

Capítulo 4

Respuesta Dinámica de los Suelos: Estimaciones Empíricas

Laboratorio de Ingeniería Sísmica, INII-UCR

RESUMEN

Los efectos de sitio se determinaron en forma empírica para once sitios seleccionados en el Area Metropolitana de San José, Costa Rica. Se utilizó una red de instrumentos de registro de movimiento fuerte compuesta por ocho acelerógrafos del tipo K2 Kinematics y tres del tipo SSA de la misma marca. La red registró un total de sesenta y ocho sismos con magnitudes entre 2,0 y 5,0 grados durante un periodo de nueve meses. Con esa información sismológica, se procedió a la determinación de los factores de amplificación y al reconocimiento de los periodos fundamentales del suelo en el Area Metropolitana.

Tres diferentes técnicas fueron utilizadas para tales efectos. Todas ellas consisten en el análisis de cocientes espectrales. En la primera, se evaluó la amplificación de los sitios en sedimento con respecto a un sitio en roca. En la segunda, se utilizó el cociente de la componente horizontal con respecto a la componente vertical utilizando una sola estación. Ambas técnicas fueron aplicadas utilizando la onda S de los registros de eventos sísmicos. La tercera de las técnicas supone que el ruido ambiente está compuesto por ondas superficiales y por esa razón, es posible determinar los periodos fundamentales mediante la obtención del cociente de la componente horizontal con respecto a la vertical utilizando el ruido y no los sismos.

Los resultados obtenidos muestran que existe variabilidad en la amplificación en todos los puntos de medición. Lo anterior ha sido asociado a las características propias de cada sitio (estratigrafía, espesor, etc.) del lugar y en un caso particular a posibles efectos de topografía. En forma general, amplificaciones relativas de entre 2 y 3 fueron estimadas para el área de estudio. En general, las tres técnicas usadas coinciden en que hay una variación de los periodos predominantes entre 0,2 y 0,6 segundos.

Mediante el uso del ruido ambiente y la aplicación de la tercera técnica, se determinó el periodo fundamental en 185 puntos diferentes a lo largo y ancho de toda el Area Metropolitana. Los resultados fueron interpolados y se presentan en forma de un mapa de isoperiodos que muestra que la parte noreste de la zona estudiada tiene los periodos más largos y la zona sur y oeste los periodos más bajos.

4.1 INTRODUCCION

El comportamiento dinámico del suelo debido a los diferentes ambientes geológicos ha sido siempre un tópico de intensa investigación en el área de la sismología, la ingeniería sísmica y la geotecnia. Numerosos estudios revelan que los sedimentos blandos y de baja impedancia tienden a amplificar las ondas sísmicas en mayor medida que los sitios rígidos (como sería el caso de roca). La identificación de lugares donde se da amplificación durante un sismo es muy importante para los gobiernos locales e instituciones encargadas de la planificación del desarrollo urbano. Esto les permite elaborar políticas orientadas hacia la prevención de eventuales desastres producidos por el movimiento fuerte del suelo.

Recientemente, se ha despertado consciencia en la necesidad de estimar los factores de amplificación en Centroamérica. En la región existen numerosas ciudades fundadas sobre suelos blandos propensas a sufrir los embates de grandes terremotos. El Gran Área Metropolitana de San José (recuadro en la Fig. IV-1), es hogar para aproximadamente un millón y medio de personas y ha sido fuertemente sacudida por terremotos de tipo local y de subducción a lo largo de los años. La actividad sísmica de principios de la década de 1990 (Fig. IV-1) produjo pérdidas que superaron los \$200 millones y decenas de muertos en todo el país. Ante esta situación, tanto los sismos de subducción como los de fallamiento local son igualmente importantes. Los primeros debido a las grandes magnitudes que caracterizan y los segundos debido a su cercanía a los centros urbanos, así como a su poca profundidad.

Como parte del proyecto de microzonificación, y para registrar las señales sísmicas en el Área Metropolitana, se contó con ocho acelerógrafos del tipo K2 de Kinematics que se instalaron en una red denominada *San José Accelerograph Network (SAN)*. La ubicación de estos instrumentos se muestra en la Figura IV-2. La red SAN estuvo operando en Costa Rica durante un periodo de nueve meses (de marzo a noviembre de 1998) y durante ese tiempo registró más de 60 sismos de moderada magnitud. En setiembre, se añadieron tres acelerógrafos más del tipo SSA, también Kinematics, con el objetivo de brindar una mejor cobertura del área de estudio.

Los datos recopilados durante ese tiempo fueron usados para evaluar el efecto de sitio en forma empírica aplicando las técnicas de razón espectral de sedimento contra roca, **RESR** (Borcherdt, 1970), la razón espectral horizontal sobre vertical de una estación, **REHV** (Lermo y Chávez-García, 1993; Lermo y Chávez-García, 1994; Chávez-García *et al.*, 1996) y la razón espectral de ruido ambiente, **RERA** (Nakamura, 1989). En este capítulo se presenta una comparación de los resultados obtenidos mediante las tres técnicas, así como también un breve análisis de la influencia de la geología local, ubicación de los epicentros y efectos de topografía que podrían estar jugando un papel importante en el efecto de amplificación de la zona de estudio. El desarrollo de este capítulo está basado en el trabajo presentado por Moya *et al.* (1998).

