones de correlación cruzada (Penzien, 1985).

Para un proceso aleatorio estacionario, el espectro de potencia cruzado de cualesquiera dos componentes  $\ddot{u}_i, \ddot{u}_j$  es

$$S_{ij}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\left[ \int_{-T/2}^{T/2} \ddot{u}_i(t) e^{-i\omega t} dt \cdot \int_{-T/2}^{T/2} \ddot{u}_j(t) e^{i\omega t} dt \right]}{2\pi T} \quad [7]$$

y la correlación cruzada

$$R_{ij}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \ddot{u}_i(t) \ddot{u}_j(t + \tau) dt \quad [8]$$

Puede demostrarse que:

$$R_{ij}(\tau) \Rightarrow FFT^{-1} (S_{ij}(i\omega)) \quad [9]$$

Si  $i=j$  tenemos la función de autocorrelación  $R(\tau)$  y espectro de potencia  $S(\omega)$ . Debido a la naturaleza del proceso  $S_{ii}(\omega)$  es una cantidad real,  $Re(S_{ij}) = Re(S_{ji})$  e  $Im(S_{ij}) = -Im(S_{ji})$ . Esto significa que  $S_{ij}(i\omega)$  es una matriz hermitica.

La correlación  $R_{ij}$  conduce al concepto de coeficiente de correlación  $\rho_{ij}$  entre dos señales

$$\rho_{ij}(\tau) = \frac{R_{ij}(\tau)}{\sqrt{R_{ii}(\tau)} \sqrt{R_{jj}(\tau)}} \quad [10]$$

mientras  $S_{ij}$  conduce al concepto de función de coherencia  $\gamma_{ij}$

$$\gamma_{ij}(\omega) = \frac{|S_{ij}(i\omega)|^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{S_{ii}(\omega)} \sqrt{S_{jj}(\omega)}} \quad [11]$$

Penzien *et al.* (1976) han demostrado que los registros de movimiento del suelo disponibles confirman la idea de que las componentes del modelo en 3-D no están estadísticamente relacionados si el sistema de referencia coincide con los ejes principales del movimiento del suelo. Estos están definidos por los vectores propios de la matriz de correlación

$$R_{ij}(\gamma) = E [\dot{b}_i(t) \dot{b}_j(t + \gamma)] \quad [12]$$

donde  $\dot{b}_i(t)$  está dado por la ecuación (6) cuando  $m=1$

$$\ddot{u}(t) = \zeta(t) \ddot{b}_i(t) \quad i = x, y, z \quad [13]$$

Bajo ciertas condiciones, que son observadas en aplicaciones prácticas,  $R_{ij}$  tiene el mismo vector propio que la matriz de correlación de la función del tiempo original. En términos físicos, Penzien *et al.* (1976) encontraron que el mayor eje principal del movimiento del suelo fluctúa durante el movimiento alrededor de la dirección hacia el epicentro y el menor eje principal permanece vertical; la proporción entre las varianzas principales (valores propios de  $R_{ij}$ ) mayor y menor es aproximadamente 0.5, lo que está de



acuerdo con la proporción 2/3 entre los picos de la aceleración del suelo de los componentes vertical y horizontal. Esta conclusión, no obstante, no puede extenderse a casos más generales dependientes del tiempo como los definidos por la ec. (6), para los cuales las funciones pico envolventes coinciden. Volveremos sobre este tema posteriormente.

## 2.2. Parámetros de Primer Orden de Importancia

A pesar de que el movimiento del suelo requiere la especificación de los empujes (cargas) sísmicos en el dominio del tiempo y/o de la frecuencia, puede ser descrito de forma simplificada por los siguientes parámetros:

- Valores pico del movimiento del suelo aceleración (PGA), velocidad (PGV) y desplazamiento (PGD).
- Duración del movimiento, no hay una única definición de la duración; a grosso modo corresponde a la fase intensa de la sacudida y se mide, comúnmente, por la cantidad de tiempo para el cual las amplitudes del movimiento sobrepasan un cierto umbral, tomado como un valor estándar o como un porcentaje en la distribución estadística de amplitudes.

El estudio de los registros sísmicos, producidos en diferentes sitios durante diferentes terremotos han conducido a correlaciones estadísticas entre esos valores pico, valores pico y magnitud sísmicas y distancias fuente-emplazamiento. Estas correlaciones, no obstante, presentan gran dispersión.

La variabilidad de los registros de movimiento del suelo apuntan al uso de modelos estadísticos para su estudio y caracterización. Esto se puede llevar a cabo de dos maneras: 1) analizar una colección de datos en sus varios aspectos y obtener estimaciones estadísticas para sus principales parámetros; 2) definir «a priori» un modelo teórico cuyos parámetros ajusten a los datos observados. Un ejemplo del primer método se obtiene por superposición de RS a partir de diferentes formas de tiempo para determinar los valores medios, obtener los intervalos de confianza, suavizar los resultados, etc. El método estocástico como segunda aproximación, considera que cada función del tiempo es representativa de una familia de realizaciones (series temporales que pueden ser generadas) con una función densidad espectral de potencia dada. Ambos tratamientos deberían llegar a resultados similares si es grande el número de funciones del tiempo (registros) para la misma fuente y condiciones de trayectoria.

El tratamiento estocástico tiene la gran ventaja de ser capaz de predecir, bajo ciertas condiciones, las distribuciones de máximos y valores pico. También es posible obtener la distribución de los picos 2.º, 3.º, ... La observación estadística de los valores pico en un acelerograma dado,

muestra que se ajustan a distribuciones exponencial, Rayleigh o Weibull (clase de tipo Extremo I, Borges *et al.*, 1971).

Utilizando la teoría de distribuciones de orden (tipo I) los valores medios de cualquier pico  $X_k$  viene dado por

$$\frac{X_k}{X_1} = \left[ \frac{-\ln(k/(N+1))}{\ln(N+1)} \right]^n \quad \begin{array}{ll} n=1 & \text{Exponencial} \\ n=2 & \text{Weibull} \\ n=1/2 & \text{Rayleigh} \end{array} \quad [14]$$

donde  $N$  es el número estándar de picos (De Herrera *et al.*, 1982) definido como dos veces el número de picos de la mediana exponencial superior para la longitud total del registro. Como ejemplo tomado de datos de suelo blando en California, el tercer pico tienen un promedio por debajo del 1.º de 1.30 para la distribución exponencial, 1.52 para la de Weibull y 1.18 para la Rayleigh.

La distribución de los picos por debajo del primero es muy importante para establecer reglas para determinar el pico de aceleración efectiva, dando alguna idea de cómo se distribuyen los picos altos. El pico más alto puede no ser significativo para propósitos de ingeniería, especialmente si es un valor aislado asociado a un pulso de alta frecuencia. Los picos segundos y tercero serían más apropiados. De acuerdo con los valores previos esperamos un promedio del 30 % del pico de aceleración (PGA) para el tercer pico.

Este concepto es también interesante para estudiar los parámetros de la fuente, ya que parece haber alguna correlación entre el tipo de distribución y el efecto directividad como refiere Azevedo (1984).

### 2.3. Parámetros de Segundo Orden de Importancia

Directamente asociado con el fenómeno de propagación de ondas están la dependencia espacial de los movimientos del suelo registrados en dos sitios diferentes y los componentes rotacionales. Aunque la teoría de la elasticidad estudia estos conceptos, sólo con el desarrollo reciente de redes de acelerógrafos de movimientos fuertes ha sido posible el progreso en este campo. Los resultados son de gran importancia para la definición de la entrada sísmica (Figura 3) en: 1) estructuras extensas tales como grandes puentes, presas, que están sujetos a movimientos diferenciales en los cimientos; 2) estructuras con cimientos de base rígida, como algunas plantas nucleares; y 3) estructuras altas, tales como rascacielos, torres y chimeneas, que son muy sensibles a los componentes rotacionales (torsión y balance).

El modelo simplificado de propagación de ondas considera un tren de ondas monocromática predominante con una velocidad aparente dada,  $V_{app}$  (Figura 1). La apariencia de la forma de las ondas, medida a través del

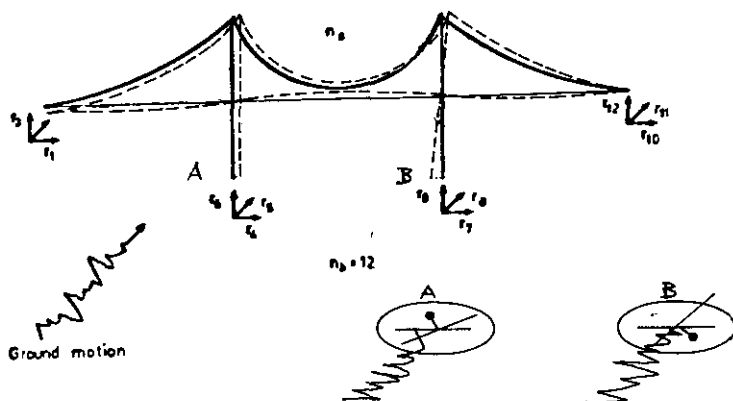


Figura 3.—Datos de entrada para el análisis dinámico de estructuras.

coeficiente de coherencia de correlación cruzada definida por las ecuaciones 10 y 11, donde los índices  $i$  y  $j$  representan una componente dada, registrada en las estaciones  $i$  y  $j$ , se atenúa con la distancia de separación entre estaciones. Una aproximación más realista considera el espectro completo de frecuencias descompuesto en varias bandas de frecuencia y asocia una velocidad aparente y una pérdida de coherencia a cada uno de ellos. Como veremos más adelante, los despliegues de movimientos fuertes juegan un papel importante en esta materia.

### 2.3.1. Componentes Rotacionales

Consideraremos aquí la aproximación simplificada. Siguiendo a Newmark (1964), podemos calcular los componentes rotacionales producidos por una onda monocromática como

$$\Phi(t) = \frac{\frac{du}{dt}}{V_{app}} \quad [15]$$

donde  $\frac{du}{dt}$  es la velocidad del suelo en la dirección perpendicular a la propagación. Utilizando esta formulación simple, los espectros de respuesta para rotación pueden derivarse del espectro de respuesta para aceleración como

$$\text{máx}|\Phi| = \frac{\text{máx} \left| \frac{d^3u}{dt^3} \right|}{V_{app}} \quad [16]$$

Las líneas de igual aceleración angular en la representación de respuesta trilogarítmica corresponden a pendiente de  $\omega^2$ .

Veremos más adelante que el problema, basado en datos de los tres componentes de la traslación medidas en estaciones próximas (todavía no se han hecho medidas directas de la torsión) es mucho más complejo de lo que se esperaba de los modelos simplificados previos.

### 2.3.2. *Correlaciones Espaciales del Movimiento del Suelo*

El análisis dinámico de una estructura sujeta a una excitación multi-soporte, requiere el conocimiento de la aceleración y el desplazamiento en todos los  $n$  puntos soporte como una función del tiempo (Oliveira *et al.*, 1985), (Figura 3). Esto implica el desarrollo de una matriz  $(3n) \times (3n)$  de la función densidad espectral de potencial cruzada  $S_{ij}(i\omega)$  considerando sólo los componentes de la aceleración y tomando para los desplazamientos

$$S_u(i\omega) = \frac{\ddot{S}u(i\omega)}{\omega^4} \quad [17]$$

El tratamiento es similar al referido en relación con el análisis de componentes. Volveremos sobre el tema más tarde. Pero otra vez bajo la hipótesis de una onda monocromática, es posible obtener la atenuación espacial de la función densidad espectral de potencia cruzada y definir el rotacional de la función densidad espectral de potencia (Duarte, 1984).

## 3. DESCRIPCION DEL ARRAY (DESPLIEGUE) SMART-1 Y EVENTOS SISMICOS

### 3.1. **Geometría del Array y de la Región Local**

El array (despliegue) de movimientos fuertes de Taiwan, SMART-1, está localizado en el extremo noreste de Taiwan, cerca de la ciudad de Lotung. Su instalación comenzó en septiembre de 1980 y se completó en agosto de 1982. En septiembre de 1985, habían sido registrados, en este array, 35 eventos, Tabla I, produciendo registros con aceleraciones pico, PGA, entre 0.01 g y 0.250 g, Tabla II. Aproximadamente 2.200 registros están disponibles. El array consta de 37 acelerómetros triaxiales equilibrados, desplegados en tres anillos circulares concéntricos de radios 200 m, 1.000 m y 2.000 m y uno en el centro (Figura 4); cada uno de los anillos con 12 estaciones equiespaciadas, numeradas de 1 a 12 en el sentido de las agujas del reloj y nombradas I (interior) M (medio) y O (exterior), respectivamente; la estación del centro es C-00. La distancia entre pares de estaciones varía desde un mínimo de aproximadamente 105 m a un máximo de 4.000 m.

TABLA 1  
Terremotos registrados por el array SMART-1.

