

Análisis de los acelerogramas de la serie de Adra (Almería)

Diciembre 1993 a Enero 1994

R. Blázquez
A. Suárez
E. Carreño
A.J. Martín

Monografías de Ingeniería Sísmica

Editor A. H. Barbat

**Análisis de los acelerogramas
de la serie de Adra (Almería)**

Diciembre 1993 a Enero 1994

R. Blázquez
A. Suárez
E. Carreño
A.J. Martín

MONOGRAFÍAS DE INGENIERÍA SÍSMICA
Editor A.H. Barbat

CENTRO INTERNACIONAL DE MÉTODOS NUMÉRICOS EN INGENIERÍA
Edificio C1, Campus Norte UPC
C/ Gran Capitán, s/n
08034 Barcelona, España.

ISSN: 84-87867-70-7

**ANÁLISIS DE LOS ACELEROGRAMAS DE LA SERIE
DE ADRA (ALMERÍA)-DICIEMBRE 1993 A ENERO 1994**
Monografía CIMNE IS-26
© Los autores

ISBN: 84-89925-11-9
Depósito Legal: B-16413-98

IMPRESO EN ESPAÑA - PRINTED IN SPAIN

ABSTRACT

The accelerographic data obtained for the two main shocks of the Adra Earthquake Series are presented. The series comes from a set of tremors with magnitude $m_b = 5.0$ that took place in the province of Almeria during the months of December 1993 and January 1994. As such it is regarded as the first case study of a considerable number of accelerograms (main shocks and aftershocks) recorded in Spain.

The research conducted focuses on the engineering characterization of the acceleration records corresponding to the main shocks of the Adra Series, both in the time domain (time histories of accelerations, velocities and displacements) and in the frequency domain (response spectra). Also, the standard parameters commonly used in Earthquake Engineering, namely: significant duration, predominant period, Arias and Housner intensities, and so on, are computed for all the records shown. Such parameters are then correlated with the factors governing the ground motions due to the seismicity of the region, specifically the magnitude of the earthquake, the epicentral distance and the geological conditions at the site.

Finally, the data obtained are used to derive observational attenuation laws and response spectra which are compared with the NCSE-94 code provisions, largely based in historical seismicity information.

RESUMEN

Se analizan en este trabajo los datos acelerográficos asociados a los dos sismos principales de la denominada serie de Adra. Esta serie está constituida por un conjunto de terremotos de magnitud $m_b \leq 5.0$ que ocurrieron durante los meses de Diciembre de 1993 y Enero de 1994 en la provincia de Almería, representando el primer caso de registro de gran número de acelerogramas (terremotos principales y réplicas) en España.

El estudio realizado se centra en la caracterización ingenieril de los acelerogramas correspondientes a los dos sismos principales de la Serie de Adra, tanto en el dominio temporal (historias de aceleraciones, velocidades y desplazamientos), como en el frecuencial (espectros de respuesta). Se obtienen asimismo los parámetros estándar derivados de dicha caracterización, a saber: duración significativa, amplificación espectral, período predominante, intensidad de Arias e intensidad de Housner, los cuales se correlacionan a su vez con los factores que determinan el movimiento del suelo debido a la sismicidad de la región (magnitud, distancia epicentral y tipo de terreno).

Finalmente, los datos obtenidos se utilizan para derivar leyes de atenuación y espectros de respuesta instrumentales, que se comparan con las previsiones de la Norma NCSE-94, basadas fundamentalmente en información de sismicidad histórica.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado en parte mediante la ayuda concedida por el Programa Sectorial de Promoción General del Conocimiento del MEC al Proyecto de Investigación titulado "Caracterización Ingenieril de Registros Sísmicos Españoles. Comparación con la Norma Sismoresistente", realizado conjuntamente por la Universidad Politécnica de Madrid y el Instituto Geográfico Nacional (1996-1998). Los investigadores responsables del Proyecto, Dr. Rafael Blázquez (UPM) y Dr. Emilio Carreño (IGN), agradecen desde estas páginas a la Dirección General de Investigación Científica y Técnica del Ministerio de Educación y Cultura la subvención otorgada para dicha investigación.

ÍNDICE

1.	Introducción.	1
2.	Antecedentes históricos. Evidencias macrosísmicas.	3
3.	Ubicación y características de los acelerógrafos instalados en la zona. ...	7
4.	Tratamiento de los registros sísmicos.	9
5.	Caracterización ingenieril de los acelerogramas de la serie de Adra.	11
5.1.	Parámetros cinemáticos.	12
5.1.1.	Duración.	12
5.1.2.	Valores máximos de los movimientos.	17
5.1.3.	Leyes de atenuación.	19
5.2.	Parámetros espectrales.	23
5.2.1.	Período predominante.	24
5.2.2.	Espectros de Fourier.	27
5.2.3.	Espectros de respuesta.	27
5.2.4.	Atenuaciones espectrales.	33
5.3.	Parámetros de daños.	34
5.3.1.	Intensidad de Arias.	34
5.3.2.	Intensidad de Housner.	35
6.	Comparación entre los datos medidos y las previsiones de la Norma NCSE-94.	39
7.	Conclusiones.	41
	Referencias.	43
APÉNDICE I	Acelerogramas, velocigramas y registros de desplazamiento de los sismos de la serie de Adra.	47
APÉNDICE II	Diagramas de Husid.	63
APÉNDICE III	Espectros normalizados de respuesta.	69
APÉNDICE IV	Diagramas espectrales trilogarítmicos.	75

CAPÍTULO 1

1 Introducción.

La denominada serie de Adra está constituida por un conjunto de terremotos de magnitud $m_b \leq 5.0$ que tuvieron lugar en el entorno de la provincia de Almería (Figura 1) durante los meses de diciembre de 1993 y enero de 1994. El primer terremoto ocurrió el día 23 de diciembre de 1993 a las 14:22 horas, sintiéndose con una intensidad máxima de VII en la escala M.S.K. en una región de unos 100 km^2 aproximadamente (IGN, 1994). La magnitud de sismo fue 5.0, localizándose su epicentro en tierra, a 6,2 km al noroeste de Adra (Almería).

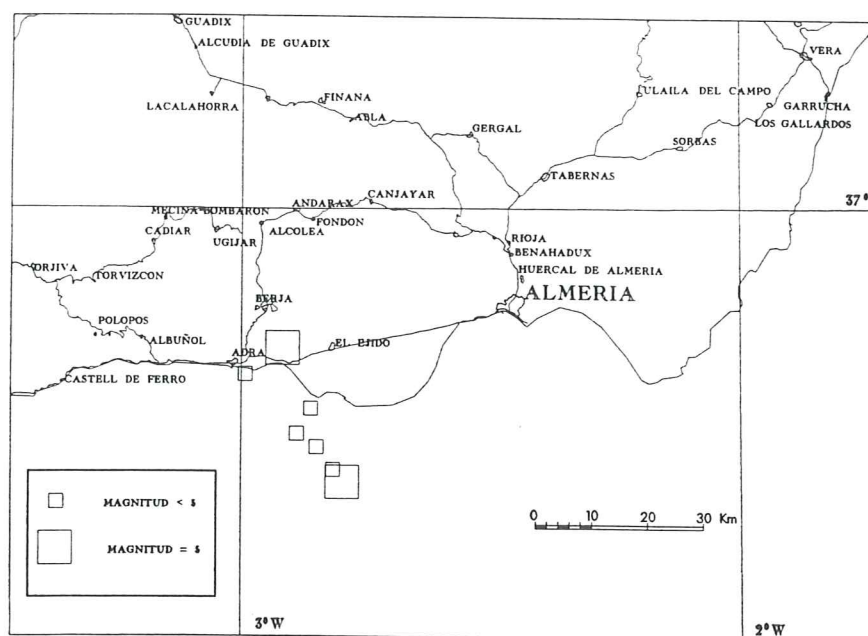


Figura 1 Área afectada y epicentros de la serie de Adra.

El segundo terremoto principal de la serie tuvo lugar el día 4 de enero de 1994, a las 8:30 horas, con magnitud similar al anterior $m_b = 5.0$. El epicentro de este terremoto se situó en el mar, a 27,7 km al sureste de la mencionada localidad de Adra. La serie analizada se compone de 7 eventos, cinco de los cuales (de magnitud inferior a 4) pueden considerarse réplicas de los dos anteriores (Tabla I). La actividad sísmica en la región cesó aparentemente el 26 de enero de 1994, si bien se registraron movimientos apreciables durante todo el año 1994 y hasta bien entrado el año 1995. A efectos de este trabajo no se han contabilizado en la serie estos últimos sismos, ni las réplicas de los terremotos principales.

Tabla I Terremotos constitutivos de la serie de Adra.

FECHA	HORA ORIGEN (GMT)	COORDENADAS EPICENTRALES		PROFUNDIDAD (km)	MAGNITUD
		LONGITUD	LATITUD		
23/12/93	14:22	-2° 55'	36° 46'	3	5.0
"	18:00	-3° 00'	36° 44'	2	3.8
04/01/94	08:03	-2° 48'	36° 34'	2	5.0
"	08:05	-2° 49'	36° 35'	5	3.6
09/01/94	16:01	-2° 52'	36° 41'	3	3.1
16/01/94	17:03	-2° 53'	36° 38'	2	3.5
26/01/94	16:16	-2° 51'	36° 37'	2	3.7

CAPÍTULO 2

2 Antecedentes históricos. Evidencias macrosísmicas.

Históricamente, aunque hay catalogados bastantes sismos con epicentro en las proximidades de Adra, tan sólo hay constancia de dos series sísmicas que posean cierta similitud con la iniciada en 1993.

La primera de ellas dio comienzo el 13 de enero de 1804 con un terremoto catalogado como de intensidad VIII-MSK (Mezcua y Martínez Solares, 1983), y se prolongó según el catálogo sísmico hasta finales de septiembre de ese mismo año. Durante este primer período hay catalogados varios sismos catastróficos en la región, entre otros un sismo de intensidad VIII (2 de enero) y uno de intensidad IX (25 de agosto). En las Figuras 2 y 3 se muestran los mapas de isosistas de ambos, confeccionados por López Marinas (Mezcua, 1982).

Existe un cierto paralelismo entre las referencias macrosísmicas de esta serie y la de 1993-94, si bien a tenor de los efectos ocasionados -más de 250 muertos entre otros- los mayores sismos de la serie de 1804 debieron ser de una magnitud sensiblemente más elevada que los de la serie actual y además, por la forma de las isosistas (Mezcua, 1982), parece deducirse que se trató también de sismos muy superficiales. Existen además otras analogías bastante notables entre ambas series: área epicentral casi coincidente, menor atenuación en las localidades costeras que en las próximas del interior y amplificación extraordinaria en ciertos emplazamientos lejanos donde llegaron a sentirse los sismos principales (Jaén y Madrid, por ejemplo).

La segunda serie histórica de sismos de Adra se inició el 14 de mayo de 1910, siendo este terremoto inicial el de mayor intensidad (VII-MSK). Actualmente hay catalogados terremotos de esta serie sísmica hasta finales de agosto, habiéndose reevaluado a la baja las intensidades inicialmente asignadas a algunos de ellos. Estos sismos fueron además registrados instrumentalmente, dado que en esta época funcionaban ya cuatro Observatorios Sismológicos en nuestro país (San Fernando en Cádiz, Cartuja en Granada, El Ebro en Tortosa y Fabra en Barcelona). No obstante parece que se han perdido los registros, por lo que no se conoce la magnitud.

Las informaciones macrosísmicas nos hablan de que el sismo principal de la serie de 1910 fue sentido en gran parte del sureste peninsular, así como en Madrid,

Córdoba, Sevilla y Alicante, entre otras poblaciones distantes. Se repiten pues algunas de las características antes apuntadas de los sismos de la serie de 1804.

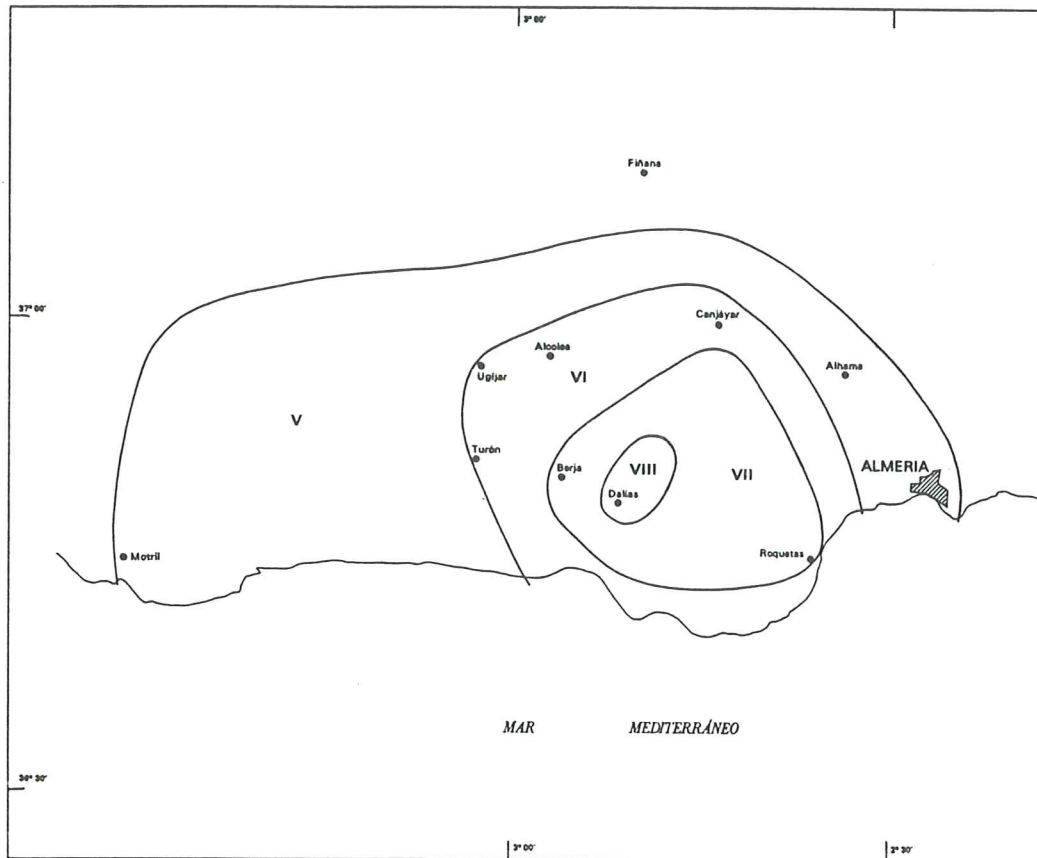


Figura 2 Isosistas del terremoto del 13 de enero de 1804 (Mezcua, 1982)

Comparados los sismos principales de las tres series, el de la serie de 1910 pudieran haber tenido una magnitud intermedia entre los de las series de 1804 y 1993, si bien su profundidad debió ser sensiblemente mayor a juzgar por sus efectos.

Cabe la duda de si las intensidades de los sismos de las series de 1804 y 1910 están sobrevaloradas. A estos efectos hay que resaltar que dichas intensidades han sido reevaluadas hace poco y los mapas de isosistas son también de reciente confección (Mezcua, 1982), si bien no se oculta la dificultad que representa la evaluación de las intensidades de los terremotos históricos, debido, por un lado, a la falta de información y, por otro, a la carencia de referencias, sobre todo en lo que atañe a la gran variedad de tipos y materiales constructivos existentes hoy día y de los que no se disponía antaño.

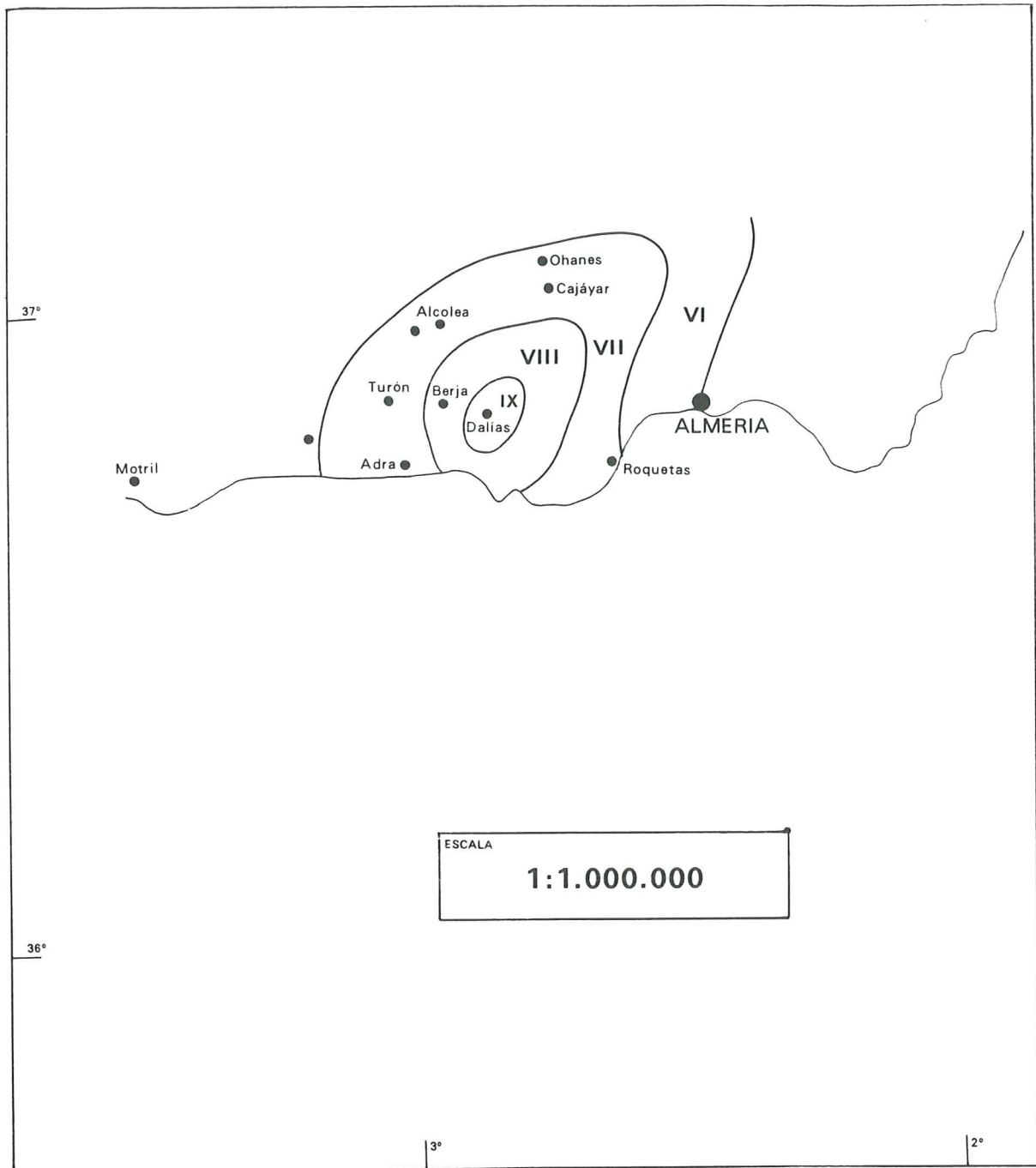


Figura 3 Isosistas del terremoto del 25 de Agosto de 1804 (Mezcua, 1982)



CAPÍTULO 3

3 Ubicación y características de los acelerógrafos instalados en la zona.

Los instrumentos de la Red Nacional de Acelerógrafos del Instituto Geográfico Nacional registraron los sismos de la serie de Adra en cinco provincias, a saber: Almería, Granada, Málaga, Sevilla y Murcia. En el momento de la ocurrencia de los sismos el área estaba instrumentada con un total de 29 acelerógrafos digitales SSA-1 y SSA-2, marca Kinematics, de tres componentes, con una resolución de 13 bits por canal y alta sensibilidad. El valor umbral de los acelerógrafos estaba fijado en 0,002 g, variando el fondo de escala entre $\pm 0,5g$ y $\pm 2 g$. El 55% del total de los acelerógrafos disponibles en la zona se dispararon el 23-XII-93 y el 45% el 4-I-94, fechas de los sismos principales de la serie. Un total de 12 aparatos registraron ambos eventos.

Hay que hacer notar que, si bien en 1977 se instalaron los primeros nueve acelerógrafos en España (tipo Kinematics con registro analógico en cassette), no es sino a partir de 1989 cuando se planifica el establecimiento de una red acelerográfica digital, potenciada a partir de 1992 con la instalación y reinstalación de nuevos instrumentos de muy bajo umbral de detección. La localización de las estaciones - fundamentalmente en el sur y sureste de la Península (Fig. 4) - se basa en los siguientes criterios:

- a) distribución espacial variable con el grado de actividad sísmica de la zona, ajustando en función de este parámetro la densificación planimétrica de la red.
- b) fácil acceso a las estaciones, con la posibilidad de consulta telefónica vía modem en algunos casos.
- c) permanencia indefinida de los instrumentos en los emplazamientos seleccionados.

El resultado de esta planificación ha sido un incremento notable en el número de registros disponibles (más de 300 en la actualidad, frente a escasamente tres antes de 1989), lo que permitirá en el futuro evaluar la influencia de los efectos locales en la respuesta sísmica de distintos emplazamientos, el análisis de atenuación de las aceleraciones máximas y el comportamiento de edificios singulares. La forma sistemática de efectuar estos estudios se ejemplifica en estas páginas tomando como referencia los sismos de la serie de Adra.

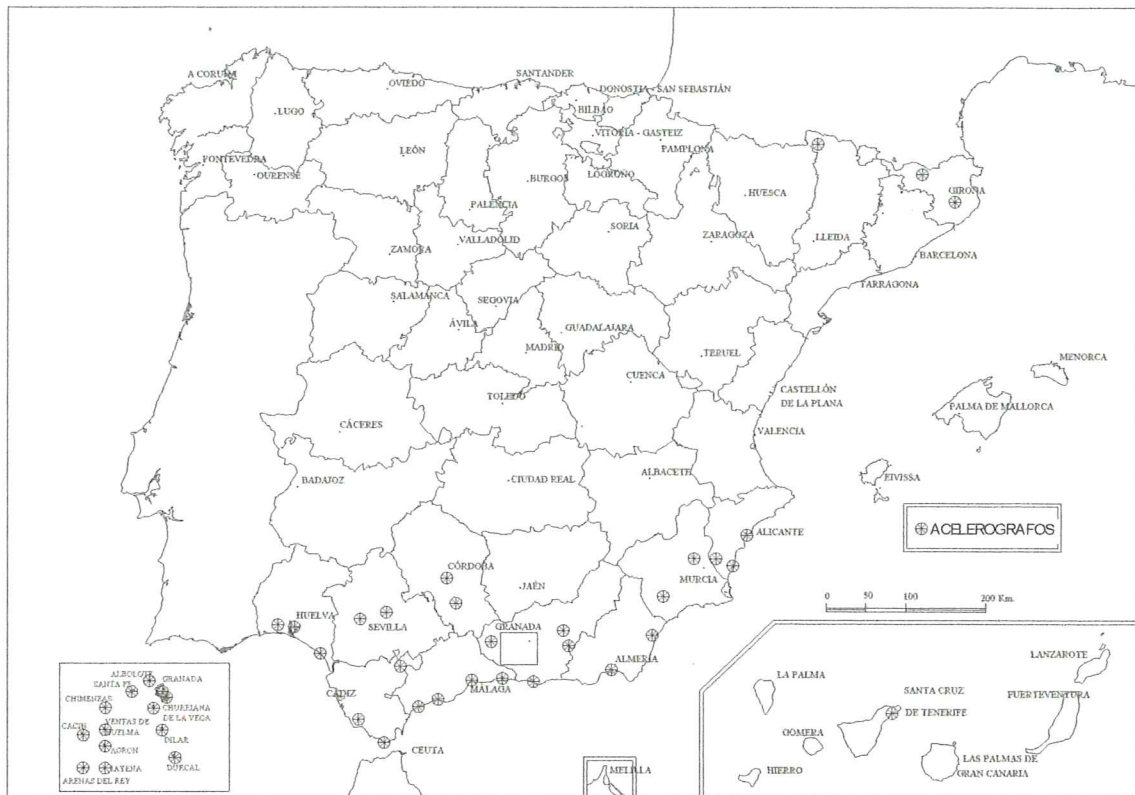


Figura 4 Estaciones de la Red Nacional de Acelerógrafos (Carreño, Suárez y Martínez Solares, 1995).

CAPÍTULO 4

4 Tratamiento de los registros sísmicos.

Todos los acelerógrafos de la Red del Instituto Geográfico Nacional registran digitalmente las tres componentes de la aceleración, longitudinal, transversal y vertical. Estos registros son procesados convirtiendo previamente los datos que provienen de los instrumentos a formato ASCII, que es con el que se trabaja a nivel informático.

En una segunda fase se tratan los acelerogramas obtenidos utilizando un software de análisis de datos comercial. De esta manera se realiza una corrección de los registros por respuesta instrumental, un filtrado de paso banda para eliminar el ruido de la señal y una restitución de la línea base o corrección de ceros. A continuación se aplica la regla de integración del trapecio para obtener consecutivamente los registros de velocidad y desplazamiento correspondientes a la historia temporal de aceleraciones (Apéndice I). Este método ha demostrado ser a la vez simple y eficiente en comparación con otros algoritmos de integración (regla de Simpson, método de Schuesler-Ibler, etc). Además, si se utiliza un intervalo de muestreo no superior a $f_{\max}/4$, siendo f_{\max} la máxima frecuencia del acelerograma, se comprueba que los efectos de ruido y deriva introducidos por la integración son prácticamente despreciables (Cabañas y Blázquez, 1997).

El tratamiento de los registros proporcionados por los acelerógrafos es fundamental en estudios de propagación de ondas y de respuesta estructural o del suelo, en los que se requiere una definición lo más exacta posible de las amplitudes y fases del movimiento en un amplio rango de frecuencias.

CAPÍTULO 5

5 Caracterización ingenieril de los acelerogramas de la serie de Adra.

En la Figura 5 se muestran las estaciones de la red afectadas por el sismo principal de la serie de Adra (23/12/93), distinguiendo entre las que registraron el terremoto y las que no. En total se obtuvieron 54 acelerogramas en la serie, cuya localización se indica en la Tabla II-a conjuntamente con el tipo de suelo de los emplazamientos deducido de los mapas 1:50000 del I.G.M.E.

Como puede verse en la Tabla II-b, la **distancia epicentral**, d_e , para las estaciones en las que se tiene registro varía entre unos pocos kilómetros (6,2 km para Adra el día 23 de diciembre) y 272 km, para el día 4 de enero en Carmona. Es notable que una estación tan alejada del epicentro como la de Carmona haya registrado los dos terremotos estudiados, lo cual se puede atribuir en principio a un efecto topográfico local (Aptdo 5.2.1).

Además hay que tener en cuenta que las condiciones geológicas y geotécnicas en las estaciones de registro no se conocen con exactitud, por lo que no es posible valorar correctamente su influencia en los acelerogramas analizados. En este sentido, la necesidad de realizar una campaña de sondeos en los emplazamientos de los acelerógrafos, que incluya ensayos de penetración estándar "in situ" y eventualmente ensayos dinámicos del terreno (cross-hole, triaxial cíclico, etc), es evidente. Por otra parte, el interés en la caracterización del movimiento del suelo en un determinado lugar viene motivado por la necesidad de definir el sismo local esperable a efectos de su posterior utilización en el diseño antisísmico de estructuras. Esta tarea es bastante compleja, dada la gran cantidad de factores que intervienen en la definición del movimiento del suelo, lo que obliga a recurrir a representaciones simplificadas basadas en un número limitado de parámetros físicos. Dichos parámetros (obtenidos de los registros analizados) se correlacionan a su vez con otros que definen el efecto de la fuente sísmica (magnitud), la trayectoria de las ondas (distancia) y el medio atravesado (rigidez del suelo). Distinguiremos en este estudio tres tipos de parámetros: parámetros cinemáticos, parámetros espectrales y parámetros de daños.

5.1 Parámetros cinemáticos.

Engloban una serie de valores característicos que definen en primera instancia el “tamaño del sismo” y su grado de peligrosidad desde el punto de vista ingenieril. Fundamentalmente se reducen a dos parámetros: la duración (escala horizontal de los registros) y los valores máximos de los movimientos (escala vertical).

5.1.1 Duración.

Puede definirse de acuerdo con varios criterios: duración efectiva (fase de máxima energía del movimiento; Vanmarcke and Lai, 1977), tiempo transcurrido entre el primer y último paso por un determinado umbral de aceleración (Bolt, 1973), etc.

El concepto de duración utilizado en este trabajo es el denominado “duración significativa” (Trifunac and Brady, 1975), que se relaciona con la aceleración cuadrática media del movimiento y por tanto con la energía transportada por las ondas sísmicas, la cual crece monótonicamente con el tiempo de registro. La duración significativa, D , se define como el tiempo transcurrido entre los instantes en los que se alcanza el 5% y el 95% del valor de la denominada intensidad de Arias, I_A , que es un parámetro de daño estructural que se deduce instrumentalmente (Aptdo. 5.3.1).

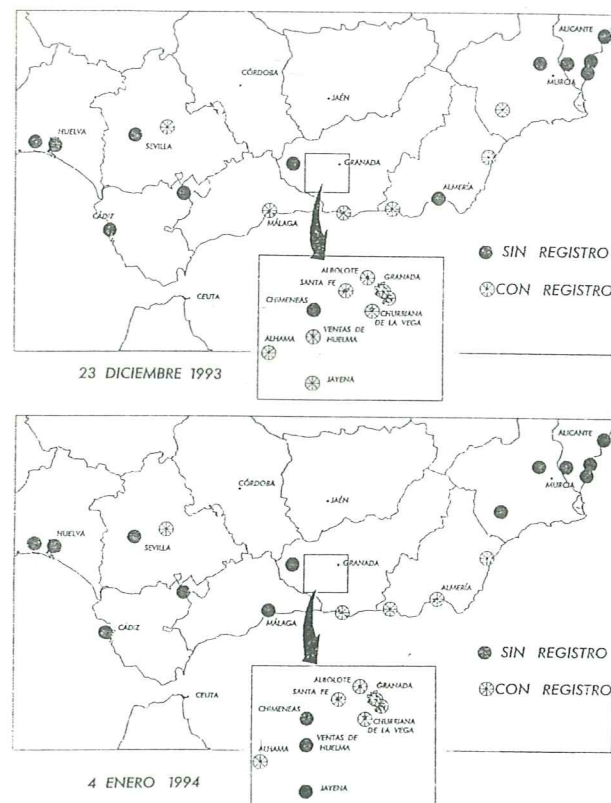


Figura 5 Estaciones de la Red Acelerográfica Nacional que registraron los sismos principales de la serie de Adra (Carreño et al., 1996).

Tabla II-a Datos de estaciones con registros de aceleración en la serie de Adra.

ESTACIÓN	COORDENADAS		MODELO	TIPO DE SUELO (ITGE)
	LATITUD	LONGITUD		
Adra (AL)	36°45'05"N	03°00'45"W	SSA-2	Esquistos, Cuarzitas
Motril (GR)	36°43'50"N	03°32'20"W	SSA-2	Aluvial
Pº de Ronda (Alhambra, GR)	37°10'44"N	03°35'18"W	SSA-2	Conglomerados
Comares (Alhambra, GR)	37°10'44"N	03°35'18"W	SSA-2	Conglomerados
Caballerizas (Alhambra, GR)	37°10'42"N	03°35'27"W	SSA-2	Conglomerados
Churriana (GR)	37°08'57"N	03°38'40"W	SSA-2	Aluvial
Fac. Ciencias (GR)	37°10'59"N	03°36'51"W	SSA-1	Aluvial
Albolote (GR)	37°13'53"N	03°39'18"W	SSA-1	Arcillas, Gravas
Jayena (GR)	36°57'02"N	03°49'18"W	SSA-2	Limos, Arenas
Santa Fe (GR)	37°11'28"N	03°43'01"W	SSA-2	Aluvial
Ventas de Huelma (GR)	37°04'06"N	03°49'13"W	SSA-2	Limos
Alhama (GR)	37°00'17"N	03°59'03"W	SSA-2	Calcarenitas
Vera (AL)	37°14'48"N	01°52'15"W	SSA-2	Coluvional, Aluvial
Málaga (MA)	36°43'39"N	04°24'40"W	SSA-1	Calizas
Lorca (MU)	37°40'41"N	01°41'59"W	SSA-2	Calizas
Almería (AL)	36°51'09"N	02°27'35"W	SSA-2	Calizas
Carmona (SE)	37°28'31"N	05°37'55"W	SSA-2	Calcarenitas

Tabla II-b Distancias epicentrales para las estaciones de la Tabla II-a en la serie de Adra.

SERIE DE ADRA (23-XII-93)		SERIE DE ADRA (4-I-94)	
ESTACIÓN	DISTANCIA EPICENTRAL (km)	ESTACIÓN	DISTANCIA EPICENTRAL (km)
Adra (AL)	6.2	Adra (AL)	27.7
Motril (GR)	53.7	Almería (AL)	44.0
Pº de Ronda (Alhambra, GR)	72.9	Motril (GR)	68.9
Comares (Alhambra, GR)	72.9	Pº de Ronda (Alhambra, GR)	97.2
Caballerizas (Alhambra, GR)	72.9	Comares (Alhambra, GR)	97.2
Churriana (GR)	74.5	Caballerizas (Alhambra, GR)	97.2
Fac. Ciencias (GR)	76.4	Churriana (GR)	98.0
Albolote (GR)	81.0	Fac. Ciencias (GR)	100.6
Jayena (GR)	81.4	Albolote (GR)	105.3
Santa Fe (GR)	83.7	Santa Fe (GR)	107.3
Ventas de Huelma (GR)	85.5	Vera (AL)	110.9
Alhama (GR)	97.1	Alhama (GR)	116.8
Vera (AL)	108.2	Carmona (SE)	272.0
Málaga (MA)	132.6		
Lorca (MU)	149.4		
Carmona (SE)	252.2		

Desde el punto de vista práctico la duración significativa se obtiene mediante el denominado “diagrama de Husid”, que no es sino un gráfico de valores acumulados que define la evolución temporal de la energía acarreada por las ondas sísmicas en el emplazamiento del acelerógrafo. Este gráfico se representa de forma adimensional en ordenadas, es decir se dibuja el valor del cociente normalizado:

$$\frac{I(t)}{I_A} = \frac{\frac{\pi}{2g} \int_0^t a^2(t) dt}{\frac{\pi}{2g} \int_0^{t_f} a^2(t) dt} \quad (1)$$

frente al tiempo (t_f = duración total del registro).

En la Figura 6 se muestra, a título de ejemplo, el diagrama de Husid correspondiente a un registro obtenido en la estación de Motril (Granada) el día 4 de enero de 1994. El valor de D (15,3 s) es la duración significativa del registro, mientras que Δ es la denominada duración “efectiva” o duración del tramo “recto” en el gráfico de Husid (para este registro su valor es aproximadamente 6 s). Este tramo recto, muy evidente en acelerogramas obtenidos en roca o suelo duro, está directamente relacionado con la llegada de las ondas directas P y S. El incremento de tiempo ($D - \Delta$) puede estar motivado en algunos casos por la llegada de ondas de volumen retrasadas o por el efecto de las ondas de superficie (Dobry, Idriss and Ng, 1978).

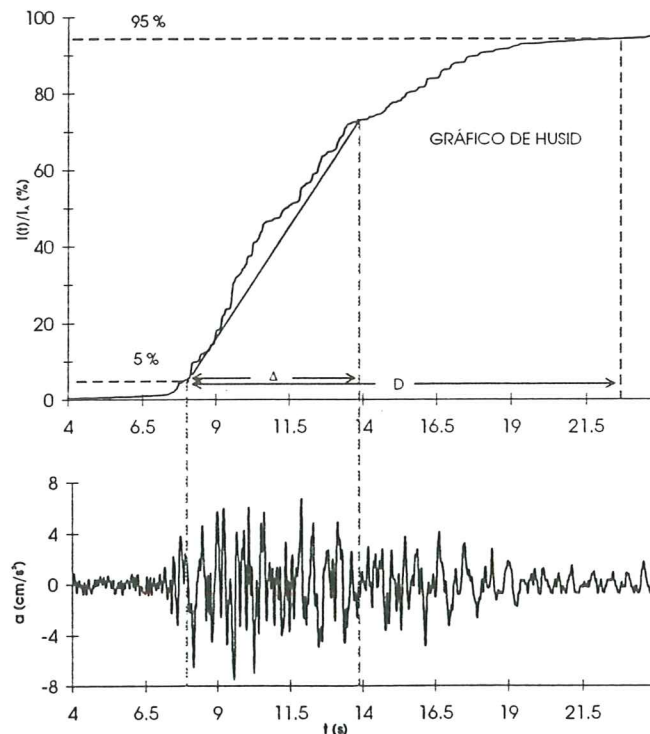


Figura 6 Diagrama de Husid. Definición de duración significativa (D) y duración efectiva (Δ).

En el Apéndice II se recogen los diagramas de Husid de los acelerogramas de Adra y en la Tabla III los cálculos de duración efectuados. Las duraciones significantes que figuran en la Tabla son, en cada estación, las relativas a las componentes horizontales del registro con valor máximo de aceleración. Hay que indicar que el acelerograma de Comares no aparece en la tabla por corresponder a una estructura, a diferencia de los demás registros que han sido obtenidos en campo libre. Si bien a primera vista se aprecia una gran dispersión en los resultados, un estudio más detallado parece indicar una relación directa entre el aumento de la duración significativa y el de la distancia epicentral. Así por ejemplo se comprueba que, para la estación de Adra, los gráficos de Husid correspondientes a los registros de diciembre del 93 y enero del 94 son muy similares: los valores de D son muy pequeños (1,1 y 3,4 segundos respectivamente) y prácticamente coinciden con los valores de Δ .

Tabla III Duración de los registros.

SERIE DE ADRA (23-XII-93). HORA ORIGEN: 14:22		
ESTACIÓN	COMPONENTE	DURACIÓN SIGNIFICANTE (s)
Adra (AL)	E-W	1.1
Motril (GR)	N-S	20.5
Pº de Ronda (Alhambra, GR)	E-W	20
Caballerizas (Alhambra, GR)	N-S	16.1
Churriana (GR)	N-S	10.3
Fac. Ciencias (GR)	N-S	21
Albolote (GR)	E-W	30.3
Jayena (GR)	E-W	19.5
Santa Fe (GR)	E-W	15.3
Ventas de Huelma (GR)	E-W	8
Alhama (GR)	N-S	24
Vera (AL)	E-W	26.5
Málaga (MA)	E-W	12.3
Lorca (MU)	N-S	29
Carmona (SE)	N-S	20.5
SERIE DE ADRA (4-I-94). HORA ORIGEN: 8:03		
ESTACIÓN	COMPONENTE	DURACIÓN SIGNIFICANTE (s)
Adra (AL)	N-S	3.4
Almería (AL)	E-W	15.1
Motril (GR)	E-W	11
Pº de Ronda (Alhambra, GR)	E-W	13.4
Caballerizas (Alhambra, GR)	E-W	15.1
Churriana (GR)	N-S	13.7
Fac. Ciencias (GR)	N-S	19.5
Albolote (GR)	N-S	34
Santa Fe (GR)	N-S	15.6
Vera (AL)	E-W	22.5
Alhama (GR)	N-S	22.7
Carmona (SE)	E-W	13.5

Ello es debido en ambos casos a la proximidad al epicentro y al emplazamiento rocoso del acelerógrafo.

Si se representa la duración significativa frente a la distancia epicentral para todos los registros (Fig. 7-a) parece difícil poder encontrar una función que relacione ambos parámetros, debido a la gran dispersión de resultados. Sin embargo, si se hace sólo la representación de los valores que corresponden a estaciones sobre suelo duro (Fig. 7-b), se atisba una mejor correlación directa entre la duración significativa y la distancia epicentral. Aunque los valores disponibles son pocos, se ha ajustado una recta a la nube de puntos que concuerda bastante bien con las estimaciones de Dobry et al. (1978) para emplazamientos sobre roca.

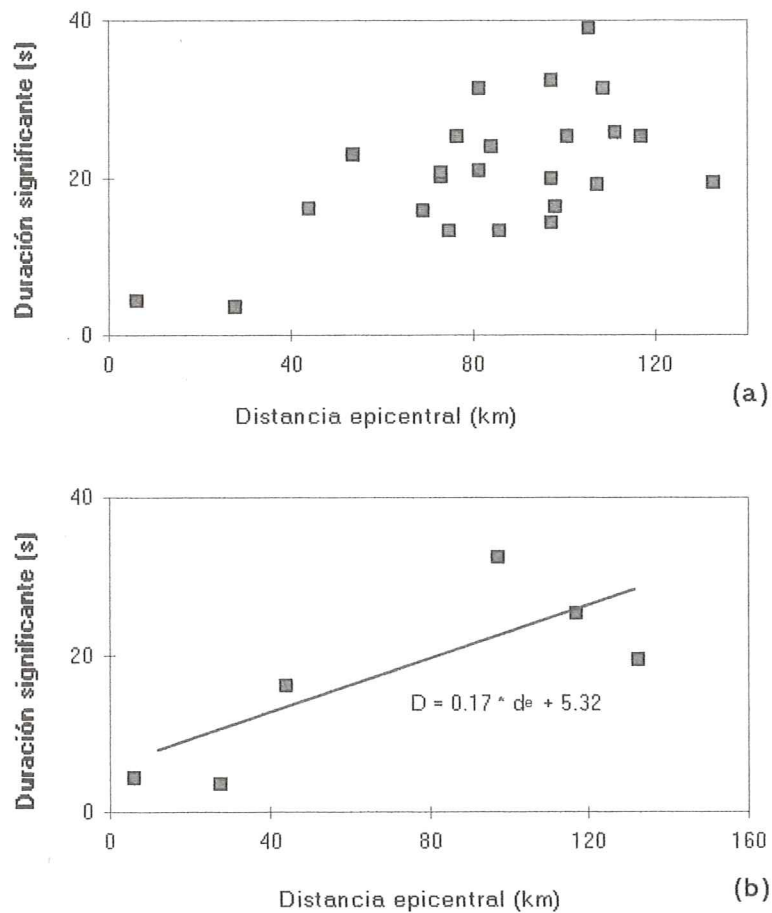


Figura 7 Duración significativa versus distancia epicentral
 a) de todos los registros,
 b) de los registros en estaciones sobre suelo duro.