Sismo	Data	Hora	Magni- tude	Dist.Epi- central	Profun- didade	Azi- mute
1	18/10/80	00:08:22.90	5.8	45.0	8.2	166.5
2	14/11/80	13:37:04.00	5.9	10.0	62.1	164.2
3	14/11/80	13:38:15.80	5.6	12.5	59.3	152.1
4	24/01/81	14:10:31.70	5.8	87.5	43.0	181.7
5	29/01/81	04:51:36.00	6.9	30.0	11.1	153.8
6	27/02/81	02:27:33.90	5.8	17.2	76.6	140.0
7	02/03/81	12:13:46.50	6.9	192.6	9.7	190.6
8	10/03/81	08:24:51.20	4.4	7.0	7.1	15.4
9	22/03/81	21:25:32.50	3.8	9.7	11.2	30.9
10	03/05/81	19:19:51.30	4.3	21.5	68.5	82.4
11	01/06/81	11:53:44.20	5.3	32.5	1.5	1165.5
12	20/08/81	19:03:28.10	4.7	1.8	0.1	286.7
13	20/08/81	20:55:06.55	3.9	4.3	0.3	23.1
14	30/08/81	18:54:53.58	5.0	23.0	0.2	180.0
15	05/10/81	13:24:30.52	3.4	2.7	3.6	219.2
16	23/01/82	14:10:39.84	6.6	85.1	3.3	189.2
17	21/02/82	06:04:37.77	4.5	11.5	0.8	36.0
18	28/02/82	13:23:32.07	4.9	8.0	10.0	39.3
19	01/04/82	04:50:02.80	4.9	23.0	8.0	153.8
20	17/12/82	02:43:01.40	6.9	116.6	27.8	105.7
21	26/04/83	15:26:38.40	6.6	115.8	97.4	96.5
22	10/05/83	00:15:03.77	6.3	35.4	1.2	227.5
23	21/06/83	14:48:03.47	6.8	119.2	14.8	135.9
24	24/06/83	09:06:42.95	7.3	115.4	25.0	131.6
25	21/09/83	19:20:40.73	7.1	98.8	18.0	145.6
26	23/02/84	12:15:28.13	5.3	5.7	58.8	162.9
27	28/03/84	09:11:15.56	6.5	135.4	10.3	130.3
28	18/04/84	01:34:18.27	5.3	50.7	5.9	74.6
29	23/04/84	22:35:04.03	5.3	36.0	8.7	69.4
30	29/12/84	01:07:02.60	5.9	21.9	60.1	65.7
31	09/03/85	19:51:00.40	5.4	48.4	4.0	78.6
32	12/06/85	13:23:13.30	5.5	48.2	5.3	101.1
33	12/06/85	17:22:50.48	6.3	45.3	3.3	104.3
34	05/08/85	13:00:38.98	5.9	32.9	6.5	155.8
35	11/08/85	00:21:32.90	5.2	7.4	11.3	42.9

En junio de 1983 se añadieron al array las estaciones E-01 y E-02 localizados, respectivamente a 2.8 y 4.8 km al sur de C-00. Con excepción de esta última estación, que está instalada sobre roca, todas las demás están situados en la superficie de aluvión relativamente llana, con elevaciones que van desde 2.4 m a 18.1 m de un lado a otro del array. Para una descripción más completa de las coordenadas de la estación e instrumentación ver Abrahamson (1985).

TABLA 2

Aceleración pico del suelo (PGA-cm/s<sup>2</sup>) para todas las estaciones y todos los eventos (componente NS).

EVENTS																																				
Est	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	
E00	10	51	51	-	114	-	-	31	17	-	-	36	36	30	12	20	26	33	21	42	-	51	29	40	29	20	-	-	-	35	70	53	53	23	136	
E01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12	17	17	35	24	-	-	23	40	-	55	25	55	35	22	18	22	35	49	41	73	73	-	77		
E02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	14	-	40	14	19	15	23	26	46	19	44	-	-	32	-	20	21	35	35	29	62	62	22	50	
E03	-	-	48	-	22	-	-	-	-	-	-	-	-	13	-	24	27	22	42	-	42	21	52	27	-	-	22	31	28	40	52	-	-	63		
E04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21	21	26	-	-	-	32	-	35	-	32	-	52	26	-	-	-	37	46	64	64	25	102		
E05	12	-	30	-	78	-	-	19	-	8	-	-	-	28	-	-	24	33	-	35	23	55	-	-	-	-	20	24	24	37	45	45	15	70		
E06	-	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	15	24	-	-	24	15	27	-	31	21	53	30	-	-	14	25	24	29	37	-	-	81		
E07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	15	9	19	-	-	26	-	27	17	-	27	-	-	13	20	-	22	37	-	-	70		
E08	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	27	17	17	22	-	17	33	-	36	22	64	34	-	-	16	24	25	26	40	-	-	102	
E09	19	-	-	-	-	-	-	20	14	-	-	20	20	25	10	15	-	33	21	34	-	36	-	-	-	-	-	-	-	35	40	-	24	59		
E10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	21	21	-	8	-	22	25	29	31	-	45	21	45	31	-	21	34	33	59	-	-	-		
E11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	16	-	16	-	-	22	20	33	-	32	19	50	28	-	20	16	22	27	41	42	42	19	61	
E12	15	-	-	-	112	-	-	27	18	6	-	14	-	21	12	-	22	37	22	41	20	39	24	50	33	-	-	27	37	38	31	40	40	20	90	
E01	24	-	-	-	117	-	-	-	15	-	-	-	-	16	50	-	-	32	27	32	-	52	-	65	40	-	-	-	-	-	46	-	-	35		
E02	-	48	80	-	121	-	-	18	-	19	-	19	19	44	40	20	27	35	31	55	25	57	37	55	37	47	-	25	45	31	45	54	94	23	58	
E03	-	-	41	-	121	-	-	15	-	-	-	27	27	16	11	-	-	-	39	-	35	22	51	29	-	-	22	32	37	30	50	-	24	91		
E04	18	40	40	9	132	12	25	14	-	-	-	31	31	33	14	16	-	52	19	45	15	45	47	27	13	16	28	37	45	44	100	100	38	81		
E05	13	38	38	-	102	9	6	13	7	-	-	19	-	36	-	-	-	24	-	47	-	34	23	51	31	-	-	26	21	24	40	49	49	-	49	
E06	14	-	42	-	98	-	-	-	-	-	-	-	-	42	-	-	-	30	16	35	-	30	31	42	-	-	28	29	32	30	64	64	17	31		
E07	12	-	-	-	109	-	-	-	-	-	17	12	-	35	20	18	-	25	20	44	-	50	24	42	35	-	-	27	44	39	47	47	-	-		
E08	19	38	36	-	105	10	-	10	-	12	15	7	-	35	12	14	-	24	37	-	34	-	42	31	-	-	23	-	20	31	16	-	-	70		
E09	-	30	30	-	75	-	-	11	-	-	-	13	-	19	7	-	-	34	-	29	-	42	-	37	-	-	15	23	-	28	37	-	-	59		
E10	13	52	52	-	124	8	-	15	13	11	9	-	-	44	27	-	-	27	41	-	55	21	45	36	-	-	-	22	28	44	-	34	30			
E11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19	44	-	17	29	16	40	-	49	-	41	37	-	17	27	-	56	72	72	-	59		
E12	20	-	37	-	153	-	-	-	10	-	12	-	19	22	-	-	-	24	21	-	17	47	-	47	37	-	-	31	44	31	35	83	83	24	40	
E01	-	-	-	-	115	-	-	23	-	-	-	-	-	16	20	-	-	29	42	-	47	25	47	27	-	14	-	26	37	49	49	14	63			
E02	-	-	-	-	9	249	9	11	16	-	-	-	18	16	16	-	-	33	26	-	17	52	34	50	35	25	-	17	36	33	32	39	-	20	36	
E03	-	70	70	-	135	10	-	19	18	-	-	15	-	27	15	19	-	25	17	44	-	41	24	54	38	-	17	20	32	45	29	30	-	22	43	
E04	-	-	-	-	114	-	-	35	20	18	10	36	-	-	-	-	-	93	21	61	16	-	-	-	30	24	20	-	-	40	41	41	29	116		
E05	14	74	74	-	118	12	-	11	10	-	-	-	-	24	-	-	-	21	-	40	-	34	-	43	28	26	-	21	30	34	30	40	-	-	36	
E06	-	-	-	-	105	10	5	11	13	-	-	-	-	33	-	-	-	15	27	-	15	32	30	42	-	15	14	53	38	35	43	30	60	18	38	
E07	-	-	-	-	91	9	-	-	-	-	-	20	-	15	10	-	-	-	44	-	42	-	47	27	-	-	29	51	37	34	47	-	-	37		
E08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	-	20	-	-	-	34	32	-	25	52	-	-	35	19	12	33	22	53	49	37	-	28	42	
E09	10	40	40	-	95	7	-	27	19	-	-	23	23	-	18	-	-	32	25	34	16	47	21	37	22	-	-	16	47	33	33	-	-	22	85	
E10	-	-	-	-	115	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	-	-	23	36	-	43	20	32	24	-	-	-	29	27	24	57	-	-	16	43	
E11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	29	-	-	-	40	17	-	-	-	-	-	-	-	30	23	15	15	25	29	40	-	45
E12	16	94	34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17	24	-	-	-	45	-	35	-	42	23	-	-	15	25	27	17	25	-	16	32		
E01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
E02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Mean	18	42	47	9	117	10	7	19	15	12	12	20	23	25	19	12	22	33	23	40	18	43	24	49	31	24	17	23	33	34	38	50	81	22	62	
Std	4	16	16	0	35	1	3	7	13	4	2	7	6	9	11	2	4	16	4	8	3	10	5	8	5	9	2	9	10	12	11	17	16	5	25	

El SMART-1 está situado en un valle aluvial reciente, cerca de la desembocadura del río Lan-yang. El valle tiene unos 15 km de ancho y 8 km de largo, con una forma triangular. El nivel freático es muy alto, casi en la superficie del suelo. La estructura geológica no es todavía bien conocida, pero estudios recientes indican que el aluvión está formado por 15-20 m de espesor de grava recubriendo un limo arcilloso gris. Este relleno está asentado sobre un complejo Eoceno-Mioceno de arcillas y areniscas que constituye el lecho de la cuenca y es cortado por fallas inversas casi verticales buzando hacia el sur. Mientras que las dos capas aluviales superiores tienen espesor casi constante en todo el array, las capas del Mioceno muestran el engrosamiento del valle en la dirección S-N. Tomando velocidades de ondas de cizalla a partir de las medidas de ondas *P* obtenidas de perfiles sísmicos (Weng Yeh, 1983), una estimación burda del

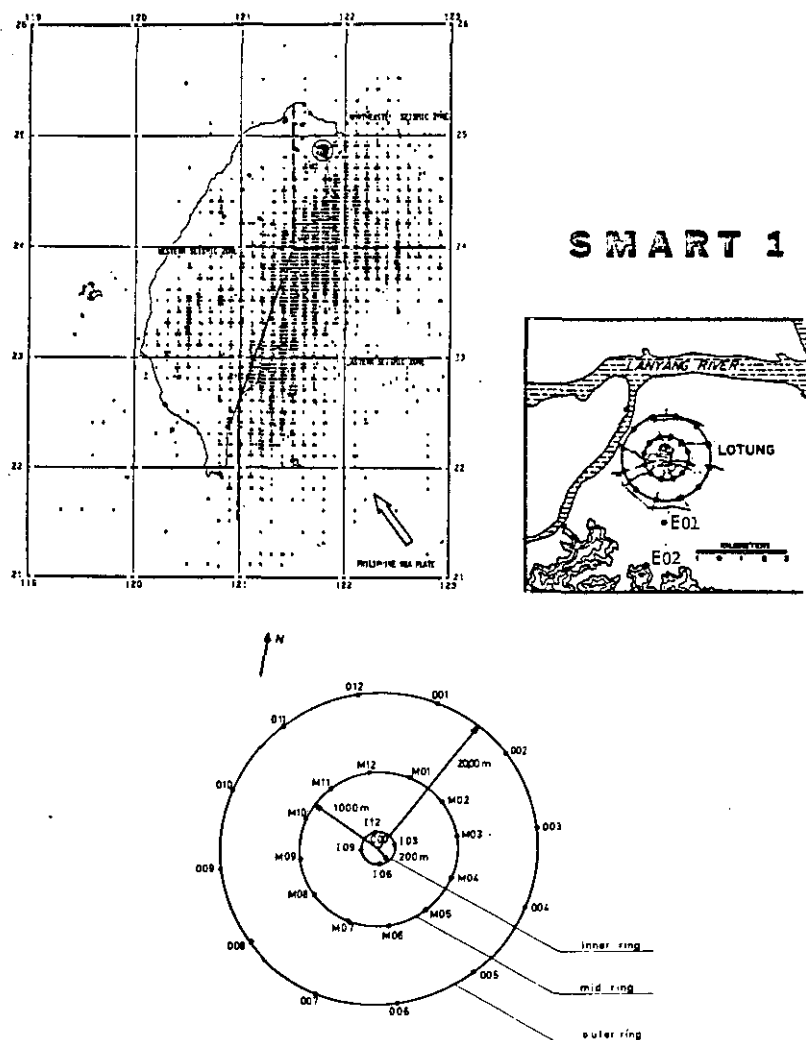


Figura 4.—Situación del array SMART-1 e identificación de las estaciones de registro.

período natural de vibración,  $T$ , de diferentes columnas de suelo independientes es: estación central  $T=1.1$  a  $1.45$  s; eje sur  $T=0.7$  a  $0.9$  s; eje norte  $T=1.5$  a  $2$  s. Estos valores indican que la geología local puede influir en el movimiento del suelo registrado a través del array. Se necesitan estudios de campo y modelados más seguros para entender mejor el comportamiento del suelo bajo deformaciones de pequeña a gran amplitud y, especialmente, la influencia del nivel freático.

### 3.2. Clases de Eventos

Taiwan es parte de una zona de alta sismicidad dominada por el sistema de arco Ryukyu-Taiwan-Filipinas y puede ser considerada como una falla de transformación entre dos zonas de subducción con geometría muy diferente. Este entorno tectónico complejo origina varios tipos de mecanismos focales que, combinado con la variación de magnitud y distancia focal, hacen del SMART-1 un array (despliegue) importante.

Los varios mecanismos morfológicos (y tectónicos) disponibles en la región permiten clasificar los eventos provisionalmente en cuatro clases (Oliveira, 1985) (Figura 5):

1. Terremotos superficiales muy próximos de pequeña magnitud ( $M_L$  en el rango 3-4), originados, probablemente, en pequeñas fallas superficiales.
2. Eventos de media a gran magnitud ( $M_L$  en el rango 5-8) que ocurren a gran profundidad (50-100 km) debajo del array, probablemente relacionados con la subducción.
3. Eventos superficiales de magnitud moderada a grande a distancias intermedias del array (15 a 30 km). El mecanismo tectónico sería similar al referido en 1.
4. Eventos distantes (más de 50 km) de magnitud moderada a grande, a profundidad moderada.