5.1.2 Valores máximos de los movimientos

Se relacionan en la Tabla IV para los registros de aceleración y desplazamiento que se muestran en el Apéndice I. Obviamente los valores máximos de los movimientos sísmicos disminuyen, por efecto de la atenuación del frente de ondas, al aumentar la distancia.

Dos observaciones cabe hacer en relación con los datos de la Tabla IV. En primer lugar se produce una fuerte caída en los valores de la aceleración al alejarnos de la zona epicentral del terremoto. Dicha disminución es relativamente constante en magnitud e independiente del sismo considerado. Las excepciones a esta regla pueden atribuirse con bastante probabilidad a deficiencias en la instalación y/o en el funcionamiento del aparato (ej: acelerógrafo de la Facultad de Ciencias de Granada, que registra aleatoriamente valores muy superiores o muy inferiores a los de otros instrumentos ubicados a distancias similares).

En segundo lugar se constata que la posible armonicidad del movimiento del terreno:

$$\frac{a_{\max} \cdot d_{\max}}{v_{\max}^2} = 1 \quad (2)$$

sólo se verifica en general en el campo lejano ($d_e > 200$ km.), ya que entonces el movimiento se hace más uniforme, al ordenarse los paquetes de ondas sísmicas (Newmark and Rosenblueth, 1971). Para los demás puntos el cociente anterior decrece con la distancia, aproximándose al valor unidad al alejarnos del foco del terremoto (Newmark, 1968).

Por lo que concierne al carácter tridimensional del movimiento, se ha comprobado que no existe una gran diferencia entre los valores pico de las componentes longitudinal y transversal de cada registro, por lo que en la Tabla IV (al igual que en la Tabla III), sólo se recogen los valores correspondientes a la componente horizontal que da la máxima aceleración.

Respecto a la componente vertical, como se muestra en la Fig. 8, su valor pico es en general inferior al 70% del valor de la componente horizontal, que es la especificación de la norma NCSE-94 para las ordenadas espectrales verticales.

Es interesante mencionar aquí que los registros de la serie de Adra muestran ciertas peculiaridades con relación a la aceleración vertical, que ya habían sido puestas de manifiesto en terremotos anteriores. Así, la máxima aceleración registrada en el acelerógrafo de Alhama de Granada corresponde siempre a la componente vertical. Es notable este dato por cuanto Alhama de Granada fue uno de los pueblos más azotados por el terremoto de Andalucía de 1884, interpretándose este efecto macrosísmico como una focalización de las ondas en la zona más próxima al tajo sobre el río Marchán. No es fácil de todos modos relacionar este daño con la aceleración vertical máxima aunque dada la gran debilidad de las construcciones en 1884 una importante sobrecarga vertical coadyuvaría al daño de forma notable.

Otro factor importante a considerar es la representatividad de la aceleración máxima como parámetro base del diseño sísmico.

Se impone una cierta cautela en este punto, ya que en los acelerogramas de tipo impulsivo, muy próximos al epicentro (ejemplo: los acelerogramas registrados en la estación de Adra; Figuras 9-a y 9-b), aparecen una serie de pulsos de aceleración de gran magnitud, alta frecuencia y pequeña duración, que no corresponden en absoluto a la aceleración "efectiva" que experimenta el terreno (Pfossel and Slosson, 1974). Así pues, la distancia epicentral es un factor a tener siempre en cuenta, ya que determina en cierta medida el aspecto de los acelerogramas (Figuras 9-c y 9-d)

Tabla IV Valores máximos de los movimientos sísmicos.

SERIE DE ADRA (23-XII-93). HORA ORIGEN: 14:22				
ESTACIÓN	COMPONENTE	a_{\max} (cm/s ²)	v_{\max} (cm/s)	d_{\max} (cm)
Adra (AL)	E-W	25.00	1.21	0.13
Motril (GR)	N-S	17.35	0.89	0.14
Pº de Ronda (Alhambra, GR)	E-W	6.40	0.46	0.09
Caballerizas (Alhambra, GR)	N-S	7.28	0.46	0.12
Churriana (GR)	N-S	7.63	0.38	0.11
Fac. Ciencias (GR)	N-S	0.91	0.10	0.03
Albolote (GR)	E-W	1.66	0.12	0.02
Jayena (GR)	E-W	11.93	0.66	0.09
Santa Fe (GR)	E-W	5.29	0.41	0.12
Ventas de Huelma (GR)	E-W	2.93	0.19	0.05
Alhama (GR)	N-S	0.40	0.04	0.01
Vera (AL)	E-W	1.73	0.14	0.04
Málaga (MA)	E-W	0.58	0.02	0.01
Lorca (MU)	N-S	0.84	0.09	0.03
Carmona (SE)	N-S	0.63	0.12	0.04
SERIE DE ADRA (4-I-94). HORA ORIGEN: 8:03				
ESTACIÓN	COMPONENTE	a_{\max} (cm/s ²)	v_{\max} (cm/s)	d_{\max} (cm)
Adra (AL)	N-S	30.05	1.62	0.09
Almería (AL)	E-W	10.23	0.38	0.04
Motril (GR)	E-W	16.68	1.35	0.19
Pº de Ronda (Alhambra, GR)	E-W	5.16	0.38	0.06
Caballerizas (Alhambra, GR)	E-W	4.31	0.37	0.06
Churriana (GR)	N-S	3.82	0.25	0.04
Fac. Ciencias (GR)	N-S	0.60	0.07	0.02
Albolote (GR)	N-S	0.93	0.09	0.02
Santa Fe (GR)	N-S	4.09	0.41	0.07
Vera (AL)	E-W	1.24	0.07	0.02
Alhama (GR)	N-S	0.42	0.04	0.01
Carmona (SE)	E-W	0.59	0.10	0.03

5.1.3 Leyes de atenuación.

La curva de atenuación adoptada en este estudio ha sido del tipo:

$$a = c_1 e^{c_2 m} \cdot (R + R_0)^{-c_3} \tag{3}$$

donde:

- a = aceleración horizontal máxima registrada.
- c_1, c_2, c_3 = coeficientes.
- m = magnitud del terremoto
- R = distancia en kilómetros a la fuente de liberación de energía
- R_0 = coeficiente de mejora del ajuste

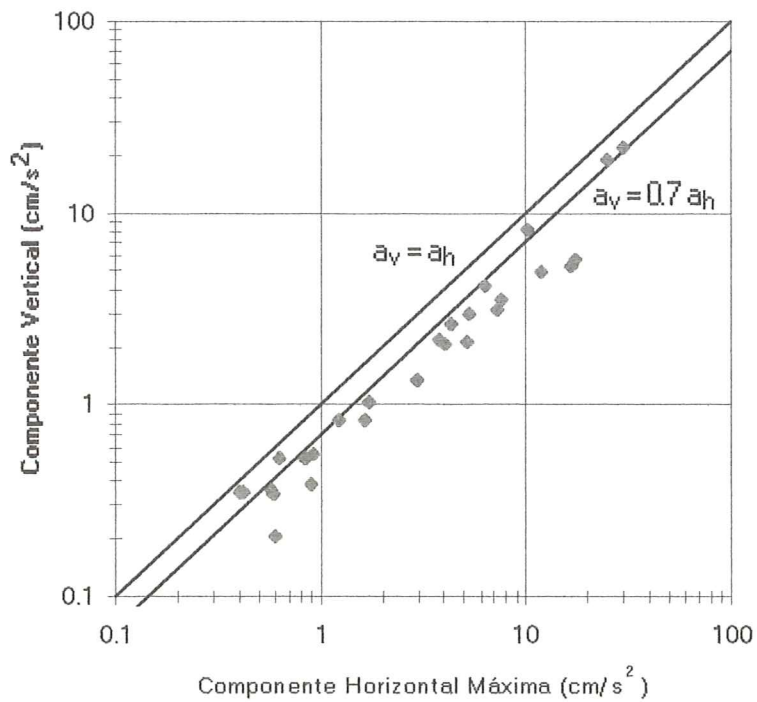


Figura 8 Correlación entre las componentes vertical y horizontal máxima de la aceleración.

El ajuste de los valores de aceleración registrados a la citada ley se llevó a cabo por el método de mínimos cuadrados, previa linealización de la ecuación (3), obteniéndose las relaciones de observación:

$$v_i = c_4 + c_2 m_i - c_3 \ln(R_i + R_0) - \ln a_i \quad (4)$$

donde $c_4 = \ln c_1$, y v_i representan los residuos de las relaciones de observación a minimizar.

El cálculo se realizó mediante el programa ACEDIR (Martín, 1983), que determina matricialmente los valores correspondientes a los coeficientes c_1 , c_2 , c_3 , de acuerdo con la teoría de errores, así como los residuos y los errores medios cuadráticos. A fin de obtener el valor de R_0 , los cálculos se iteraron para los valores de $R_0=0,5;10;15;20$ y 25 km, adoptándose en cada supuesto el valor de ellos que daba el error medio cuadrático mínimo.

Cuando la magnitud de todos los sismos considerados es exactamente la misma - lo que ocurre por ejemplo cuando se consideran únicamente los dos sismos principales de la serie de Adra- la ecuación (3) se simplifica de la forma siguiente:

$$a = c_5 (R + R_0)^{-c_3} \quad (5)$$

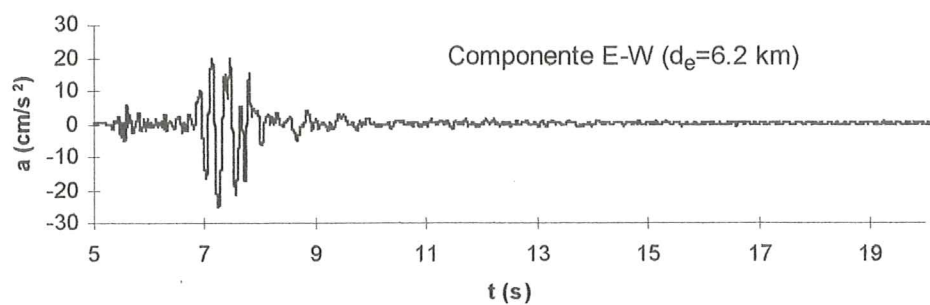
o lo que es lo mismo:

$$\ln a = c_6 - c_3 \cdot \ln(R + R_0) \quad (6)$$

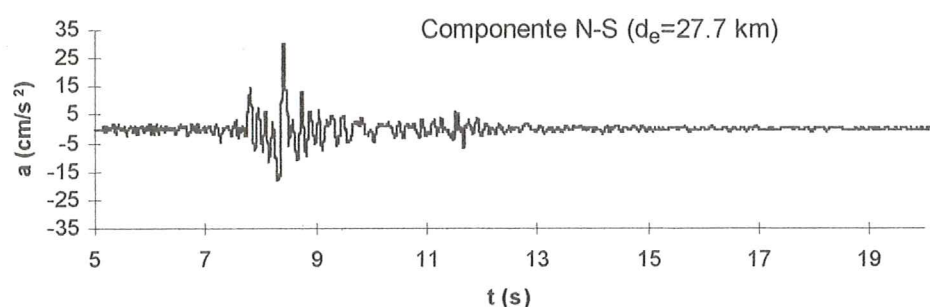
donde $c_6 = \ln c_5$ es un coeficiente y los restantes parámetros tienen el mismo significado que en la ecuación (3).

Los datos de aceleración considerados en los cálculos corresponden exclusivamente al "campo libre", esto es a instrumentos instalados directamente sobre el terreno, prescindiéndose por tanto de los registros proporcionados por el acelerógrafo situado en la parte alta de la Torre de Comares, en la Alhambra, cuyos efectos han sido evaluados en un trabajo específico (Carreño y Martín, 1994).

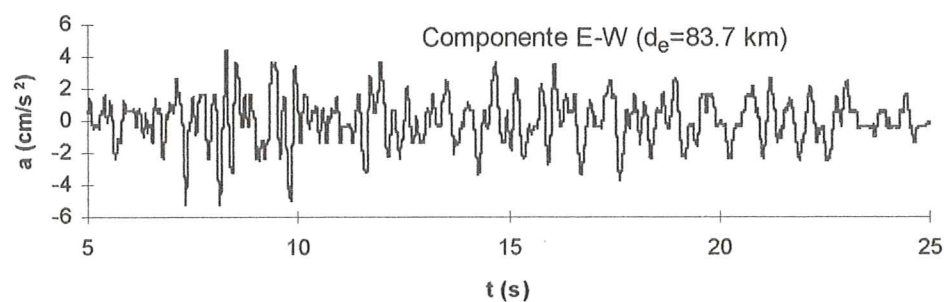
Dado el tamaño relativamente pequeño de la muestra (pocos registros) y las características de los terremotos (muy superficiales, con aceleraciones máximas inferiores a 60 gals), no es posible obtener leyes fiables de atenuación para direcciones concretas. Los resultados corresponden por tanto a curvas medias calculadas a partir de todos los datos disponibles, que muestran una fuerte atenuación y bajos picos de aceleración.



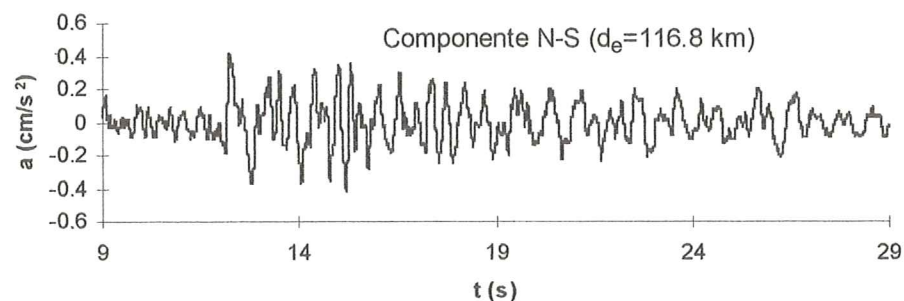
a) Acelerograma registrado en la estación de Adra (sismo del 23/12/93)



b) Acelerograma registrado en la estación de Adra (sismo del 23/12/93)



c) Acelerograma registrado en la estación de Santa Fe (sismo del 23/12/93)



d) Acelerograma registrado en la estación de Alhama de Granada (sismo del 4/1/94)

Figura 9 Influencia de la distancia epicentral en la duración y forma de los registros.

En consecuencia, las leyes de atenuación obtenidas a partir de la serie de Adra revelan aceleraciones sensiblemente inferiores a las estimadas para todos los terremotos registrados en España hasta 1994, ya sean históricos o instrumentales (Fig. 10).

La gran superficialidad de los sismos principales de la Serie de Adra (profundidades focales de 3 km. y 2 km., respectivamente) puede ser la causa de la fuerte atenuación y de los bajos picos de aceleración de estos terremotos, así como de su posterior influencia en los cálculos. Profundidades algo mayores (del orden de 15 km.) hubieran dado lugar probablemente a leyes de atenuación bastante diferentes, más acordes con las evidencias históricas macrosísmicas, ya que los cálculos de atenuación son muy sensibles a la completitud de los datos de partida. Así, la mayor heterogeneidad de los datos como consecuencia de la consideración de un mayor número de registros sísmicos, hace aumentar el error medio cuadrático del ajuste de la ley de atenuación (valores v_i en la ecuación 3). Por último, la valoración de los resultados a efectos de microzonación presenta problemas similares a la obtención de leyes de atenuación direccionales. En general se observa -en congruencia con los datos macrosísmicos- una amplificación de aceleraciones a lo largo de la costa occidental (Motril, Málaga, etc.), debido muy probablemente a efectos del suelo en dicha zona.

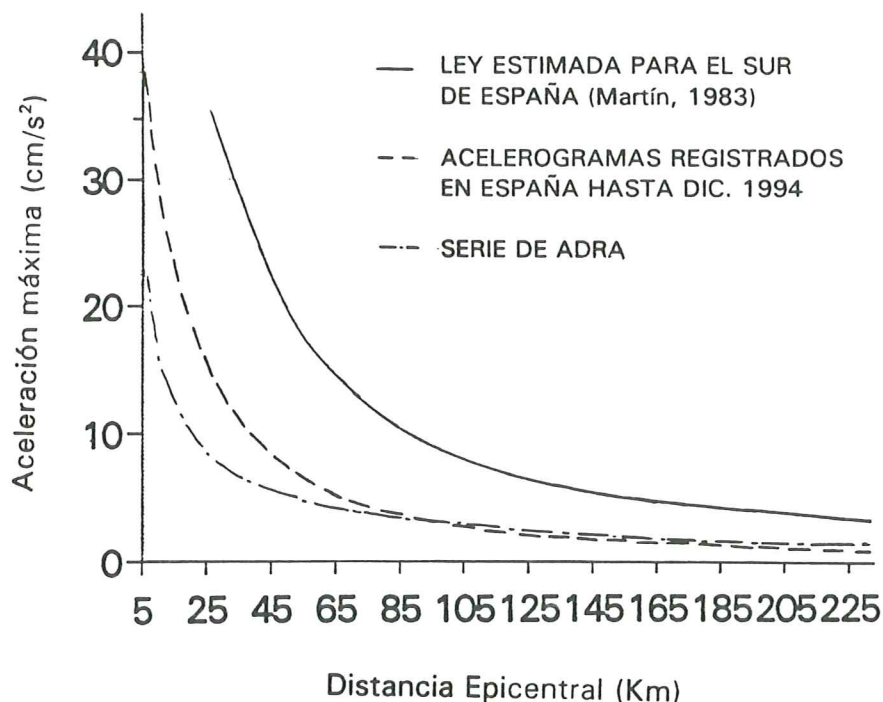


Figura 10 Curvas de atenuación de la aceleración de sismos españoles de magnitud 5.0

5.2 Parámetros espectrales.

En Ingeniería Sísmica, el conocimiento del tipo de terreno del emplazamiento y el contenido frecuencial del movimiento del suelo es absolutamente fundamental. Para caracterizar la distribución de la energía transportada por las ondas sísmicas para distintas frecuencias se utilizan básicamente los conceptos de período predominante y espectros y pseudoespectros de respuesta (Biot, 1943; Housner, 1947; Alford, Housner and Martel, 1953), así como determinados parámetros característicos de los mismos: valores máximos y atenuaciones espectrales. A continuación se analizan y resumen estos parámetros (Tabla V) para los registros de los sismos principales de la serie de Adra.

Tabla V Parámetros espectrales de los registros.

SERIE DE ADRA (23-XII-93). HORA ORIGEN: 14:22					
ESTACIÓN	COMPONENTE	PERÍODO PREDOMINANTE (s)	PSA _{max} (cm/s ²)	PSV _{max} (cm/s)	PSD _{max} (cm)
Adra (AL)	E-W	0.3	98.11	4.18	0.25
Motril (GR)	N-S	0.9	44.57	2.68	0.43
Pº de Ronda (Alhambra, GR)	E-W	0.8	19.10	2.14	0.28
Caballerizas (Alhambra, GR)	N-S	0.8	22.52	2.12	0.26
Churriana (GR)	N-S	0.3	36.01	1.59	0.37
Fac. Ciencias (GR)	N-S	0.9	3.21	0.25	0.04
Albolote (GR)	E-W	0.8	7.30	0.44	0.06
Jayena (GR)	E-W	0.6	33.83	2.01	0.22
Santa Fe (GR)	E-W	0.8	25.53	1.69	0.56
Ventas de Huelma (GR)	E-W	0.6	7.36	0.67	0.18
Alhama (GR)	N-S	0.5	1.76	0.18	0.04
Vera (AL)	E-W	0.6	6.11	0.34	0.12
Málaga (MA)	E-W	0.5	1.87	0.08	0.01
Lorca (MU)	N-S	1.3	3.95	0.33	0.09
Carmona (SE)	N-S	2.0	1.97	0.62	0.17
SERIE DE ADRA (4-I-94). HORA ORIGEN: 8:03					
ESTACIÓN	COMPONENTE	PERÍODO PREDOMINANTE (s)	PSA _{max} (cm/s ²)	PSV _{max} (cm/s)	PSD _{max} (cm)
Adra (AL)	N-S	0.2	90.26	2.90	0.27
Almería (AL)	E-W	0.1	37.76	0.93	0.13
Motril (GR)	E-W	1.4	49.27	5.58	0.98
Pº de Ronda (Alhambra, GR)	E-W	0.7	13.91	1.70	0.30
Caballerizas (Alhambra, GR)	E-W	0.7	14.44	1.60	0.26
Churriana (GR)	N-S	0.4	12.05	0.54	0.13
Fac. Ciencias (GR)	N-S	1.2	1.59	0.28	0.05
Albolote (GR)	N-S	0.7	2.59	0.15	0.03
Santa Fe (GR)	N-S	0.6	16.51	1.56	0.19
Vera (AL)	E-W	1.0	4.35	0.20	0.05
Alhama (GR)	N-S	0.8	1.86	0.13	0.02
Carmona (SE)	E-W	1.3	1.53	0.33	0.09

5.2.1 Período predominante

Se denomina período predominante de un acelerograma, T_p , aquél para el cual el espectro de Fourier de la aceleración alcanza su valor máximo. Evidentemente, si el registro fuese de tipo armónico dicho período vendría dado por la fórmula:

$$T_p = \frac{v_{\max}}{a_{\max}} \quad (7)$$

y sería independiente de tipo de suelo. Para acelerogramas reales esto no es así, y el período predominante depende tanto de la distancia epicentral y del tipo de suelo como de la propia magnitud del sismo, de tal modo que a menor distancia epicentral, menor magnitud o menor resistencia mecánica del terreno corresponde un menor período y viceversa.

Es obvio que para distancias epicentrales largas, la fórmula (7) aproxima mejor el valor de T_p que para distancias cortas, como puede deducirse a partir de los datos de la Tabla V.

En la Fig. 11 se han dibujado los valores de los períodos predominantes deducidos para las estaciones sobre roca y suelo duro de la serie de Adra. La recta de ajuste sigue la misma pauta que la correlación reportada por Seed, Idriss and Kiefer (1969) para sismos de magnitud 5.0 registrados en roca (Fig 12).

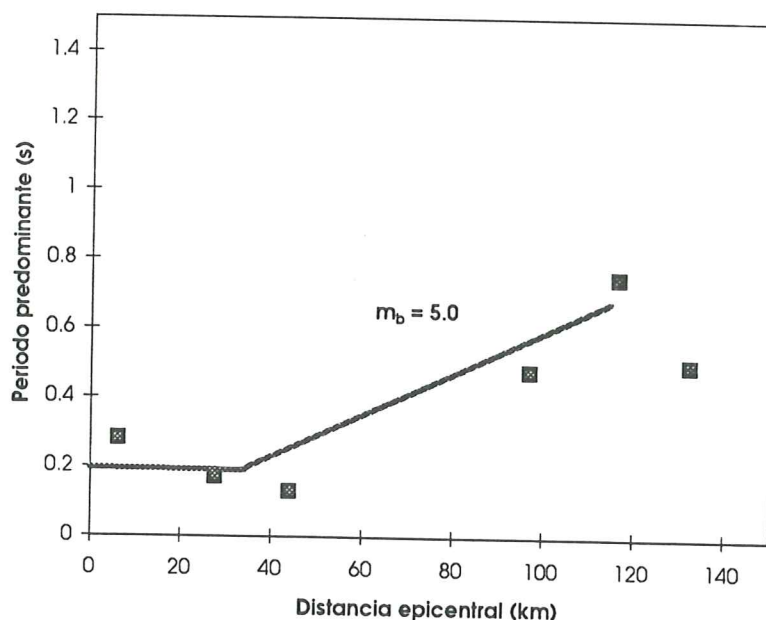


Figura 11 Distribución del período predominante con la distancia para emplazamientos en roca y terreno firme (serie de Adra).

El período predominante de un acelerograma es un concepto en desuso, pero puede ser particularmente importante a la hora de valorar los efectos topográficos y geotécnicos locales en registros alejados de la fuente origen del terremoto. En este último caso pueden producirse fenómenos de pseudo-resonancia entre el período predominante del movimiento de entrada y el período natural del suelo, que amplifican mucho las ondas en el emplazamiento del acelerógrafo (Blázquez, 1992).

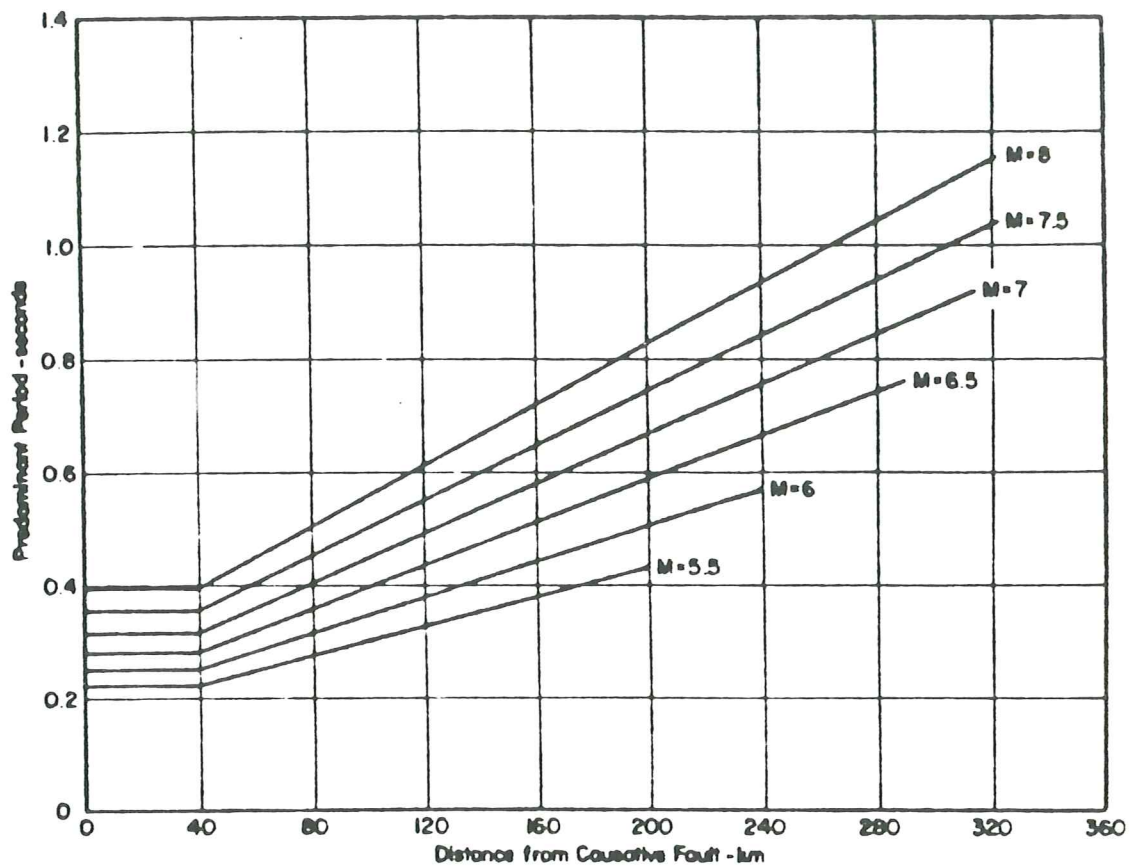


Figura 12 Variación del período predominante con la magnitud del sismo y la distancia epicentral (Seed, Idriss and Kiefer, 1969).

En cuanto a los efectos topográficos, se traducen en amplificaciones del movimiento en las cimas de cerros y coronaciones de taludes y atenuaciones en los fondos de valles. Un posible ejemplo de este tipo de efectos son los registros de la estación de Carmona (Sevilla), situada sobre una colina a 272 km. del epicentro del terremoto.

En la Figura 13 se representa la distribución geográfica de los valores del período predominante obtenidos para los dos sismos principales de la serie de Adra. Puede verse claramente como el período predominante aumenta con la distancia epicentral, la cual enmascara los posibles efectos locales debido a la baja magnitud de los sismos estudiados.

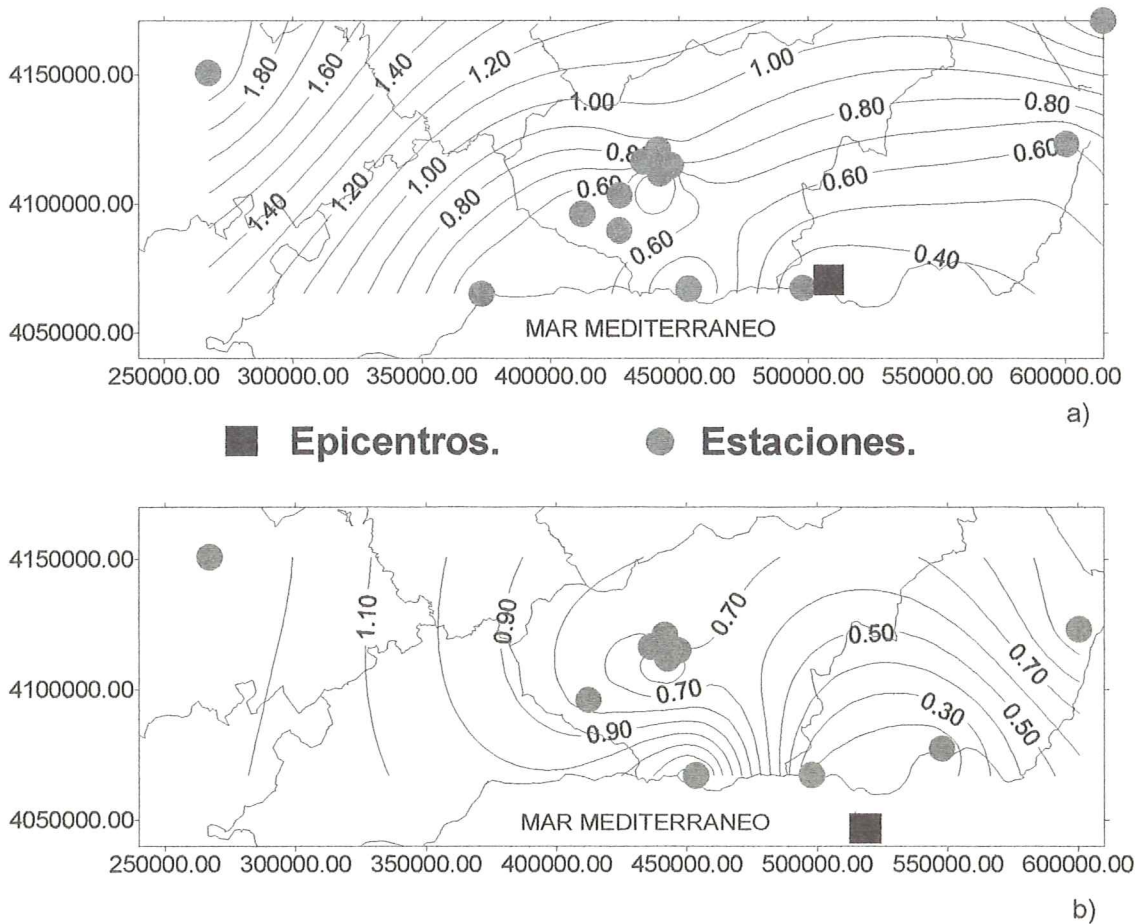


Figura 13 Isolíneas de períodos predominantes. a) Sismo del 23-12-93; b) Sismo del 4-1-94.

5.2.2 Espectros de Fourier.

El espectro de Fourier es un algoritmo que permite describir de forma inmediata la distribución por frecuencias de la energía que conllevan las ondas sísmicas. Se define como el módulo de la transformada de Fourier directa del acelerograma, $a(t)$:

$$FS(\omega) = |F(i\omega)| = \left| \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} a(t) e^{-i\omega t} dt \right| \quad (8)$$

y se relaciona, para cada valor de $T = \frac{2\pi}{\omega}$, con la raíz cuadrada de la energía total E , acumulada por un oscilador simple no amortiguado, de periodo propio T y masa m , al término del terremoto (Husid, 1973):

$$FS(\omega) = \sqrt{\frac{2E}{m}} \quad (9)$$

De aquí se concluye que los períodos predominantes del sismo se corresponden con los máximos de la curva $FS(T)$, que son precisamente las regiones de frecuencia en que el terremoto transfiere una energía apreciable al oscilador.

Los espectros de Fourier aparecen inter-relacionados con los espectros de respuesta de los registros (aptdo. siguiente), pudiendo derivarse fácilmente a partir de estos últimos. Por esta razón no se incluyen en este trabajo las gráficas correspondientes a los acelerogramas de la serie de Adra.

5.2.3 Espectros de respuesta.

Constituyen la forma habitual en Ingeniería Sísmica de caracterizar el contenido frecuencial del movimiento del terreno y/o el de las estructuras en él cimentadas. Generalmente se manejan tres tipos de espectros, denominados espectro de desplazamiento relativo, SD, espectro de velocidad relativa, SV, y espectro de aceleración absoluta, SA, cuyas definiciones se muestran en la Fig. 14. Las ventajas y el significado físico de la representación espectral de acelerogramas frente a la representación temporal han sido descritas por Hudson (1979) y son bien conocidas. Así, por ejemplo, puede demostrarse que el espectro de respuesta sin amortiguamiento ($\zeta=0$) de la velocidad relativa envuelve muy aproximadamente al espectro de Fourier de la aceleración absoluta, lo que establece el nexo de unión entre las dos categorías de espectros ya comentadas (Fig. 15).

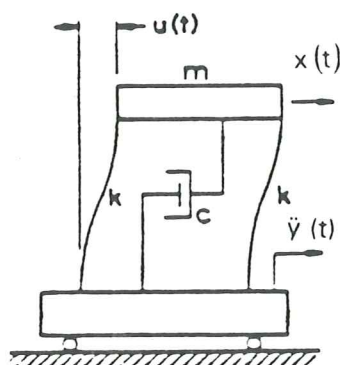
En la Fig. 14 se definen además otros dos tipos de espectros, denominados pseudoespectro de velocidad relativa, PSV, y pseudoespectro de aceleración absoluta, PSA, respectivamente. Si bien la permutación de espectros reales por pseudoespectros presenta ciertos problemas para amortiguamientos altos y períodos altos (Blázquez, 1995), la posibilidad de representar conjuntamente los valores de SD, PSV y PSA en un

solo gráfico de tipo trilogarítmico es de gran interés, por cuanto permite inducir fácilmente la aceleración y el desplazamiento máximo del terreno del emplazamiento, del siguiente modo:

$$(PSA)_{T=0} \rightarrow [a(t)]_{\max} \quad (10-1)$$

$$(SD)_{T=\infty} \rightarrow [d(t)]_{\max} \quad (10-2)$$

En el Apéndice III se muestran, en escala lineal, los pseudoespectros de respuesta de aceleración de los registros del Apéndice II normalizados a la aceleración máxima del terreno. De la misma forma, en el Apéndice IV se recogen los gráficos trilogarítmicos (comúnmente conocidos como "diagramas tripartitos") de dichos registros. En uno y otro caso, para el cálculo de los espectros y pseudoespectros de respuesta, se ha utilizado el método numérico de sumas simples (Clough, 1979), que proporciona una aproximación suficientemente buena y eficiente para los objetivos de este estudio (Canet y Barbat, 1988).



$$\zeta = \frac{c}{2mp} \quad ; \quad p = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\ddot{u} + 2\zeta p \dot{u} + p^2 u = -\ddot{y}(t)$$

$$SD = |u(t)|_{\max} = -\frac{1}{p\sqrt{1-\zeta^2}} \int_0^t \ddot{y}(\tau) e^{-p\zeta(t-\tau)} \sin p\sqrt{1-\zeta^2}(t-\tau) d\tau$$

$$SV = |u(t)|_{\max} \quad ; \quad SA = |\dot{x}(t)|_{\max} = |\ddot{u}(t) + \ddot{y}(t)|_{\max}$$

$$PSV = p \cdot SD = \frac{2\pi}{T} SD \quad ; \quad PSA = p^2 SD = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \times SD$$

Figura 14 Definición de espectros y pseudoespectros de respuesta (Hudson, 1979).

Para los dos sismos principales de la serie de Adra, la variación de los pseudoespectros de aceleración con la distancia epicentral se analiza en las Figs. 16 y 17, agrupando las curvas espectrales por intervalos de distancia epicentral, específicamente $d_e \leq 80$ km, $80 \leq d_e \leq 100$ km y $100 < d_e \leq 150$ km. A mayor abundamiento, en la Fig. 18 se dibujan las curvas espectrales extremas (para las estaciones más alejada y más próxima al epicentro) de los eventos estudiados. El efecto de la distancia epicentral sobre la forma de las curvas es evidente y predomina sobre el efecto de la geología local, si lo hubiere. Por otra parte este último efecto no se puede estimar con precisión, al desconocerse las columnas estratigráficas correspondientes a las estaciones de la red.

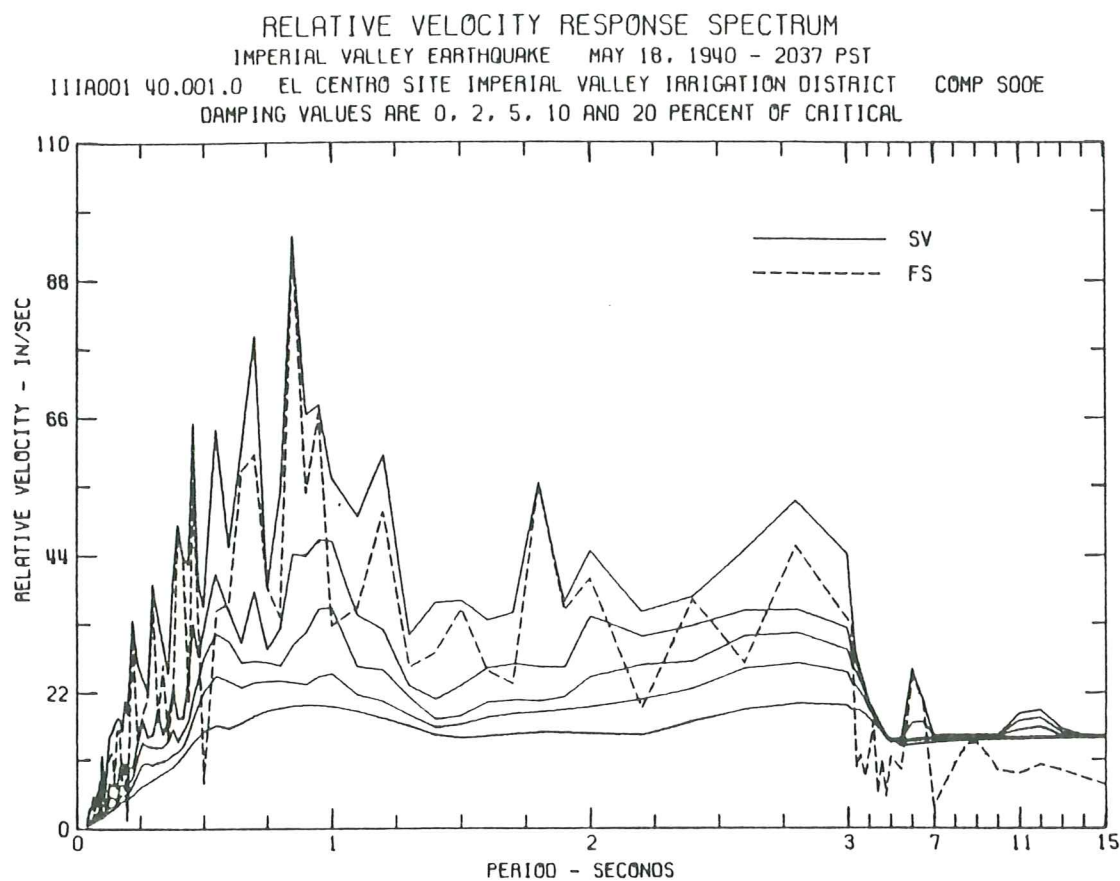


Figura 15 Comparación entre espectros de Fourier y espectros de respuesta (Hudson, 1979).

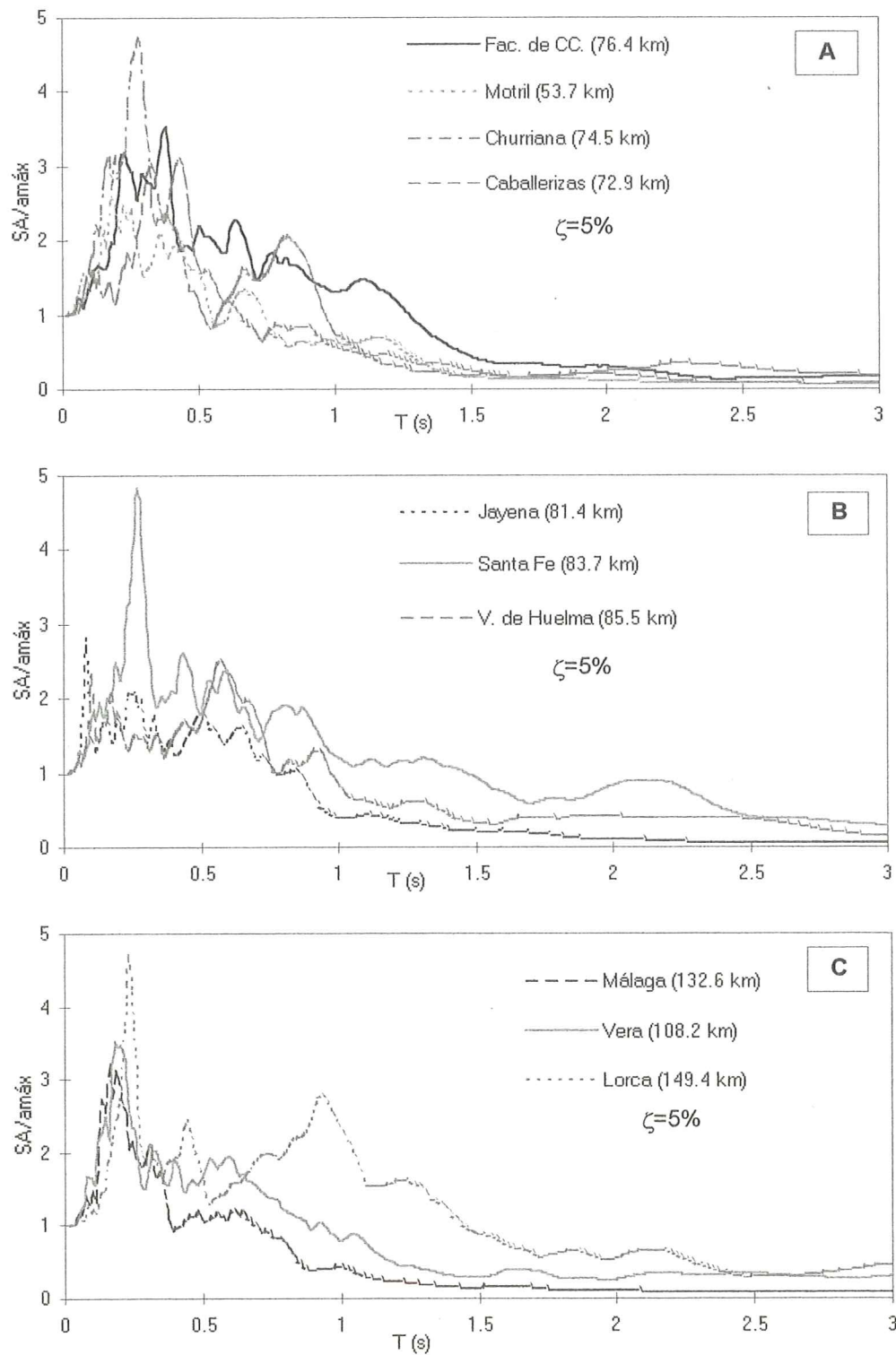


Figura 16

Variación de los pseudoespectros de aceleración con la distancia. Registros del 23 de diciembre de 1993. A) $d_e \leq 80$ km; B) $80 < d_e \leq 100$ km; C) $100 < d_e \leq 150$ km.

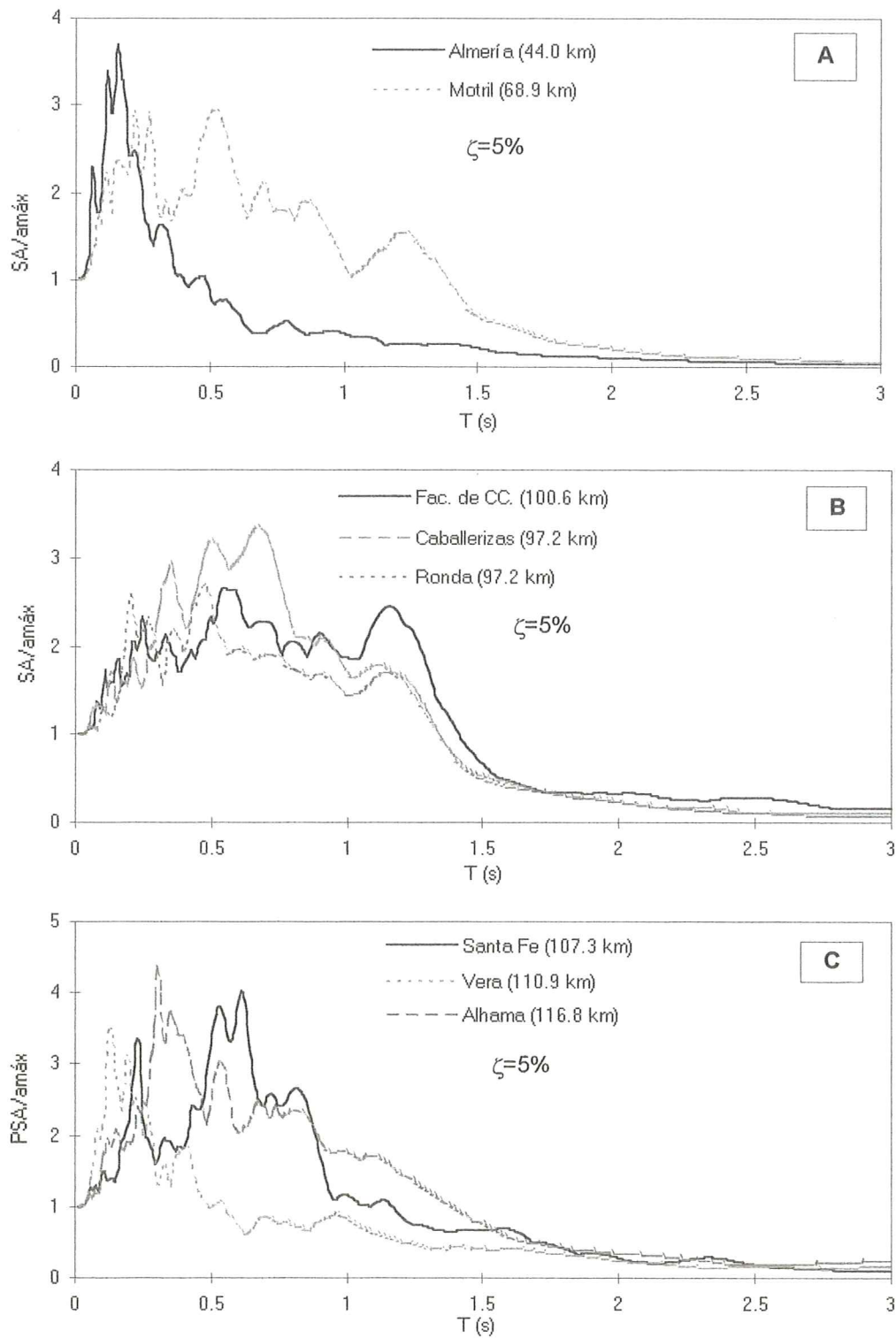
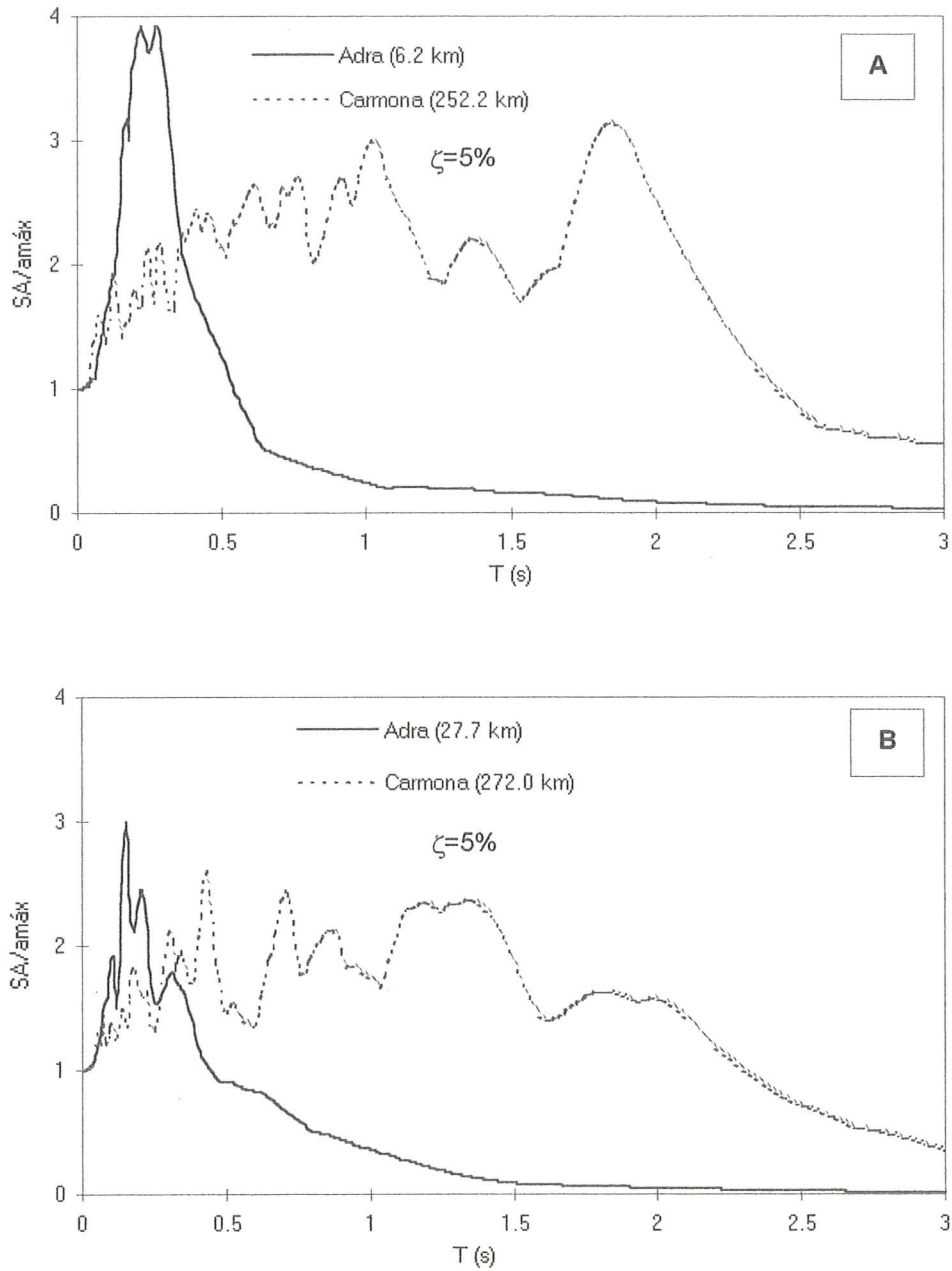


Figura 17 Variación de los pseudoespectros de aceleración con la distancia. Registros del 4 de enero de 1994. A) $d_e \leq 80$ km; B) $80 < d_e \leq 100$ km; C) $100 < d_e \leq 150$ km.

**Figura 18**

Variaciones extremas de las curvas espectrales con la distancia. A) Sismo del 23 de diciembre de 1993; B) Sismo del 4 de enero de 1994.

5.2.4 Atenuaciones espectrales.

Se denominan así las leyes de variación de las ordenadas del espectro de respuesta con la distancia epicentral, d_e . Para pseudoespectros de aceleración horizontal dichas leyes vienen dadas por expresiones del tipo:

$$PSA = a (d_e + \delta)^b \quad (11)$$

que han sido propuestas por diversos investigadores (Sadigh, 1983; Kawashima, Aizawa and Takahashi, 1984).

Los coeficientes a y b dependen, en general, de la magnitud del sismo, del período, del amortiguamiento y del tipo de suelo, mientras que δ es un parámetro relacionado con la profundidad focal del terremoto.

En la Fig. 19 se muestran las curvas de atenuación espectral de los sismos de la serie de Adra (componentes de máxima aceleración horizontal), para períodos de 0,25; 0,50 y 1,00 segundos y 5% de amortiguamiento. El ajuste se ha efectuado con el valor $\delta=10$, que es el que da el menor error medio cuadrático en la regresión múltiple.

Es claro que las ordenadas espectrales se atenúan más rápidamente en la región de altas frecuencias que en la de bajas frecuencias, en consonancia con lo observado en las leyes clásicas de atenuación de aceleraciones máximas.

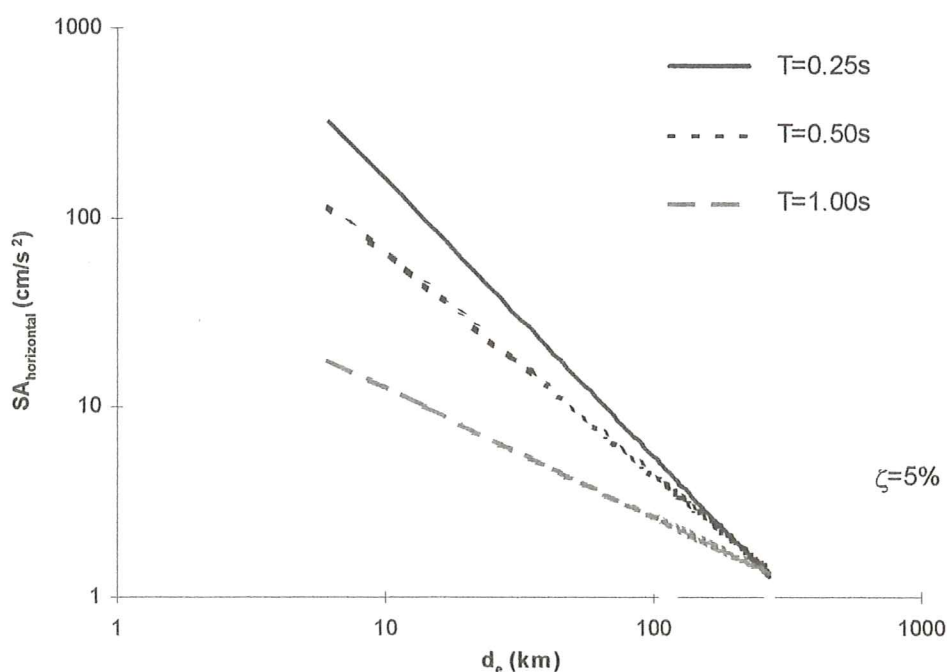


Figura 19 Curvas de atenuación de las ordenadas espectrales con la distancia para diferentes períodos.

5.3 Parámetros de daños.

Van asociados a la severidad del terremoto, o lo que es lo mismo, a su grado potencial de destructividad. En general estos parámetros miden la energía media disipada en el lugar, bien por el suelo (campo libre) bien por las correspondientes estructuras, en el tiempo que duran las vibraciones sísmicas. Los indicadores de daños más utilizados son las denominadas “intensidades instrumentales”, cuyos exponentes más conocidos son la intensidad de Arias y la intensidad de Housner, que se describen a continuación.

5.3.1 Intensidad de Arias.

Este parámetro fue definido originalmente (Lange, 1968), para una serie de osciladores de un grado de libertad y un terremoto dado, como la energía unitaria disipada por una familia de osciladores con frecuencias comprendidas entre cero e infinito e igual nivel de amortiguamiento, esto es:

$$I_A = \int_0^{\infty} E(\omega) d\omega \quad (12)$$

donde $E(\omega)$ representa la energía disipada por unidad de peso por el oscilador lineal de frecuencia ω . En principio $E(\omega)$ debería determinarse a partir de la respuesta de osciladores elastoplásticos, de tipo histerético, pero Arnold (1969) ha demostrado que el ordenamiento de los sismos en cuanto a los daños producidos es similar tanto si se usa el cálculo elástico como el inelástico. Más aún, si se utiliza el modelo elástico, puede demostrarse (Arias y Husid, 1963) que el porcentaje de amortiguamiento crítico, c/c_c , tiene una influencia muy pequeña sobre el valor de I_A :

$$I_A = \frac{1}{g} \frac{\arccos \frac{c}{c_c}}{\sqrt{1 - \left(\frac{c}{c_c}\right)^2}} \int_0^{t_f} a^2(\tau) d\tau \quad (13)$$

por lo que la definición anterior puede normalizarse eligiendo $c/c_c=0$, con lo que resulta:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_f} a^2(\tau) d\tau \quad (14)$$

siendo $a(\tau)$ y t_f la aceleración y la duración total del registro sísmico, respectivamente.

Los valores de la intensidad de Arias resultantes de aplicar la fórmula (14) a los acelerogramas registrados en los dos eventos principales de la serie de Adra se recogen en la Tabla VI (columna 3ª).

5.3.2 Intensidad de Housner.

A efectos prácticos, el espectro de respuesta define los valores máximos de la respuesta sísmica de estructuras de un grado de libertad para un determinado rango de periodos. De ello se sigue que el área bajo el espectro entre dos periodos cualesquiera constituye una medida de la respuesta media de las estructuras en ese rango especificado de periodos.

Tabla VI Intensidades instrumentales.

SERIE DE ADRA (23-XII-93). HORA ORIGEN: 14:22			
ESTACIÓN	COMPONENTE	I_A (cm/s)	I_H (cm) ($\zeta=20\%$)
Adra (AL)	E-W	2.9E-01	1.97
Motril (GR)	N-S	2.7E-01	1.79
Pº de Ronda (Alhambra, GR)	E-W	6.6E-02	1.10
Caballerizas (Alhambra, GR)	N-S	7.3E-02	0.94
Churriana (GR)	N-S	7.1E-02	0.86
Fac. Ciencias (GR)	N-S	1.5E-03	0.16
Albolote (GR)	E-W	7.5E-03	0.25
Jayena (GR)	E-W	2.7E-01	1.26
Santa Fe (GR)	E-W	7.8E-02	1.31
Ventas de Huelma (GR)	E-W	8.7E-03	0.50
Alhama (GR)	N-S	8.2E-04	0.11
Vera (AL)	E-W	6.2E-03	0.25
Málaga (MA)	E-W	5.3E-04	0.05
Lorca (MU)	N-S	2.0E-03	0.23
Carmona (SE)	N-S	5.0E-09	0.35
SERIE DE ADRA (4-I-94). HORA ORIGEN: 8:03			
ESTACIÓN	COMPONENTE	I_A (cm/s)	I_H (cm) ($\zeta=20\%$)
Adra (AL)	N-S	2.2E-01	2.19
Almería (AL)	E-W	1.1E-01	0.67
Motril (GR)	E-W	4.5E-01	3.26
Pº de Ronda (Alhambra, GR)	E-W	3.8E-02	1.01
Caballerizas (Alhambra, GR)	E-W	4.3E-02	0.98
Churriana (GR)	N-S	1.7E-02	0.41
Fac. Ciencias (GR)	N-S	2.9E-08	0.15
Albolote (GR)	N-S	3.1E-03	0.26
Santa Fe (GR)	N-S	3.9E-02	0.86
Vera (AL)	E-W	2.9E-03	0.15
Alhama (GR)	N-S	5.2E-04	0.11
Carmona (SE)	E-W	7.9E-04	0.26

Esta idea condujo a Housner (1952,1975) a definir como medida de la energía local del movimiento provocado por el terremoto, la denominada **intensidad espectral**, que se calcula mediante la integral:

$$I_H(\zeta) = \int_{T_1}^{T_2} PSV(\zeta, T) dT \quad (15)$$

donde T es el periodo del oscilador, PSV es el pseudoespectro de velocidad y ζ es el factor de amortiguamiento (Fig. 20). El valor de ζ y los límites de integración se eligen de forma que incluyan el rango de períodos más habitual en el diseño sismorresistente de estructuras de edificación. Así, Housner sugiere utilizar el intervalo de integración (0,1 seg; 2,5 seg), teniendo en cuenta la gran cantidad de estructuras en una ciudad real con períodos comprendidos en ese rango. No obstante hay que tener en cuenta que, si bien el parámetro I_H no es muy sensible a variaciones del límite inferior de integración (para $T=0$ los espectros no son fiables por razones de tipo instrumental), sí lo es a variaciones del límite superior, ya que las ordenadas del espectro PSV para $T > 2,5$ seg. son cantidades considerables.

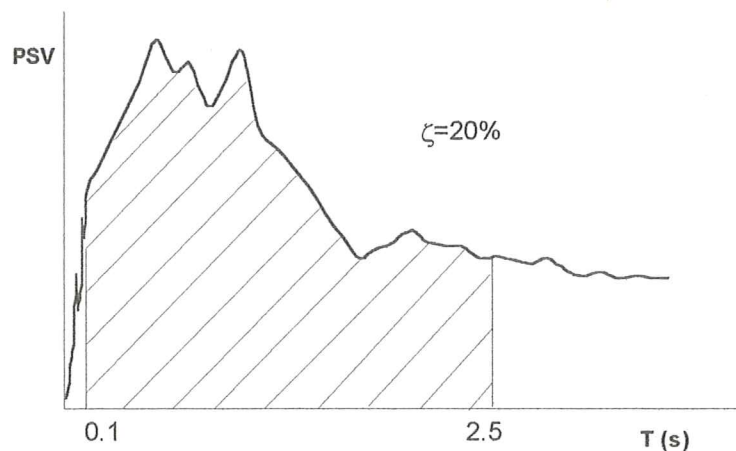


Figura 20 Definición de la intensidad de Housner.

Los valores de $I_H(\zeta)$ tienen dimensiones de longitud y disminuyen, lógicamente, al aumentar el amortiguamiento. Para Housner un porcentaje de amortiguamiento del 20% del crítico probablemente sea el más significativo de la destructividad de un terremoto.

Uno de los principales problemas de la intensidad de Housner como descriptor de los daños sísmicos esperables es que se ignora en su definición la duración del acelerograma, lo que no ocurre con la intensidad de Arias. Por contra, tiene a su favor que, al ser un valor medio de la respuesta en una amplia banda de períodos, constituye una estimación más fiable de la intensidad del movimiento que, por ejemplo, la aceleración pico.

En la Tabla VI se recogen los valores de ambas intensidades instrumentales (I_A e I_H) para las estaciones en las que existen registros de los dos sismos principales de la serie de Adra. Dichas intensidades aparecen dibujadas en las Figuras 21-a y 21-b. La consistencia de los resultados obtenidos para los dos terremotos (de igual magnitud) es remarcable.

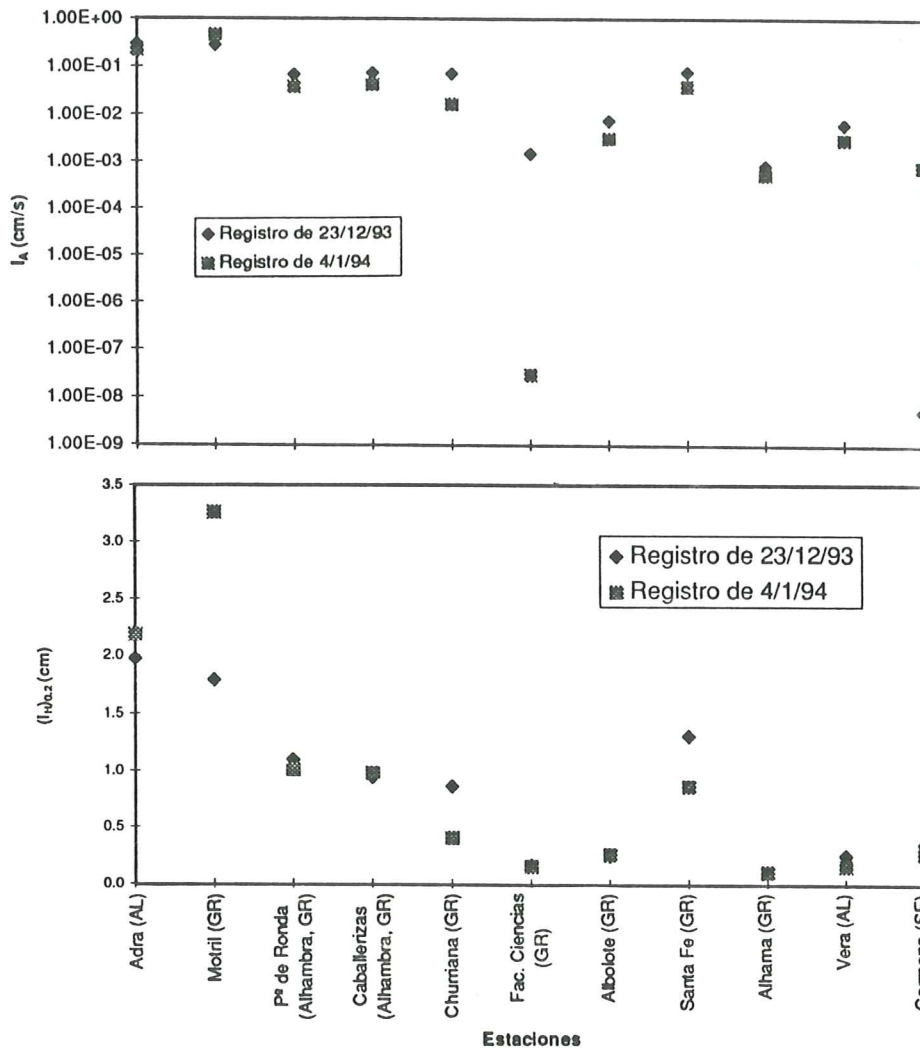


Figura 21 Valores de la intensidad de Arias y de la intensidad de Housner ($\zeta = 0,20$) para las estaciones con registros de los dos sismos principales de la serie de Adra (componentes de máxima aceleración).

CAPÍTULO 6

6 Comparación entre los datos medidos y las previsiones de la Norma NCSE-94.

La Norma Sismorresistente Española NCSE-94 supuso un cambio importante en la filosofía del código sísmico, PDS-1 (1974), vigente en nuestro país por espacio de 20 años (1974-1994). La diferencia fundamental consistió en la especificación de las acciones sísmicas de proyecto, que pasó a hacerse en términos de espectros de respuesta en función del grado de peligrosidad sísmica del emplazamiento (Blázquez, 1997).

Para campo próximo y suelo rocoso el pseudoespectro de aceleración prescrito por la Norma se dibuja de línea llena en la Fig. 22. En la misma figura se superponen, en líneas de trazos, los espectros de respuesta correspondientes a los dos sismos principales de la serie de Adra registrados en la estación del mismo nombre, la cual está situada sobre suelo firme en la región epicentral.

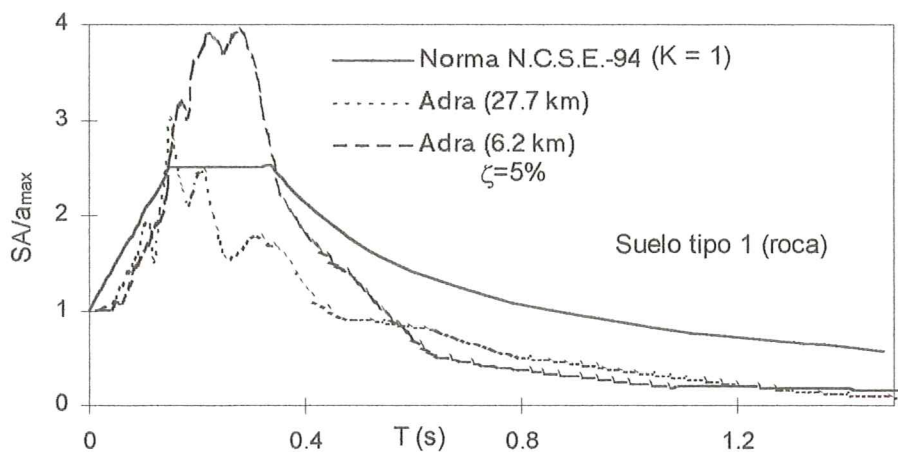


Figura 22 Pseudoespectros de aceleración para los sismos del 23-12-93 y 4-1-94 en la estación de Adra. Comparación con el espectro de proyecto de la Norma NCSE-94 para terremotos peninsulares y suelo rocoso (Carreño, Suárez, Martín y Blázquez, 1996).

En este caso no se producen ampliaciones de los períodos altos, por efecto de la distancia o el tipo de suelo, de acuerdo con lo esperado. Sin embargo se observa una magnificación importante de las ondas de alta frecuencia en la región de resonancia (“meseta” del espectro de la Norma), donde es de suponer un comportamiento cuasilíneo del terreno. Esta sobreamplificación respecto a la Norma es similar a la verificada en acelerogramas registrados cerca del epicentro en otras partes del mundo (Bertero, 1989; Saragoni, 1996), y parece explicar por qué los daños observados en la región epicentral de cualquier terremoto superan con mucho los esperables por mera aplicación de la Norma.

Por contra, en el campo intermedio y lejano se comprueba una sobreatenuación de las aceleraciones horizontales máximas con relación a las previsiones del mapa de peligrosidad de la Norma (curva continua en la Fig. 10). Esta observación no está aún suficientemente clarificada y requiere un estudio ulterior.

CAPÍTULO 7

7 Conclusiones.

Este estudio, aunque restringido a acelerogramas de movimientos débiles del terreno ($a_{\max} < 0,05g$), ha permitido una aproximación inicial a la caracterización ingenieril de registros de la Red Acelerográfica Nacional. Por primera vez se ha contado con un buen número de registros de aceleración que, aunque son insuficientes para un estudio exhaustivo del tema, sí son válidos para corroborar lo observado en países donde se cuenta con un mayor número de acelerogramas. Los registros se han parametrizado para poder interpretar la información que contienen a efectos de su utilización práctica. En esta línea, se han definido y calculado sistemáticamente los valores pico de los acelerogramas, sus espectros de respuesta, las curvas de atenuación, algunas intensidades instrumentales (Arias y Housner) y la duración significativa de los registros.

El análisis de los resultados permite avanzar las conclusiones siguientes:

a) la distancia epicentral parece ser el factor que controla el conjunto de parámetros calculados. Ello es debido probablemente al rango de magnitudes con que trabajamos y que inducen movimientos débiles del terreno.

b) el tipo de suelo no se conoce con exactitud, por lo que no es posible valorar correctamente su influencia en los registros analizados. En este sentido, la necesidad de efectuar una campaña de sondeos en los emplazamientos de los acelerógrafos, con ensayos de penetración "in situ" y eventualmente ensayos dinámicos de los suelos (cross-hole, triaxial, cíclico, etc), es evidente y está ya siendo abordada por los autores de este informe (Blázquez y Carreño, 1996).

c) en general, las condiciones locales influyen menos sobre los espectros de respuesta que la distancia epicentral, excepto en algunos emplazamientos que presentan una banda de resonancia muy acusada.

d) el estudio de la atenuación de las curvas espectrales de los registros confirma que los periodos bajos se atenúan más rápidamente con la distancia epicentral que los periodos altos.

e) la amplificación espectral deducida del espectro de proyecto de la norma N.C.S.E-94 es claramente conservadora en la zona de periodos altos para emplazamientos en suelo firme en la región epicentral. Lo contrario ocurre en la meseta del espectro.

Por último conviene indicar que estudios similares a éste permitirán en el futuro reubicar las estaciones de la red de acelerógrafos, configurándola más en consonancia con las observaciones instrumentales disponibles en cada momento. Un claro ejemplo de esto lo constituyen las estaciones de Paseo de Ronda y Caballerizas, en la Alhambra de Granada, que registran valores prácticamente iguales, por lo que suministran una información redundante.

REFERENCIAS

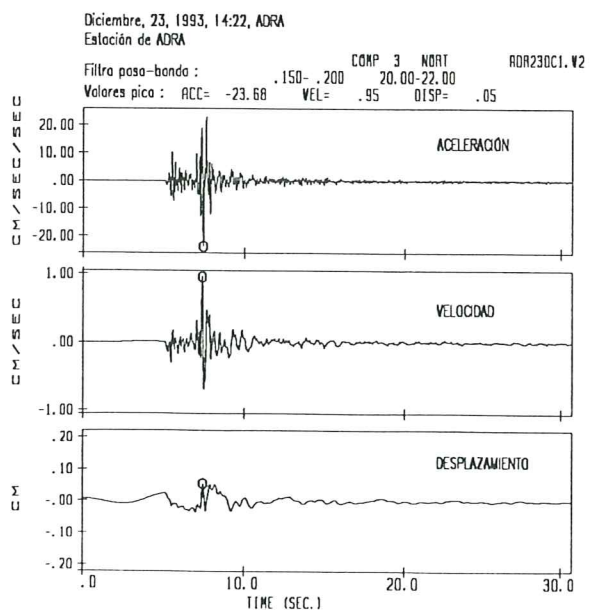
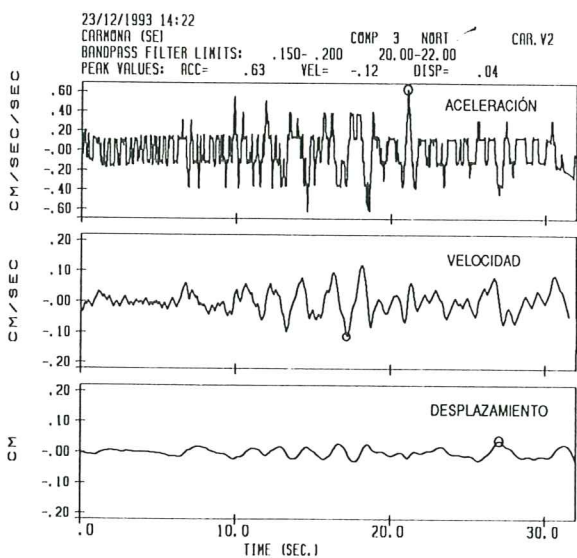
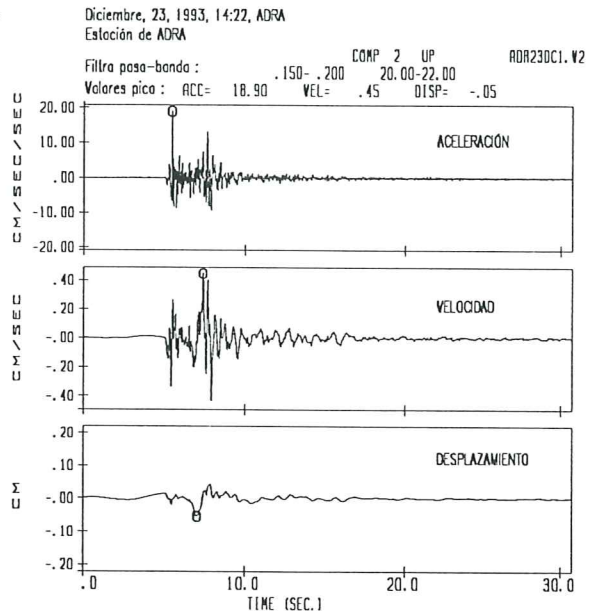
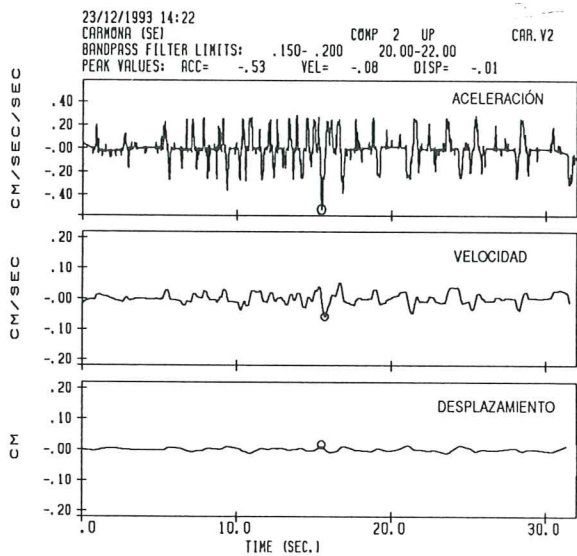
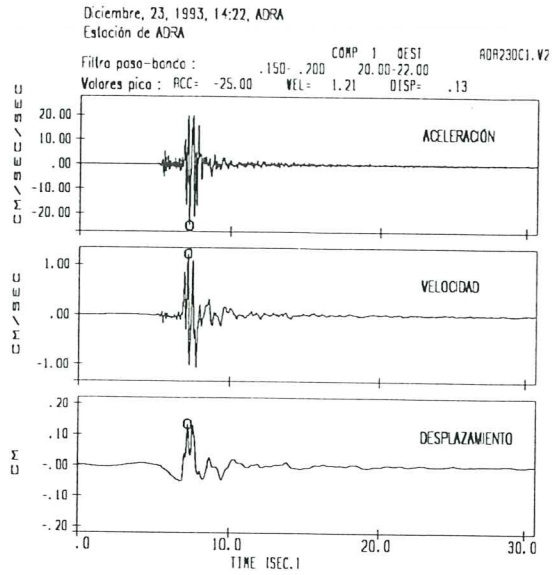
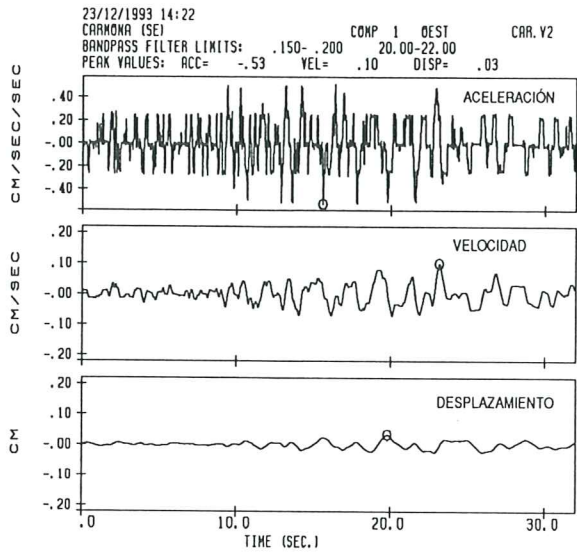
- Alford, J.L., Housner, G. W. and Martel, R.R. (1953)**, "Spectrum Analysis of Strong-Motion Earthquakes", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 43, pp. 97-119.
- Arias, A. y Husid, R. (1963)**, "Influencia del Amortiguamiento Viscoso sobre la Respuesta a Temblor de Estructuras Lineales", *Geofísica Internacional*, Vol, 3, nº1, pp. 1-10.
- Arnold, P. (1969)**, *Intensidad Sísmica Definida a Base del Daño Acumulado en una Estructura Elastoplástica Simple*, Memoria para el Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Bertero, V.V. (1992)**, "Lecciones Aprendidas de Terremotos Catastróficos Recientes y otras Investigaciones", Primera Conferencia Internacional Torroja, Monografía 410-411 del ICCET, Noviembre.
- Biot, M.A. (1943)**, "A Mechanical Analyser for the Prediction of Earthquake Stresses", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 31, pp. 259-264.
- Blázquez, R. (1992)**, "Factors Affecting Response Spectra in the Long Period Range", Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Vol. 11, pp. 6783-6790.
- Blázquez, R. (1995)**, *25 Años de Normativa Sismorresistente en España (1969-1994)*, Monografías AEIS, nº 1, Octubre, pp. 45-70.
- Blázquez, R. y Carreño (1996)**, "Caracterización Ingenieril de Registros Sísmicos Españoles. Comparación con la Norma Sismorresistente", Proyecto de Investigación Coordinado UPM-IGN, DGICYT, Programa Sectorial de Promoción General del Conocimiento 1996-1998.
- Blázquez, R. (1997)**, "Enfoque y Avances Conceptuales de la Nueva Norma Española de Construcción Sismorresistente NCSE-94", *Informes de la Construcción*, ICCET, Vol. 48, nº 447, pp. 39-48, enero-febrero.
- Bolt, B.A. (1973)**, "Duration of Strong Ground Motion", Proc. Fifth World Conference on Earthquake Engineering, Rome, Italy, Vol. I, pp. 1304-1313.
- Cabañas, L. and Blázquez, R. (1997)**, "Análisis de Integradores Temporales en el Procesado de Acelerogramas", *Ingeniería de Estructuras*, Escuela Superior Politécnica del Ejército, Ecuador, Vol. 2, nº 1, pp. 59-73.
- Canet, J.M. y Barbat, A.H. (1988)**, *Estructuras Sometidas a Acciones Sísmicas. Cálculo por Ordenador*, Ed.: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, España, pp. 155-194.
- Carreño, A. y Martín, A.J. (1994)**, "Recorded Weak Motions at a Historical Monument in Granada (Spain)", Proc. XIX General Assembly of the European Geophysical Society, Grenoble, France.
- Carreño, E., Suárez, A. y Martínez Solares, J.M. (1995)**, "Red de Acelerógrafos del Instituto Geográfico Nacional", *Ingeniería Civil*, CEDEX, nº 100, pp.67-76.
- Carreño, E., Suárez, A., Martín, A.J. y Blázquez, R. (1996)**, "Engineering Parameters of Spanish Accelerograms. Comparison with Code Provisions", Proc. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, June 23-28, paper nº 1778.