### 3.3. Características Sismológicas y Terremotos Registrados

Los 35 eventos registrados desde 1980 hasta septiembre de 1985 (Tabla I y Figura 5), crean varias situaciones diferentes en lo que a aplicaciones de ingeniería se refiere. No todos los 35 eventos fueron registrados en todas las estaciones. Tabla II, o son útiles para analizar las características globales. Hasta el evento núm. 13, con excepción del evento núm. 5, que disparó las 27 estaciones que estaban en funcionamiento en el momento del terremoto, los eventos fueron registrados sólo en el 50 % de las estaciones con gran variabilidad de un evento a otro. En algunas estaciones, los registros son de pobre calidad. A partir del evento 13, la eficiencia se incrementa aproximadamente en el 70 % y los registros son de mejor calidad. Si bien el número de registros disponibles del SMART-1 es considerable, la media del máximo pico de aceleración del suelo, PGA, por evento es sólo de 31 cm/s<sup>2</sup>. Esperamos que el número de terremotos de interés e importancia, aumente en el futuro próximo.

En algunas partes de este trabajo, cuando tratamos de caracterizar la situación sismológica en su conjunto, utilizamos toda la información disponible de todos los eventos. Cuando comparamos similitudes entre eventos de la misma clase, seleccionamos el evento núm. 15 para la clase



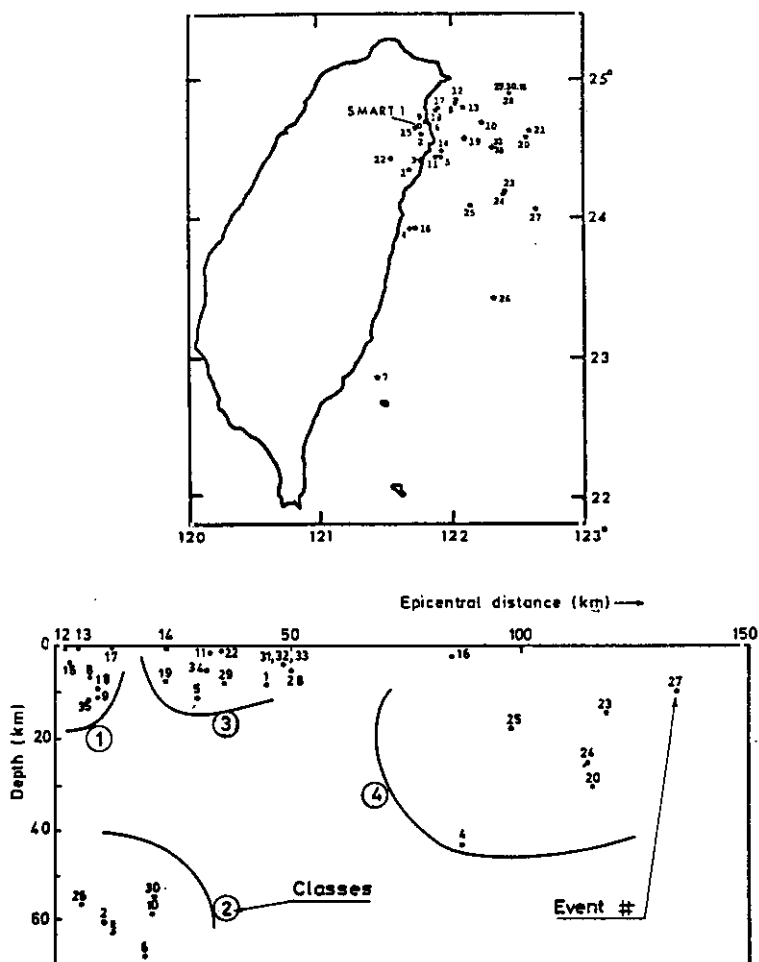


Figura 5.—Distribución geográfica de terremotos registrados en el SMART-1: a) vista horizontal; b) perfil vertical. Clases de eventos.

1, núm. 28 para la clase 2, núm. 30 para la clase 3 y núm. 24 para la clase 4. En algunas situaciones utilizamos eventos específicos y/o registros, en particular el evento núm. 24 debido a su naturaleza. En futuros desarrollos, tendremos a usar tanta información como sea posible para ser capaces de correlacionar el comportamiento sismológico observado en el array con el entorno sismotéctónico, estudiando la variabilidad del movimiento del suelo en relación con: (i) principales parámetros sísmicos, tales como magnitud y distancia hipocentral; (ii) la calibración de relaciones de atenuación; y (iii) la incertidumbre adicional derivada de la variabilidad espacial.

#### 4. CARACTERIZACION ESTADISTICA DE LOS REGISTROS SMART-1

Los arrays son especialmente importantes en el estudio de la variabilidad del movimiento del suelo para estaciones situadas muy próximas unas de otras.

Utilizamos el numeroso conjunto de datos obtenidos hasta ahora con SMART-1 para estudiar, dentro de un marco estadístico, algunas de las propiedades de los registros de movimientos fuertes del suelo. Los registros sísmicos obtenidos en varias estaciones para el mismo evento, muestran diferencias en el aspecto de las ondas (Figura 6), incluyendo valores del pico del movimiento del suelo, forma de las envolventes y contenido de frecuencias (Oliveira y Penzien, 1985). Las diferencias son mayores cuando comparamos registros de diferentes eventos, e incluso mayores para eventos de diferentes situaciones fuente-emplazamiento (clases).

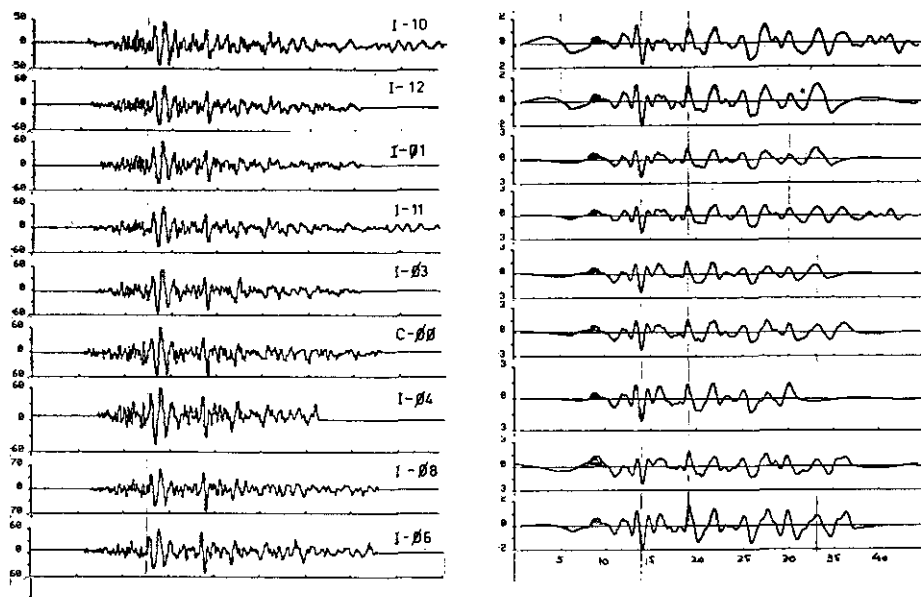


Figura 6.—Formas de onda a través del array: a) trazas de aceleración; b) trazas de desplazamiento. (Anillo interior, evento 024, componente NS.)

La representación completa de la propagación de la onda requiere un análisis simultáneo en tiempo y espacio, que sólo puede ser hecho en un sistema con un soporte físico de tres dimensiones (3-D). Las componentes individuales del movimiento del suelo en un solo emplazamiento pierden la característica espacio temporal de la propagación. Las órbitas del

desplazamiento de la partícula son la mejor observación de las ondas que pasan por un solo punto pero también pierden la información que relaciona los movimientos de las estaciones entre sí. Para visualizar este fenómeno en el dominio del tiempo, la configuración plana de los tres anillos, al viajar las ondas a través del array, proporciona una base para aplicaciones sismológica y de ingeniería de la variación espacial (Figura 7). Representaciones en el plano horizontal son las más útiles; por ejemplo, pueden ser utilizadas para reconocer diferencias en el comportamiento del suelo a lo largo del array y separarlas de los patrones de mecanismo focal.

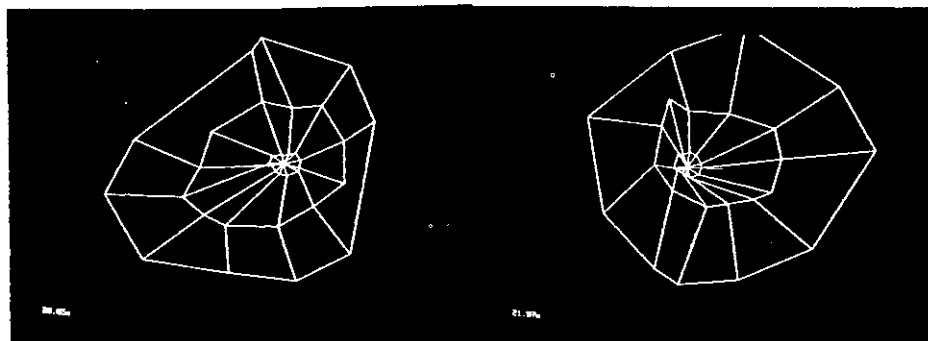


Figura 7.—Deformación del array con el paso de la onda (según A. Lomax).

#### 4.1. Metodología para Tratamiento del Array. Distribución de los Parámetros Pico del Movimiento del Suelo

Como se dijo en el apartado 2.2, los picos ordenados para registros individuales (el primer pico,  $P_1$ , es normalmente designado por el pico de aceleración del suelo PGA, los otros respectivamente  $P_2$ ,  $P_3$ , etc. Figura 8) se ajustan, generalmente, bien por una distribución Exponencial ( $E$ ), Rayleigh ( $R$ ) o Weibull ( $W$ ) (familia de Extremos Tipo I). La Figura 8 presenta, también, la tendencia general de estas tres distribuciones, representada en papel de probabilidad exponencial. En una distribución Rayleigh los picos están concentrados en la parte de aceleración alta, mientras que en la distribución Weibull están concentrados en la región de aceleraciones más bajas. No obstante, los valores de PGA y el tipo de distribuciones de orden para registros obtenidos en el array para un evento dado, varían ampliamente, incluso para estaciones muy próximas (Figura 9). Nosotros seleccionamos la distribución de pico ordenado que minimiza el error cuadrático medio entre valores observados y calculados (Pimentel, 1987). El predominio del tipo de distribución de cada registro para un evento dado depende de la clase del evento y de la componente:

- Los eventos de clase 1 tienden a mostrar un predominio de  $R$  con gran participación de  $E$ ;
- la clase 4 sólo muestra predominio de  $R$ ;
- la componente vertical para ambas clases muestra, esencialmente  $R$ ;
- la disminución de la distancia hipocentral aumenta la probabilidad de  $W$ .

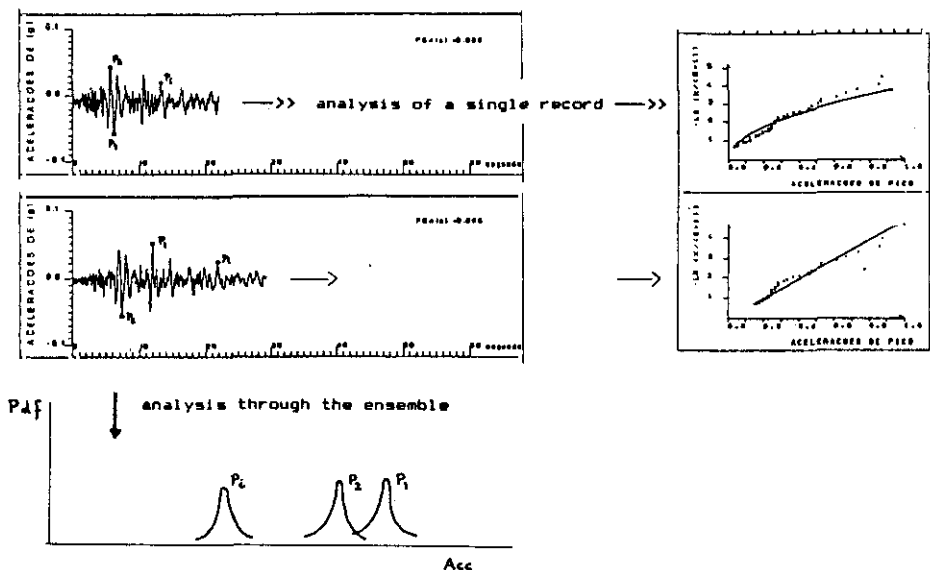
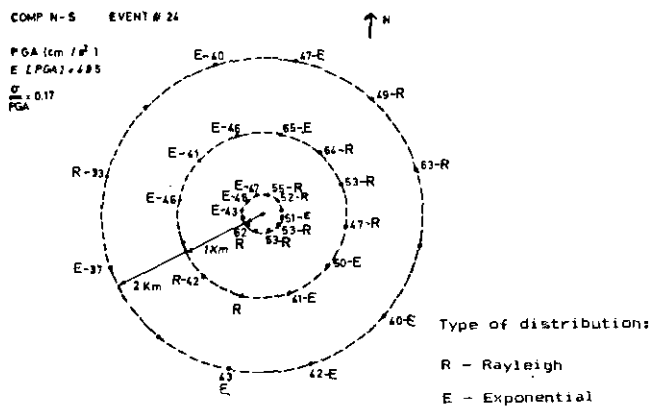


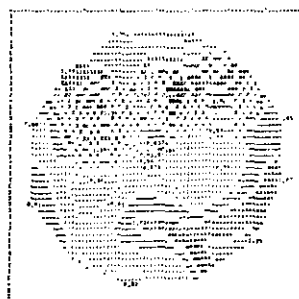
Figura 8.—Metodología para el tratamiento del array.

Como la variabilidad entre las distribuciones para las diferentes estaciones es muy grande incluso para los casos que mejor se comportaron, en vez de analizar registro a registro, estudiamos el proceso en todo el conjunto de registros, tratando todos los picos  $P_1$  en todas las estaciones. El proceso se repite para  $P_2$ ,  $P_3$ , etc. La Tabla III es un sumario de valores medios y coeficientes de variación (desviación estándar ( $\sigma$ )/media) obtenido para un evento, y los principales comentarios son:

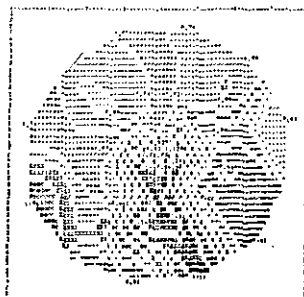
— Las variaciones en el PGA dentro del array para un evento dado, medido como la proporción entre el valor alto y bajo, varía de 2:1 a un máximo de 6:1. El coeficiente de variación  $\sigma/x$  varía de un mínimo de 0.17 a un máximo de 0.49. Las mayores variaciones son observadas en terremotos cercanos y son causados por una o dos estaciones de las 20. Si se excluyen estos casos extremos, las variaciones bajan inmediatamente a (2.5–3.0):1, con coeficientes de variación del orden de 0.20.



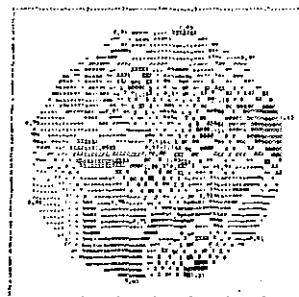
EVENT 15; Vert component  
(max=1.95 min=0.37)



EVENT 15; NS component  
(max=2.59 min=0.52)



EVENT 24; Vert component  
(max=1.30 min=0.66)



EVENT 24; EW component  
(max=1.37 min=0.66)

Figura 9.—Variabilidad de los primeros picos en el array. Tipo de distribución de picos.

TABLA 3

Análisis de los once primeros picos a través del array: medias y coeficientes de variación (evento 024, componente EW). Los valores en cada columna están normalizados respecto al valor pico medio de esa misma columna (pico orden). Las dos últimas filas representan: la primera la razón entre el valor medio del pico de orden  $i$  y el valor medio del pico de orden 1, y la segunda el coeficiente de variación para cada columna.

ST690 24 COMPONENTE EW PGA-00381g											
EST	ESTUDIO DA VARIABILIDADE DOS PICOS DE ORDEM 1 A 11										
	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11
C00	1.0581	0.9864	0.9636	0.9995	1.0040	0.9837	0.8747	0.9058	0.9374	0.9570	0.9440
101	0.8310	0.9339	0.9970	1.0640	1.0780	1.0558	1.0539	1.0508	1.0577	1.0378	0.9838
102											
103	1.1381	1.1895	1.2198	1.1291	1.0151	1.0581	1.0935	1.0931	1.0895	1.0772	1.1114
104	1.0316	1.1229	1.1636	1.1015	1.0739	1.0515	1.0683	1.0271	0.9997	1.0005	0.9661
105	1.0085	1.0310	0.9473	0.9500	0.9148	0.9813	0.9321	0.9468	0.9597	0.9789	0.9870
106	1.2702	1.0428	1.0645	0.9933	1.0128	1.0258	0.9830	1.0149	1.0086	0.9455	0.9360
107											
108	1.2037	1.3431	1.1108	0.8757	0.9862	0.8951	0.9254	0.9558	0.9054	0.9243	0.9707
109											
110	0.9861	0.9858	1.0324	1.0378	1.0490	1.0998	1.0163	0.9753	0.9264	0.9069	0.9257
111	0.9710	0.9185	0.9211	0.9705	1.0051	0.8152	0.7655	0.7931	0.7192	0.7624	0.7866
112	0.9291	1.0230	0.9787	0.9831	1.0029	1.0337	0.9528	0.9266	0.9387	0.9563	0.9888
R01	0.8748	0.8837	0.9875	0.8775	0.8914	0.8527	0.8812	0.8812	0.8207	0.8375	0.8645
R02	1.1186	1.2120	1.1823	1.1891	1.2299	1.1778	1.2072	1.2109	1.1808	1.2055	1.2438
R03	1.2848	1.0044	1.0750	0.9788	1.0229	1.0758	1.0347	0.9927	0.9264	1.0479	1.0041
R04	0.9378	0.9606	1.0029	1.0227	1.0804	1.1327	1.0937	1.0997	1.1309	1.1566	1.1678
R05	0.9480	1.0305	1.0778	1.0415	1.0546	1.1162	1.0167	1.0756	1.1126	1.0957	1.0871
R06	0.9047	1.0088	0.9162	0.8988	0.9328	0.9810	0.9238	0.9675	0.9376	0.9375	0.8673
R07	0.9547	1.0368	1.0096	0.9830	1.0384	1.0337	1.0097	1.0272	1.0409	1.0627	1.0528
R08	0.8487	0.9156	0.9551	0.9076	0.8681	0.8834	0.8234	0.9567	0.8488	0.8687	0.8980
R09											
R10	1.0496	1.1460	1.1112	1.2083	1.1343	1.1892	1.1953	1.1188	1.1523	1.1395	1.1269
R11	0.8637	0.7988	0.7988	0.8431	0.8852	0.8965	0.9265	0.9539	0.9454	0.9652	0.9591
R12	1.1474	0.9195	0.9336	1.0841	1.0922	0.9400	0.9330	0.9471	0.9797	1.0009	1.0320
001	1.0318	0.9030	0.8740	0.9292	0.9460	0.9444	0.9376	0.9026	0.9223	0.8995	0.8846
002	0.7956	0.8813	0.9303	0.9814	0.9876	0.9983	0.9932	1.0044	0.9977	0.9765	1.0075
003	1.1201	0.8463	0.8825	1.0458	1.0683	1.0828	1.1128	1.1186	1.1514	1.1403	1.1860
004											
005	0.8104	0.8470	0.8145	0.9545	0.9805	0.9535	0.9855	1.0164	1.0069	1.0270	1.0256
006	1.2704	1.4437	1.3111	1.2592	1.2338	1.2119	1.2525	1.2578	1.2598	1.2080	1.1936
007	0.9117	0.8422	0.8801	0.9225	0.9390	0.9845	1.0175	1.0191	1.0492	1.0341	1.0235
008											
009	0.6640	0.7123	0.7365	0.7768	0.8264	0.8155	0.8119	0.8336	0.7755	0.7621	0.7863
010	0.9475	0.9452	1.0155	1.0173	0.9249	0.9293	0.9604	0.9188	0.9504	0.9666	0.9142
011											
012	0.8500	0.9047	0.9432	0.9955	1.0161	0.9908	1.0155	1.0123	1.0059	1.0270	1.0257
E01											
E02	0.3996	0.3600	0.3570	0.3828	0.3760	0.3878	0.3903	0.3822	0.3883	0.3615	0.3730
MEU		1	0.8962	0.8320	0.7626	0.7219	0.6885	0.6662	0.6430	0.6216	0.6089
DES	0.1548	0.1507	0.1806	0.1088	0.1086	0.1060	0.1077	0.0995	0.1102	0.1080	0.1051

— La proporción media de PGA en las dos componentes horizontales se aproxima a uno, con un coeficiente de variación en el rango 0.11–0.24; tienden a localizarse, normalmente, en la misma ventana de tiempo.

— La componente vertical muestra una tendencia a amplitudes constantes en toda la duración, especialmente para terremotos distantes. La proporción media entre PGA de cualquier componente horizontal y la componente

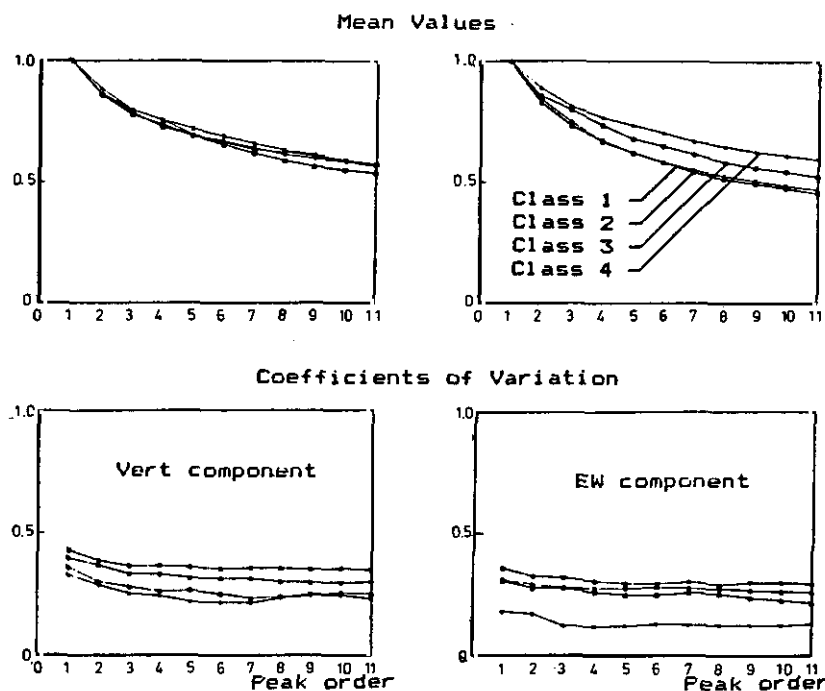


Figura 10.—Disminución de los valores pico con los picos ordenados para el conjunto del array: a) valores medios; b) desviación estándar/media.

vertical para terremotos intermedios a lejanos varía de 2.0 a 4.0 con coeficientes de variación en el rango 0.3–0.4. Generalmente, los picos horizontal y vertical no coinciden en el tiempo. Para focos muy próximos, la proporción entre horizontal y vertical se aproxima a uno, con un coeficiente de variación grande, de 0.7.

La Figura 10 presenta la disminución del valor medio y del coeficiente de variación con el número de pico ordenado para los eventos que representan a las cuatro clases de terremotos. Se observa que:

- El comportamiento de eventos individuales en una clase dada es muy similar y consecuentemente, cada uno es una buena representación de la familia.
- Los valores medios disminuyen de forma bastante uniforme. Las diferencias entre clase y componentes están claramente acentuados.
- Los coeficientes de variación disminuyen del primero al segundo y al tercer pico, dependiendo de la clase y componente, y son casi constantes en adelante.

Utilizando la teoría de las distribuciones de orden (ecuaciones 14), y de acuerdo con los valores de la Figura 10, se pueden definir las siguientes

distribuciones límite superior e inferior (los valores presentados se refieren al tercer pico).

	Horizontal		Vertical	
	$x$	$\sigma/x$	$x$	$\sigma/x$
Clase 1	$W(1.48)$	0.3	$E(1.29)$	0.4
Clase 4	$R(1.18)$	0.15	$R(1.18)$	0.2

#### 4.2. Formas Envolventes

El análisis de los picos no tiene en cuenta la manera en que éstos se distribuyen durante el movimiento del suelo. Para incluir esta característica en el análisis necesitamos información sobre las formas envolventes.

Encontramos cinco tipos diferentes de funciones del tiempo para caracterizar la envolvente de las trazas del movimiento del suelo (Figura 11). Esta clasificación es una extensión de la presentada por Newmark y Rosenblueth

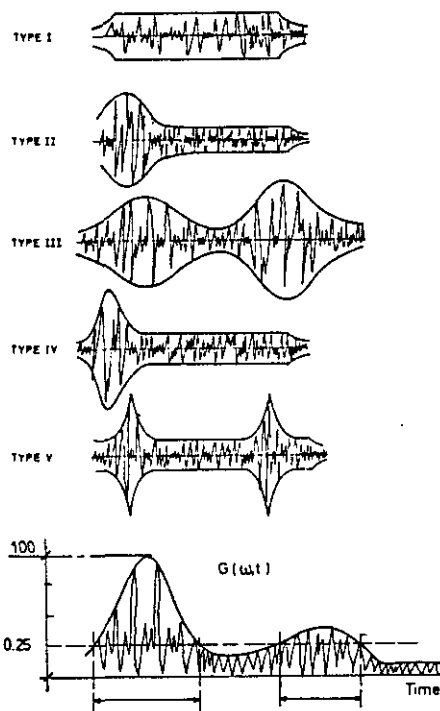


Figura 11.—Tipos de funciones temporales envolventes observadas en los datos, y criterios para su identificación.



(1975), que refleja otros posibles patrones de envolventes tales como la existencia de más de una porción del registro con trenes de ondas de gran amplitud. Estudios posteriores deberían dedicarse a generalizar el concepto de forma de la onda de movimiento del suelo.

- Tipo I: amplitud casi constante en todo el registro;
- Tipo II: registro uniforme con un tren de ondas grandes;
- Tipo III: registro uniforme con dos trenes de ondas grandes separadas por una zona de amplitudes menores;
- Tipo IV: registro con uno o dos picos sobresalientes, la envolvente es una función uniforme muy por debajo de estos dos picos;
- Tipo V: registro con más de dos picos sobresalientes, la envolvente es una función uniforme muy por debajo de estos picos.

Los datos reales son, en general, una mezcla de tipos. Está siendo desarrollado un criterio para identificar el tipo predominante basándose en la idea de que la función envolvente  $G(\omega, t)$  es como trenes de onda. Observad que  $G(\omega, t)$  puede ser equivalente a la función intensidad  $\zeta(t)$ , ecuación 6.

Los arrays, una vez más, permiten utilizar datos de diferentes estaciones para suavizar las variaciones espaciales observadas en las formas de las envolventes. Para llevar a cabo esto, primero calculamos las funciones envolventes para registros individuales (por ejemplo con la transformada de Hilbert [Kanasewich, 1981]), posteriormente se modifican para obtener correlaciones máximas y finalmente se promedian para todo el array. De esta manera, obtendremos una función envolvente para un evento dado.

Para decidir sobre el tipo, se deberá considerar la fracción de tiempo para el cual la envolvente está por encima de un umbral dado, por ejemplo el 25 %. Las variaciones en el contenido de frecuencias a lo largo del registro pueden considerarse, también, si aplicamos una ventana de frecuencia que filtre antes de realizar el análisis en tiempo. El estudio puede realizarse separadamente para cada uno de los tres componentes y bien para aceleración, velocidad o desplazamiento. Los resultados preliminares indican que la máxima información se obtiene de la señal de velocidad.