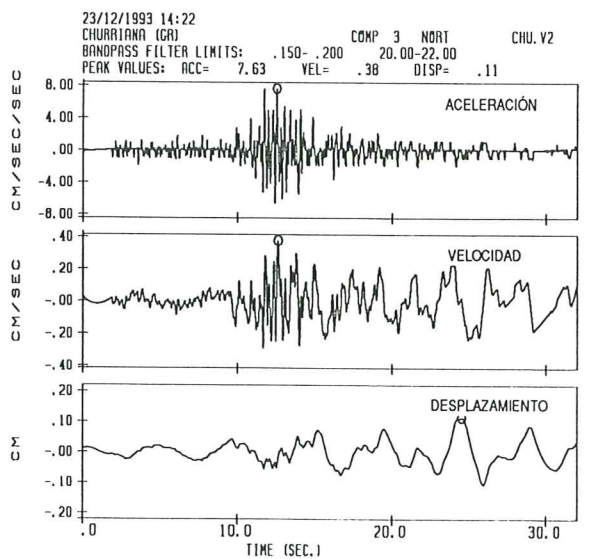
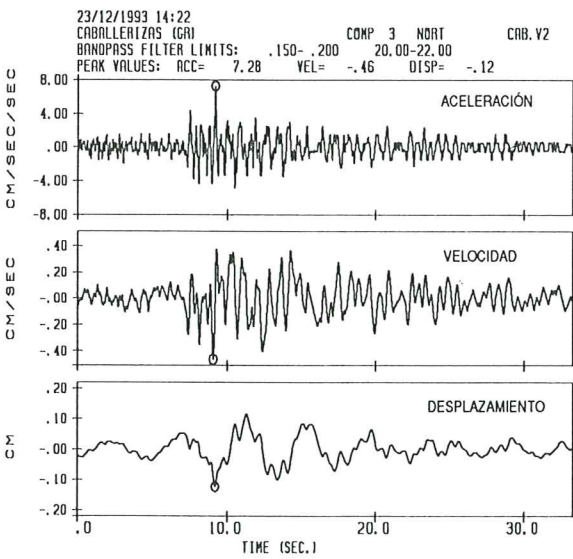
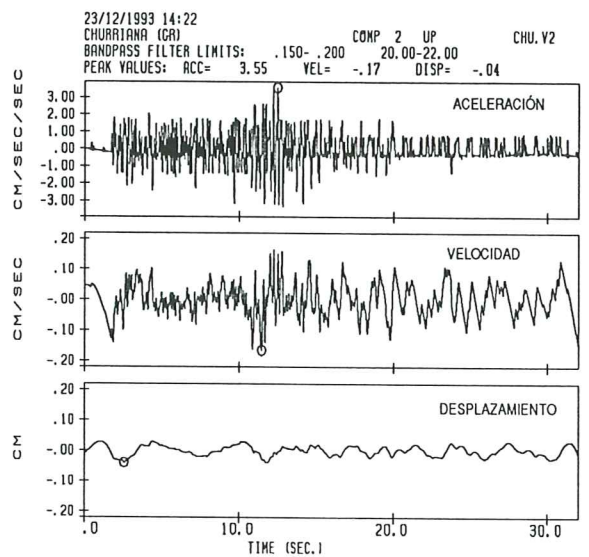
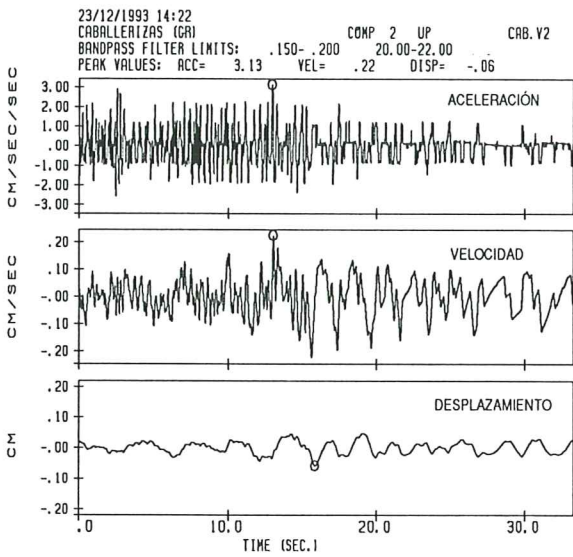
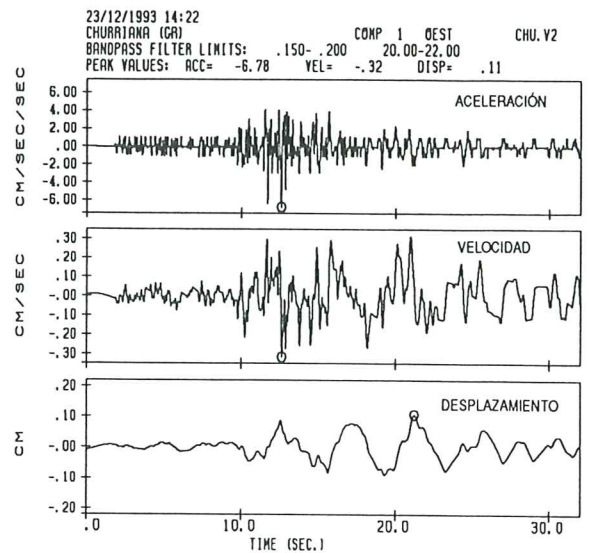
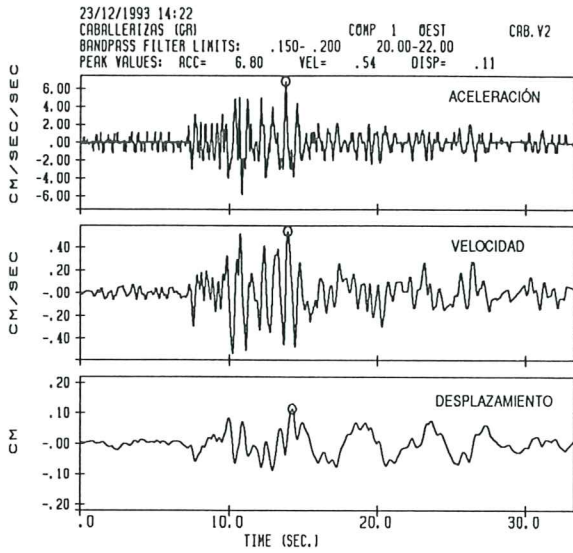
- Clough, R. W. (1970)**, "Earthquake Response of Structures", in: *Earthquake Engineering*, R.L. Wiegel Editor, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Comisión Interministerial de Normas Sismorresistentes (1974)**, "Norma Sismorresistente PDS-1 (1974)", BOE nº 279, 21 Noviembre.
- Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes (1994)**, "Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-94 (Parte General y Edificación)", BOE 8 Feb 1995.
- Dobry, R., Idriss, J.M. and Ng, E. (1978)**, "Duration Characteristics of Horizontal Components of Strong-Motion Earthquake Records", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 68, no. 5, pp. 1487-1520.
- Housner, G. W. (1974)**, "Characteristics of Strong-Motion Earthquakes", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 37, pp. 19-31.
- Housner, G. W. (1952)**, "Intensity of Ground Motion During Strong-Earthquakes", Earthquake Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, C.A.
- Housner, G. W. (1975)**, "Measures of Severity of Earthquake Ground Shaking", Proc. U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Ann Arbor, Michigan.
- Hudson D.E. (1979)**, "Reading on Interpreting Strong Motion Accelerograms", EERI Monograph, Berkeley, Ca, USA.
- Husid, R. (1973)**, *Terremotos-Earthquakes*, Editorial Andrés Bello, Santiago, Chile.
- Kawashima, K., Aizawa, K. and Takahashi, K. (1984)**, "Attenuation of Peak Ground Motion and Absolute Acceleration Response Spectra", *Proc. 8th WCEE, San Francisco, USA*.
- Lange, G. (1968)**, *Una Medida de Intensidad Sísmica*, Memoria para el Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Martín, A.J. (1983)**, *Riesgo Sísmico en la Península Ibérica*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- Martín, A.J., Carreño, E. e Izquierdo, A., (1996)**, "Análisis de la Atenuación de Aceleraciones de la Serie de Sismos de Adra de 1993 y 1994", *Avances en Geodesia y Geofísica*, Instituto Geográfico Nacional, pp. 115-123.
- Mezcua, J. (1982)**, *Catálogo General de Isosistas de la Península Ibérica*, Instituto Geográfico Nacional, Publ. Técnica 202, 62 pp. + 262 mapas.
- Mezcua, J. y Martínez Solares, J.M. (1983)**, *Sismicidad del Área Ibero-Mogrebí*, Instituto Geográfico Nacional, Public. Técnica. 203, 301 pp.
- Newmark, N.M. (1968)**, "Problems in Wave Propagation Soil and Rock", Proc. Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials, Univ. of New Mexico, Albuquerque, pp. 7-26.
- Newmark, N.M. and Rosenblueth, E. (1971)**, *Fundamentals of Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., USA
- Pfossel, M.R. and Slosson, J.E. (1974)**, "Repeatable High Ground Acceleration from Earthquakes", *California Geology*, pp. 195-199.
- Sadigh, K. (1983)**, "Site-specific Effects on Soil and Rock on Ground Motion and the Amplification for Earthquake-Resistant Design", Proc. of a Workshop, July, 25-27, Santa Fe, New Mexico, USGS Open File Report 83-845.

- Saragoni, R. (1996)**, “ Un Cuarto de Siglo de Grandes Terremotos y su Influencia en el Diseño Sísmico”, Memorias del IX Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sísmica, Sto. Domingo, República Dominicana, 28-30 Nov.
- Seed, H. B., Idriss, I.M. and Kiefer, F.W. (1969)**, “Characteristics of Rock Motions During Earthquakes, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol 95, no. SM5, pp 1199-1218.
- Trifunac, M.D. and Brady, A.G. (1975)**, “ A Study of the Duration of Strong Earthquake Ground Motions”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 65, no. 3, June, pp 581-626.
- Vanmarcke, E. H. and Lai, S.P. (1977)**, *Strong Motion Duration of Earthquakes*, Publication n° R77-16, Dept. of Civil Engineering, MIT, Cambridge, Mass, July.

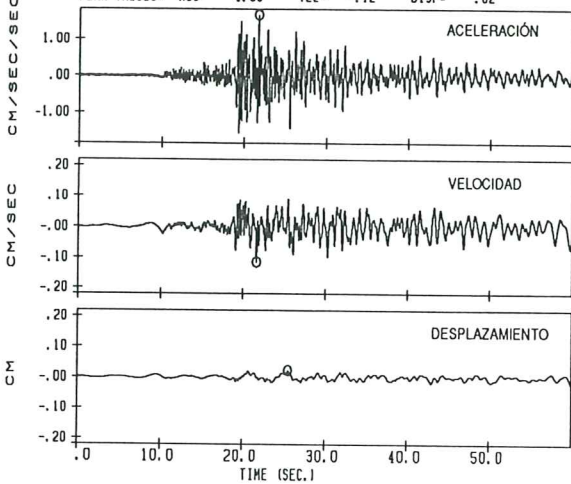
APÉNDICE I

**Acelerogramas, velocigramas y registros de desplazamiento
de los sismos de la serie de Adra.**

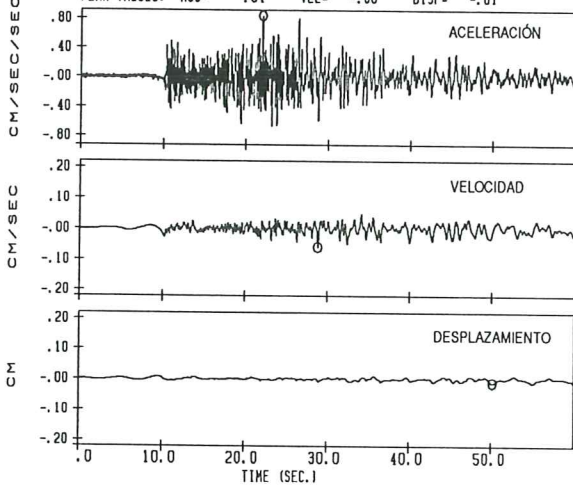




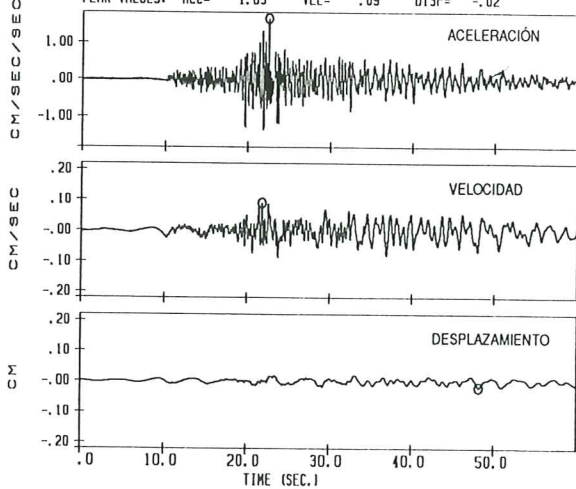
23/12/1993 14:22
 ALBOLOTE (GA) COMP 1 OEST ALB1.V2
 BANDPASS FILTER LIMITS: .150-.200 20.00-22.00
 PEAK VALUES: ACC= 1.66 VEL= -.12 DISP= .02



23/12/1993 14:22
 ALBOLOTE (GA) COMP 2 UP ALB1.V2
 BANDPASS FILTER LIMITS: .150-.200 20.00-22.00
 PEAK VALUES: ACC= .84 VEL= -.06 DISP= -.01

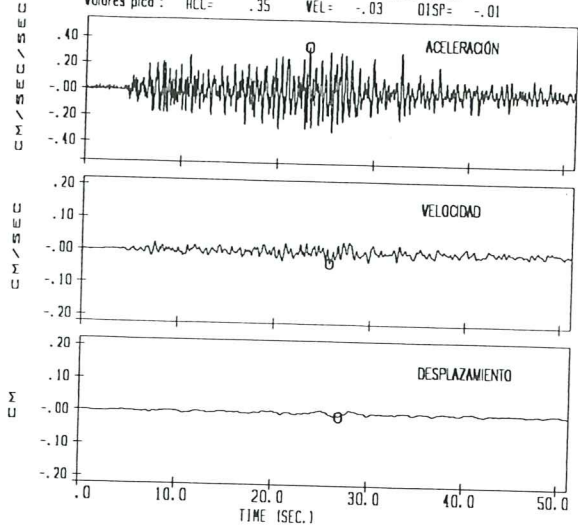


23/12/1993 14:22
 ALBOLOTE (GA) COMP 3 NORT ALB1.V2
 BANDPASS FILTER LIMITS: .150-.200 20.00-22.00
 PEAK VALUES: ACC= 1.65 VEL= .09 DISP= -.02



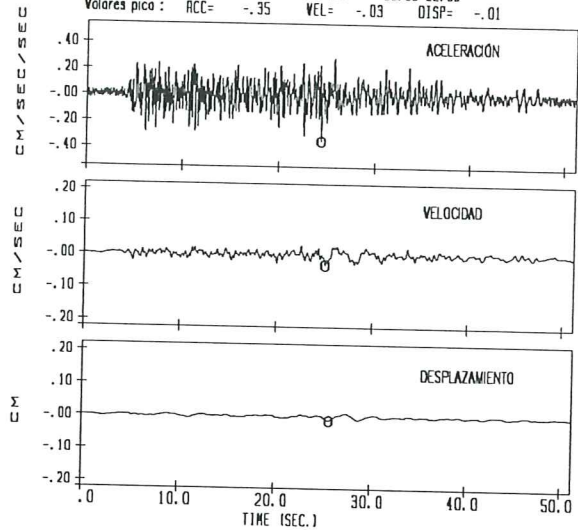
Diciembre, 23, 1993, 14:22, ADRA
 Estación de ALHAMA

Filtro paso-banda : COMP 1 OEST ALH230C1.V2
 .150-.200 20.00-22.00
 Valores pico : ACC= .35 VEL= -.03 DISP= -.01



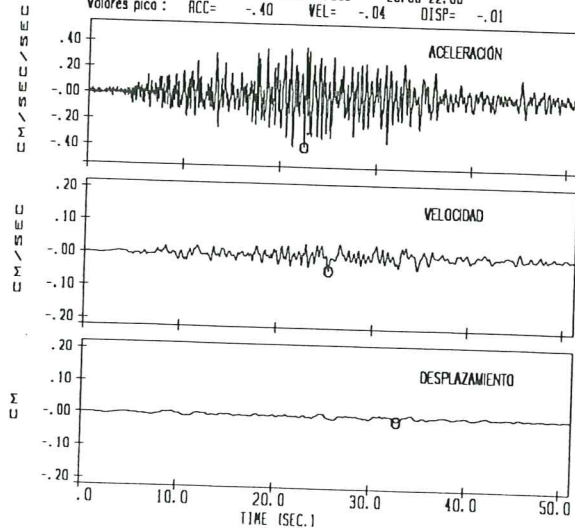
Diciembre, 23, 1993, 14:22, ADRA
 Estación de ALHAMA

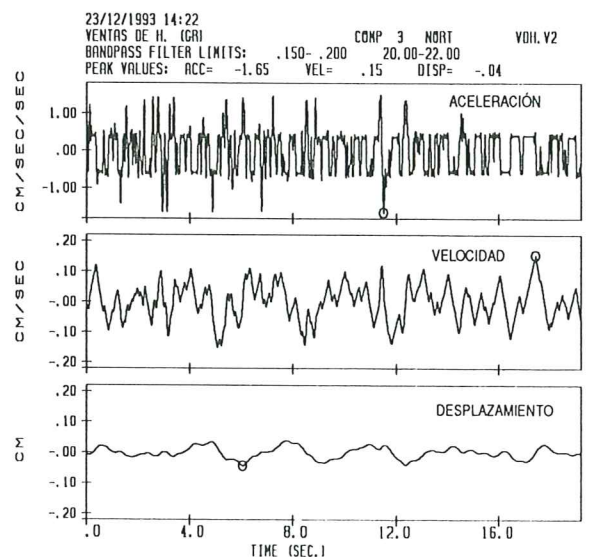
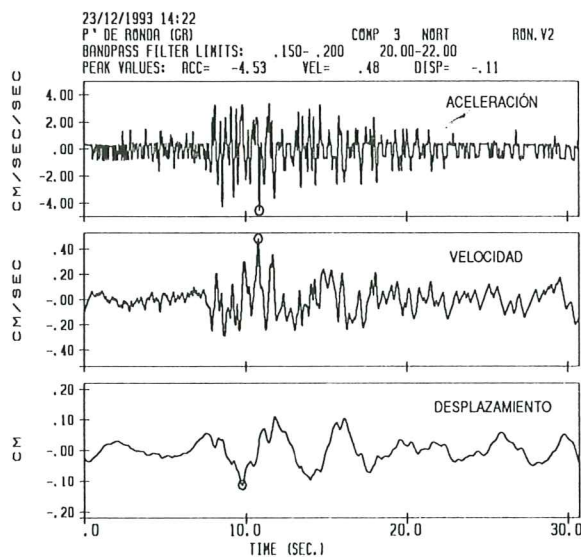
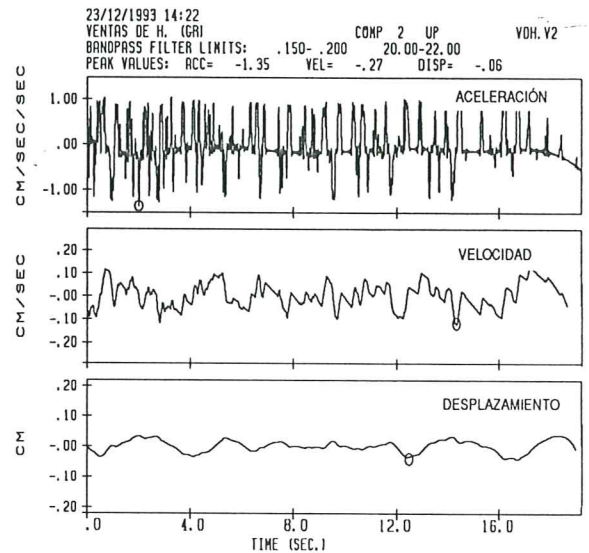
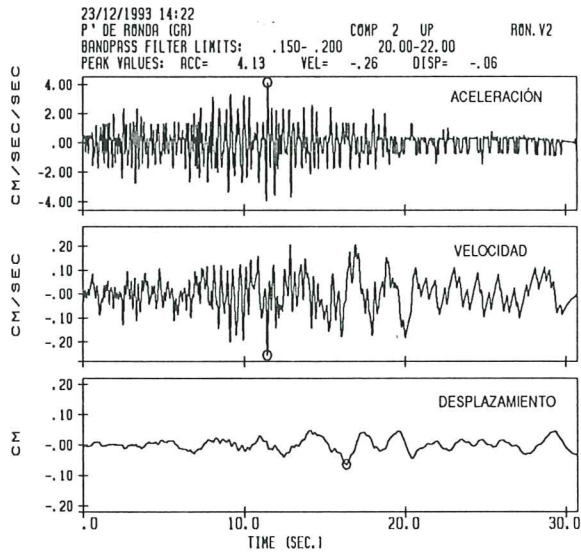
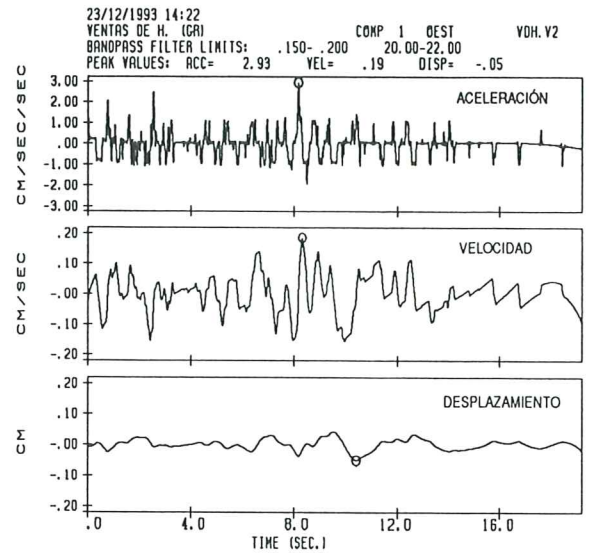
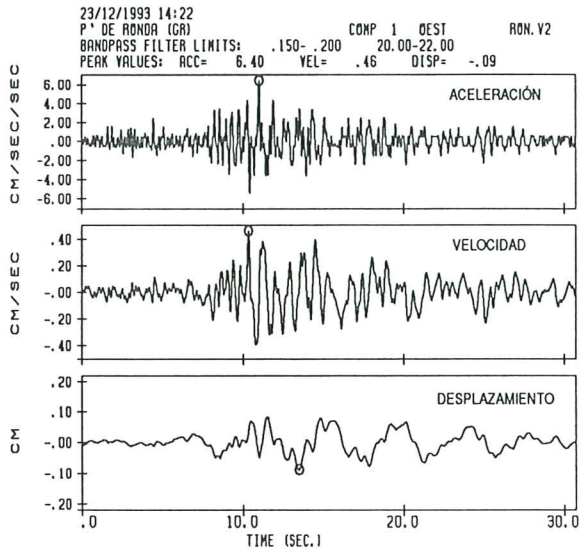
Filtro paso-banda : COMP 2 UP ALH230C1.V2
 .150-.200 20.00-22.00
 Valores pico : ACC= -.35 VEL= -.03 DISP= -.01

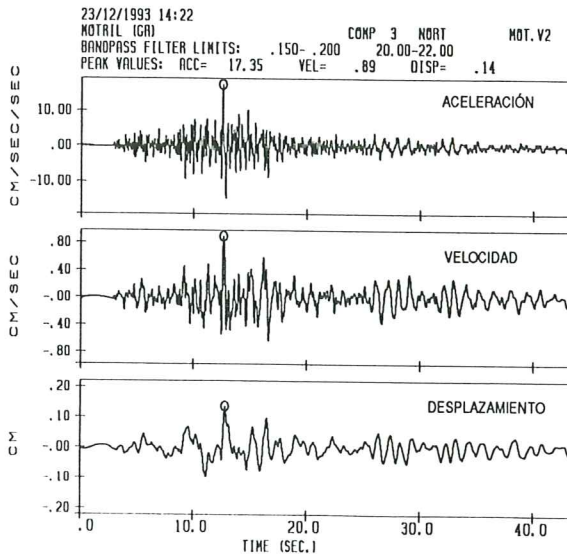
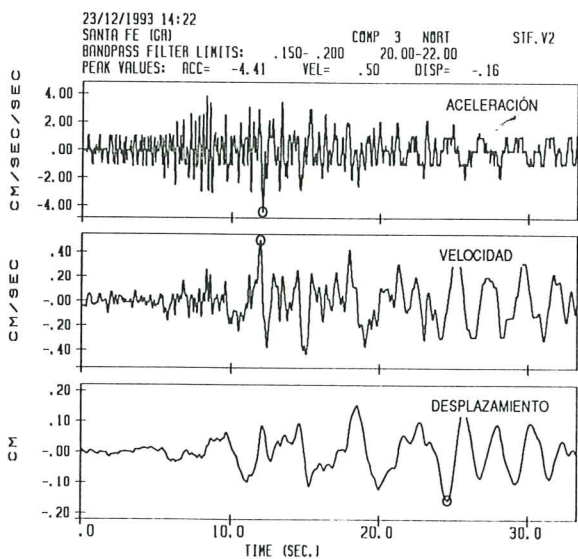
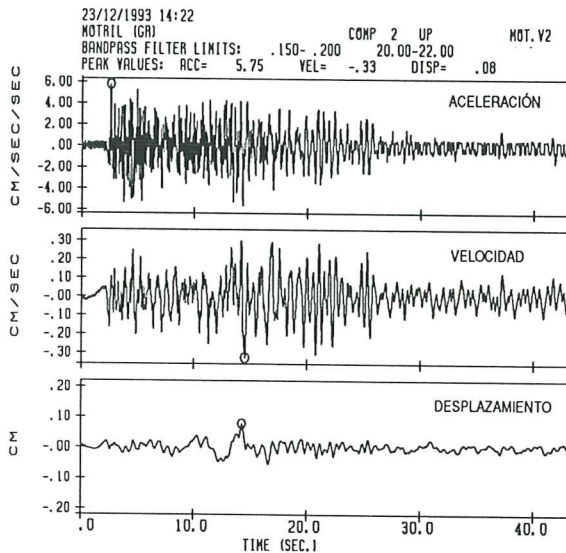
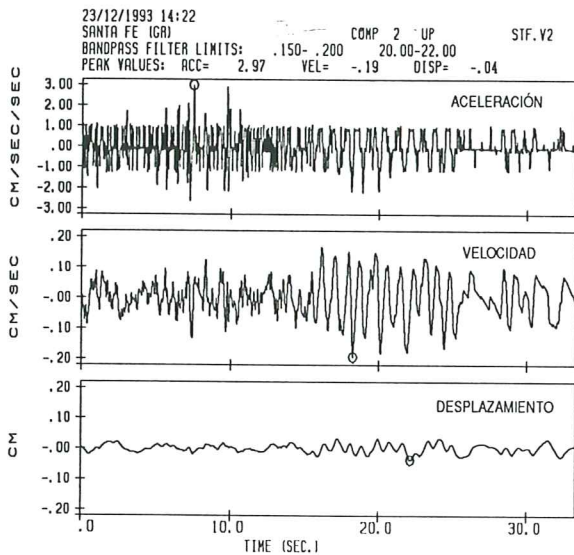
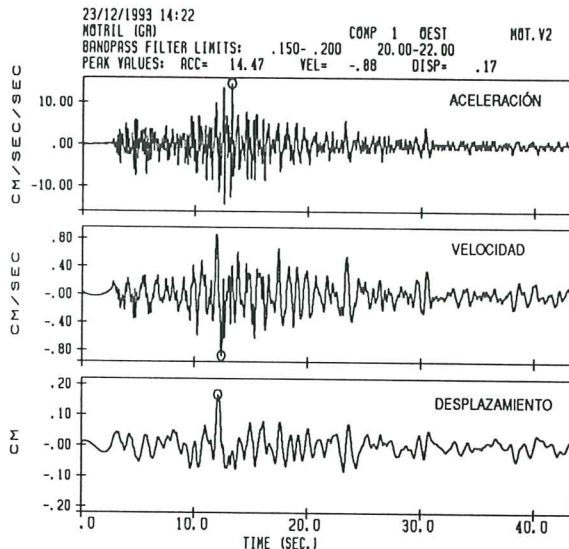
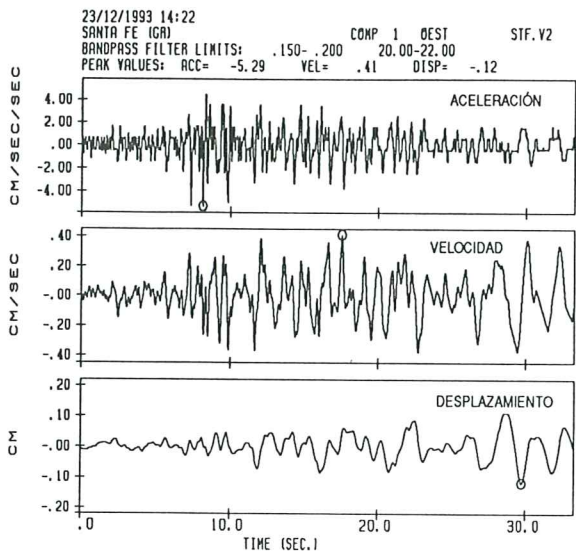


Diciembre, 23, 1993, 14:22, ADRA
 Estación de ALHAMA

Filtro paso-banda : COMP 3 NORT ALH230C1.V2
 .150-.200 20.00-22.00
 Valores pico : ACC= -.40 VEL= -.04 DISP= -.01

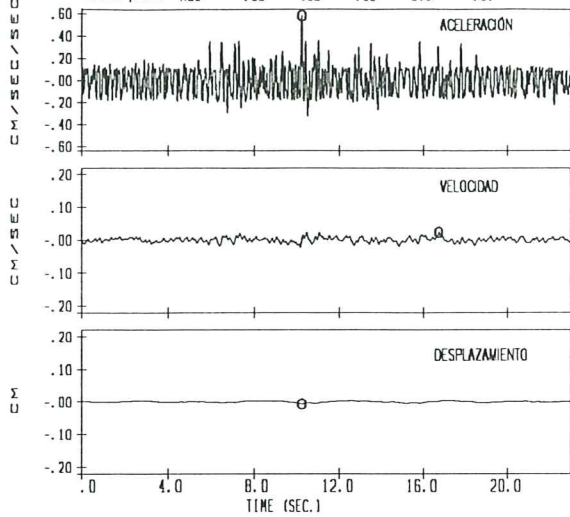




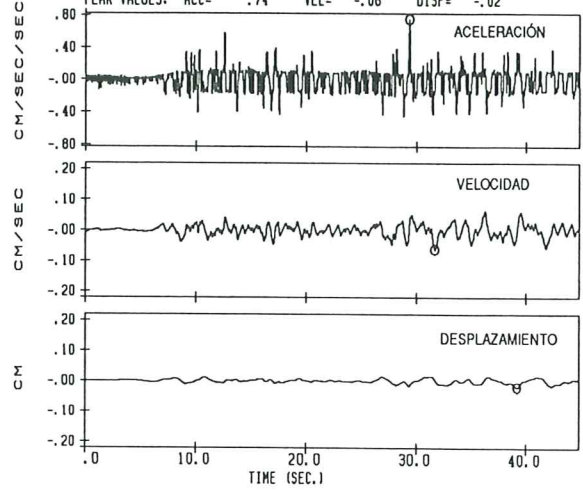


Diciembre, 23, 1993, 14:22, ADRA
Estación de MÁLAGA

Filtro paso-banda : .150- .200 COMP 1 OEST #9394002.V2
Valores pico : ACC= .58 VEL= .02 DISP= -.01

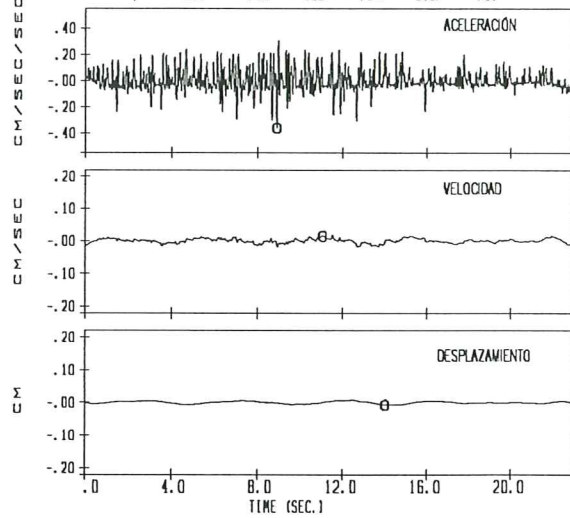


23/12/1993 14:22
LORCA (M) COMP 1 OEST LOR.V2
BANDPASS FILTER LIMITS: .150- .200 20.00-22.00
PEAK VALUES: ACC= .74 VEL= -.06 DISP= -.02

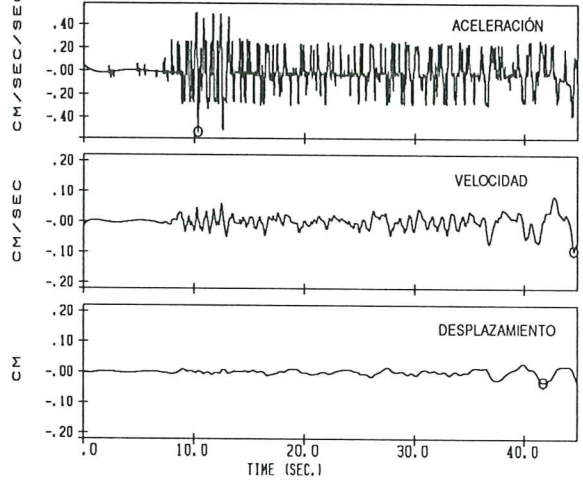


Diciembre, 23, 1993, 14:22, ADRA
Estación de MÁLAGA

Filtro paso-banda : .150- .200 COMP 2 UP #9394002.V2
Valores pico : ACC= -.36 VEL= .02 DISP= -.01

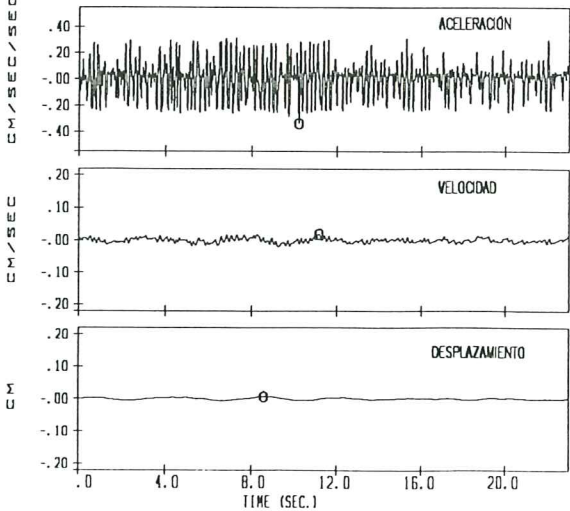


23/12/1993 14:22
LORCA (M) COMP 2 UP LOR.V2
BANDPASS FILTER LIMITS: .150- .200 20.00-22.00
PEAK VALUES: ACC= -.53 VEL= -.09 DISP= -.03

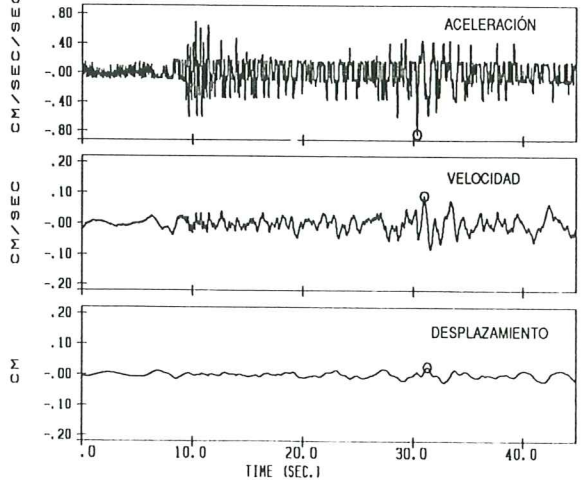


Diciembre, 23, 1993, 14:22, ADRA
Estación de MÁLAGA

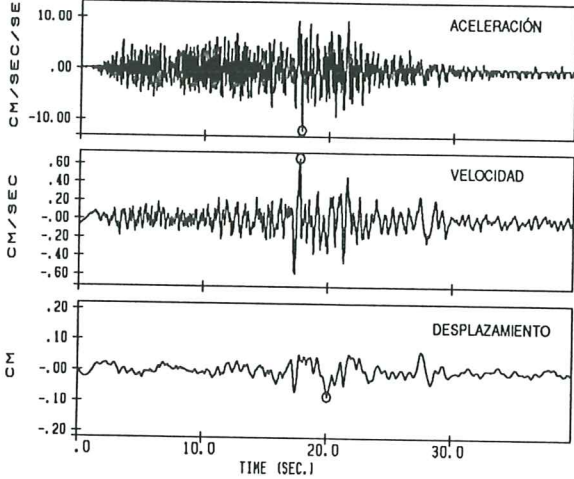
Filtro paso-banda : .150- .200 COMP 3 NORT #9394002.V2
Valores pico : ACC= -.34 VEL= .02 DISP= .01



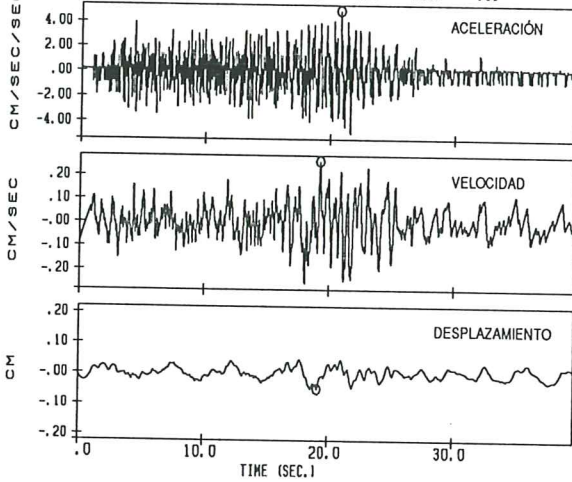
23/12/1993 14:22
LORCA (M) COMP 3 NORT LOR.V2
BANDPASS FILTER LIMITS: .150- .200 20.00-22.00
PEAK VALUES: ACC= -.84 VEL= .09 DISP= .03



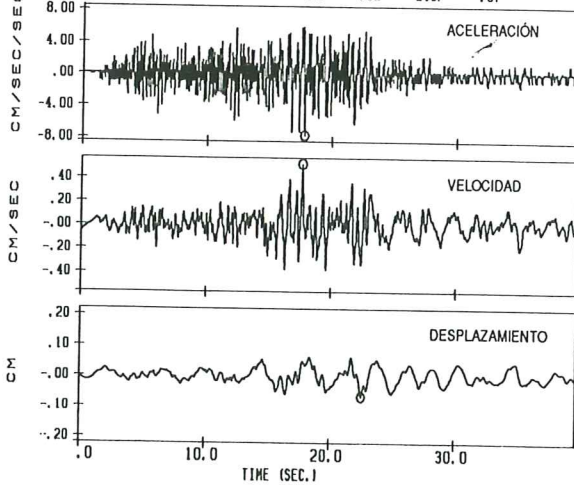
23/12/1993 14:22
 JAYENA (GR) COMP 1 OEST JAY.V2
 BANDPASS FILTER LIMITS: .150-.200 20.00-22.00
 PEAK VALUES: ACC= -11.93 VEL= .66 DISP= -.09



23/12/1993 14:22
 JAYENA (GR) COMP 2 UP JAY.V2
 BANDPASS FILTER LIMITS: .150-.200 20.00-22.00
 PEAK VALUES: ACC= 4.89 VEL= .26 DISP= -.05

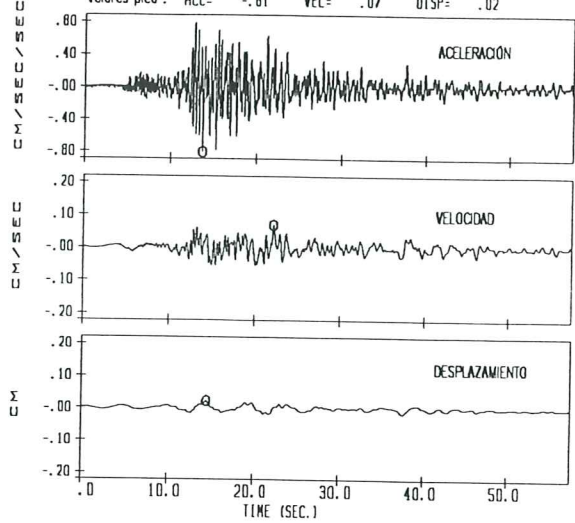


23/12/1993 14:22
 JAYENA (GR) COMP 3 NOR1 JAY.V2
 BANDPASS FILTER LIMITS: .150-.200 20.00-22.00
 PEAK VALUES: ACC= -7.70 VEL= .52 DISP= -.07



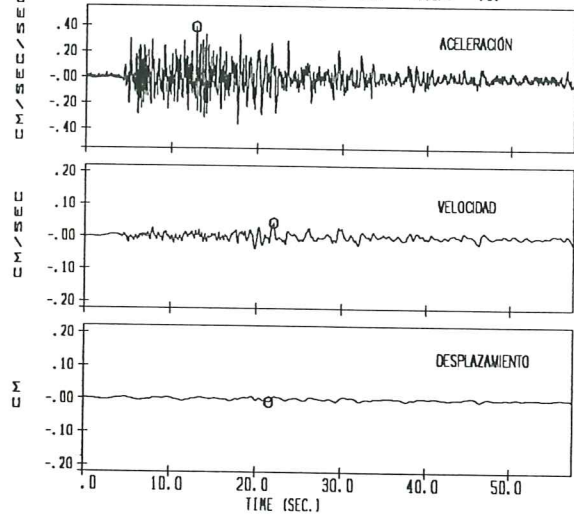
Diciembre, 23, 1993, 14:22, ADRA
 Estación de FACULTAD DE CC.

Filtro paso-banda : .150-.200 20.00-22.00 COMP 1 OEST FAC230C.V2
 Valores pico : ACC= -.81 VEL= .07 DISP= .02



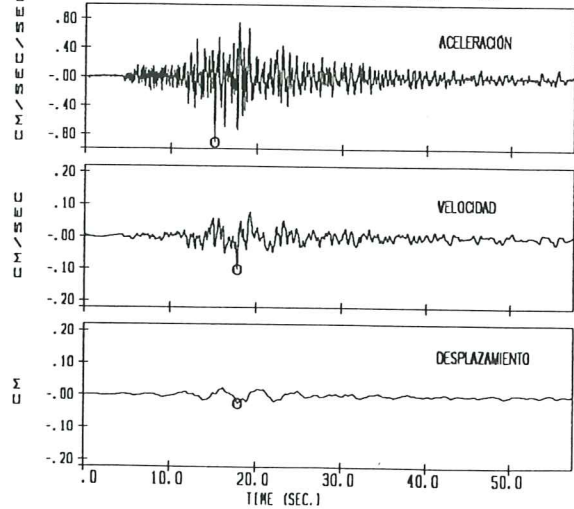
Diciembre, 23, 1993, 14:22, ADRA
 Estación de FACULTAD DE CC.