Esta técnica permite la detección de semejanzas entre registros, tales como la existencia de una forma de onda predominante que viaja por todo el array, llegadas de ciertas fases, semejanzas entre las componentes y, en cierto modo, comprobar la estacionariedad de las señales. Estamos en una situación inmejorable para describir el movimiento del suelo en el dominio del tiempo, junto con otras técnicas a las que se hará referencia en las secciones siguientes.

El análisis de los datos del SMART-1 no ha sido realizado todavía, dentro del marco conceptual presentado más arriba. No obstante, pueden apuntarse los siguientes aspectos:

- La duración del movimiento del suelo es aproximadamente la misma para cada evento y, en general, no muy grande. De evento a evento

hay diferencias importantes que dependen esencialmente de la distancia epicentral y de la magnitud.

- Los datos del SMART-1 muestran que los picos de las dos componentes horizontales casi nunca ocurren simultáneamente, sólo para los eventos de clase 1 se observó este fenómeno. Scheret *et al.* (1982) llegaron a una conclusión similar cuando estudiaron espectros evolutivos.

#### 4.3. Contenido de Frecuencias

En este trabajo utilizamos sistemáticamente el espectro de amplitudes de Fourier y la razón espectral de amplitudes como una herramienta para comparar registros. Se utilizó el algoritmo FFT directo e inverso, después de eliminar el componente estacionario, conjuntamente con un filtro Butterworth de paso banda de 6 polos, aplicado en el eje de tiempos, directo e inverso para eliminar distorsiones de fase. Las aceleraciones, velocidades y desplazamientos corregidos fueron tratados utilizando un corte de baja frecuencia en 0.1 Hz y un corte de alta a 25 Hz. Las integraciones se efectuaron en el dominio de frecuencias. Se hicieron comparaciones entre el filtro de 6 polos y el de Ormsby y los resultados son bastante similares. Las razones espectrales de amplitud fueron obtenidas dividiendo los valores del espectro de dos señales diferentes, después de usar una ventana de Hamming con 13 puntos.

Pueden representarse, también, las siguientes observaciones a partir del análisis de diferentes eventos o de diferentes componentes de una estación para el mismo evento.

- La Figura 12a compara registros en diferentes estaciones, indicando que son posibles variaciones de 1:2 incluso para estaciones muy próximas.

- Para la misma estación, las diferencias entre las dos componentes horizontales no son significativas, ya sea componentes *NS-EW* o radial y transversal, sin embargo la componente vertical es bastante diferente (Figura 12b).

- Para casi todos los registros hay un cambio notable en el contenido de frecuencias a lo largo del tiempo transcurrido. Pueden definirse tres regiones principales para los componentes horizontales, la primera corresponde al tren de ondas *P*, con altas frecuencias, la segunda al tren de ondas *S*, con bajas frecuencias y grandes amplitudes y algunas veces mezclados con ondas *P*, y la tercera corresponde a ondas superficiales generalmente con un tren de bajas frecuencias muy bien definidas. Estas características pueden explicar por qué los valores pico de aceleración velocidad y desplazamiento no coinciden en el tiempo. Por lo general PGD'S (picos del desplazamiento del suelo) ocurren hacia el final del registro donde tienen lugar grandes ondas de coda monocromáticas.

- Las frecuencias predominantes del movimiento cambian con la clase de evento y con la magnitud. La Figura 12c muestra la razón espectral entre los

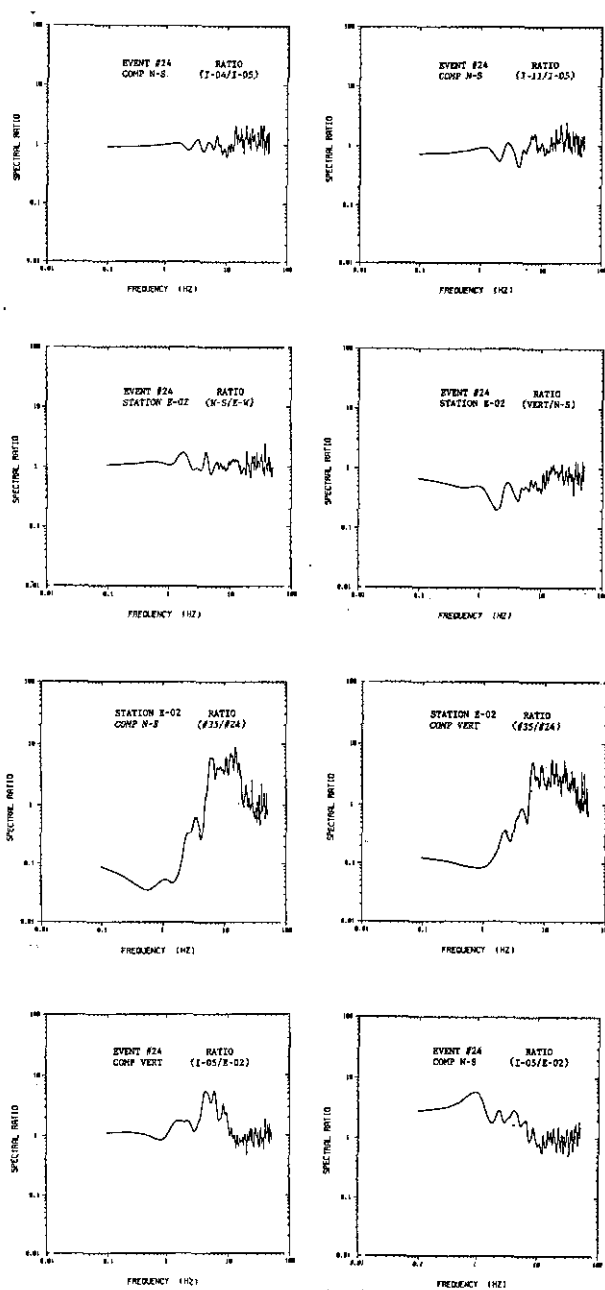


Figura 12.—Razones de amplitud espectral: a) diferentes estaciones y el mismo evento; b) componentes horizontal y vertical; c) terremotos lejanos y próximos (n.º 35/n.º 24); d) emplazamientos de suelo suave y duro.

espectros de amplitud de las componentes *N-S* de la estación *E-02* para los eventos 24 y 35. Es claro que los eventos distantes de gran magnitud contienen mucha más energía en los períodos largos que los eventos cercanos de magnitud moderada.

— Los contenidos en frecuencia en emplazamiento de suelo blando son significativamente diferentes de los emplazamientos de suelo duro (Figura 12d).

Como mencionamos anteriormente, la variabilidad de los parámetros de movimiento del suelo es bastante grande, incluso en distancias cortas, y es muy difícil hacer predicciones sobre representaciones de movimiento del suelo basadas únicamente en las propiedades de una sola estación. La Figura 13 presenta un espectro promedio de Fourier  $\pm\sigma$  para los anillos interior y exterior (evento 24), y la Figura 14 un espectro de respuesta promedio para todas las estaciones, anillo interior y componentes *E-W* y *N-S*; está claro que la variabilidad se incrementa con la distancia entre estaciones.

La Figura 15 presenta un análisis de los espectros de respuesta promedio para registros obtenidos en la misma estación y para eventos pertenecientes a la misma clase.

#### 4.4. Desviaciones Sistemáticas entre las Estaciones del Array

Los arrays permiten también la detección de desviaciones sistemáticas a partir de valores promedio del array. Esto puede ser de gran importancia en la determinación de la influencia del suelo y/o el funcionamiento defectuoso de las estaciones. La Figura 16 muestra el espectro de respuesta para la estación *C-00* y el evento 24, comparado con el promedio del anillo interior para el mismo evento. De los resultados obtenidos para cada estación, en el caso de que se tome el promedio conjunto para el total de eventos o el promedio por clases de terremotos, se deduce que

- Emplazamientos en suelo firme, estación *E-02*, registraron aceleraciones pico (PGAS) 1.6 a 3.2 veces más pequeñas que el promedio del array (media=2.0). La reducción mayor se observó para los terremotos mayores.
- Las estaciones con picos sistemáticamente del 25 % por encima del promedio son *M-02* y *O-04*, y del 25 % por debajo *I-07* y *H-09*.

#### 4.5. Influencia de la Orientación de los Instrumentos. Comentarios Generales

Como se mencionó en 2.1, las componentes del movimiento del suelo medidas en la misma estación no son, en general, procesos aleatorios independientes. Sin entrar en un análisis estocástico detallado, y sólo para visualizar la influencia de la orientación de los instrumentos, hemos repre-

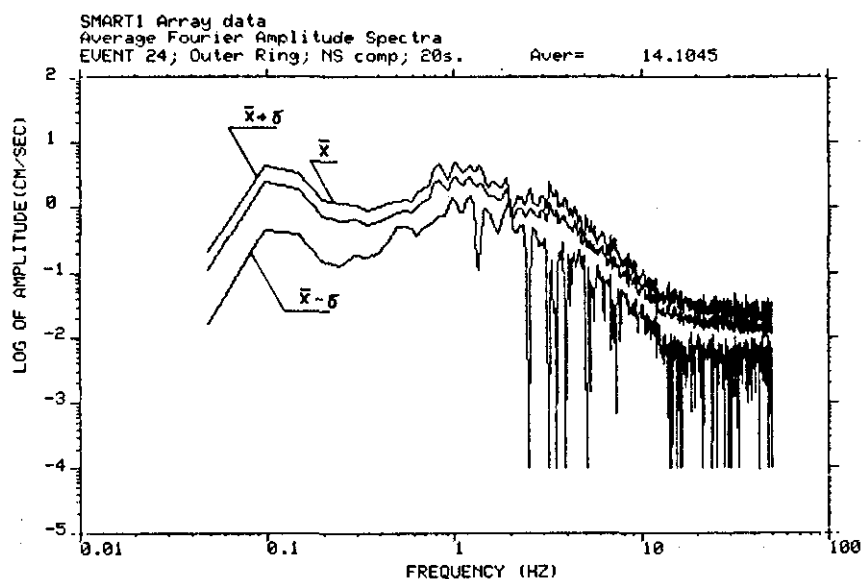
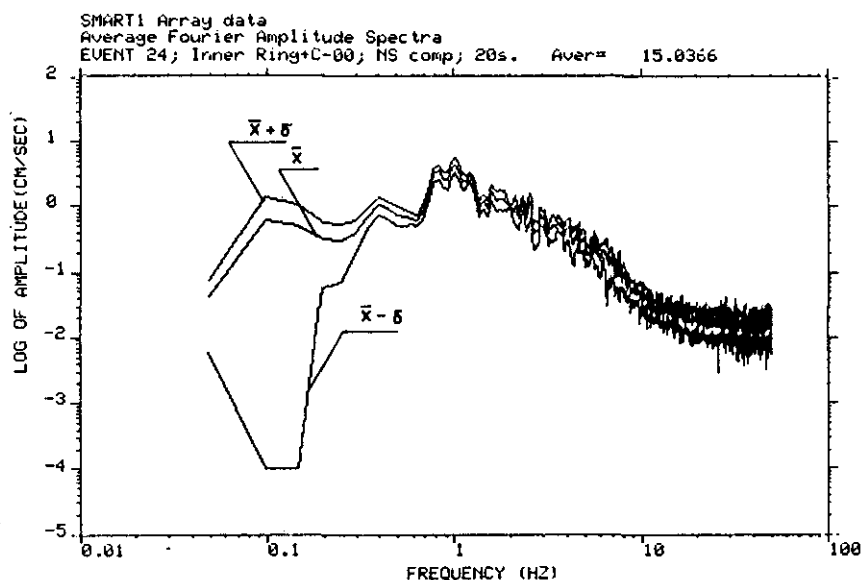


Figura 13.—Espectro de Amplitud de Fourier promedio para: a) el anillo interior; b) el anillo exterior.

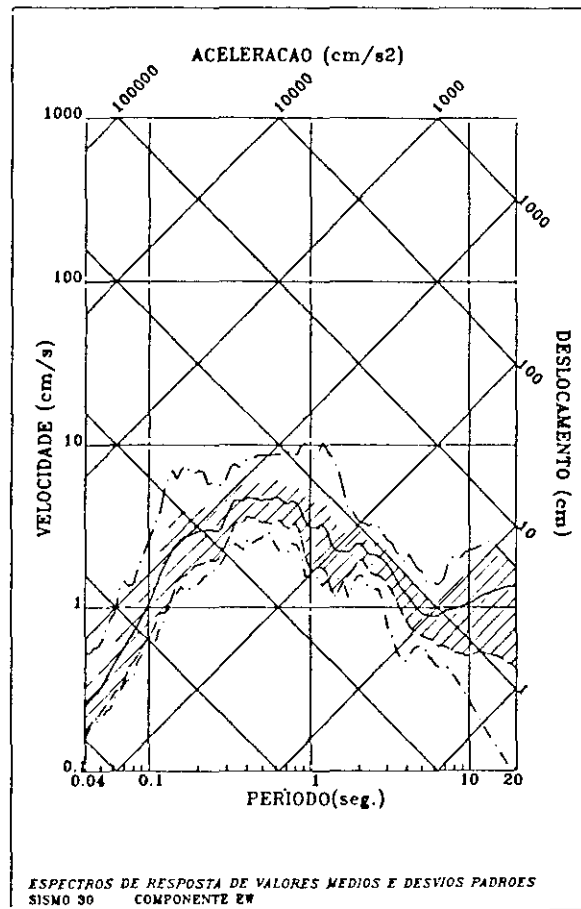
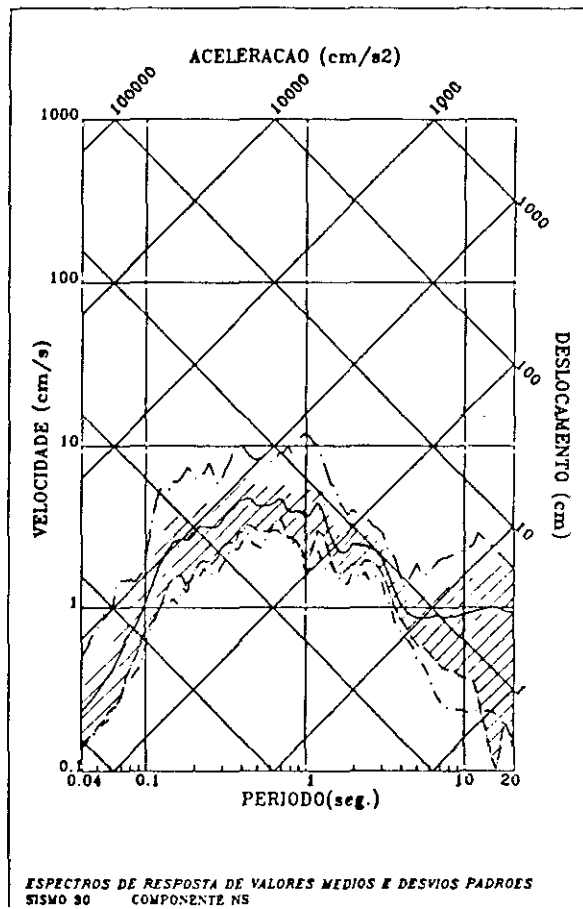


Figura 14.—Espectro de Resposta promedio para: a) todas las estaciones; b) anillo interior; c) componentes EW y NS (según Pimentel, 1987).