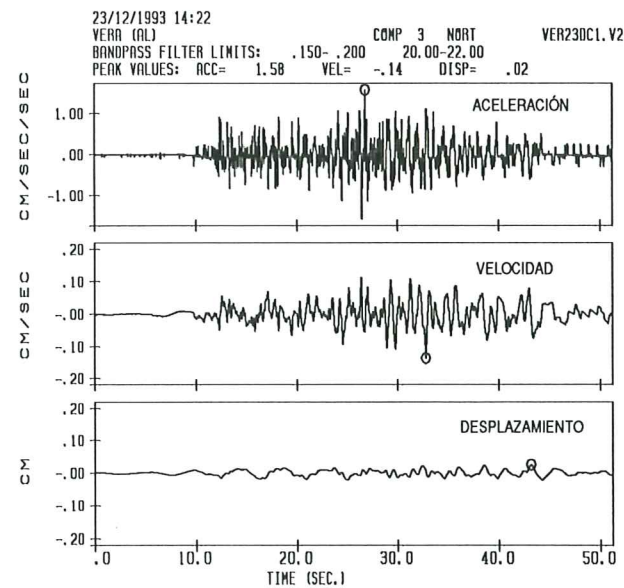
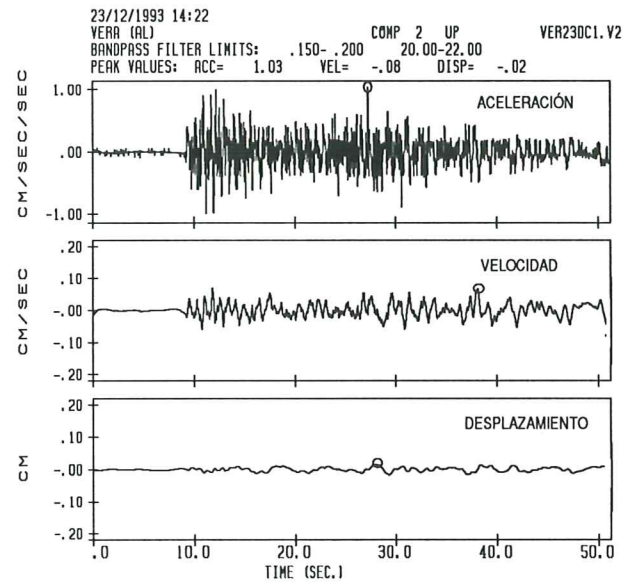
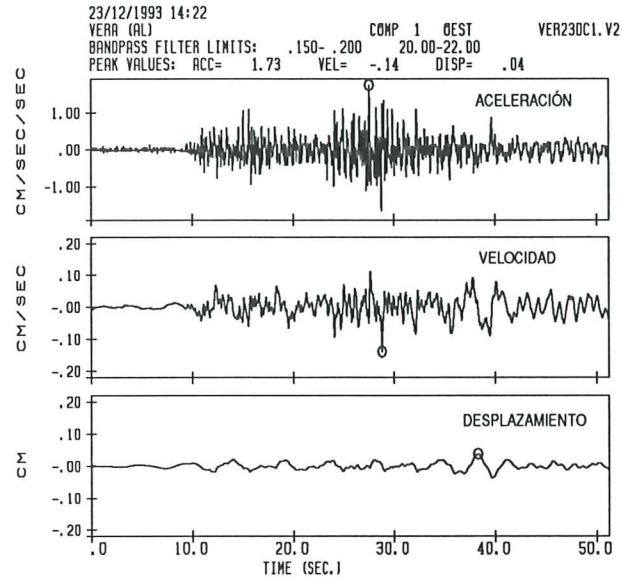
Filtro paso-banda : .150-.200 20.00-22.00 COMP 2 UP FAC230C.V2
 Valores pico : ACC= .39 VEL= .04 DISP= -.01

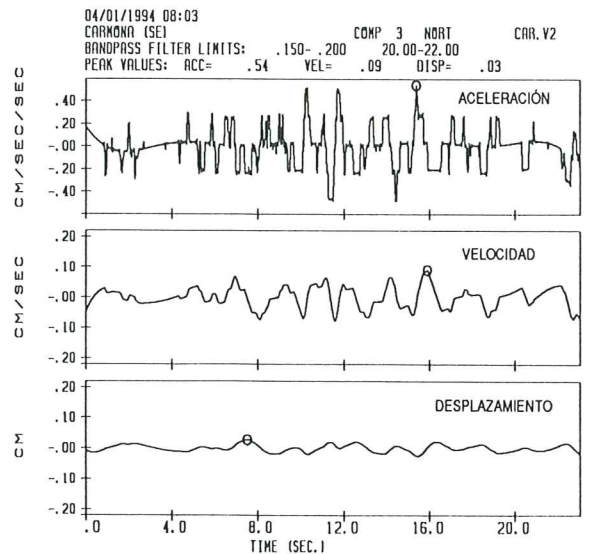
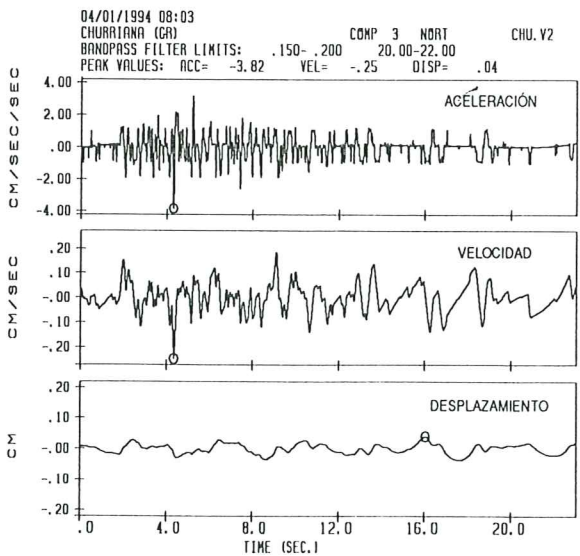
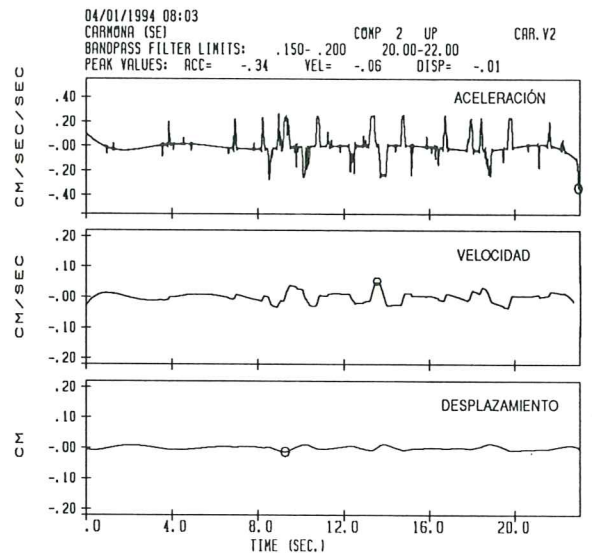
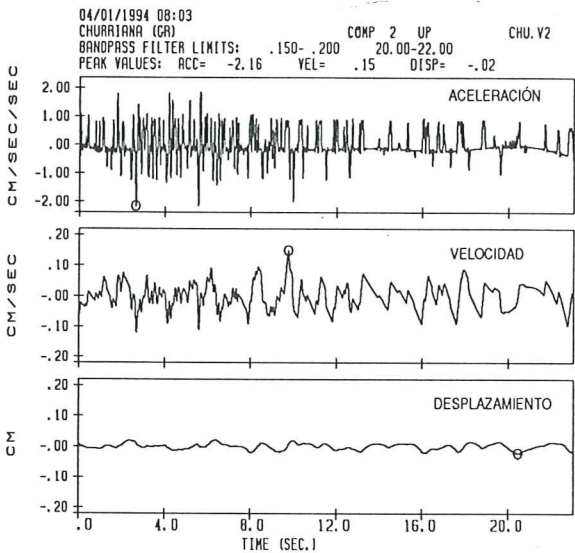
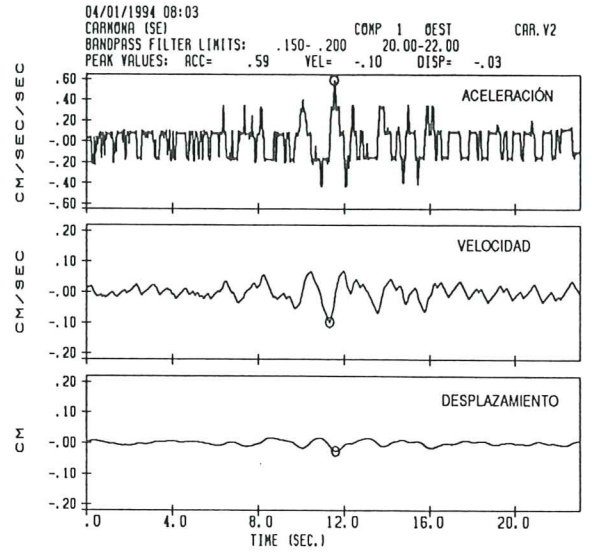
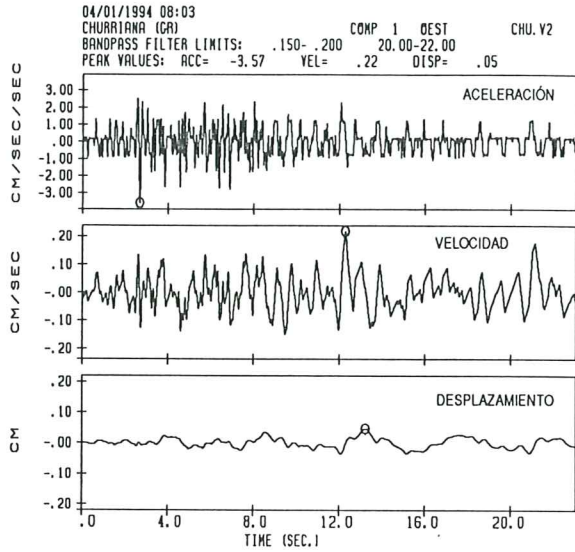


Diciembre, 23, 1993, 14:22, ADRA
 Estación de FACULTAD DE CC.

Filtro paso-banda : .150-.200 20.00-22.00 COMP 3 NOR1 FAC230C.V2
 Valores pico : ACC= -.91 VEL= -.10 DISP= -.03

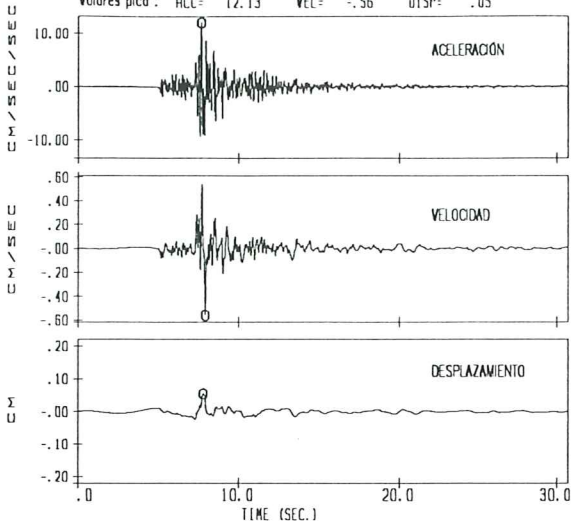






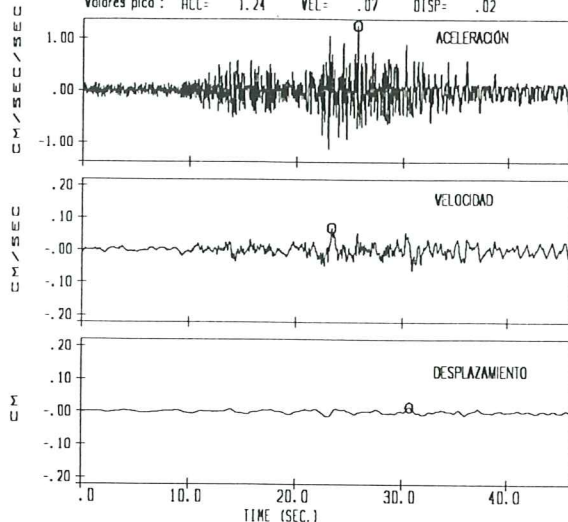
Enero, 04, 1994, 08:03, ADRA
Estación de ADRA

Filtro paso-banda : .150-.200 20.00-22.00 COMP 1 OEST RDR93004.V2
Valores pico : ACC= 12.13 VEL= -.56 DISP= .05



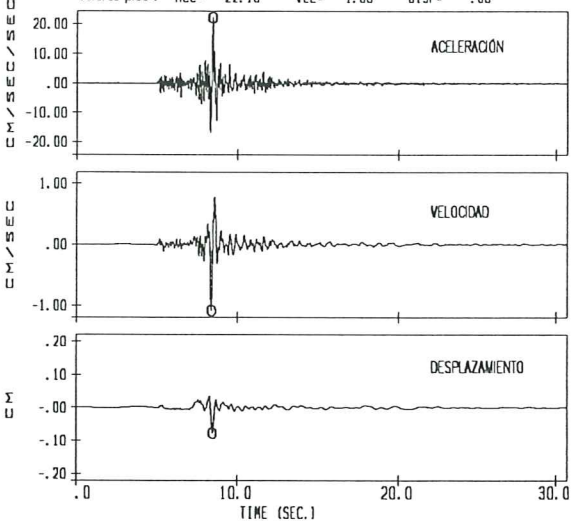
Enero, 04, 1994, 08:03, ADRA
Estación de VERA

Filtro paso-banda : .150-.200 20.00-22.00 COMP 1 OEST VER94002.V2
Valores pico : ACC= 1.24 VEL= .07 DISP= .02



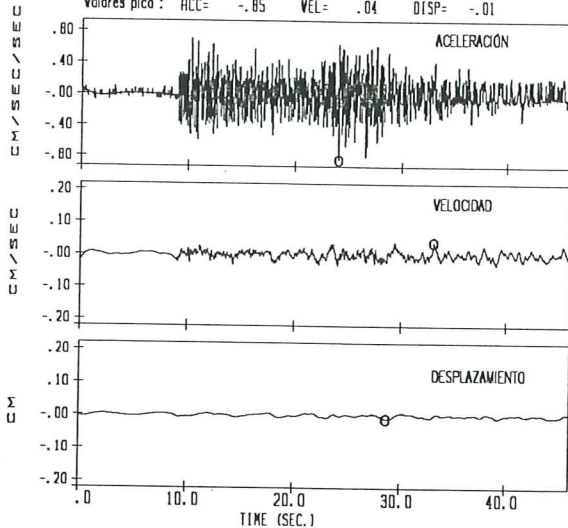
Enero, 04, 1994, 08:03, ADRA
Estación de ADRA

Filtro paso-banda : .150-.200 20.00-22.00 COMP 2 UP RDR93004.V2
Valores pico : ACC= 22.10 VEL= -1.08 DISP= -.08



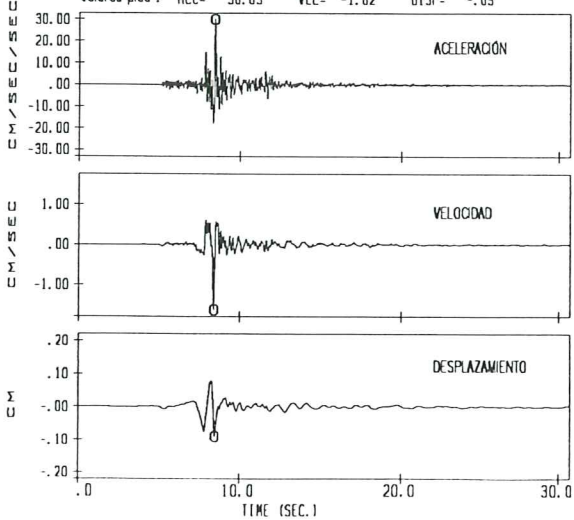
Enero, 04, 1994, 08:03, ADRA
Estación de VERA

Filtro paso-banda : .150-.200 20.00-22.00 COMP 2 UP VER94002.V2
Valores pico : ACC= -.85 VEL= .04 DISP= -.01



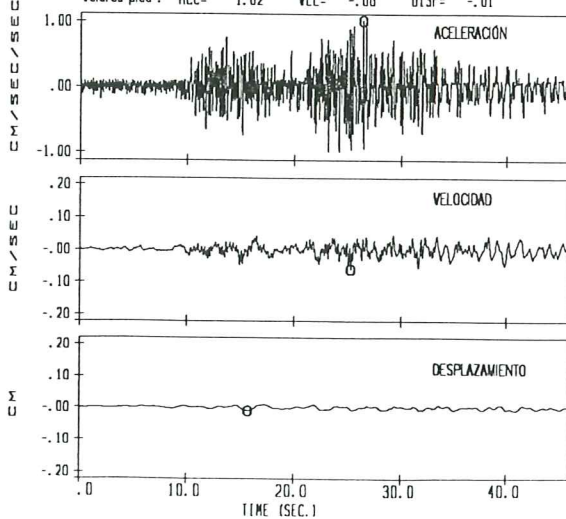
Enero, 04, 1994, 08:03, ADRA
Estación de ADRA

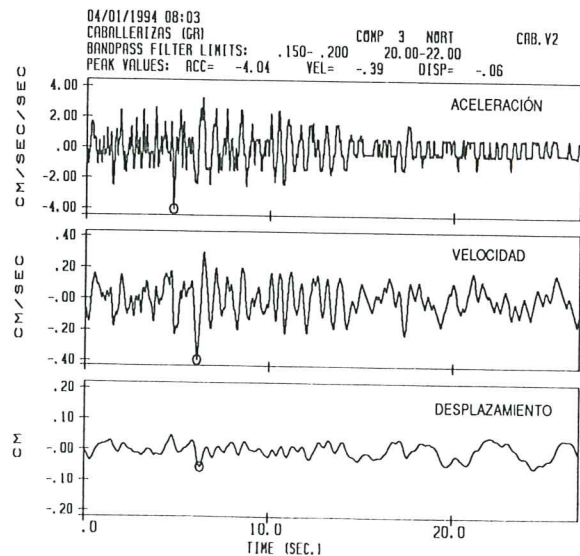
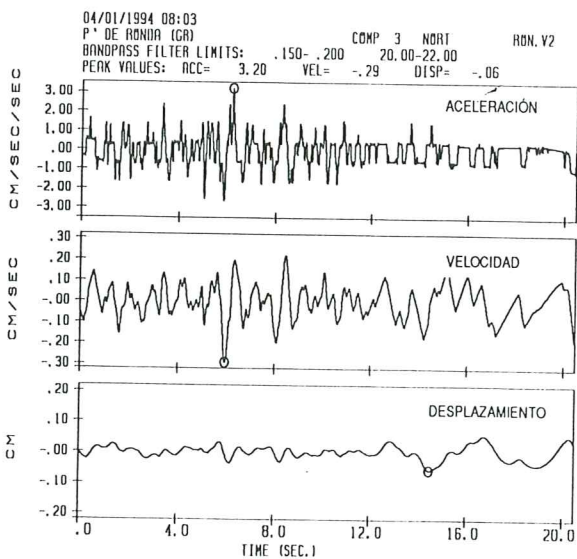
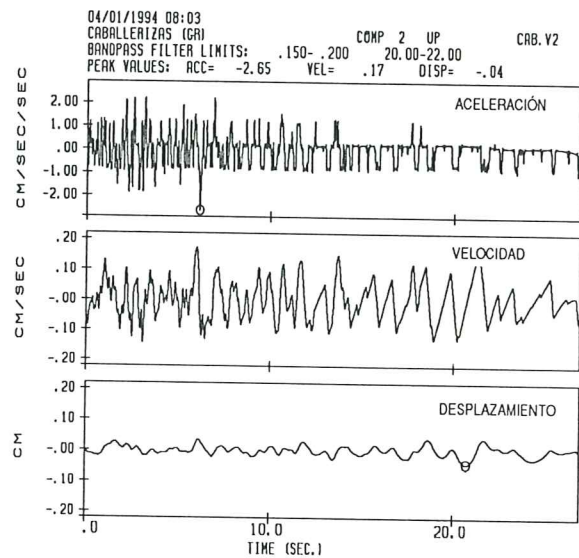
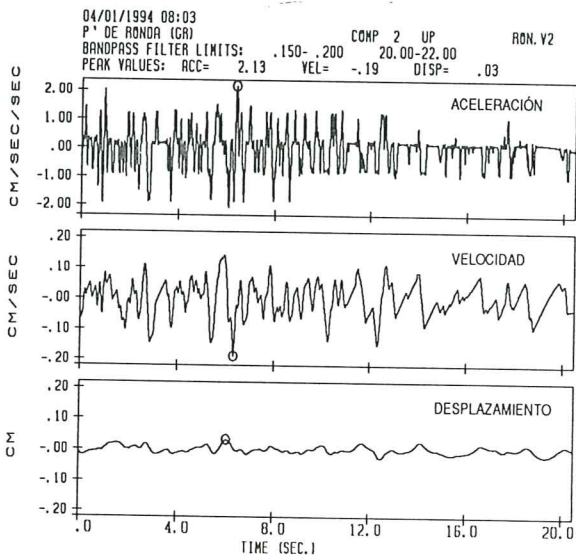
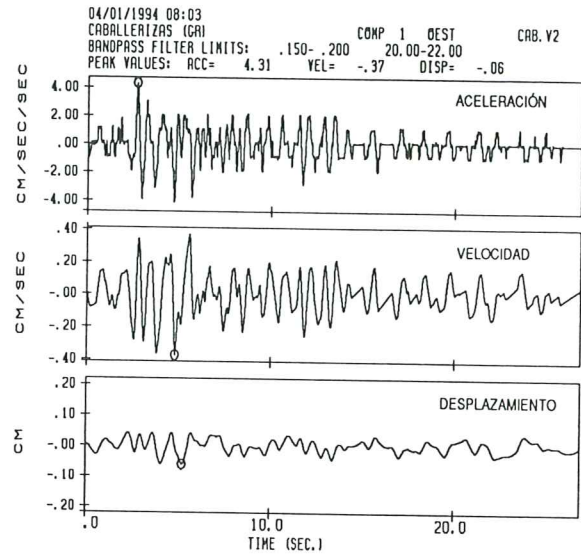
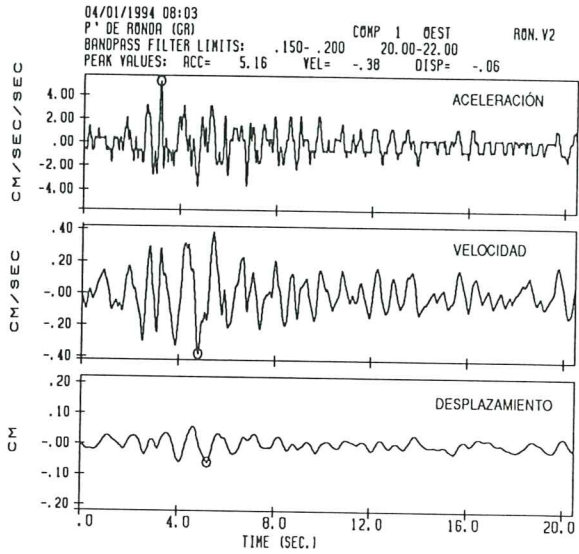
Filtro paso-banda : .150-.200 20.00-22.00 COMP 3 NORI RDR93004.V2
Valores pico : ACC= 30.05 VEL= -1.62 DISP= -.09



Enero, 04, 1994, 08:03, ADRA
Estación de VERA

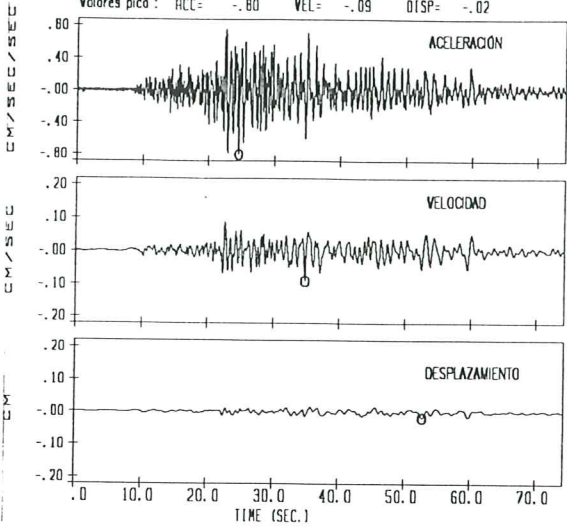
Filtro paso-banda : .150-.200 20.00-22.00 COMP 3 NORI VER94002.V2
Valores pico : ACC= 1.02 VEL= -.06 DISP= -.01





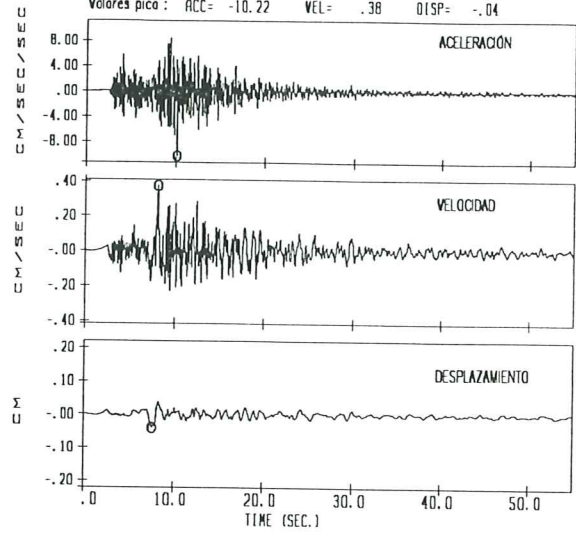
Enero, 04, 1994, 08:03, ADRA
Estación de ALBOLOTE

Filtro pasa-banda : .150-.200 COMP 1 DEST ALB04EN.V2
Valores pico : ACC= -.80 VEL= -.09 DISP= -.02



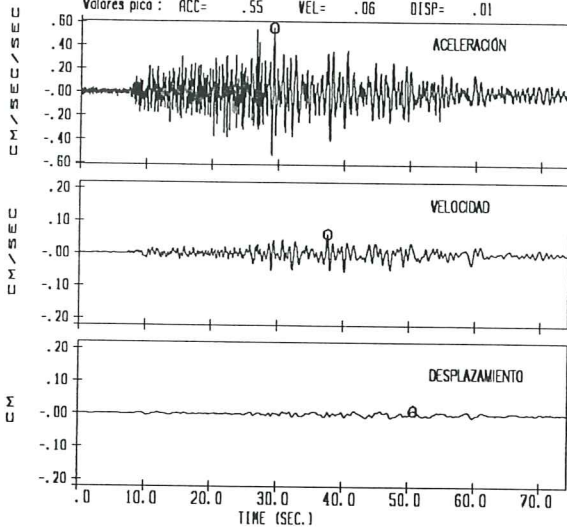
Enero, 04, 1994, 08:03, ADRA
Estación de ALMERÍA

Filtro pasa-banda : .200-.250 COMP 1 DEST ALM94004.V2
Valores pico : ACC= -10.22 VEL= .38 DISP= -.04



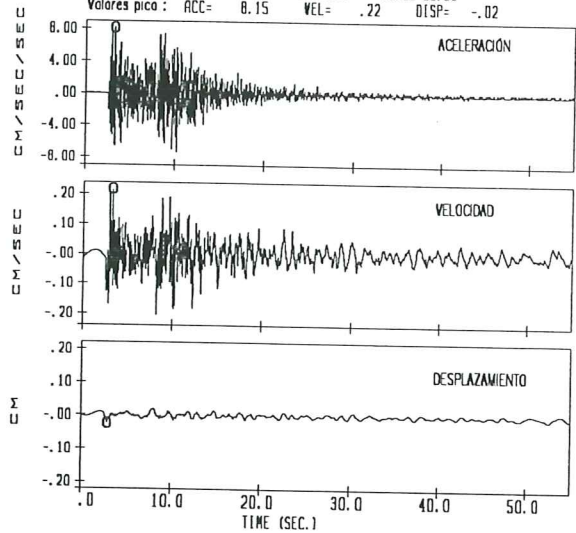
Enero, 04, 1994, 08:03, ADRA
Estación de ALBOLOTE

Filtro pasa-banda : .150-.200 COMP 2 UP ALB04EN.V2
Valores pico : ACC= .55 VEL= .06 DISP= .01



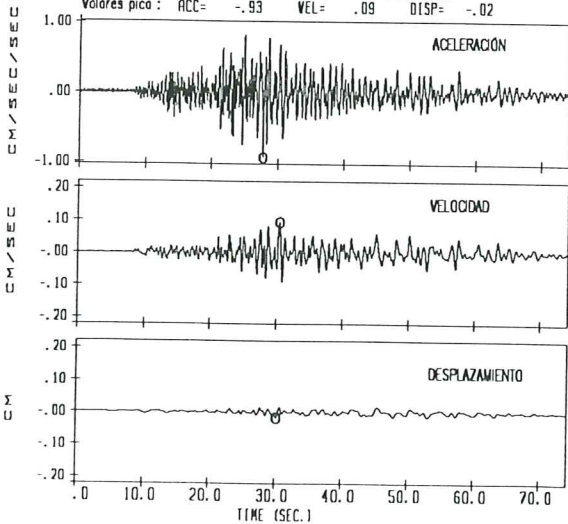
Enero, 04, 1994, 08:03, ADRA
Estación de ALMERÍA

Filtro pasa-banda : .200-.250 COMP 2 UP ALM94004.V2
Valores pico : ACC= 8.15 VEL= .22 DISP= -.02



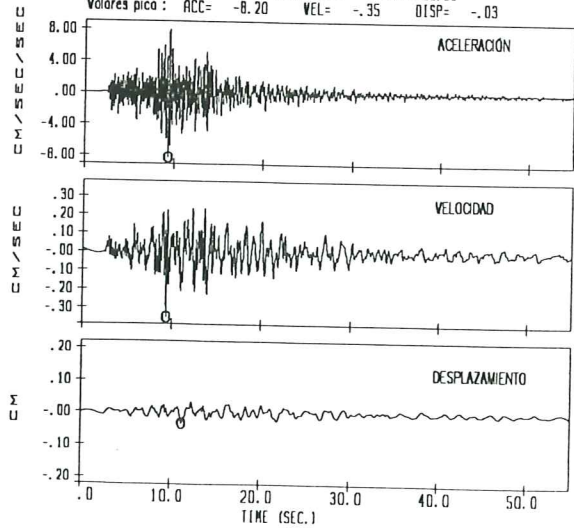
Enero, 04, 1994, 08:03, ADRA
Estación de ALBOLOTE

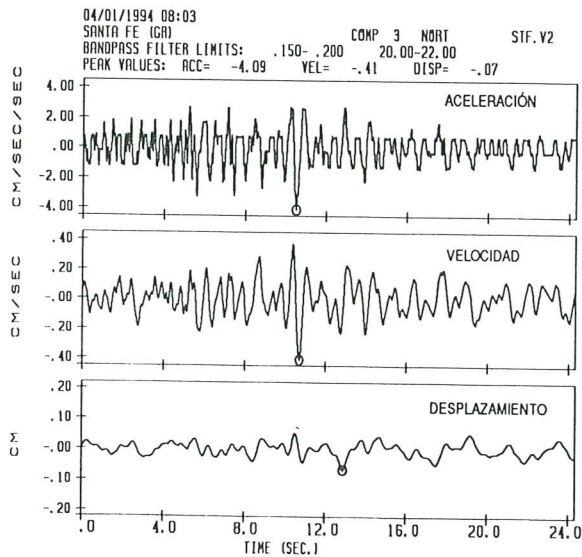
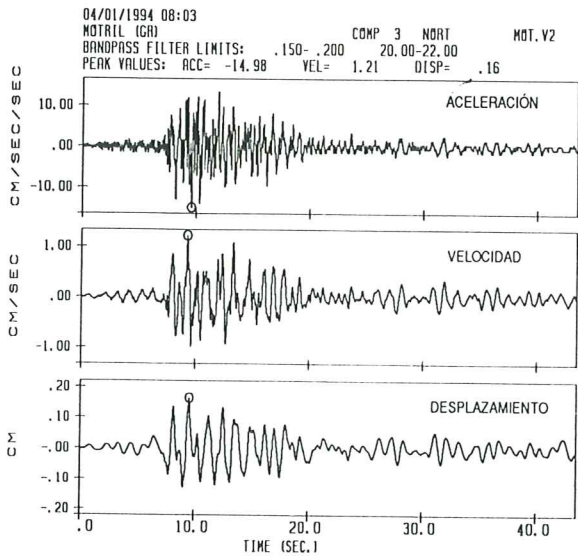
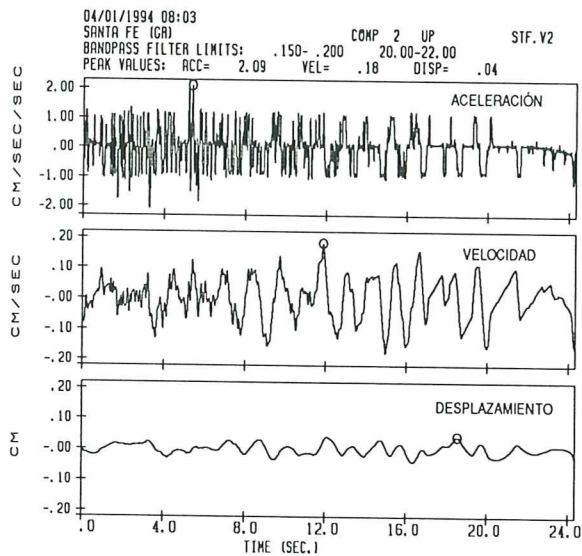
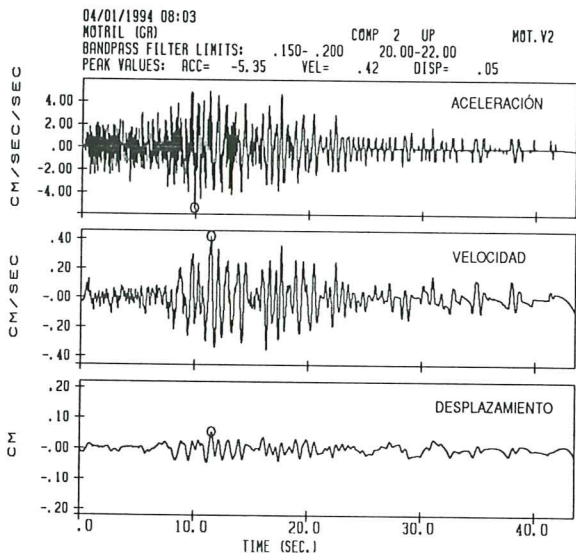
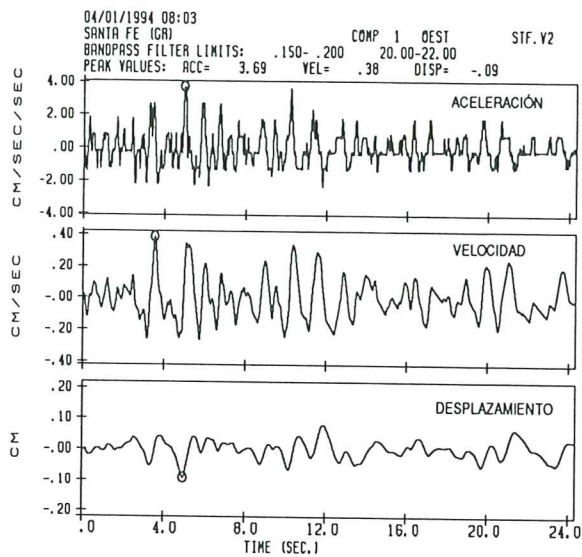
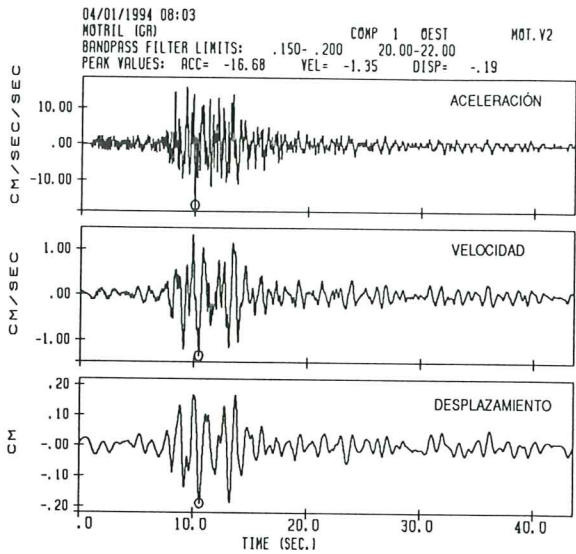
Filtro pasa-banda : .150-.200 COMP 3 NORT ALB04EN.V2
Valores pico : ACC= -.93 VEL= .09 DISP= -.02



Enero, 04, 1994, 08:03, ADRA
Estación de ALMERÍA

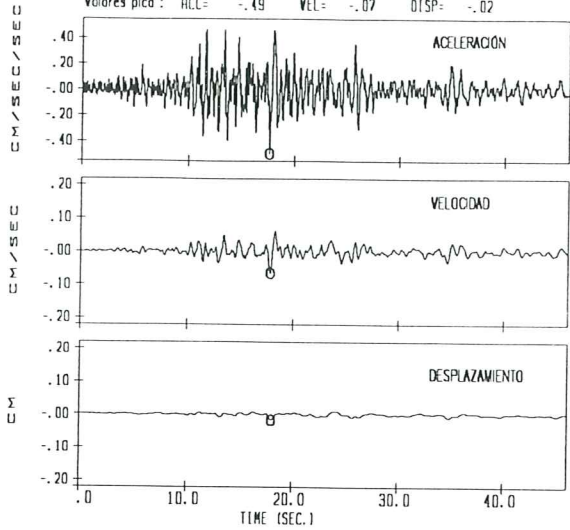
Filtro pasa-banda : .200-.250 COMP 3 NORT ALM94004.V2
Valores pico : ACC= -8.20 VEL= -.35 DISP= -.03





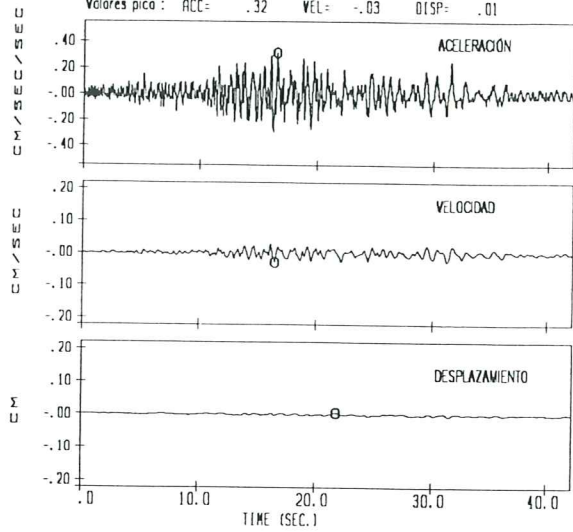
Enero, 04, 1994, 08:03, ADRA
Estación de FACULTAD DE CC.

Filtro pasa-banda : .150-.200 20.00-22.00 COMP 1 BEST FAC04EN.V2
Valores pico : ACC= -.49 VEL= -.07 DISP= -.02



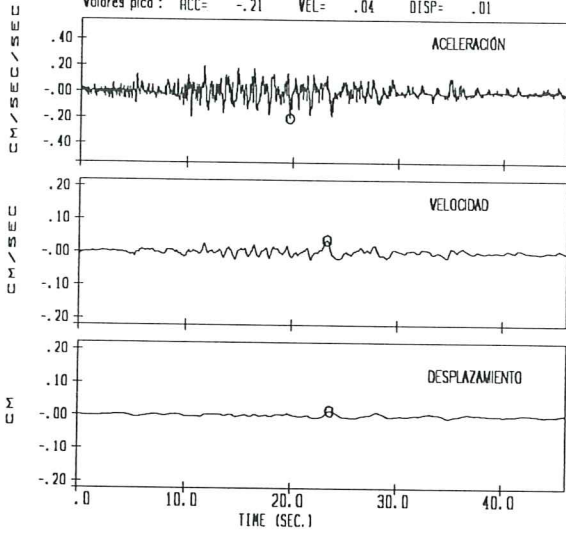
Enero, 04, 1994, 08:03, ADRA
Estación de ALHAMA

Filtro pasa-banda : .150-.200 20.00-22.00 COMP 1 BEST ALH04EN.V2
Valores pico : ACC= .32 VEL= -.03 DISP= .01



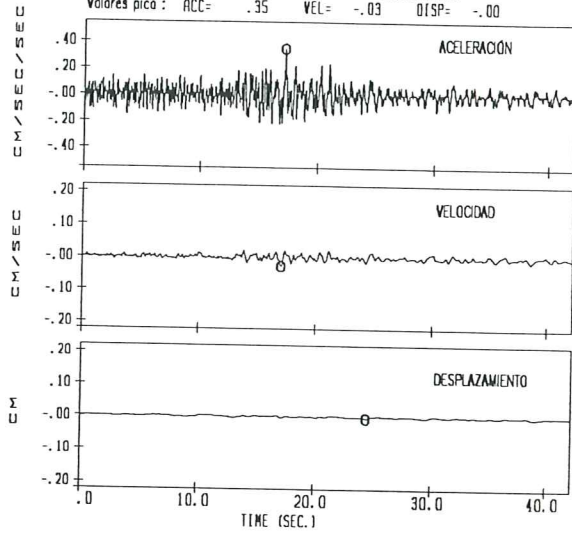
Enero, 04, 1994, 08:03, ADRA
Estación de FACULTAD DE CC.

Filtro pasa-banda : .150-.200 20.00-22.00 COMP 2 UP FAC04EN.V2
Valores pico : ACC= -.21 VEL= .04 DISP= .01



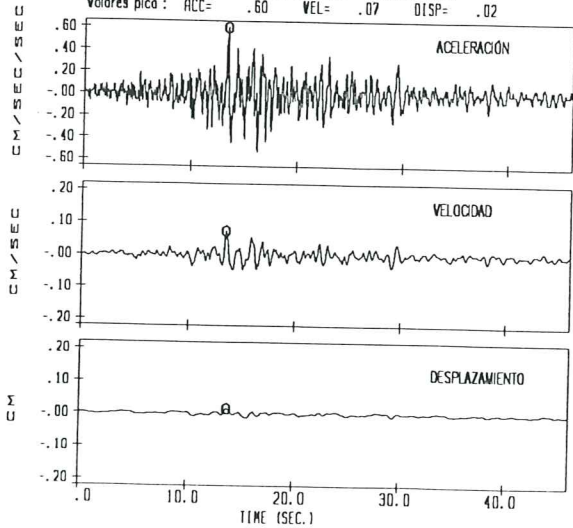
Enero, 04, 1994, 08:03, ADRA
Estación de ALHAMA

Filtro pasa-banda : .150-.200 20.00-22.00 COMP 2 UP ALH04EN.V2
Valores pico : ACC= .35 VEL= -.03 DISP= -.00



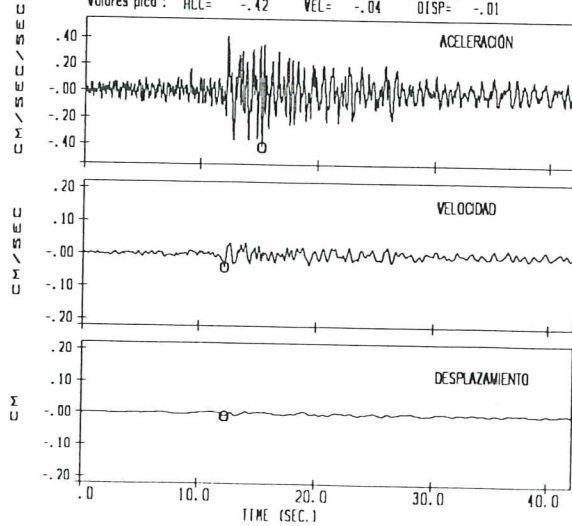
Enero, 04, 1994, 08:03, ADRA
Estación de FACULTAD DE CC.