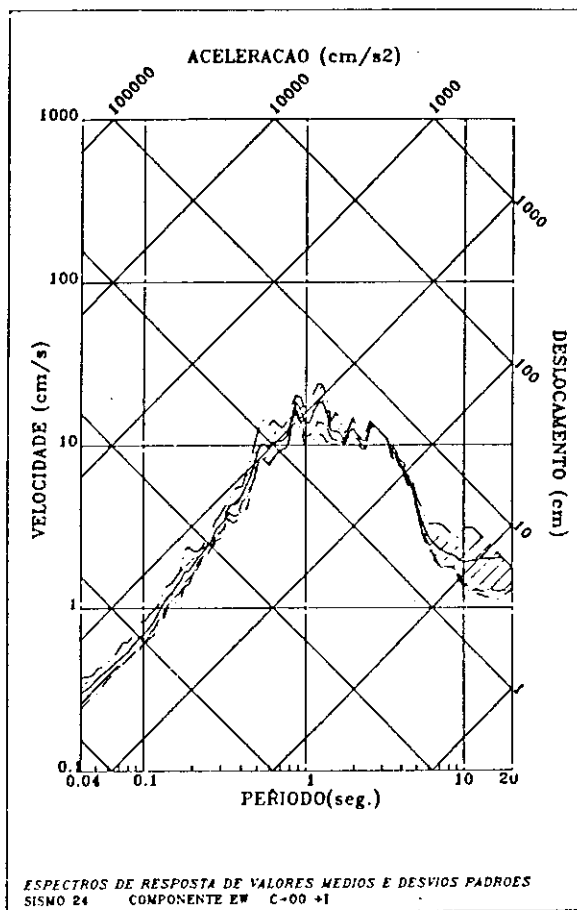
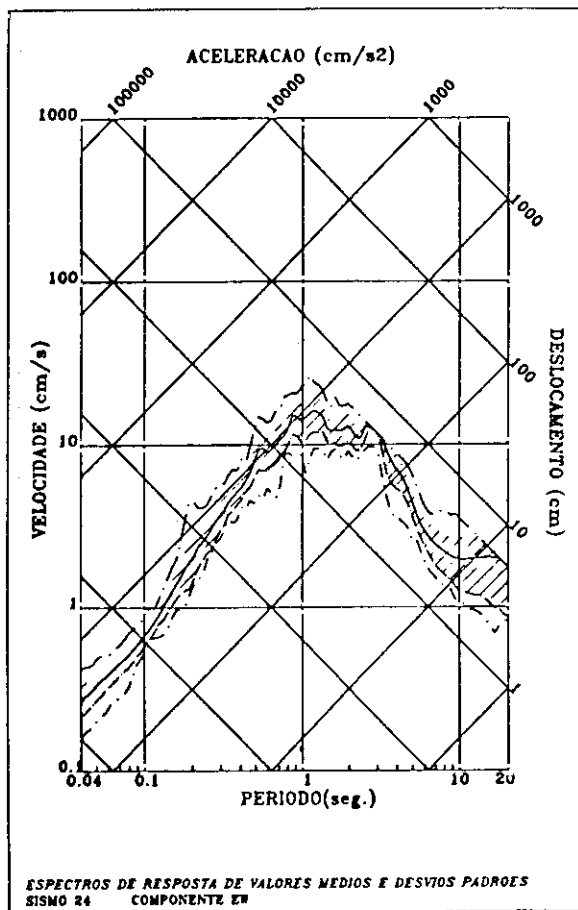


Figura 14 (Continuación).

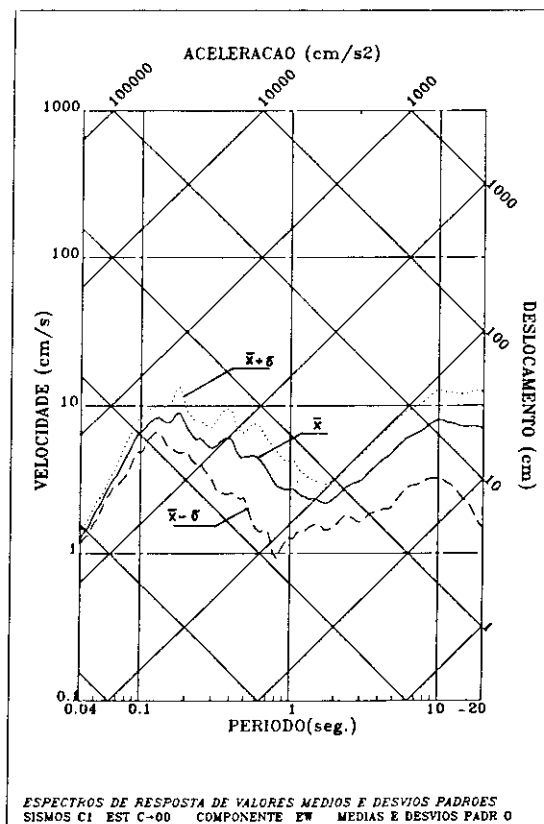


Figura 15.—Espectro de Resposta promedio para los eventos de clase 1 en la estación C-00, componente EW (según Pimentel, 1987).

sentado en la Figura 17a, la distribución de los primeros picos del registro de aceleración en función del azimut de los instrumentos en el plano horizontal cada 10°; y en la Figura 17b el espectro de respuesta cada 15°. Los resultados muestran la gran importancia del azimut en el análisis de los picos y del espectro de respuesta.

Esto conduce, inmediatamente, al concepto de función envolvente que debería considerarse en las tres direcciones del espacio simultáneamente, con una evolución continua de una a otras.

Los dos comentarios generales que se pueden extraer del análisis temporal de los registros son los siguientes:

- Existe una gran variedad en las funciones del tiempo registradas a lo largo del array, en forma, amplitud, y evolución de la frecuencia con el tiempo. Esta variabilidad aumenta con la distancia entre estaciones y es una función de la distancia epicentral y de la magnitud.



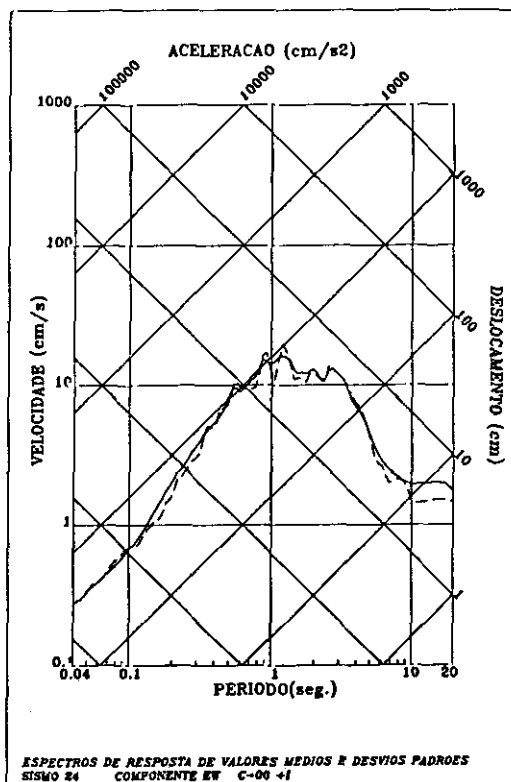


Figura 16.—Desviación sistemática de la estación C-00, componente EW, del promedio del anillo interior, en el evento 024 (según Pimentel, 1987).

- La representación del ruido blanco modulado estándar con tres partes una con incremento de la intensidad, la otra con intensidad constante y la última con comportamiento exponencial decreciente, deberían sustituirse por una forma más compleja (como tipo I a V) que refleje mejor el fenómeno de propagación de ondas.

## 5. COMPONENTES ROTACIONALES

Las componentes rotacionales del movimiento fuerte del suelo han sido mencionadas en la literatura desde hace muchos años. Richter (1958) atribuyó los efectos rotacionales observados, después de la ocurrencia de terremotos, en rocas masivas, lápidas y la parte alta de chimeneas a las componentes rotacionales. Newmark señaló en 1969, por primera vez, que las componentes rotacionales del movimiento del suelo podrían ser de importancia en el diseño

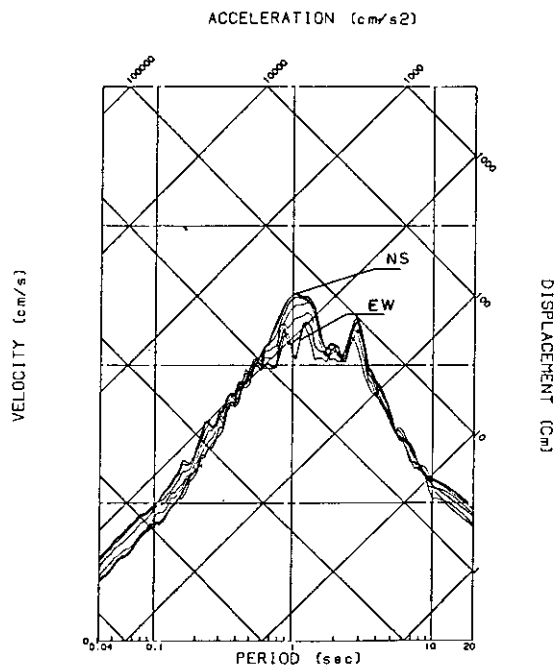
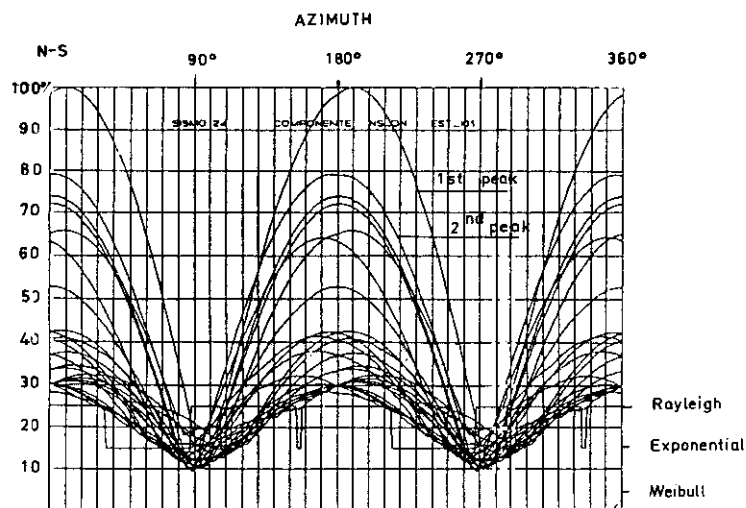


Figura 17.—Influencia de la orientación de los instrumentos (acimut): a) en los valores pico; b) en el espectro de respuesta (según Pimentel, 1987).

de estructuras de ingeniería (Figura 18a). Sin embargo, hasta hoy no ha sido posible medir directamente las componentes rotacionales del movimiento del suelo, a pesar de que se han ensayado varios experimentos y el funcionamiento básico de algunos instrumentos sismológicos tales como el sismógrafo Wood-Anderson, se basa en la respuesta dinámica de un péndulo de torsión.

Hacia la mitad de los años setenta, se realizaron medidas indirectas de las componentes rotacionales del movimiento del suelo (Shibata *et al.*, 1976), pero los primeros valores de las rotaciones fueron obtenidos por Niazi (1986) al analizar las componentes verticales de la aceleración registrada en el array diferencial de El Centro durante el terremoto de Imperial Valley de 1979. El array, localizado a 5 km aproximadamente de la traza de la falla, consiste en 5 estaciones alineadas, separadas 18 metros y dispuestas paralelamente a la traza de la falla. Calculó valores pico de rotacional de  $5 \times 10^{-3}$  rad. cuando

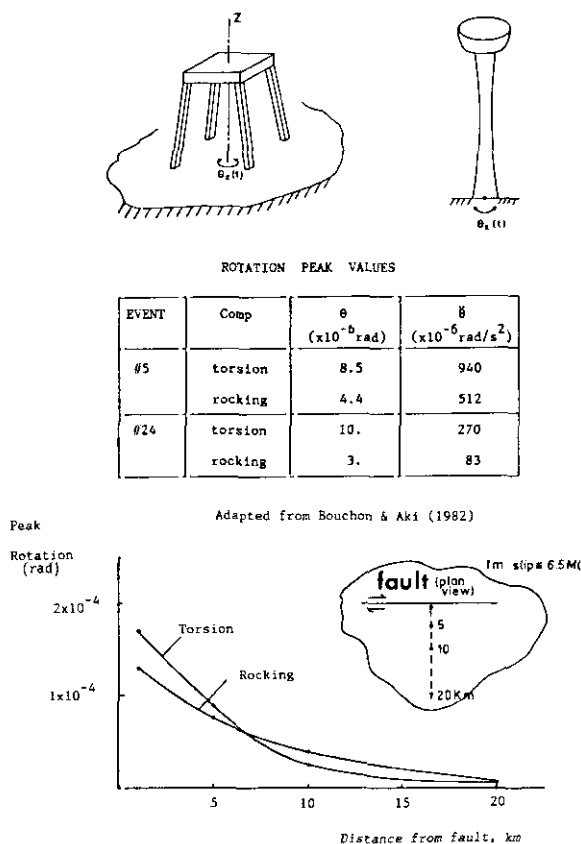


Figura 18.—Componentes rotacionales del movimiento del suelo: a) importancia para estructuras de ingeniería; b) resultados analíticos; c) obtenidos a partir del SMART-1.

utilizó estaciones adyacentes; estos valores caen a  $10^{-4}$  rad. si la separación entre las estaciones se hace mayor. La Figura 18b resume los resultados obtenidos en estudios anteriores.

Para saber si arrays densos de acelerómetros pueden medir componentes rotacionales y en qué grado, Oliveira *et al.* (1987) utilizaron los datos de dos terremotos registrados en SMART-1, donde la distancia entre pares de estaciones varían desde un mínimo de aproximadamente 105 m a un máximo de 4.000 m. Los dos terremotos estudiados son, Tabla I: evento 5, con magnitud local 6.9 y distancia focal de 30 km, causó aceleraciones pico PGA del orden de  $150 \text{ cm/s}^2$  y desplazamientos pico PGD de 2.5 cm; evento 24, con magnitud local 7.3 y distancia focal de 120 km, causó PGA de  $50 \text{ cm/s}^2$  y PGD de 2.0 cm. Ambos eventos muestran movimiento del suelo altamente correlacionados espacialmente, al menos para la llegada de las ondas *S* aunque la mayor magnitud/mayor distancia epicentral tienen un contenido de frecuencias consistentemente más bajo durante la duración total del movimiento (para información más detallada sobre estos eventos ver Oliveira, 1987).

Calculamos las componentes rotacionales del movimiento de la superficie por parejas de estaciones a partir de la función temporal bien de la aceleración o del desplazamiento, de acuerdo con la siguiente expresión, Figura 1:

$$\theta_i = \frac{1}{2} e_{ijk} \left( \frac{\Delta u_j}{\Delta X_k} - \frac{\Delta u_k}{\Delta X_j} \right) \quad [18]$$

donde *u* es el desplazamiento. El conocimiento de los tres componentes rotacionales requiere datos de un array tridimensional. A pesar de este inconveniente, los array bidimensionales (en el plano) permiten el cálculo de los componentes torsionales medidos a lo largo de un eje vertical y el giro a lo largo de ejes horizontales. Los resultados obtenidos a partir de pares de estaciones fueron promediados sobre el array utilizando técnicas de empaquetamiento. Se utilizó doble integración de aceleraciones angulares o derivaciones de rotaciones en el tiempo para obtener rotaciones o aceleraciones angulares respectivamente. En todos los casos calculamos promedios más una desviación típica (estándar) y, en algunos casos, el espectro de Fourier bien de la aceleración angular o de la rotación.

Las limitaciones del algoritmo provienen del espaciado entre estaciones debido a la linealización supuesta entre emplazamientos adyacentes, que reduce la frecuencia a valores aceptables de 4 a 5 Hz.

Las técnicas de empaquetamientos utilizados para estimar las componentes rotacionales del movimiento del suelo produjeron buenos resultados. De acuerdo con los resultados de este análisis, Figura 18c, las torsiones pico medidas son del orden de  $10 \times 10^{-6}$  rad. y los giros del orden de  $5 \times 10^{-6}$  rad. Ambos tienen valores espectrales altos en el rango 0.7 a 1.2 Hz. Estos resultados son consistentes con los encontrados previamente por Niazi (1985)

y Bouchon y Aki (1982). Los valores pico de  $10^{-5}$  rad. no parecen pequeños comparados con éstos, si se tiene en mente que las distancias epicentrales aquí son mucho más grandes.

Los valores observados en estos dos eventos del SMART-1 indican que para distancias mayores de 30 km y magnitudes menores de 7, los componentes rotacionales no son importantes para las estructuras de ingeniería. No obstante, para sitios cercanos a la ruptura de falla y magnitudes mayores de 5, las rotaciones pueden tener alguna importancia, como se observó en el terremoto de Imperial Valley de 1979. El array SMART-1 no es útil para analizar componentes rotacionales para frecuencias superiores a 5 Hz, sin embargo, todos los indicios sugieren su presencia.

En realidad, los valores de rotaciones obtenidos por Niazi (1985) cuando analizó los registros del terremoto de Imperial Valley de 1979 en el despliegue diferencial del Centro, son dos órdenes de magnitud inferiores al SMART-1. Los lugares de registros, con separación múltiplo de 18 metros, están localizados a 5 km de la ruptura de falla; se observaron desplazamientos de 27 cm y PGA de 0.37 g. También encontró que los valores de rotación calculados decrecían rápidamente con la separación. Estos estudios parecen indicar que los componentes rotacionales dependen mucho del tipo de terremoto y de la separación entre estaciones pero son importantes en aplicaciones de ingeniería para emplazamientos próximos a la zona de falla y, probablemente, para terremotos de gran magnitud a distancias moderadas.

Está en marcha otra forma de obtener las componentes rotacionales (Oliveira *et al.*, 1987), consistente en determinar la respuesta estructural de una placa rígida horizontal sustentada sobre tantas columnas como estaciones registran un evento particular. Las respuestas pico del movimiento del suelo (en seis grados de libertad) para cada frecuencia de vibración conducen directamente al concepto de espectro de respuesta rotacional.

Estudios analíticos y experimentales recientes indican que este método (Bouchon *et al.*, 1982), que conduce a un límite superior estimativo, exige que  $V_{ap}$  sea la velocidad de cizalla en la base de la roca o la velocidad de ruptura en la zona de la falla y no la velocidad de cizalla en las capas superiores.

También puede obtenerse la evaluación de algunas componentes del tensor deformación con interés en aplicaciones de ingeniería; las deformaciones axial y de cizalla a lo largo de una dirección dada  $r$  son

$$\epsilon_r^l = \frac{\Delta u_{rl}}{\Delta r} \quad (l \text{ es la axial o la normal}) \quad [19]$$

Los valores para las deformaciones longitudinales ( $30 \times 10^{-6}$ ) son consistentes con trabajos anteriores (Bolt *et al.*, 1982) y con medidas realizados en despliegues densos japoneses (Katayama *et al.*, 1984; Okubo *et al.*, 1984) para terremotos del mismo tipo que los estudiados hasta ahora con los datos SMART-1.

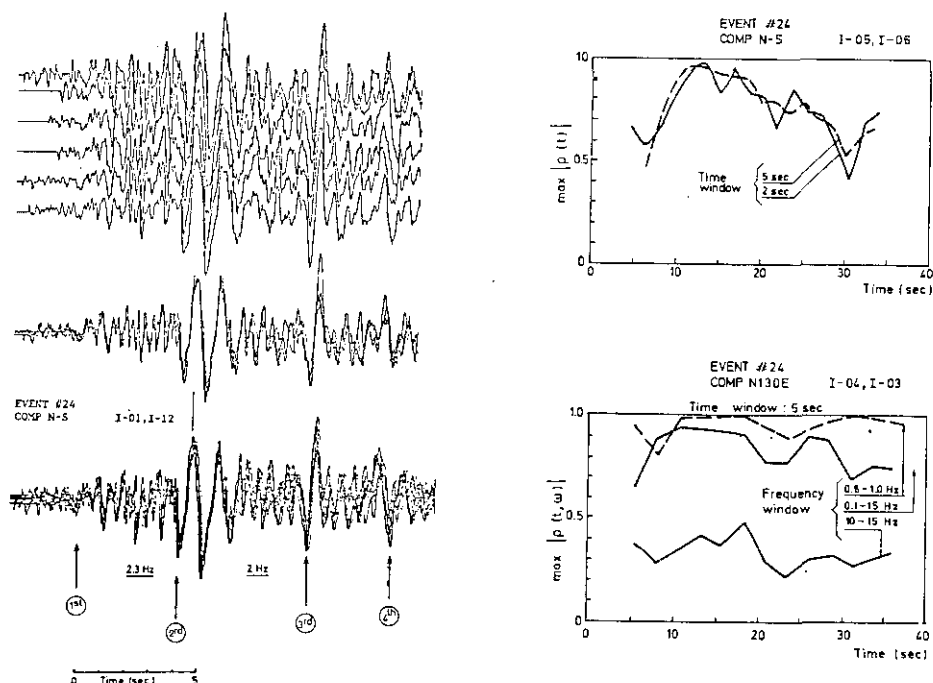


Figura 19.—Correlación espacial del movimiento del suelo dentro del array: a) superposición dentro de las trazas de aceleración para el anillo interior después de la corrección del tiempo de retraso; b) influencia de las ventanas de tiempo y frecuencia.

## 6. PROPAGACION DE ONDAS Y COHERENCIA ESPACIAL DEL MOVIMIENTO DEL SUELO

Como se expuso brevemente en la sección 2.1, la caracterización espacial de la onda puede analizarse por diferentes técnicas, utilizando esencialmente el coeficiente de correlación o el de coherencia. Los resultados, presentados en la figura 19, muestran que el valor máximo del coeficiente de correlación depende fuertemente de las ventanas de tiempo y de frecuencia. Ambas dependencias eran esperables. La primera, observando la superposición de varios registros (Figura 19), donde se ve muy claro que, al menos para algunos eventos, la llegada de algunas fases es extraordinariamente similar en estaciones localizadas muy próximas. El coeficiente de correlación es casi 1 para estos casos. En los otros casos, el coeficiente bajó a valores de aproximadamente 0.6.

Esta técnica permite la detección del desplazamiento de tiempo  $\gamma$  para la correlación máxima y la evaluación de la correspondiente velocidad aparente. La Figura 20 muestra los frentes de ondas en el array obtenidos a partir de los retrasos para correlaciones máximas entre pares de esta-

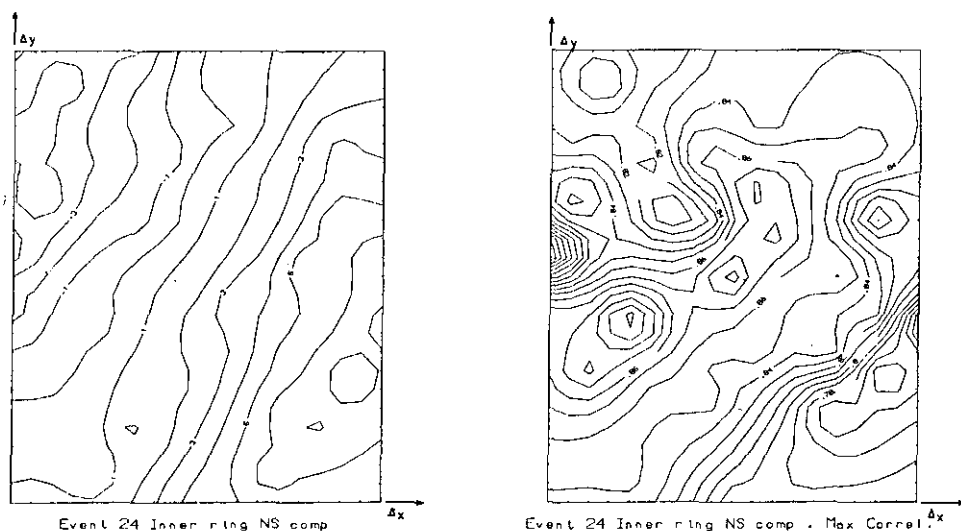


Figura 20.—Identificación de los frentes de onda obtenida a partir de los retrasos para correlaciones máximas (evento 024, componente NS): a) retraso de  $10^{-2}$ s con relación a C-00; b) valores de correlación (escala horizontal unidad 20m).

ciones. En los casos de señales de baja correlación, esta evaluación es mucho más difícil y se recomiendan otras técnicas (Harichandran y Vanmarcke, 1984).

Utilizando la llamada aproximación *F-K* (espectro frecuencia-número de onda), Bolt *et al.* (1982) y Abrahamson (1985) identificaron la energía de onda predominante en la banda de 0.5-2 Hz propagándose desde el epicentro. Aunque esta técnica no es selectiva, como la desarrollada por Loh y Penzien (1982), los resultados son del mismo orden de magnitud.

Tratamientos más sofisticados, tales como empaquetamiento o la solución de un problema de valores propios  $3n$  (siendo  $n$  el número total de estaciones), extenderían los conceptos mencionados más arriba a más de un par de estaciones, interesando al array entero. Detalles de este tipo de análisis pueden encontrarse en Kanasewich (1981) y Darragh (1985).

La dependencia con la frecuencia ha sido observada en otros estudios (Loh, 1985, Abrahamson, 1985, Harichandran y Vanmarcke, 1984) y parece ser uno de los parámetros principales que controlan la correlación espacial. Basándose en el análisis de cuatro eventos y admitiendo isotropía en la pérdida de coherencia con la distancia, Harichandran y Vanmarcke (1984) propusieron, como se muestra en la Figura 21, la coherencia como una función de la frecuencia y de la distancia entre estaciones. Los valores en la Figura 21 son buenos indicadores pero no pueden usarse indiscriminadamente.

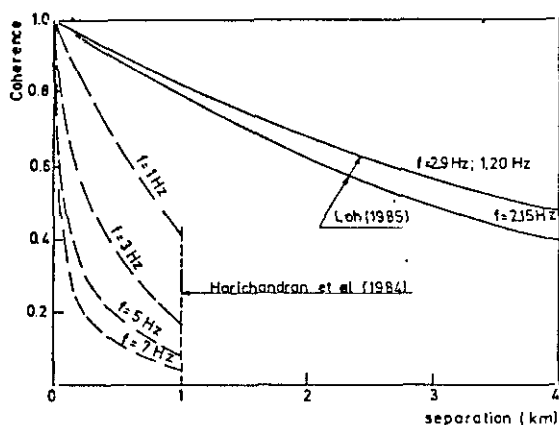


Figura 21.—Atenuación de la función densidad espectral de potencia cruzada (según Loh, 1985 y Harichandran *et al.*, 1984).