Filtro pasa-banda : .150-.200 20.00-22.00 COMP 3 NORTH FAC04EN.V2
Valores pico : ACC= .60 VEL= .07 DISP= .02



Enero, 04, 1994, 08:03, ADRA
Estación de ALHAMA

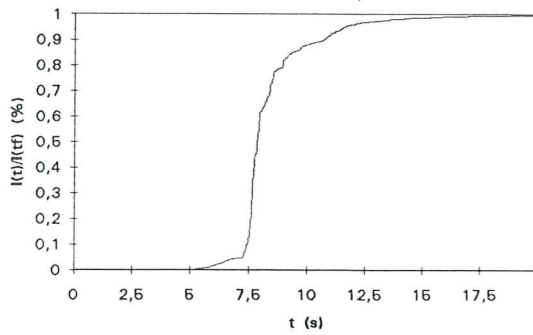
Filtro pasa-banda : .150-.200 20.00-22.00 COMP 3 NORTH ALH04EN.V2
Valores pico : ACC= -.42 VEL= -.04 DISP= -.01



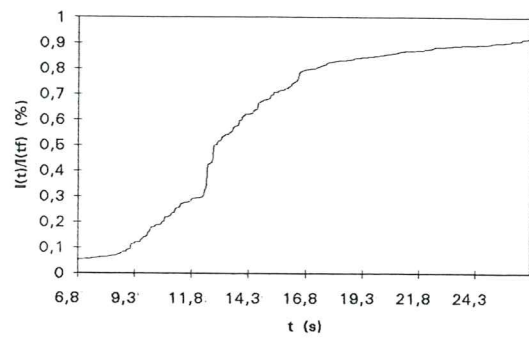
APÉNDICE II

Diagramas de Husid.

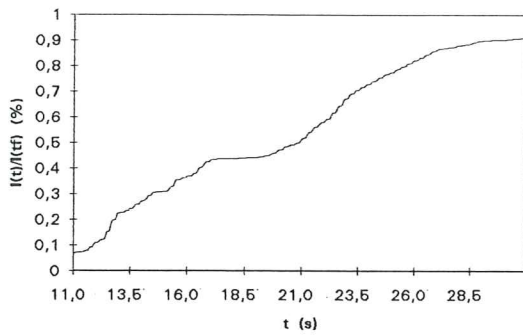
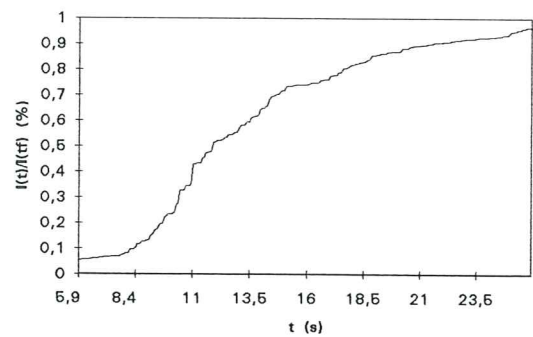
Estación de Adra (Comp. 1)



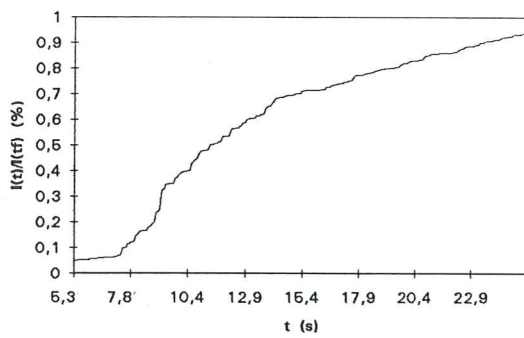
Estación de Motril (Comp. 3)



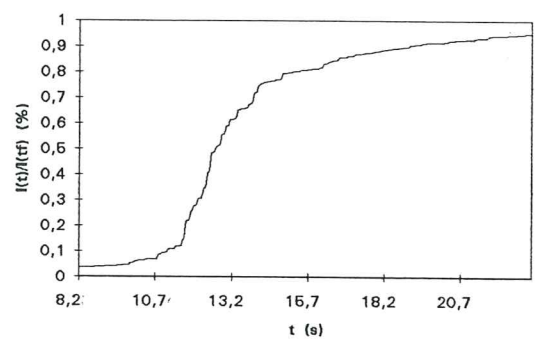
Estación de Comares (Comp. 1)

Estación de P⁹ de Ronda (Comp. 1)

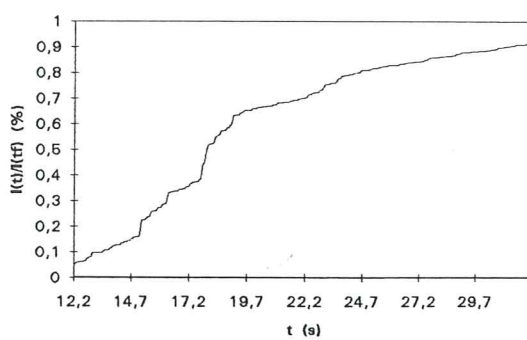
Estación de Caballerizas (Comp. 3)



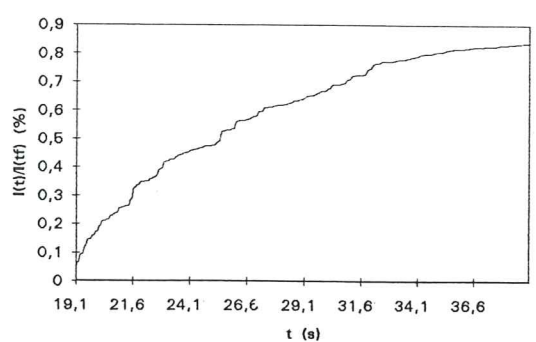
Estación de Churriana (Comp. 3)



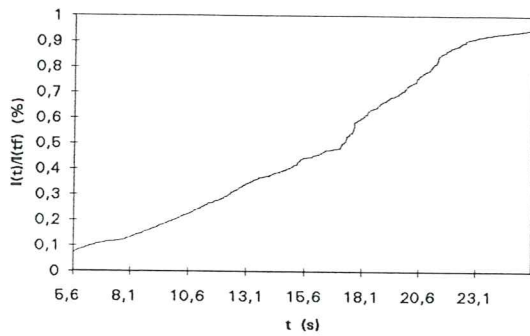
Estación de Facultad de CC. (Comp. 3)



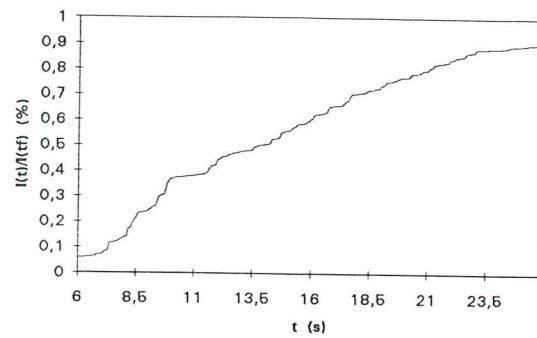
Estación de Albolote (Comp. 1)



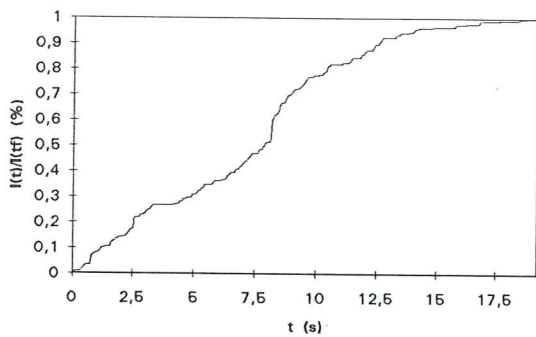
Estación de Jayena (Comp. 1)



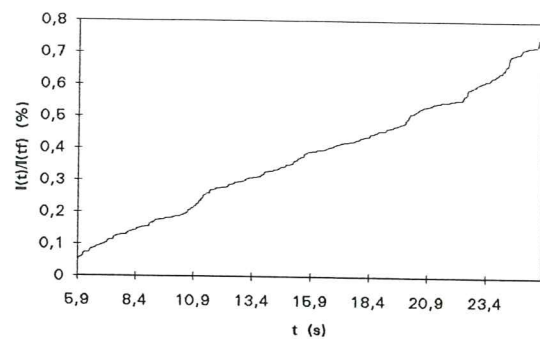
Estación de Santa Fe (Comp. 1)



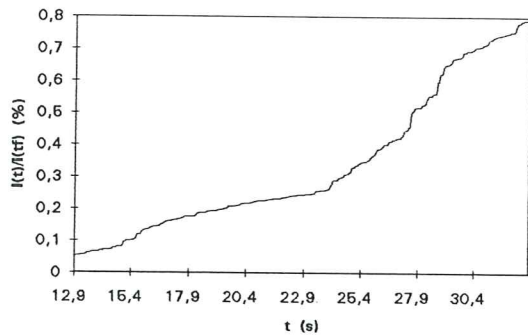
Estación de Ventas de Huelma (Comp. 1)



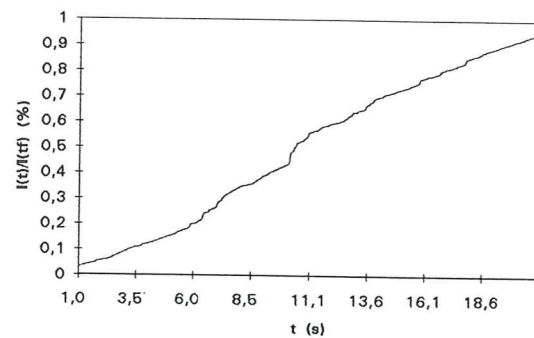
Estación de Alhama (Comp. 3)



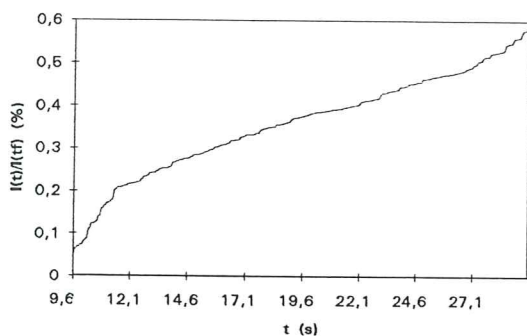
Estación de Vera (Comp. 1)



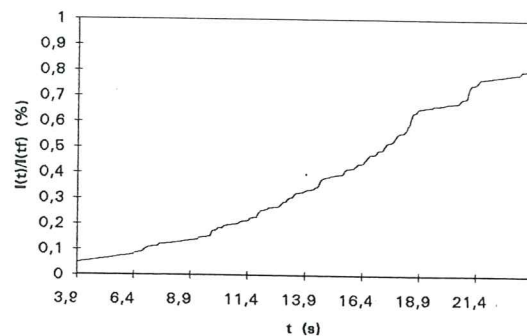
Estación de Málaga (Comp. 1)



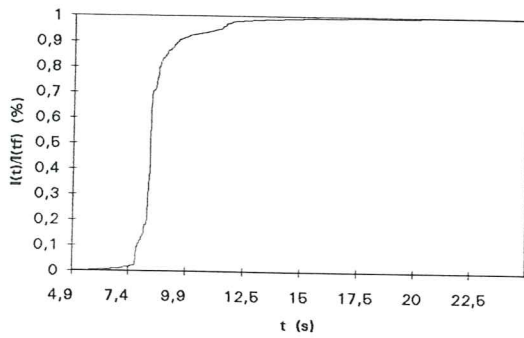
Estación de Lorca (Comp. 1)



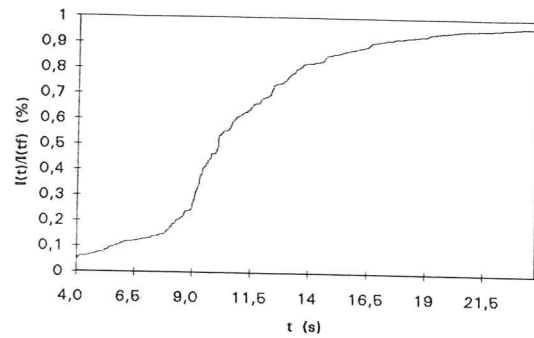
Estación de Carmona (Comp. 3)



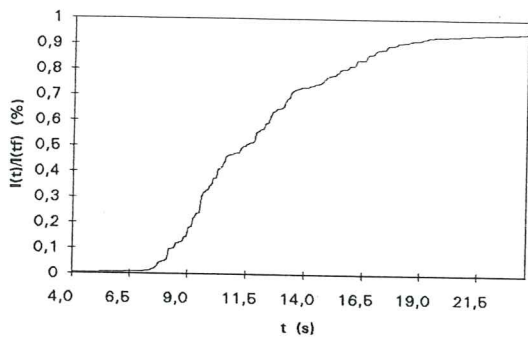
Estación de Adra (Comp. 3)



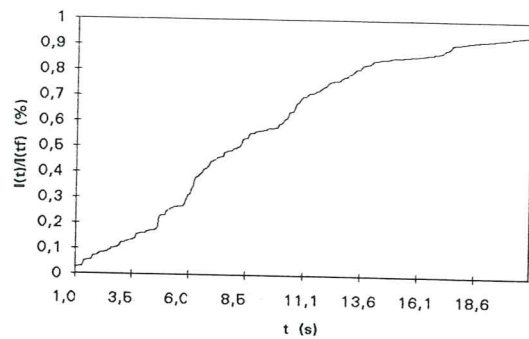
Estación de Almería (Comp. 1)



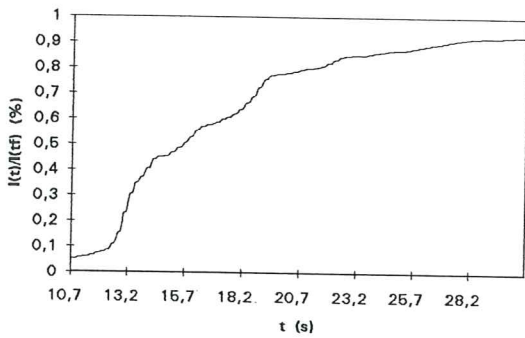
Estación de Motril (Comp. 1)



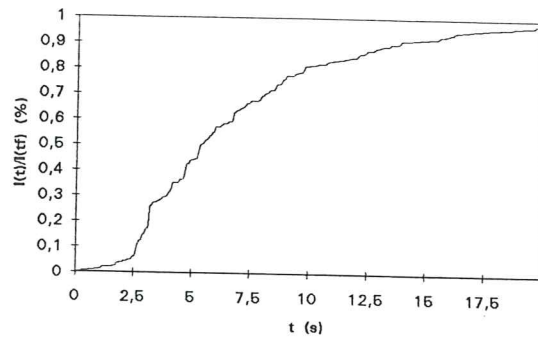
Estación de Caballerizas (Comp. 3)



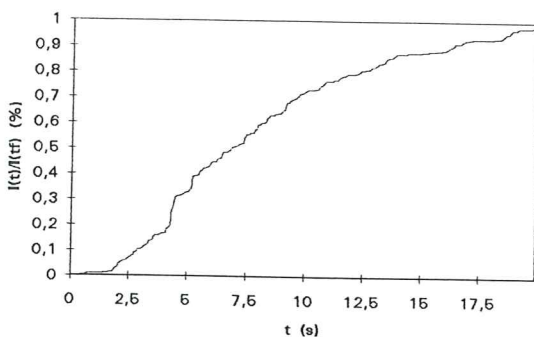
Estación de Comares (Comp. 1)



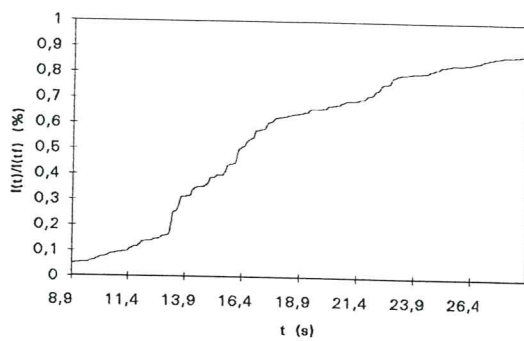
Estación de Pº de Ronda (Comp. 1)



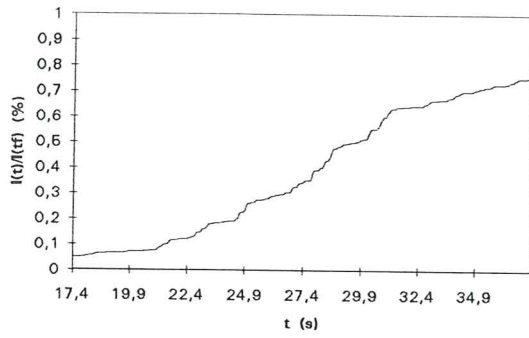
Estación de Churriana (Comp. 3)



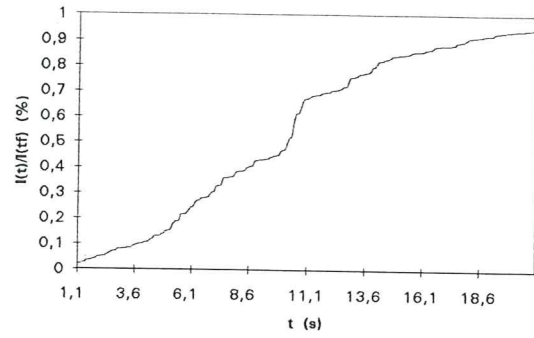
Estación de Facultad de CC. (Comp. 3)



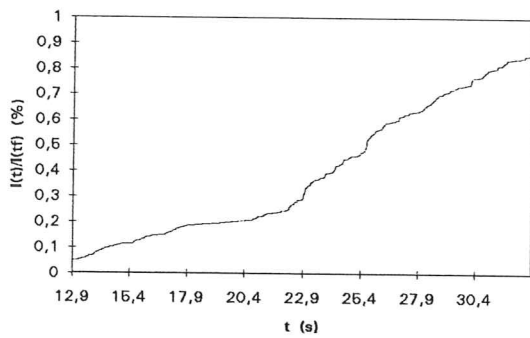
Estación de Albolote (Comp. 3)



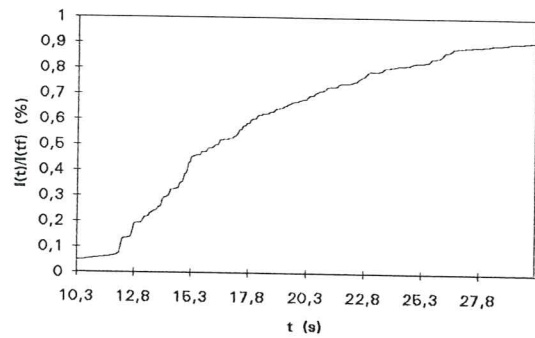
Estación de Santa Fe (Comp. 3)



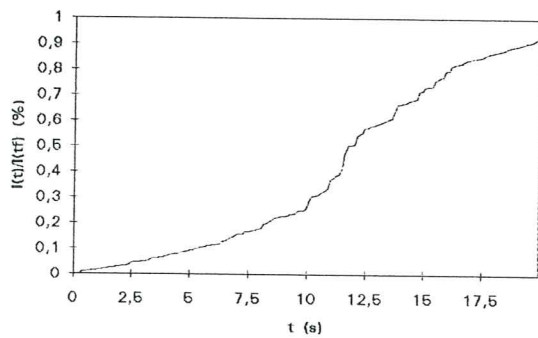
Estación de Vera (Comp. 1)



Estación de Alhama (Comp. 3)



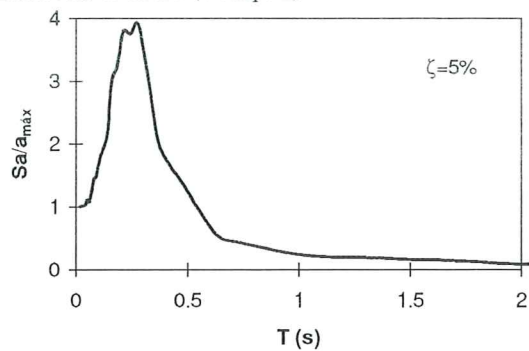
Estación de Carmona (Comp. 1)



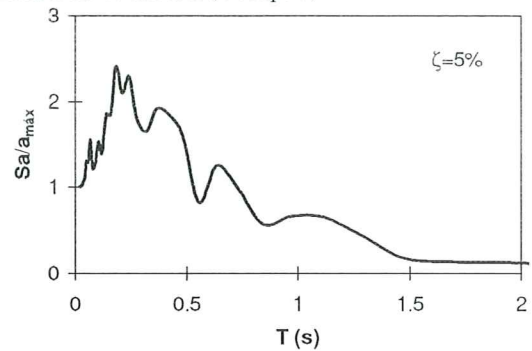
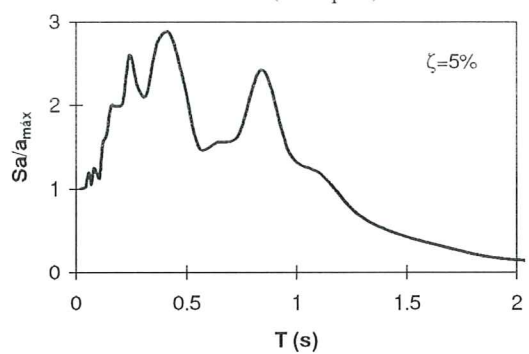
APÉNDICE III

Espectros normalizados de respuesta.

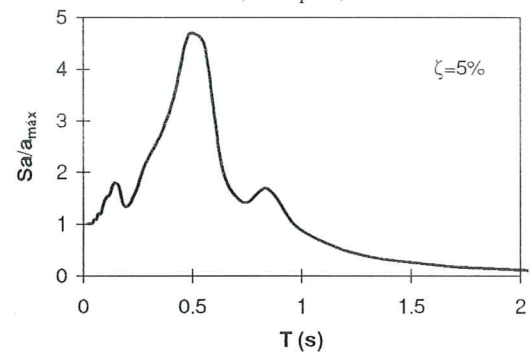
Estación de Adra (Comp. 1)



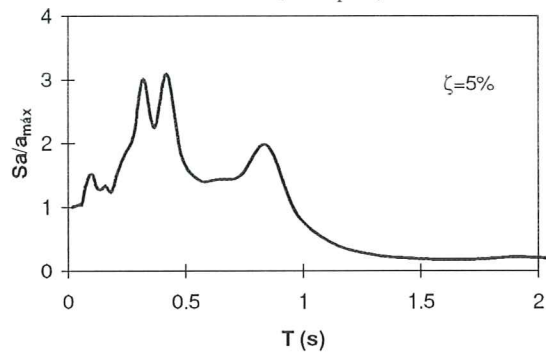
Estación de Motril (Comp. 3)

Estación de P² de Ronda (Comp. 1)

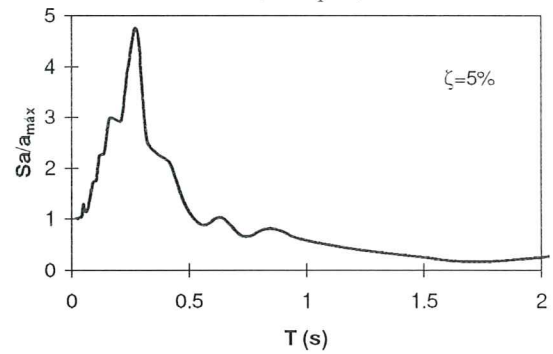
Estación de Comares (Comp. 1)



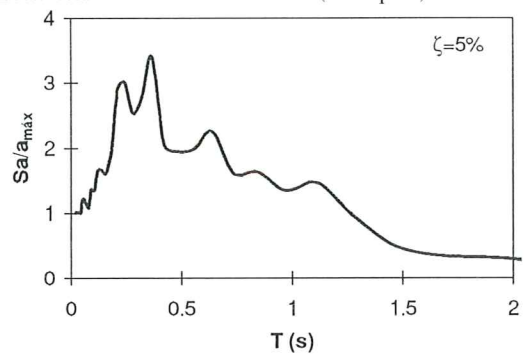
Estación de Caballerizas (Comp. 3)



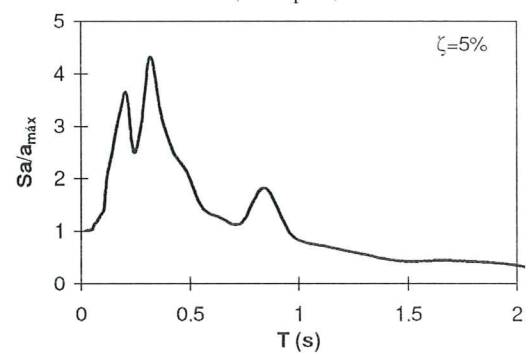
Estación de Churrriana (Comp. 3)



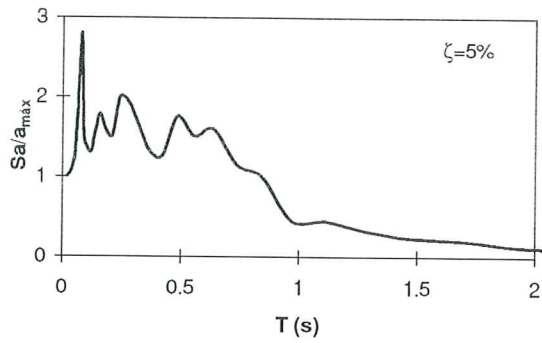
Estación de Facultad de CC. (Comp. 3)



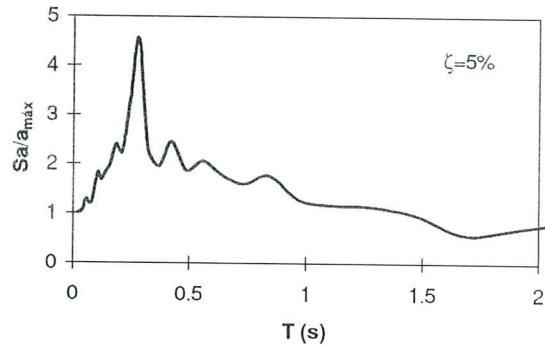
Estación de Albolote (Comp. 1)



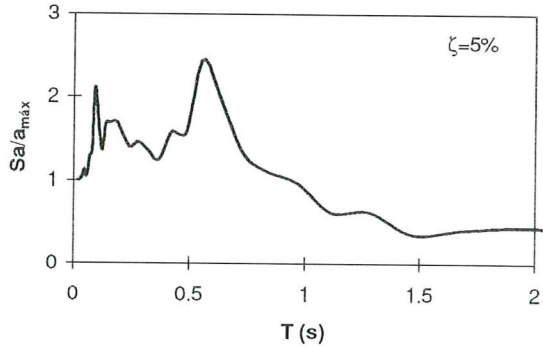
Estación de Jayena (Comp. 1)



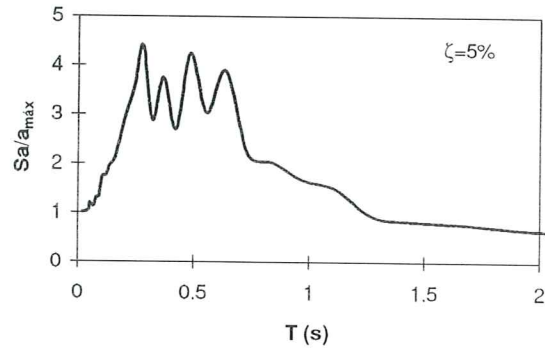
Estación de Santa Fe (Comp. 1)



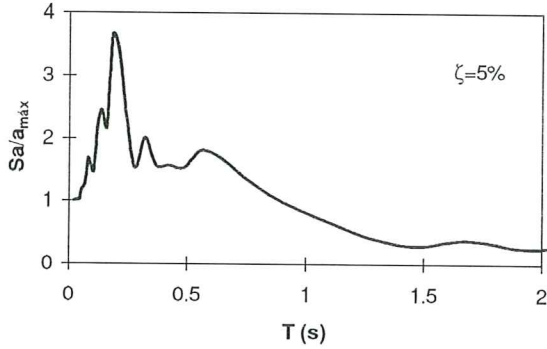
Estación de Ventas de Huelma (Comp. 1)



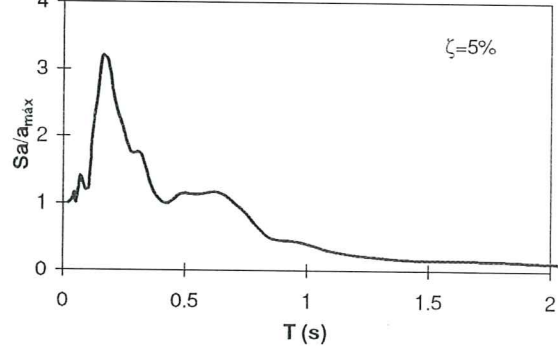
Estación de Alhama (Comp. 3)



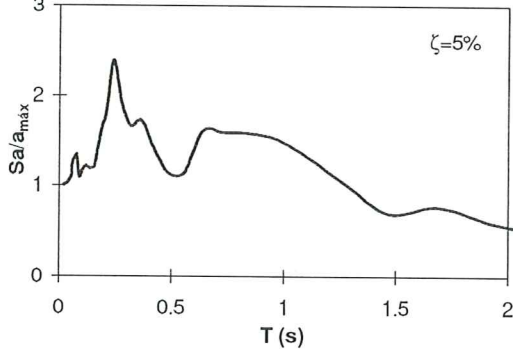
Estación de Vera (Comp. 1)



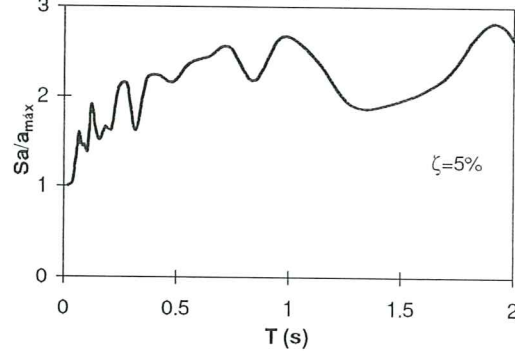
Estación de Málaga (Comp. 1)



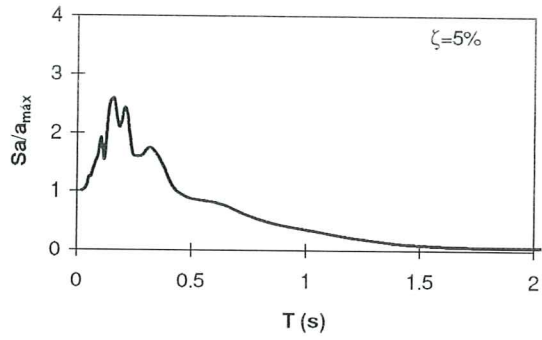
Estación de Lorca (Comp. 1)



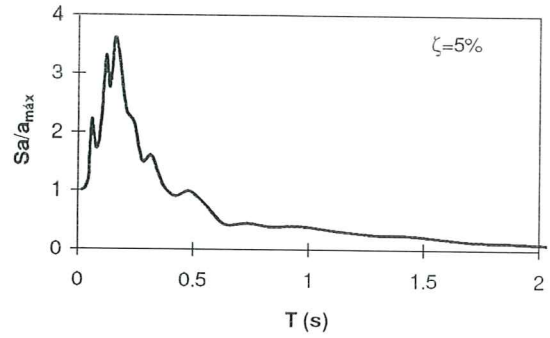
Estación de Carmona (Comp. 3)



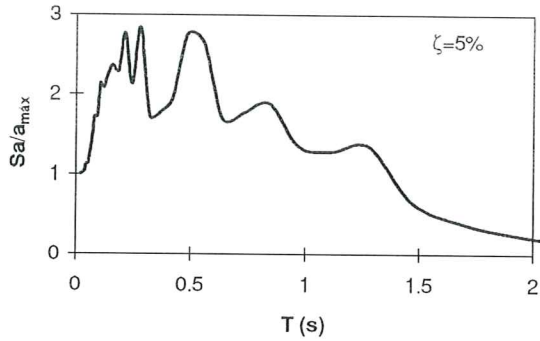
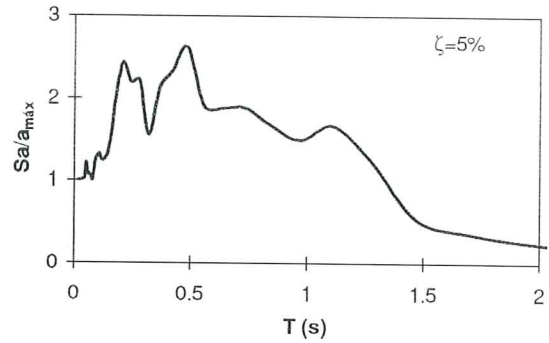
Estación de Adra (Comp. 3)



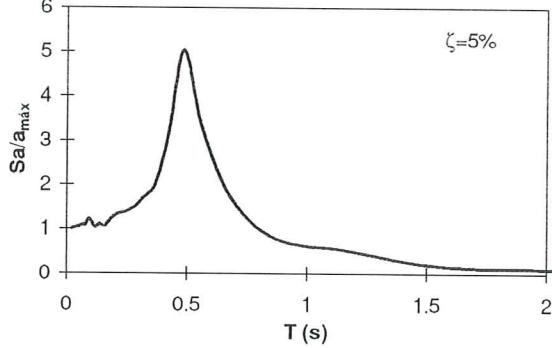
Estación de Almería (Comp. 1)



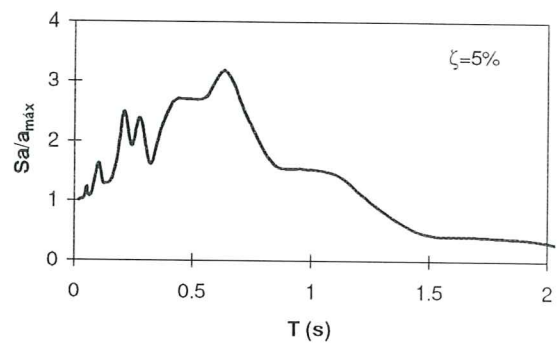
Estación de Motril (Comp. 1)

Estación de P^o de Ronda (Comp. 1)

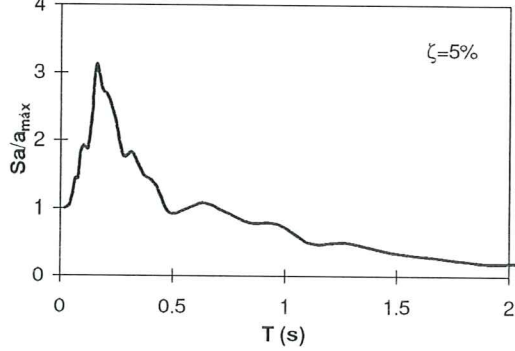
Estación de Comares (Comp. 1)



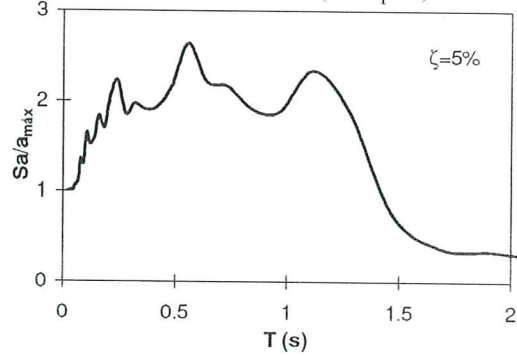
Estación de Caballerizas (Comp. 3)



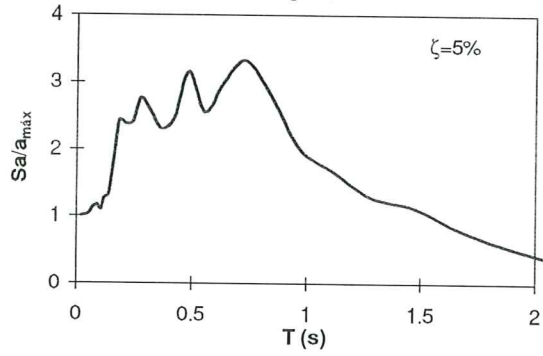
Estación de Churrriana (Comp. 3)



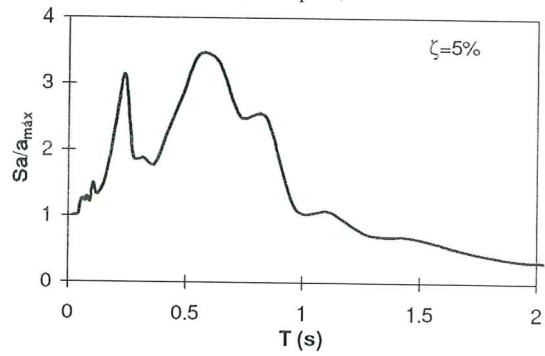
Estación de Facultad de CC. (Comp. 3)



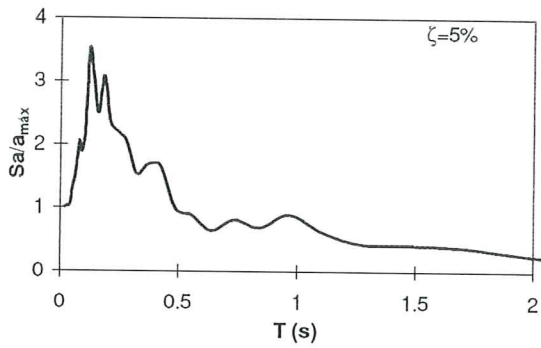
Estación de Albolote (Comp. 3)



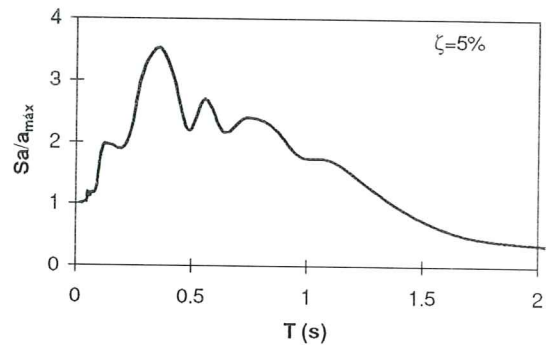
Estación de Santa Fe (Comp. 3)



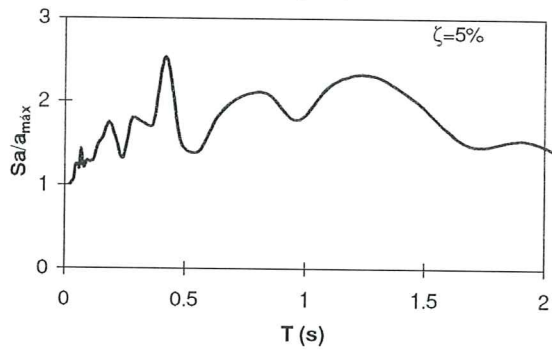
Estación de Vera (Comp. 1)



Estación de Alhama (Comp. 3)

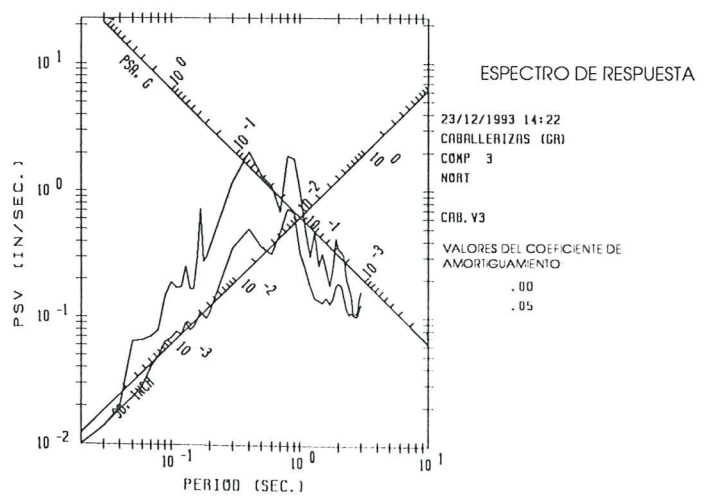
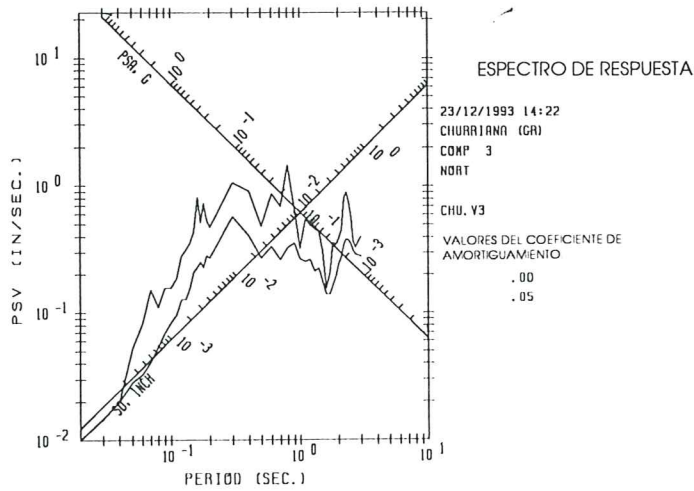
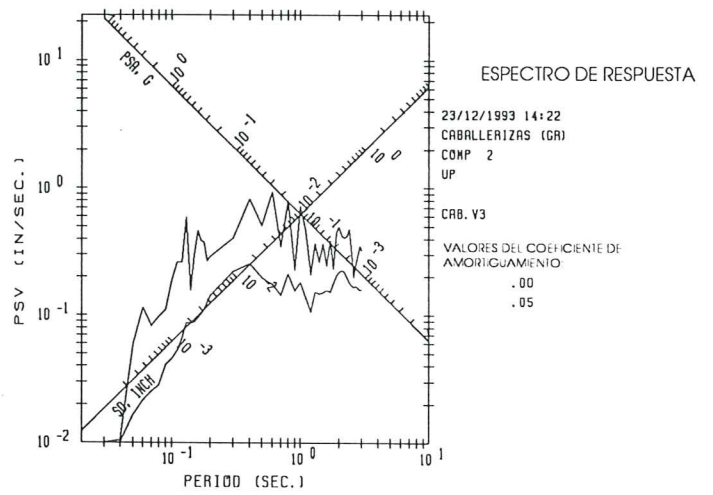
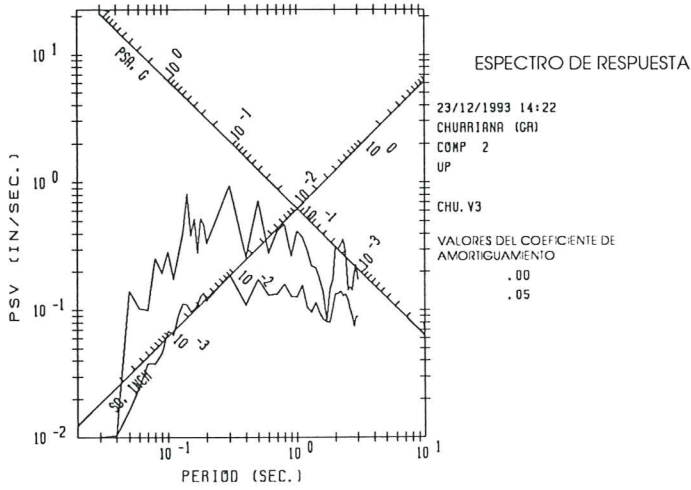
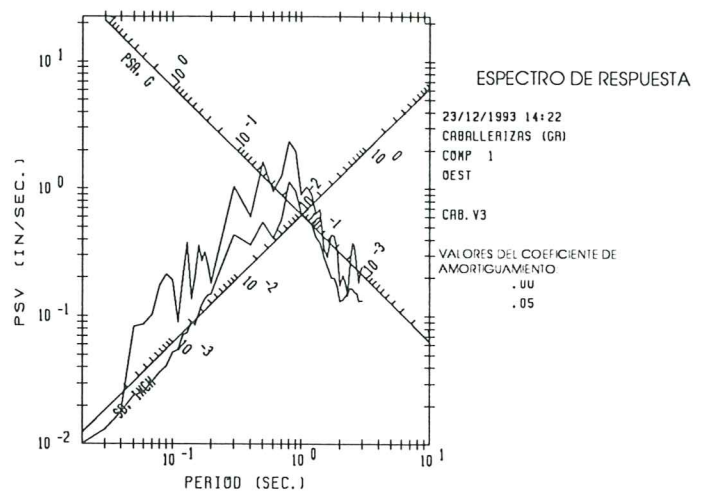
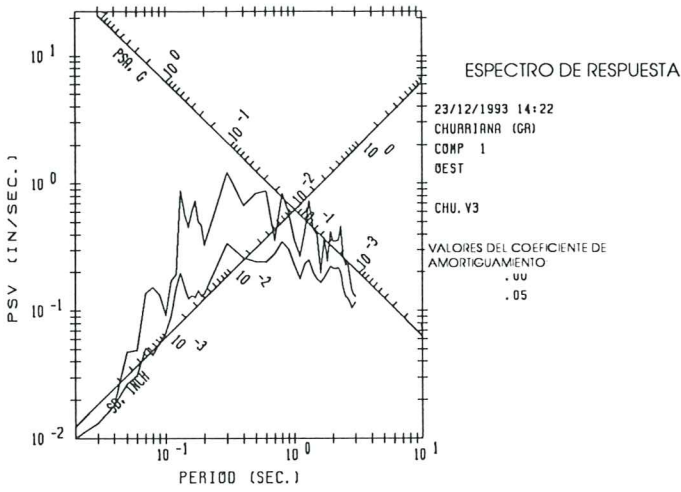


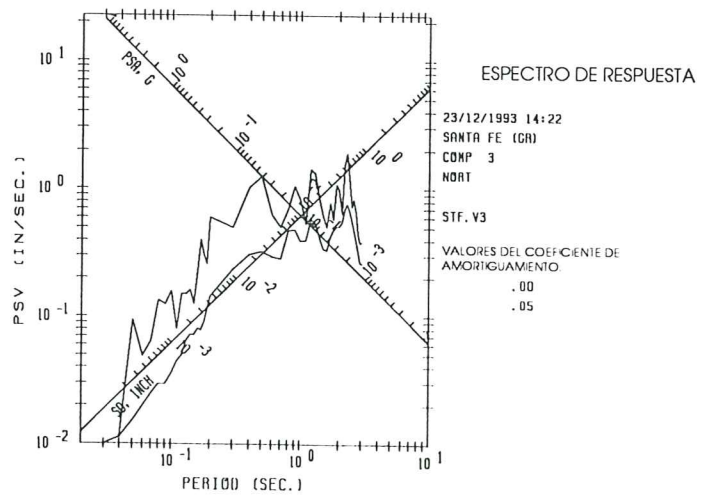
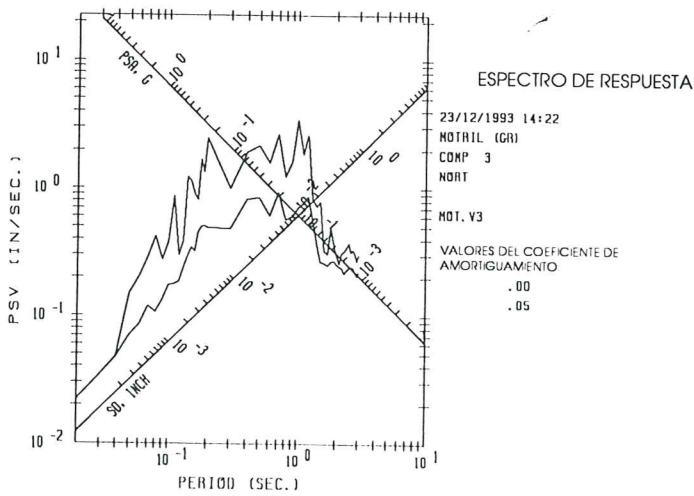
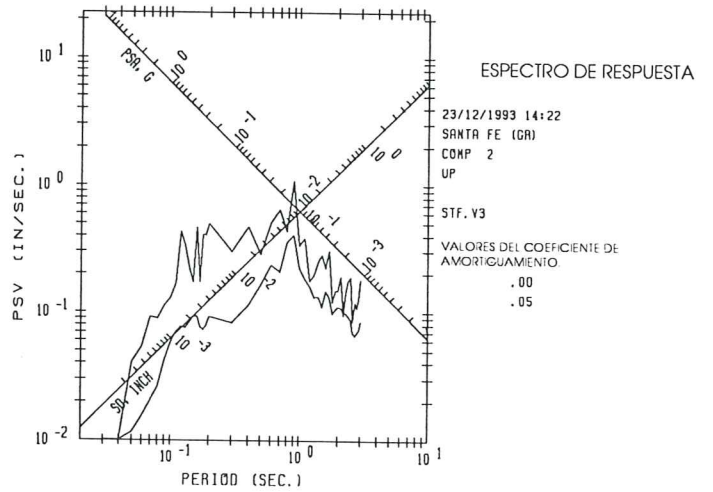
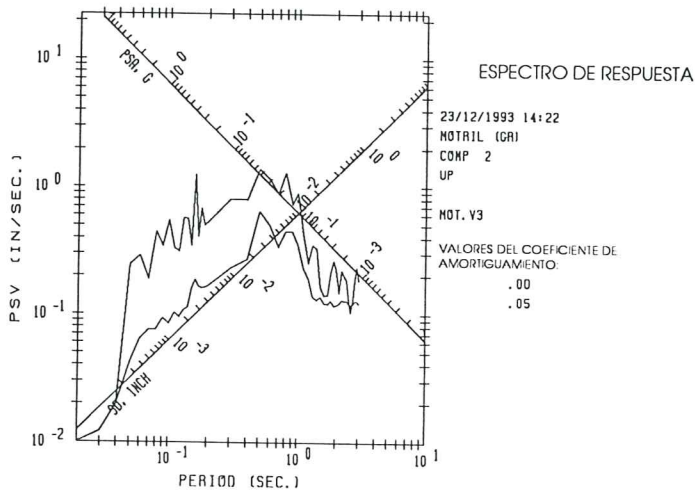
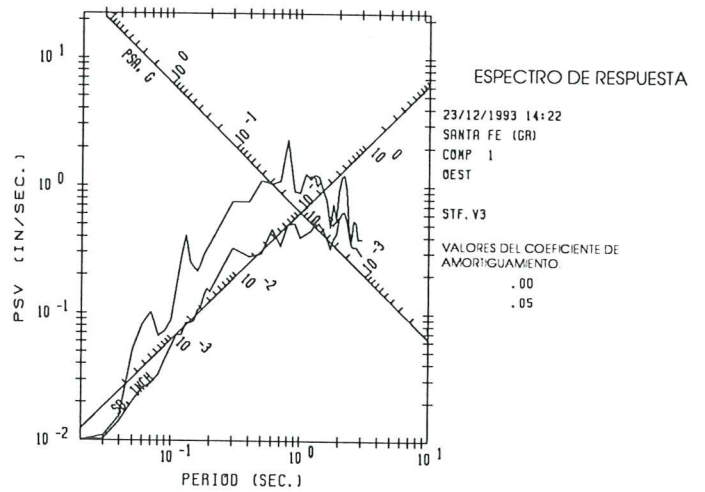
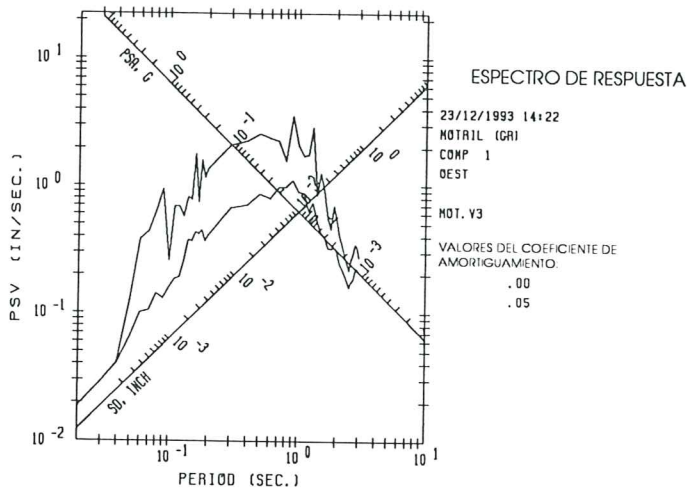
Estación de Carmona (Comp. 1)

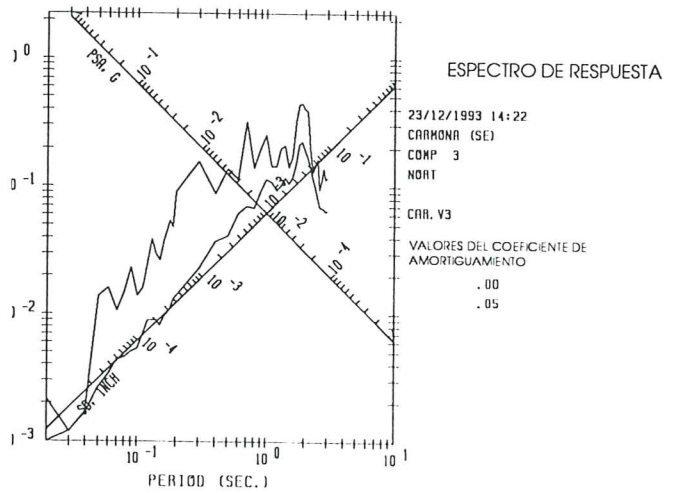
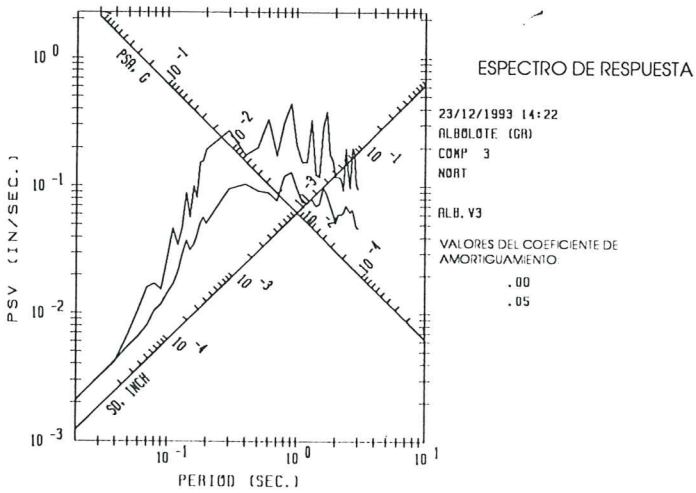
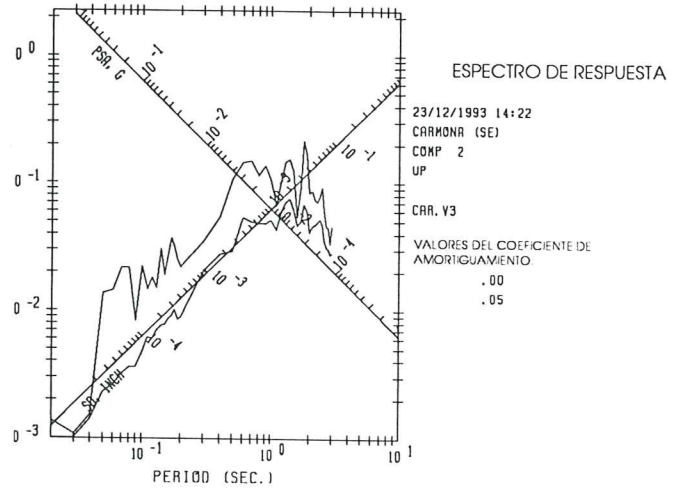
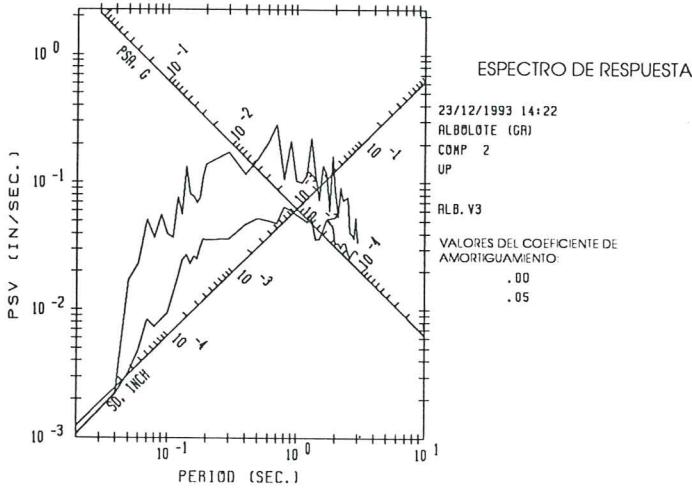
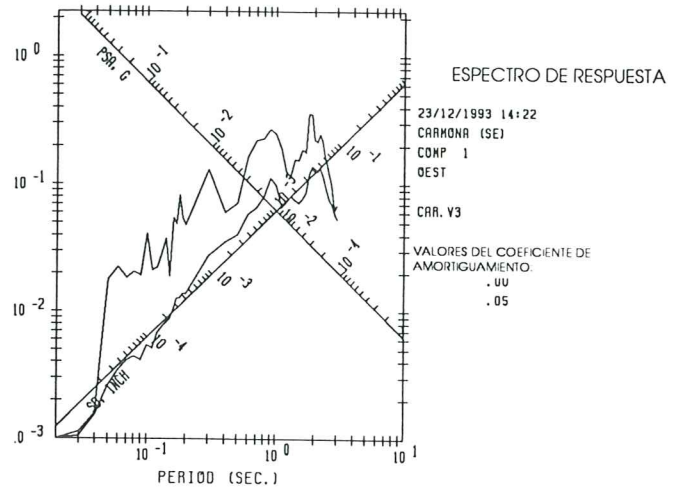
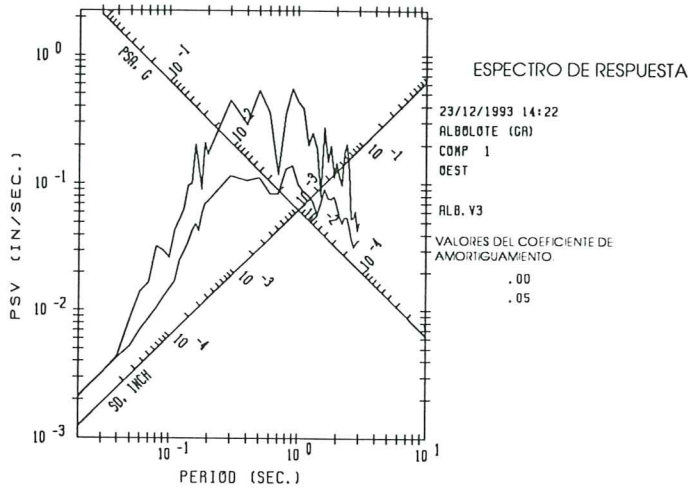


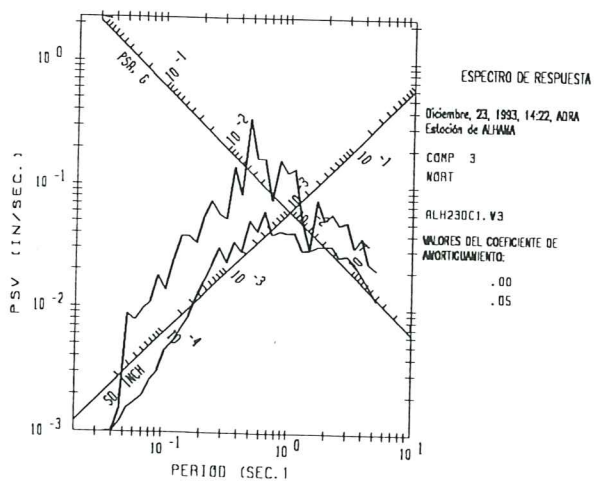
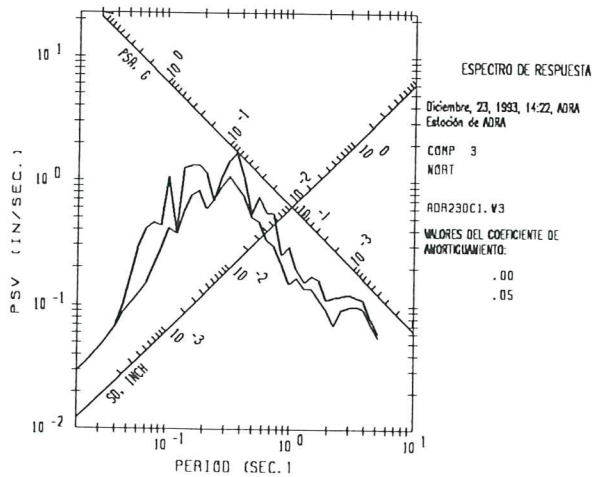
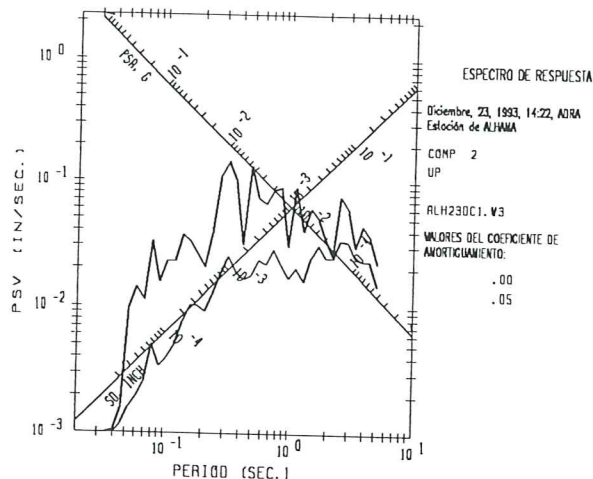
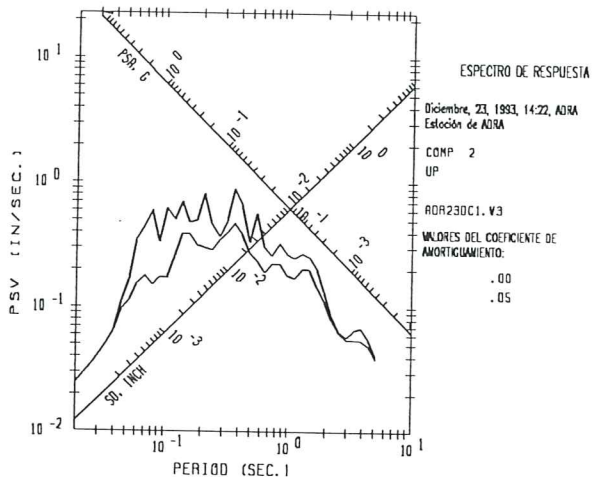
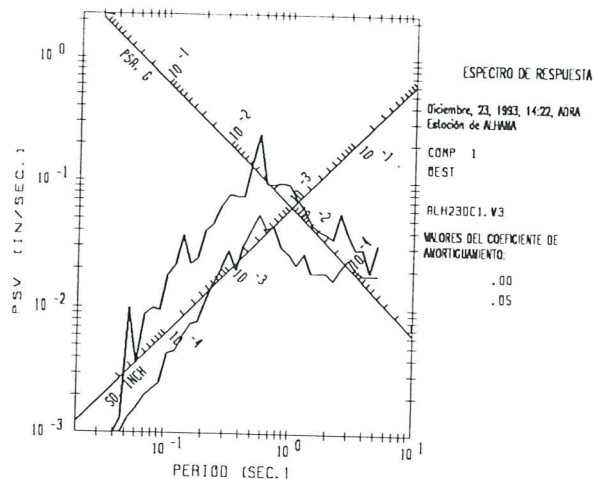
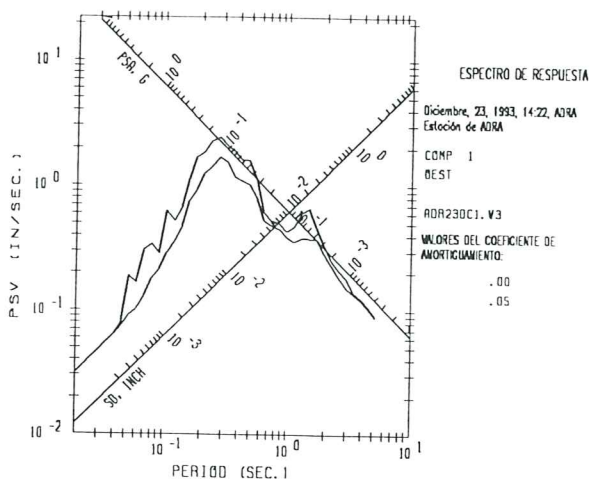
APÉNDICE IV

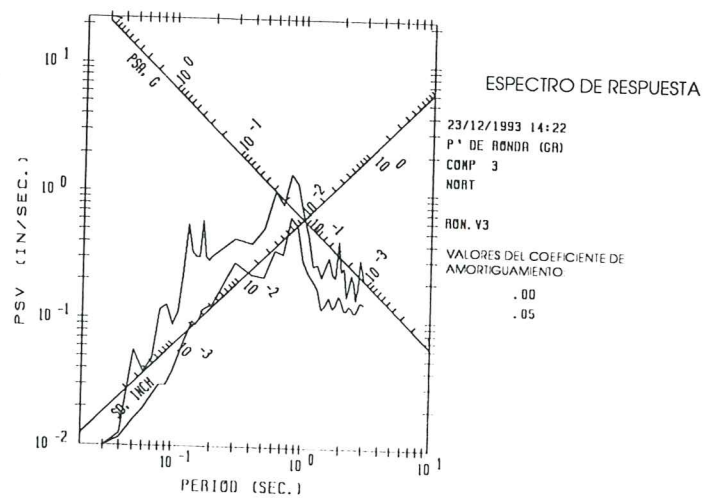
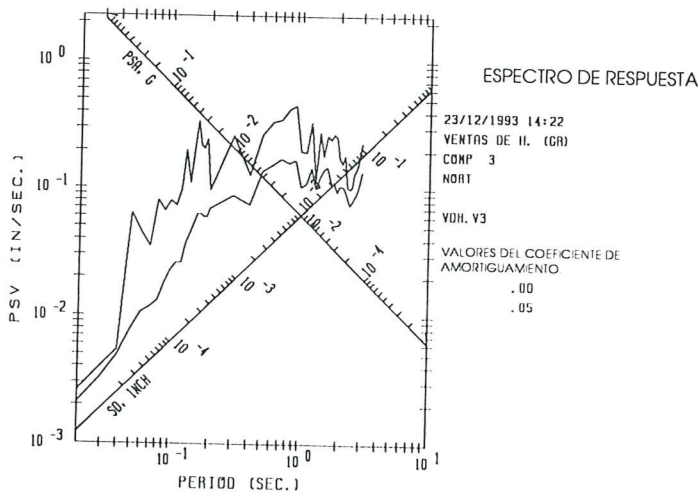
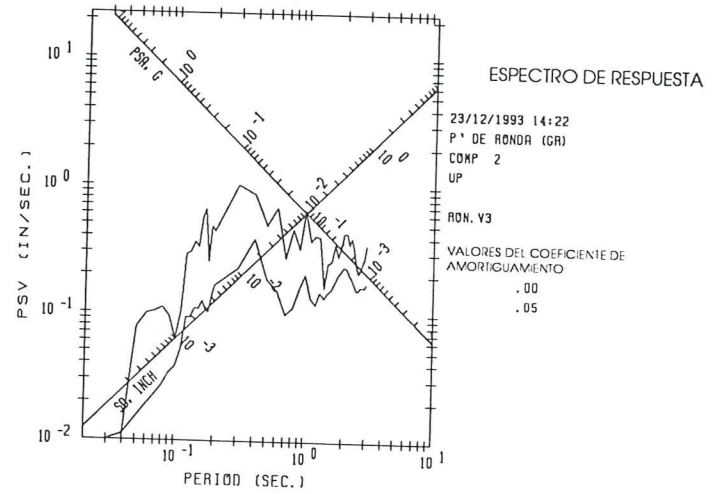
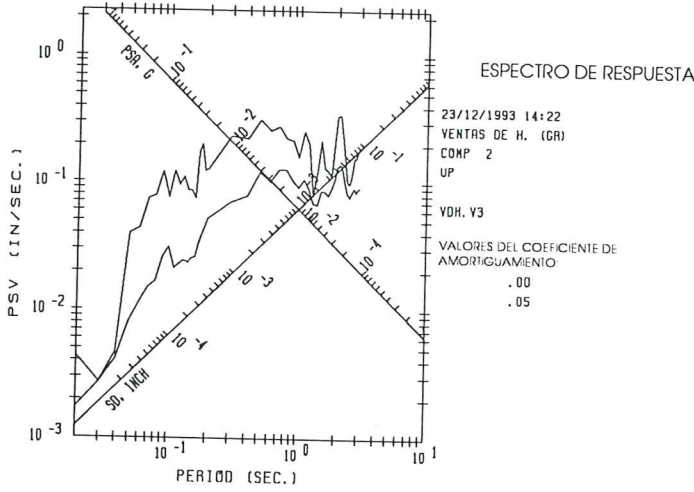
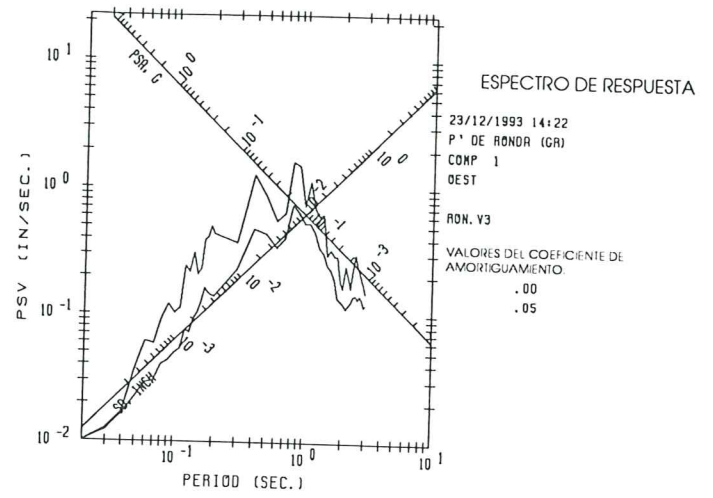
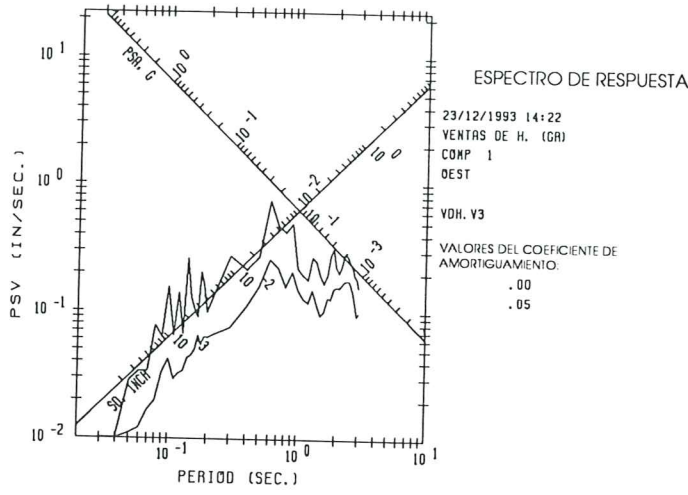
Diagramas espectrales trilogarítmicos.

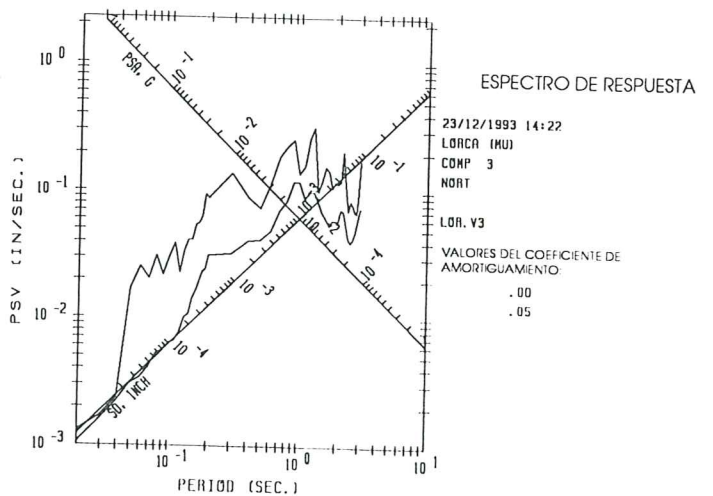
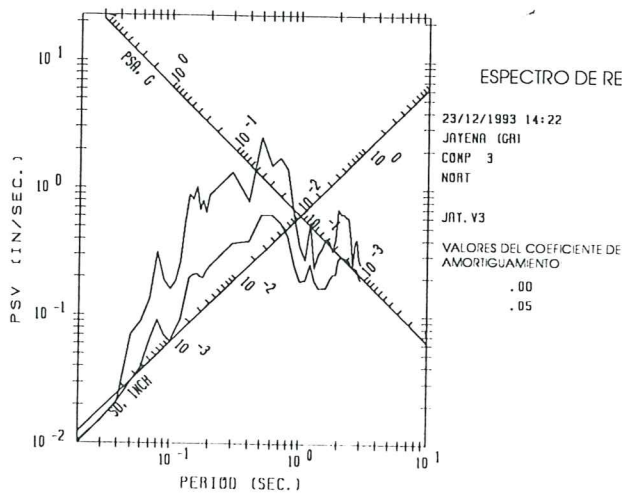
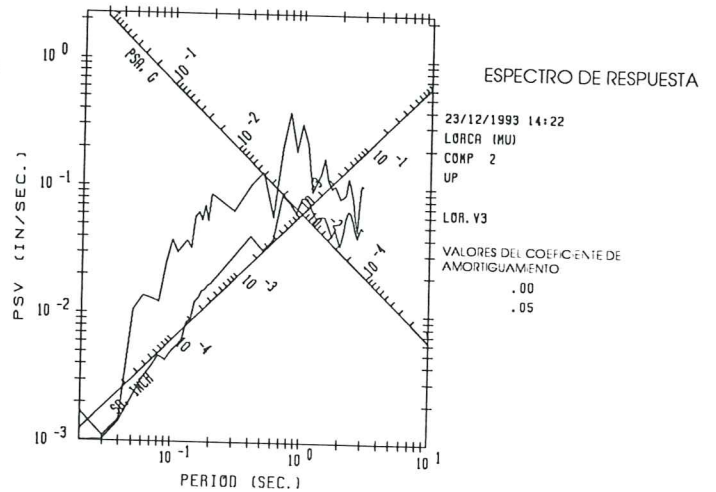
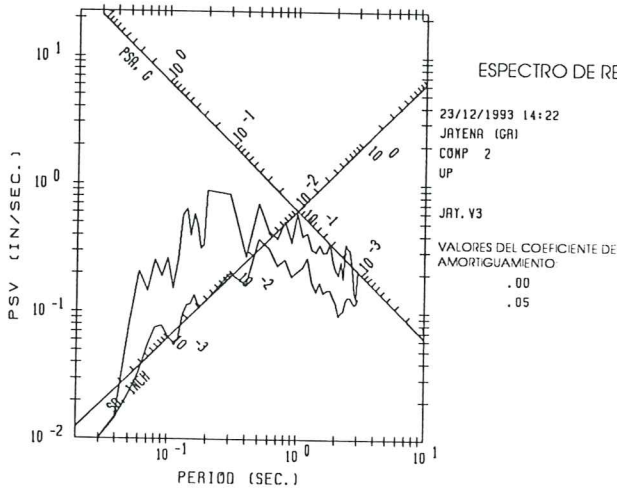
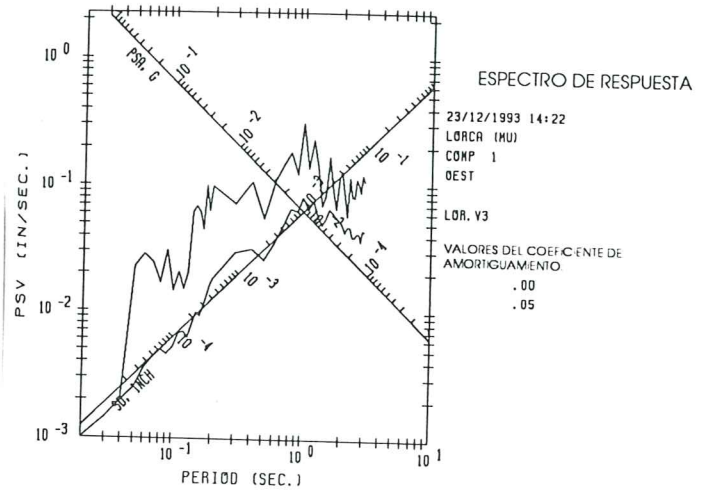
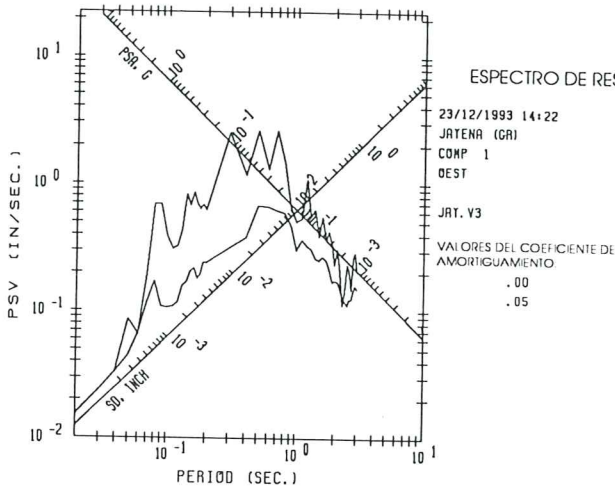


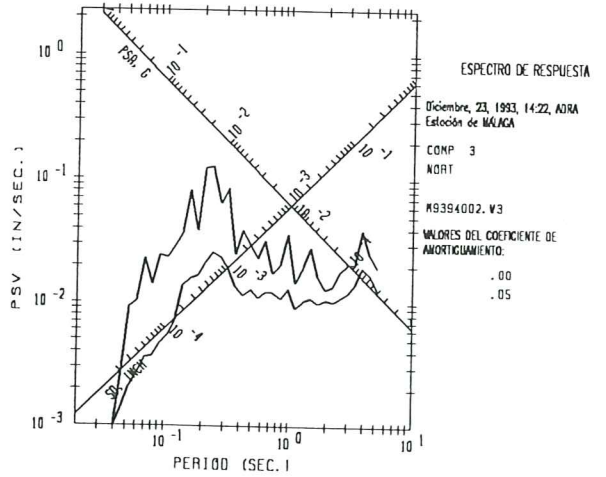
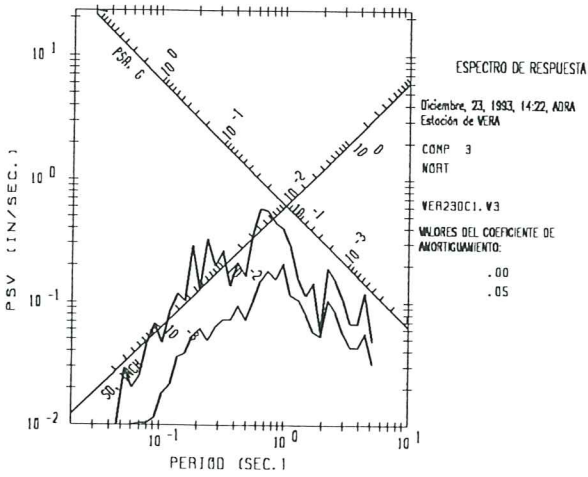
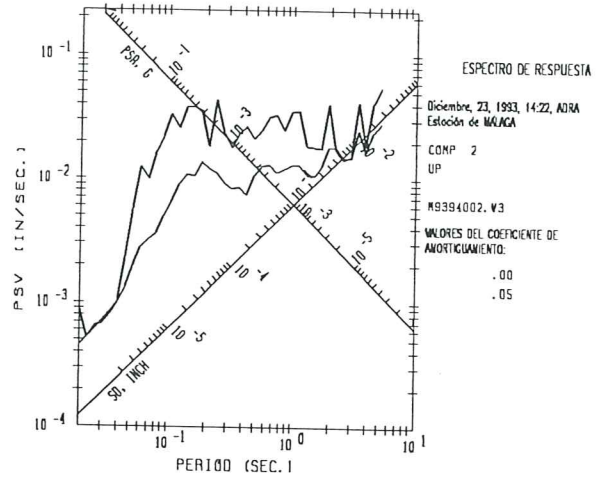
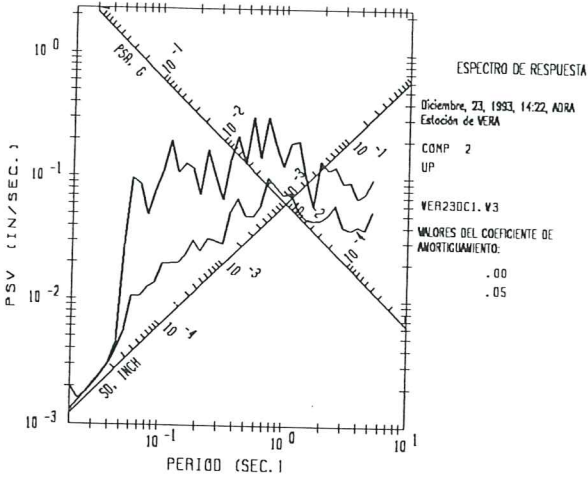
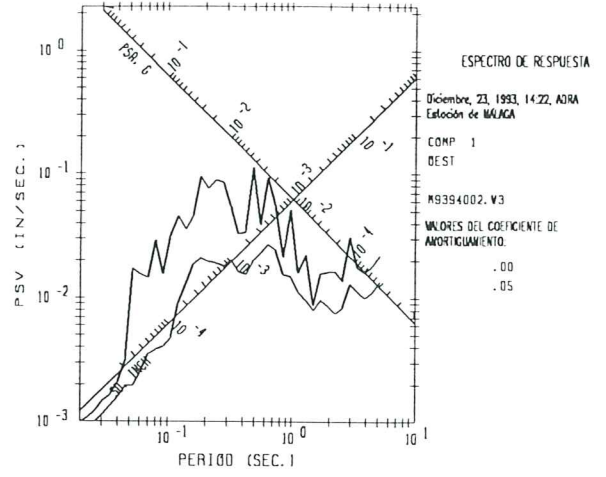
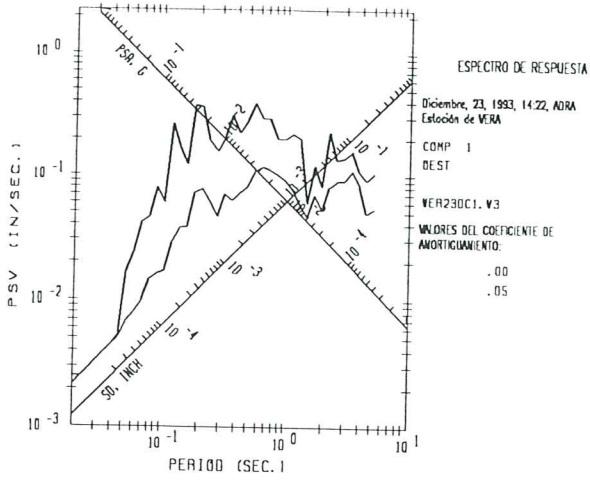


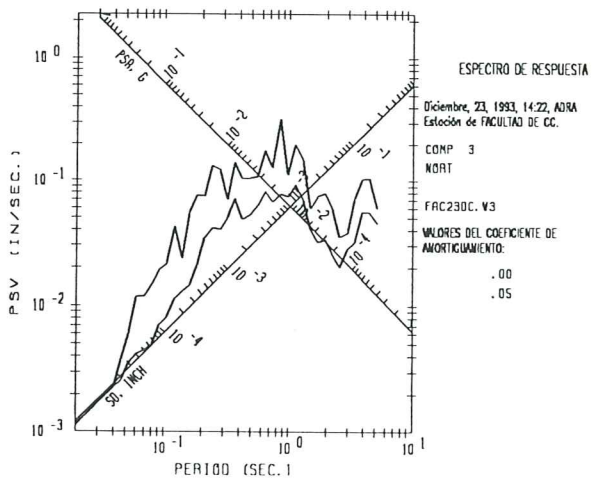
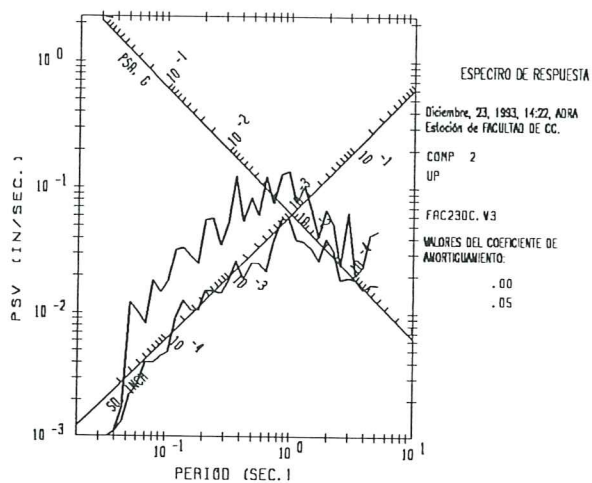
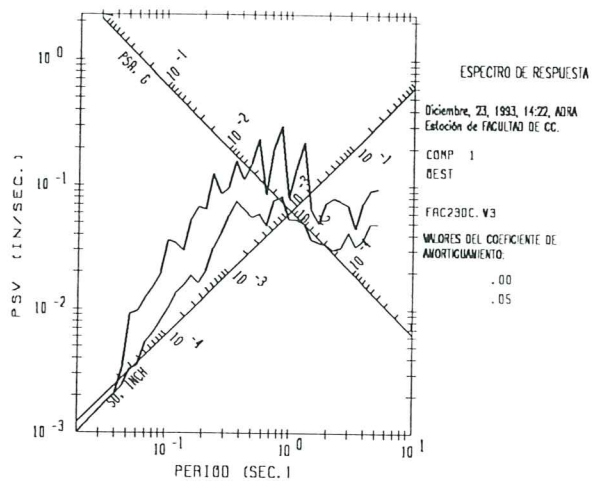