Se observó, también, que los coeficientes de correlación son función del ángulo de rotación. Estudios previos (Loh y Penzien, 1984) indican que se obtienen valores altos tanto en la dirección radial como en la transversal con pequeñas fluctuaciones, que dependen del tipo de evento. Esto es una consideración importante para la elección de un sistema de referencia para el array. Deberían continuarse estudios en este área para cuantificar las diversas influencias discutidas más arriba.

Todo lo presentado en relación con el tratamiento de la aceleración, puede aplicarse también a los desplazamientos. Estos constituyen las funciones de excitación para calcular la respuesta de estructuras. El presente array ha producido ya suficientes información para tratar este problema (Loh, 1985).

Los datos del array SMART-1 confirman la idea de que el espectro cruzado se atenúa con la distancia entre emplazamientos y sufre un desplazamiento de la fase debido al recorrido de las ondas (Loh, 1985; Harichandran *et al.*, 1984):

$$S_{ij}(i\omega) = S_o(\omega) \exp(-\lambda|D_{ij}|) \exp(i\omega \mathbf{V}_{app} \cdot \mathbf{D}_{ij} / V_{app}^2) \quad [20]$$

donde

- $\mathbf{D}_{ij}$  vector posición para las estaciones  $i, j$ ;
- $\lambda$  constante que depende de la frecuencia, se obtiene a partir de los datos;
- $\mathbf{V}_{app}$  velocidad aparente del tren de ondas para una frecuencia centrada;
- $S_o(\omega)$  espectro de potencia para todo el array.



Basándose en la ecuación 20, se puede calcular directamente la respuesta de cualquier sistema dinámico, usando la teoría de proceso estocástico, o generar series temporales de movimientos del suelo artificiales. Para la generación de series temporales artificiales nosotros preferimos utilizar directamente el concepto de función correlación cruzada que iguala

$$\text{Max } \rho[(x - \alpha), (y - \beta)] = \exp(-A|x - \alpha| - B|y - \beta|) \quad [21]$$

donde  $A$  y  $B$  se obtienen a partir de los datos utilizando ajustes lineales, y  $\alpha$  y  $\beta$  son los desplazamientos espaciales (Oliveira, 1987b).

## 7. OTRAS POSIBLES AREAS DE DESARROLLO

Además de las distintas áreas de investigación que están actualmente en marcha y que han sido mencionadas a lo largo de este texto, existen otras líneas de acción con interés directo en el campo de la ingeniería.

Algunos de los datos presentados están basados en unos pocos eventos registrados en el array SMART-1. No obstante, los datos disponibles permiten, entre otros estudios, comprobar la influencia de: i) rangos de magnitudes, distancia epicentral y mecanismo focal en movimientos fuertes; ii) para la misma clase de eventos (fuente y trayectoria comunes) la consistencia de la respuesta del suelo; y iii) la amplitud del movimiento sobre el comportamiento no lineal del suelo y la trayectoria. En trabajos futuros, cuando se analicen más eventos correspondientes a diferentes mecanismos focales, los resultados observados podrán extrapolarse a otras áreas sísmicas con características tectónicas y geológicas similares.

Está en curso el desarrollo de modelos que puedan generar i) funciones temporales y/o ii) matrices de espectros cruzados de potencia, que sean compatibles con las características observadas del movimiento del suelo, dada la magnitud, el foco y los lugares de registro (Oliveira *et al.*, 1987). También son necesarios nuevos estudios de la influencia de la variabilidad del movimiento del suelo, medida en un array, para aplicaciones de ingeniería.

Como la variabilidad de los parámetros del movimiento del suelo es bastante grande, incluso para distancias cortas, es muy difícil predecir el movimiento del suelo utilizando representaciones basadas en propiedades registradas en una única estación. Una vez más recalcamos el importante papel de los arrays de instrumentos de movimientos fuertes para estimar, de un lado, la variabilidad de los registros de movimientos fuertes, y de otro sus valores promedios. Se están realizando nuevos estudios en este tema.

Ya hemos mencionado varios temas relacionando picos y distribuciones con clases de eventos. Queremos subrayar aquí, la dependencia con la distancia hipocentral y la magnitud. La Figura 22 presenta la atenuación

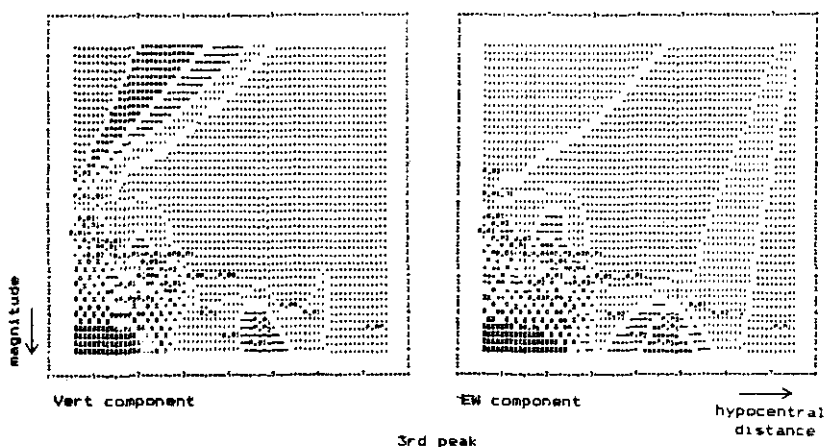


Figura 22.—Atenuación de los picos del movimiento del suelo con la magnitud y la distancia.

de picos,  $P_1$  y  $P_3$  (medio del array para cada evento) con la distancia hipocentral y la magnitud para la colección de 35 eventos. Puede representarse también la media más la desviación típica.

De acuerdo con los resultados presentes, fórmulas empíricas de atenuación del pico del movimiento del suelo tales como (Tsai y Bolt, 1983).

$$y = a_0 + a_1 \exp(a_2 M) (R + a_3 \exp(a_4 M)) - \varepsilon \quad [22]$$

(donde  $y$  representa PGA, PGV, PGD o cualquier ordenada espectral,  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$  y  $a_5$  son constantes obtenidas a partir de los datos;  $R$  es la distancia epicentral o alguna función de la distancia acimutal; y  $\varepsilon$  una función error que toma en consideración la dispersión entre los datos y los valores calculados según la ecuación 2), deberían incorporar la incertidumbre relativa a la variabilidad analizada previamente.

Aunque el array SMART-1 representa una gran proporción de los registros del movimiento del suelo con interés en ingeniería, no cubre otras situaciones importantes de eventos a pequeña distancia epicentral y magnitud moderada a grande y eventos de gran magnitud a distancias intermedias a grandes. La primera ocasiona altas aceleraciones ( $> 500$  gal) altos desplazamientos ( $> 20$  cm) y contenido de altas frecuencias; las duraciones son cortas ( $< 15$  s) y la componente vertical muestra valores picos muy grandes. La primera situación fue observada en unos cuantos terremotos muy recientes, tales como el terremoto de Imperial Valley de 1979, que produjo una gran cantidad de registros importantes. La segunda situación difiere de los casos ya mencionados, debido a que causa duraciones muy largas y predominio de ondas coda con contenido de frecuencias muy bajas ( $0.3 < f < 0.7$  Hz).

## AGRADECIMIENTOS

Parte de este trabajo fue llevado a cabo por el autor en el año académico 1985-1986 en la Estación Sismográfica de la Universidad de California, Berkeley, bajo la beca NSF N.º ECE-8417856. Los doctores B. A. Bolt y J. Penzien fueron los investigadores principales. Un agradecimiento especial a Fernando Pimentel y el Dr. Joao Azevedo del Instituto Superior Técnico de Lisboa, y a Aníbal Costa y Alfredo Costa del LNEC por su colaboración.

## REFERENCIAS

- Abrahamson, N. A. (1985): «Estimation of Seismic Wave Coherency and Rupture Velocity Using the SMART-1 Strong Motion Array Recording», Report no. UBC/EERC-85/2, University of California, Berkeley.
- Azevedo, J. J. (1984): «Characterization of Structural Response to Earthquake Motion», PhD Dissertation, Dept. Civil Eng., Stanford University.
- Barrodale, I.; Erikson, R. E. (1980): «Algorithm for Least Square Linear Prediction and Maximum Entropy», *Geophysics*, vol. 45, n.º 3, pp. 420-446.
- Bolt, B. A. (1981): «Interpretation of Strong Ground Motion Records», Miscellaneous Paper S-73-1, Report 17, State-of-the-Art for Assessing Earthquake Hazards in the United States, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg.
- Bolt, B. A.; Loh, C. H.; Penzien, J.; Tsai, Y. B.; Yeh, Y. T. (1982): Preliminary Report on the SMART-1 Strong Motion Array in Taiwan», Report UBC/EERC-82/13, University of California, Berkeley.
- Borges, J. F.; Castanheta, M. (1971): «Structural Safety», Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Bouchon, M.; Aki, K. (1982): «Strain, Tilt, and Rotation Associated with Strong Ground Motion in the Vicinity of Earthquake Faults», *Bull. Seism. Soc. of Am.*, vol. 72, n.º 5, pp. 1717-1738.
- Darragh, R. (1986): «Lecture Notes on Frequency-Wave Number Analysis», University of California, Berkeley.
- De Herrera, M. (1980): «A Time Domain Analysis of Seismic Ground Motions Based on Geophysical Parameters», PhD Dissertation, Dept. Civil Eng., Stanford University.
- Duarte, R. T. (1984): «Spatially Variable Ground Motion Models for the Earthquake Design of Bridges and Other Extended Structures», 8th World Conf. Earthq. Eng., vol. II, pp. 613-620, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Harichandran, R.; Vanmarcke, E. (1984): «Space-Time Variation of Earthquake Ground Motion», Research Report R84-12, Dept. Civil Eng., Massachusetts Institute of Technology.
- Kanasewich, E. R. (1981): «Time Sequence Analysis in Geophysics», The University of Alberta Press, Canada.
- Katayama, T.; Parjoodi, J.; Sato, M. (1984): «Measurements of Seismic Ground Strain by a Dense Seismographic Array», 8th World Conf. Earthq. Eng., vol. II, pp. 207-214, Prentice Hall, Englewood Cliff, NJ.
- Loh, C. H. (1985): «Analysis of the Spatial Variation of Seismic Waves and Ground Movements for SMART-1 Array Data», *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 13.
- Lomax, A. (1986): «QUAKE - A Computer Program for Display Wave Motion Through SMART-1», Seismographic Station, University of California, Berkeley, USA.

- McCann, M. (1982): «Personal Communication», Stanford University.
- Newmark, N. M. (1969): «Torsion in Symmetrical Buildings», Proc. 4th World Conf. Earthq. Engin., vol. II, A3.19-A3.32, Santiago do Chile.
- Newmark, N. M.; Rosenblueth, E. (1971): «Fundamentals of Earthquake Engineering», Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Niazi, M. (1985): «Inferred Displacements, Velocities and Rotations of a Long Rigid Foundation at El-Centro Differential Array Site During the 1979 Imperial Valley Earthquake», *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 13.
- Okubo, T.; Arakawa, T.; Kawashima, K. (1984): «Dense Instrument Array Program of the Public Works Institute and the Preliminary Analysis of the Records», 8th World Conf. Earthq. Eng., vol. II, pp. 151-158, Prentice Hall, Englewood Cliff, NJ.
- Oliveira, C. S. (1985): «Elements for the Definition of Strong Ground Motion Based on SMART-1 Recordings», Proceedings 12th Regional Seminar on Earthquake Engineering, Sept 16-25, 1985, Halkidiki, Greece.
- Oliveira, C. S. (1987): «Probabilistic Assessment of Strong Ground Motion», in Strong Motion Seismology, ed. Erdik & Toksoz, D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, Holland.
- Oliveira, C. S. (1987b): «Multiple Support Simulation of Ground Motion Based on SMART-1 Array Data», Work in progress, LNEC, Lisbon.
- Oliveira, C. S.; Bolt, B. A. (1987): «Rotational Components of Surface Strong Ground Motion».
- Oliveira, C. S.; Hao, H. (1988): «Response of Structures to Variable Input Ground Motion», Work in progress, University of California, Berkeley.
- Oliveira, C. S.; Penzien, P. (1985): «Spatial Variation of Seismic Ground Motion Based on SMART-1 Array Data», Paper presented at the Earthquake Engineering Lifeline Seminar, National Taiwan University, Taipei.
- Oliveira, C. S.; Pimentel, F.; Azevedo, J. (1986): «Variability of Strong Ground Motion Ordered Peaks at a Site Based on Dense Seismic Arrays», Proc. 8th European Conf. Earthq. Eng., vol. 6, Sept. 7-12, 1986, Lisbon, Portugal.
- Penzien, J.; Watabe, M. (1975): «Characteristics of 3-Dimensional Earthquake Ground Motions», *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 3, pp. 365-373.
- Penzien, J. (1985): «Lecture Notes on Earthquake Engineering Analysis», University of California, Berkeley.
- Pimentel, F. (1987): «Analysis of Variability of Strong Ground Motion», M. Sc. Thesis, Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal.
- Richter, C. F. (1958): «Elementary Seismology», W. H. Freeman, San Francisco.
- Scherer, R. J.; Schueller, G. I. (1982): «On the Correlation Between xyz-components of Earthquake Accelerations», 7th Europ. Conf. Earthq. Eng., vol. 2, pp. 169-177.
- Shibata, H.; Shigata, T.; Stone, A. (1976): «On Some Results of Observation of Torsional Ground Motions and Their Response Analysis», *Bull. Earthq. Resist. Struct. Research Center*, vol. 10, pp. 43-45.