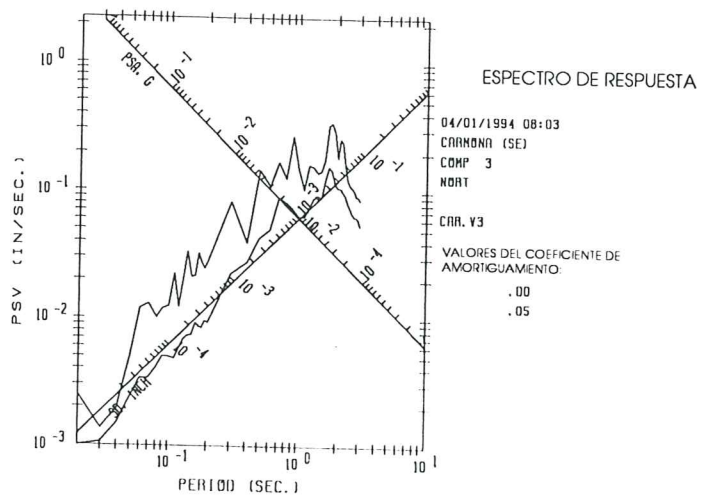
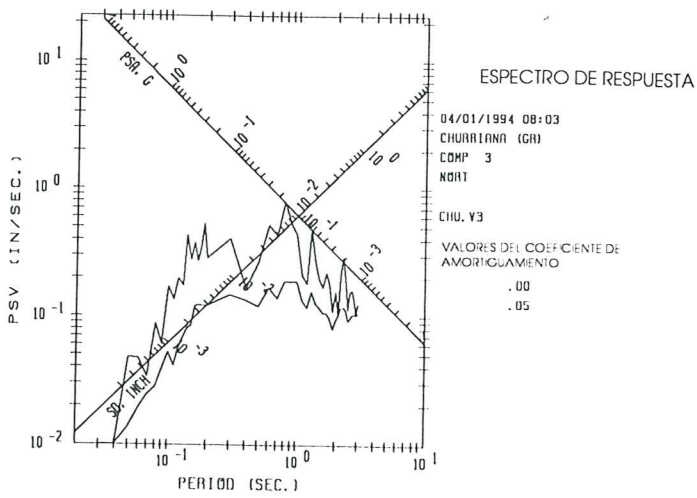
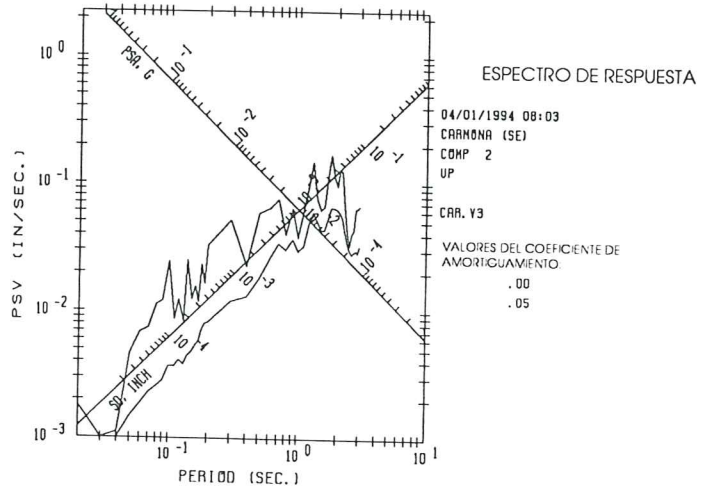
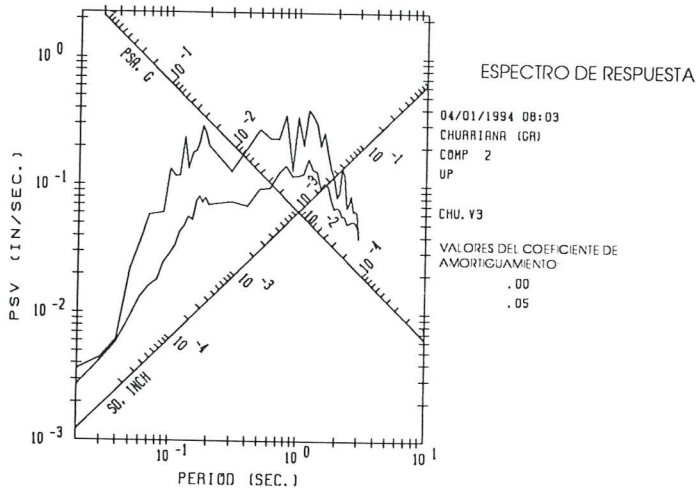
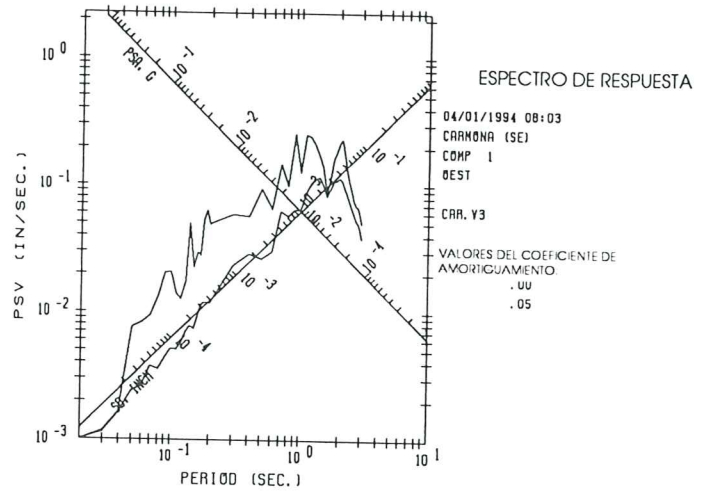
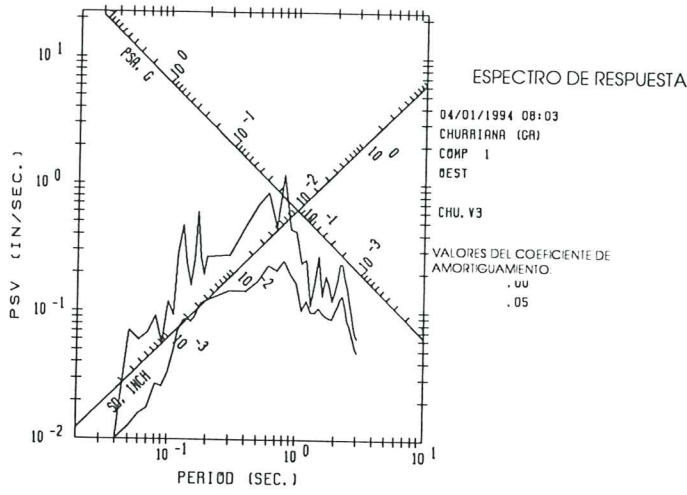


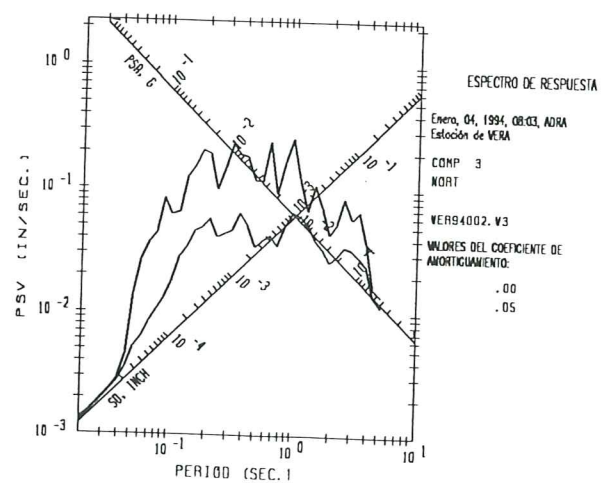
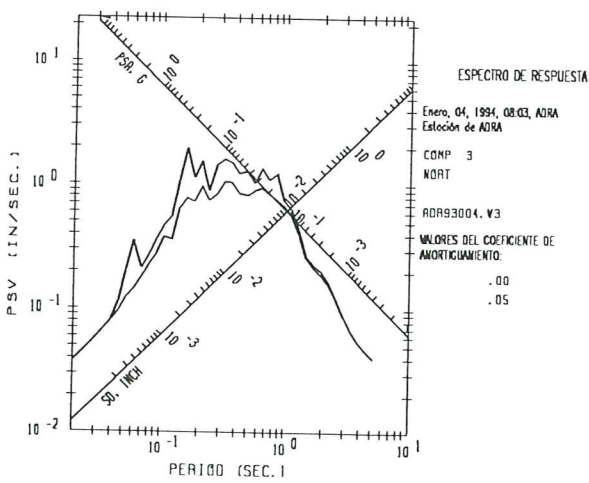
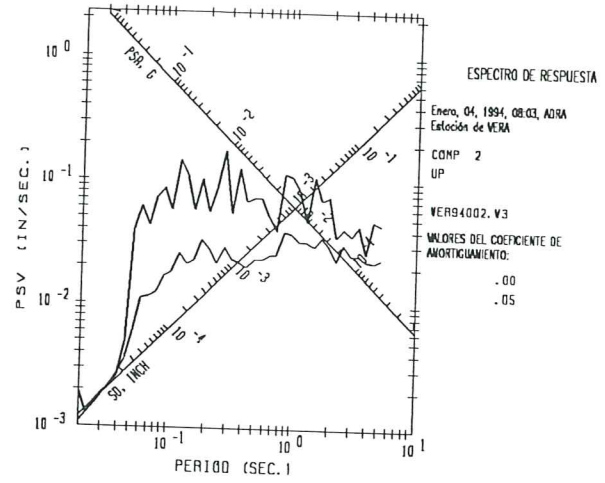
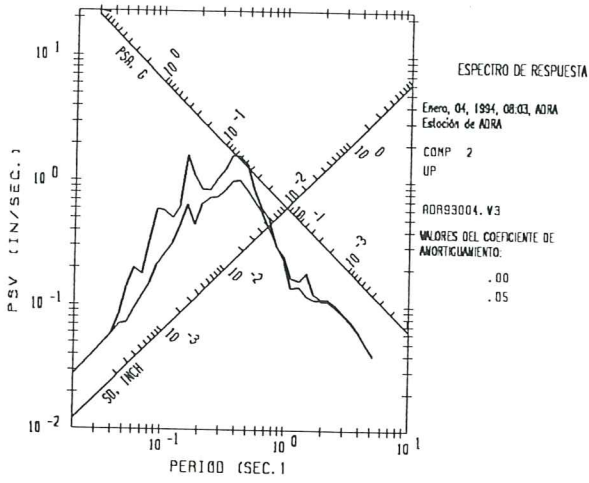
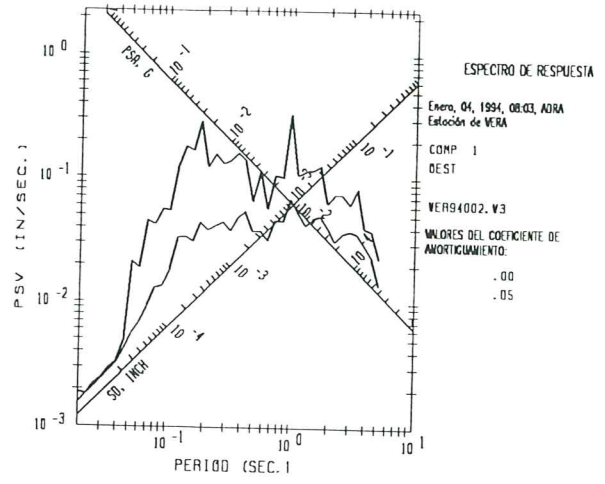
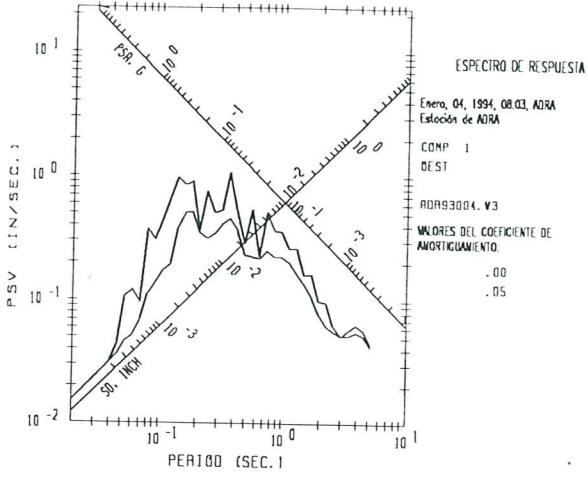


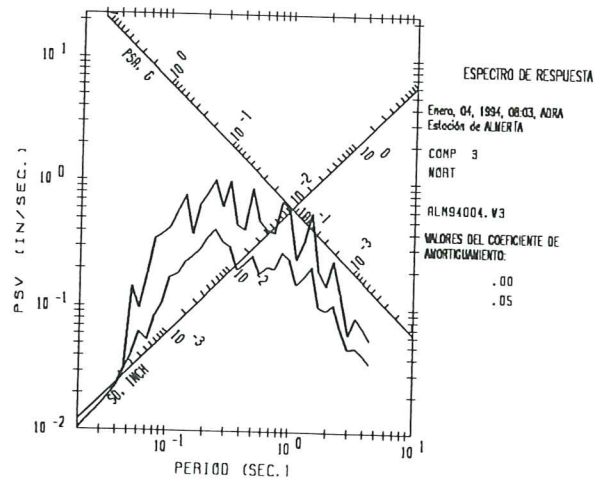
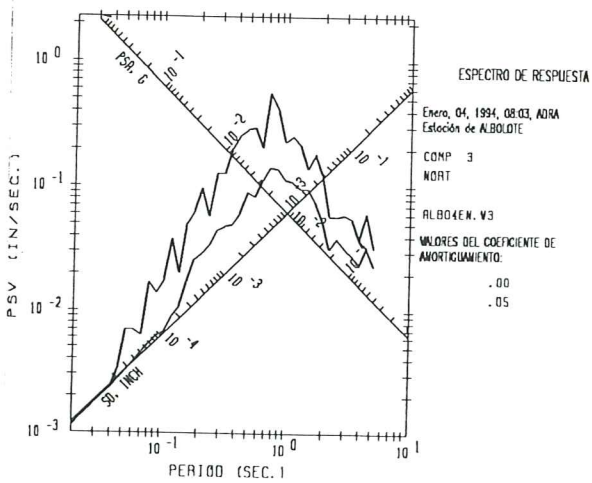
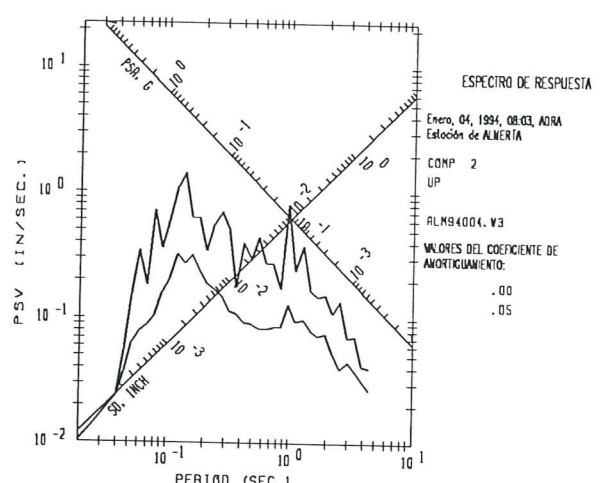
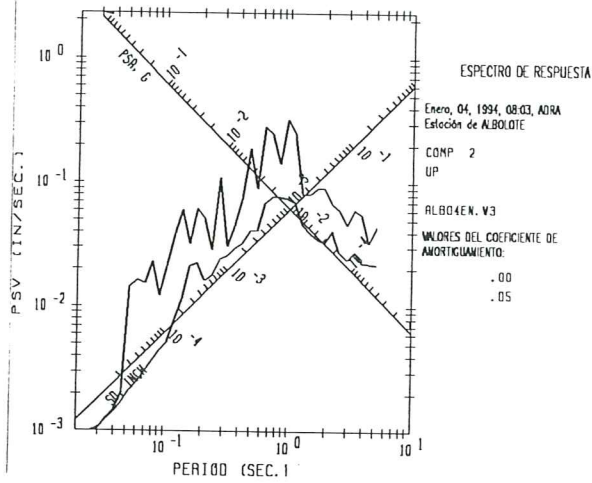
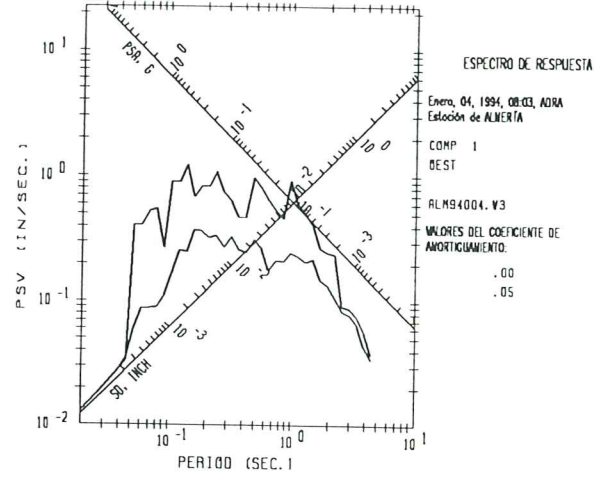
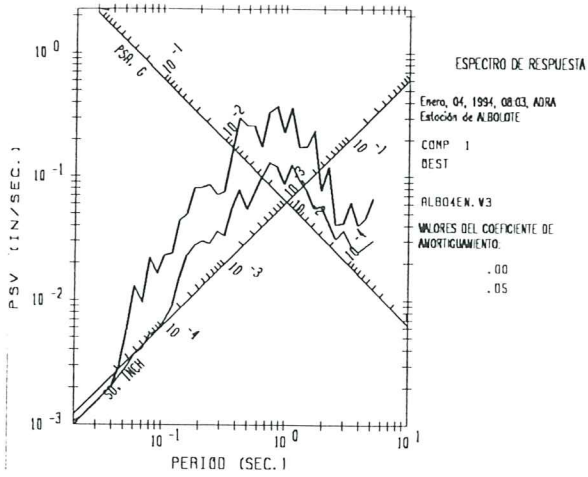


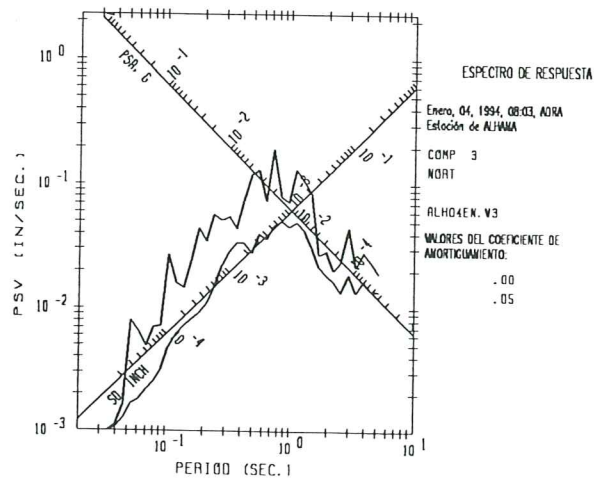
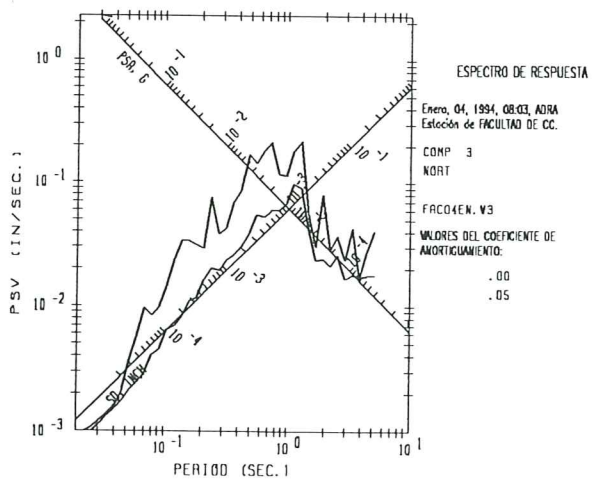
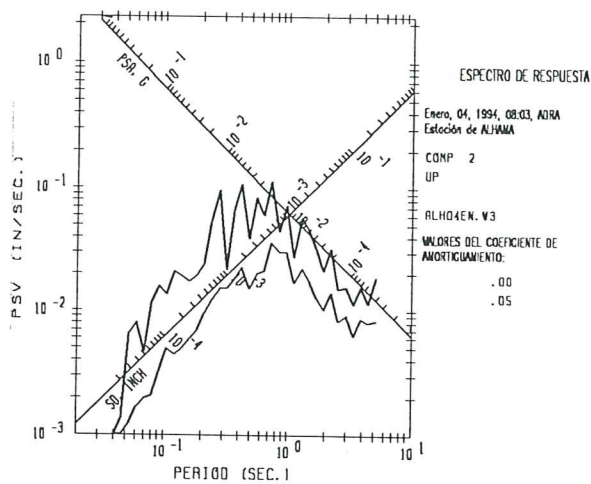
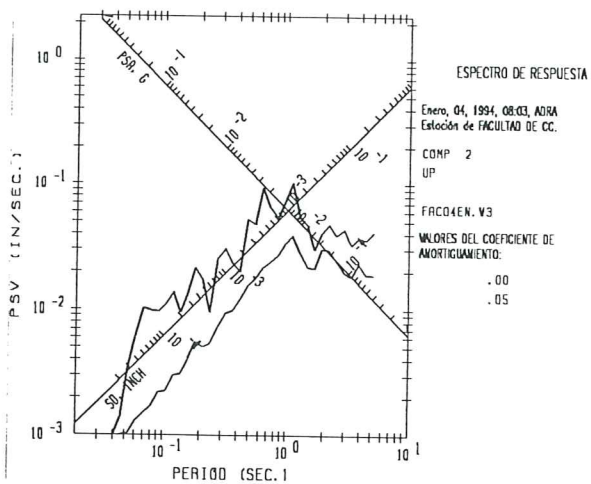
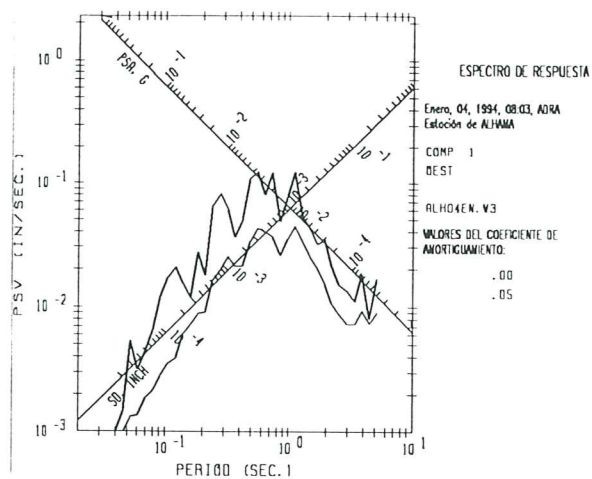
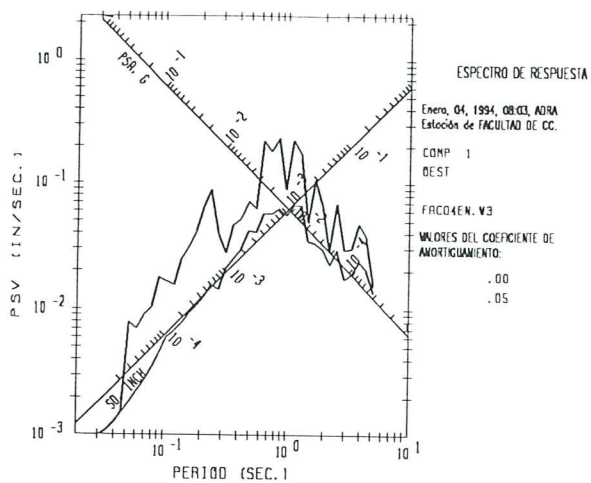


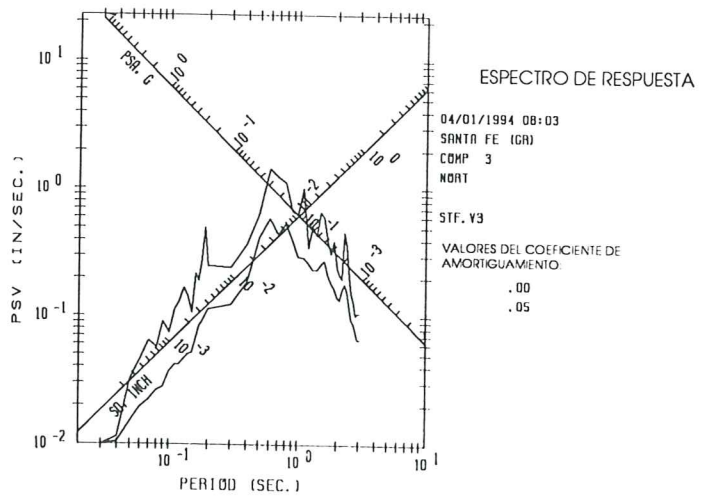
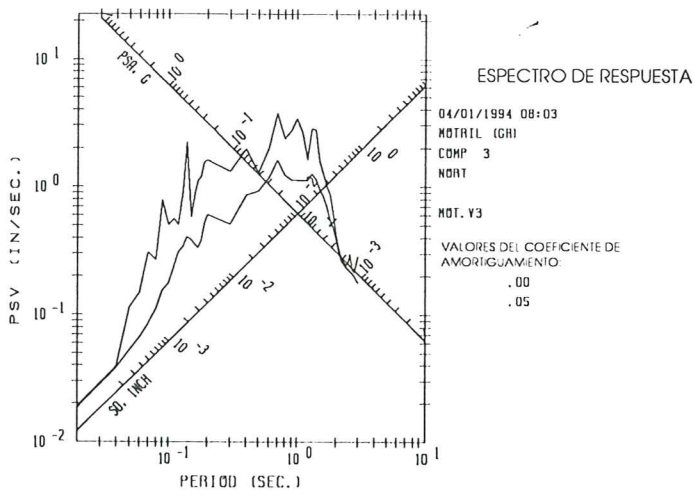
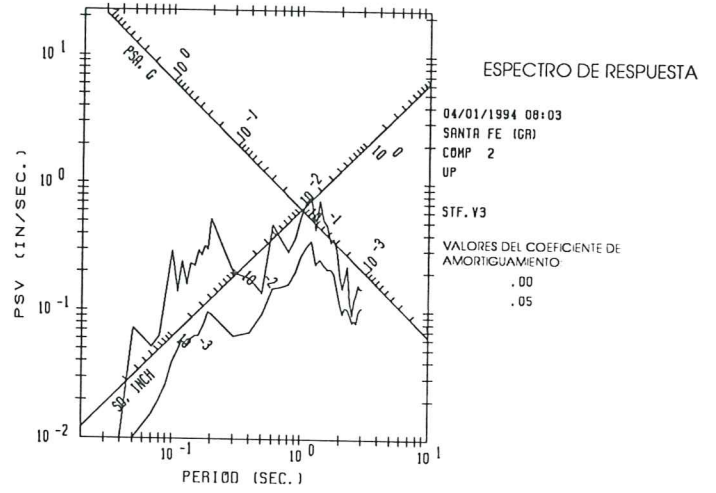
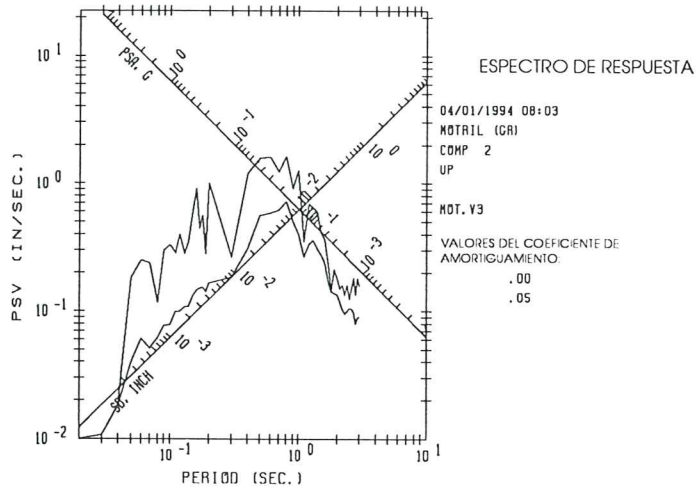
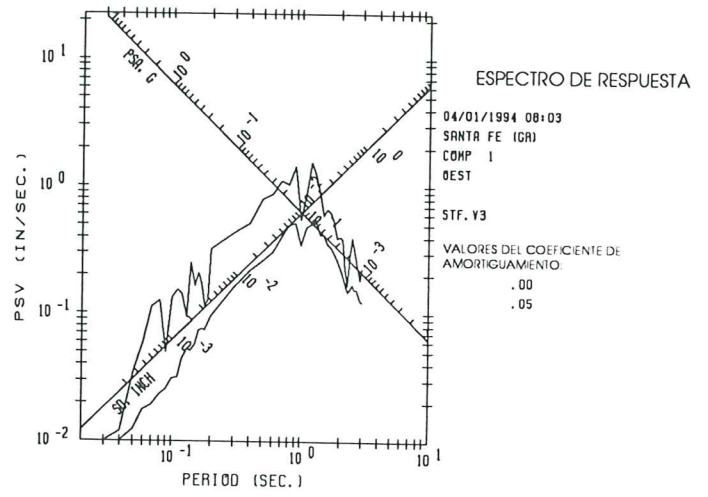
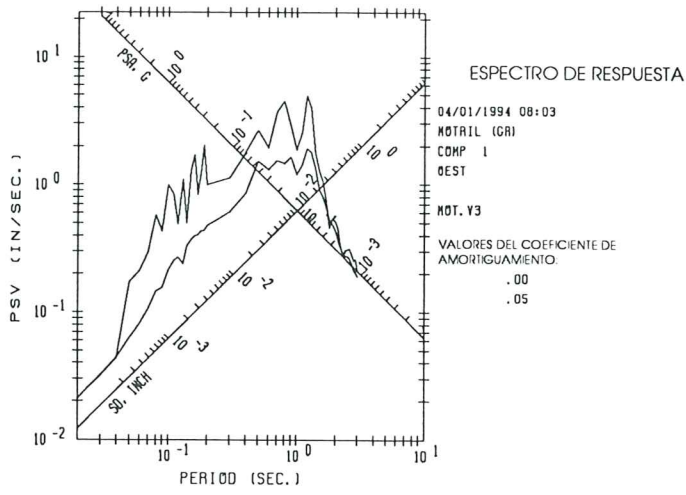


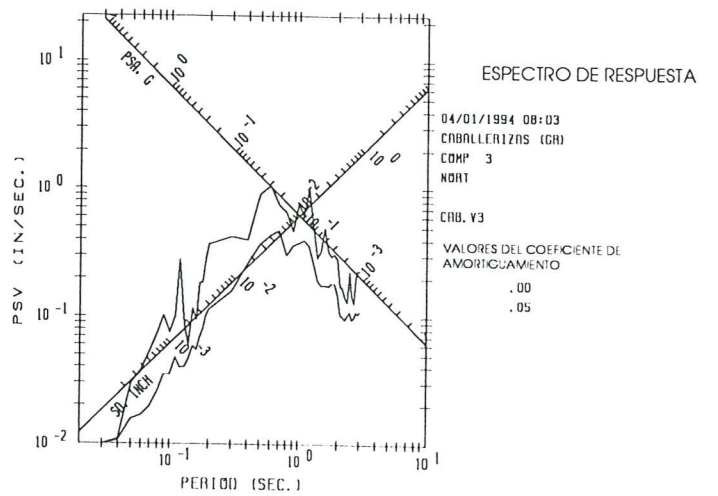
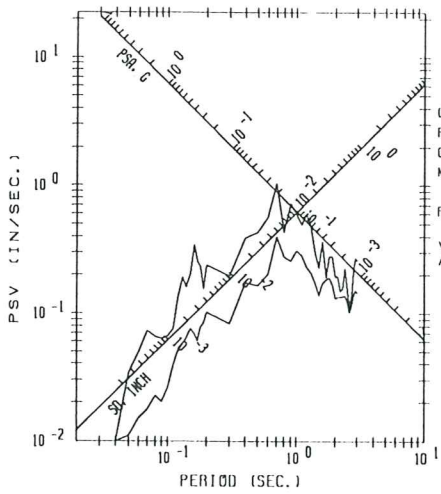
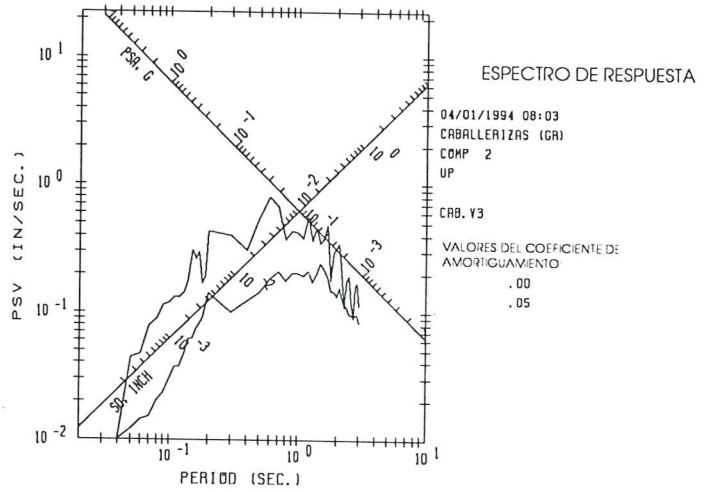
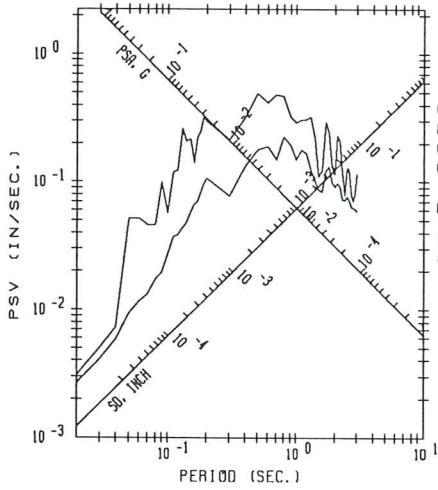
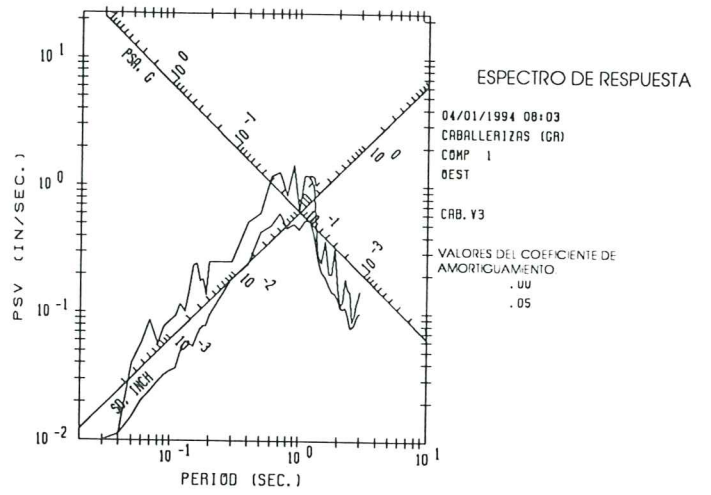
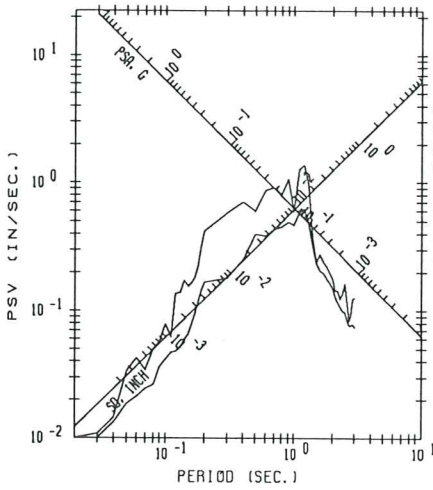












CENTRO INTERNACIONAL DE METODOS NUMERICOS EN INGENIERIA

Lista de monografías publicadas en la Serie de Ingeniería Sísmica

Las monografías pueden adquirirse dirigiéndose al Departamento de Publicaciones del Centro Internacional de Métodos Numericos en Ingeniería, Edificio C1, Campus Norte UPC, c/ Gran Capitán s/n, 08034 Barcelona, teléfono: 93-401.60.37, Fax: 93-401-65-17.

- IS-1 *Qualitative Reasoning for Earthquake Resistant Buildings*, Luís M. Bozzo, 149 pp., ISBN 84-87867-36-7, 1993.
- IS-2 *Control predictivo en sistemas de protección sísmica de estructuras*, R. Andrade Cascante, J. Rodellar, F. López Almasa, 143 pp., ISBN 84-87867-37-5, 1993.
- IS-3 *Simulación numérica del comportamiento no lineal de presas de hormigón ante acciones sísmicas*, M. Galindo, J. Oliver, M. Cervera, 255 pp., ISBN 84-87867-38-3, 1994.
- IS-4 *Simulación del daño sísmico en edificios de hormigón armado*, A. Hanganu, A.H. Barbat, S. Oller, E. Oñate, 96 pp., ISBN 84-87867-40-5, 1994.
- IS-5 *Edificios con aislamiento de base no lineal*, N. Molinares, A.H. Barbat, 96 pp., ISBN: 84-87867-41-3, 1994.
- IS-6 *Vulnerabilidad sísmica de edificios*, C. Caicedo, A.H. Barbat, J.A. Canas, R. Aguiar 100 pp., ISBN 84-87867-43-X, 1994.
- IS-7 *Análisis de terremotos históricos por sus efectos*, J. R. Arango Gonzalez, 119 pp., ISBN 84-87867-44-8, 1994.
- IS-8 *Control activo no lineal de edificios con aislamiento de base*, A.H. Barbat, N. Molinares, J. Rodellar, 124 pp., ISBN 84-87867-46-4, 1994.
- IS-9 *Análise estocástica da resposta sísmica nao-linear de estruturas*, A.M. F. Cunha, 199 pp., ISBN: 84-87867-47-2, 1994
- IS-10 *Definición de la acción sísmica*, A.H. Barbat, L. Orosco, J.E. Hurtado, M. Galindo, 122 pp., ISBN: 84-87867-448-0, 1994
- IS-11 *Sismología y peligrosidad sísmica*, J.A. Canas Torres, C. Pujades Beneit, E. Banda Tarradellas, 87 pp., ISBN: 84-87867-49-9, 1994
- IS-12 *Riesgo, peligrosidad y vulnerabilidad sísmica de edificios de mampostería*, F. Yépez, A.H. Barbat, J.A. Canas, 104 pp., ISBN: 84-87867-50-2, 1995
- IS-13 *Estudios de ingeniería sismológica y sísmica*, J.A. Canas, ISBN: 84-87867-57-X, 13 pp., 1995
- IS-14 *Simulación de escenarios de daño para estudios de riesgo sísmico*, F. Yépez, A.H. Barbat y J.A. Canas, ISBN: 84-87867-58-8, 103 pp., 1995

- IS-15 *Diseño sismorresistente de edificios de hormigón armado*, L. Bozzo, A.H. Barbat, ISBN: 84-87867-59-6, 185 pp., 1995
- IS-16 *Modelo tridimensional de atenuación anelástica de las ondas sísmicas en la Península Ibérica*, J.O. Caselles, J. A. Canas, Ll. G. Pujades, R.B. Herrmann, ISBN: 84-87867-60-X, 119 pp., 1995
- IS-17 *Índices de daño sísmico en edificios de hormigón armado*, R. Aguiar ISBN: 84-87867-43-X, 99 pp., 1996
- IS-18 *Experimental study of a reduced scale model seismically base isolated with Rubber-Layer Roller Bearings (RLRB)*, D. Foti, J.M. Kelly ISBN: 84-87867-82-0, 112 pp., 1996
- IS-19 *Modelos de evaluación del comportamiento sísmico no lineal de estructuras de hormigón armado*, F. Yépez Moya ISBN: 84-87867-80-4., 96pp., 1996
- IS-20 *Evaluación probabilista de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras de hormigón armado por medio de simulación*, F. Yépez Moya, A.H. Barbat, J.A. Canas, ISBN: 84-87867-81-2, 1996
- IS-21 *Modelización de la peligrosidad sísmica. Aplicación a Cataluña*, J.A. Canas, J.J. Egozcue, J. Miquel Canet y A.H. Barbat, ISBN: 84-87867-83-9, 101pp., 1996
- IS-22 *Evaluación del daño sísmico global en edificios porticados de hormigón armado*, R. Aguiar, A.H. Barbat and J. Canas, ISBN: 84-87867-96-0, 173pp., 1997
- IS-23 *Daño sísmico global en edificios con muros de cortante*, R. Aguiar, ISBN: 84-89925-00-3, 101 pp., 1997
- IS-24 *Conceptos de cálculo de estructuras en las normativas de diseño sismorresistente*, A.H. Barbat y S. Oller, ISBN: 84-89925-10-0, 107pp., 1997
- IS-25 *Stochastic dynamics of hysteretic structures*, J.E. Hurtado, ISBN: 84-89925-09-7, 205pp., 1998

Los autores interesados en publicar monografías en esta serie deben contactar con el editor para concretar las normas de preparación del texto.