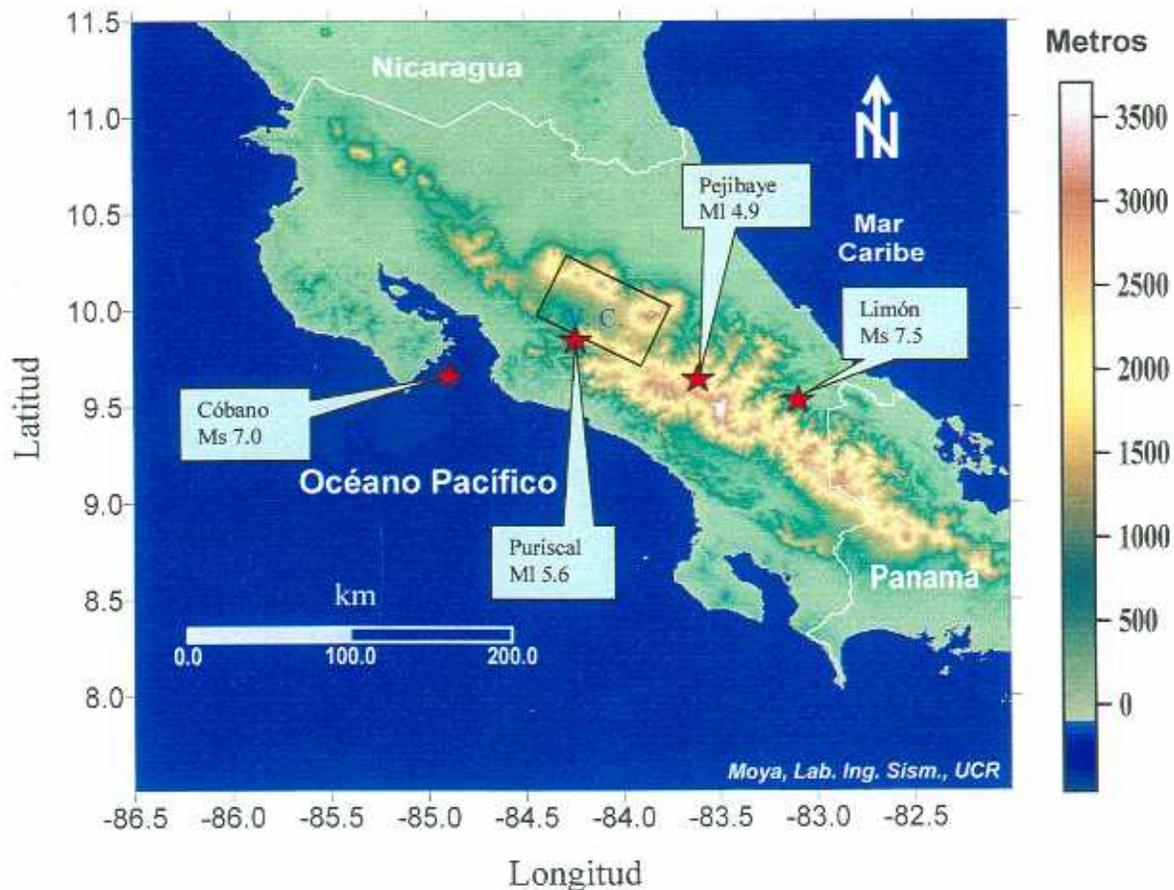


Fig. IV-1. Más de la mitad de la población de Costa Rica se concentra en una franja de dirección NW-SE en lo que se denomina el Valle Central (V.C.). Los grandes terremotos ocurridos en la década de 1990 han despertado consciencia en la necesidad de estimar los factores que controlan la amplificación sísmica y que afectan esta área en especial.

4.2 RED ACELEROGRAFICA SAN Y REGISTROS SISMICOS

En total, fueron ocho los acelerógrafos que conformaron la red SAN. La ubicación de cada una de las estaciones se muestra en el mapa de la zona metropolitana de San José (Fig. IV-2). La Tabla IV-1 resume la geología superficial de los sitios donde se instalaron.

Tanto la memoria de registro de pre-evento como la de post-evento fueron fijadas en 30 segundos. Las estaciones registraron el movimiento del suelo cuando la amplitud del evento excedió un nivel de disparo predeterminado. Este nivel de disparo fue diferente para cada uno de los acelerógrafos debido a las características propias del ruido ambiente de los sitios. En este sentido, el sitio de la estación MCU presentó algunos problemas y se decidió no usar la información en el análisis final.

Microzonificación Sísmica del Area Metropolitana de San José

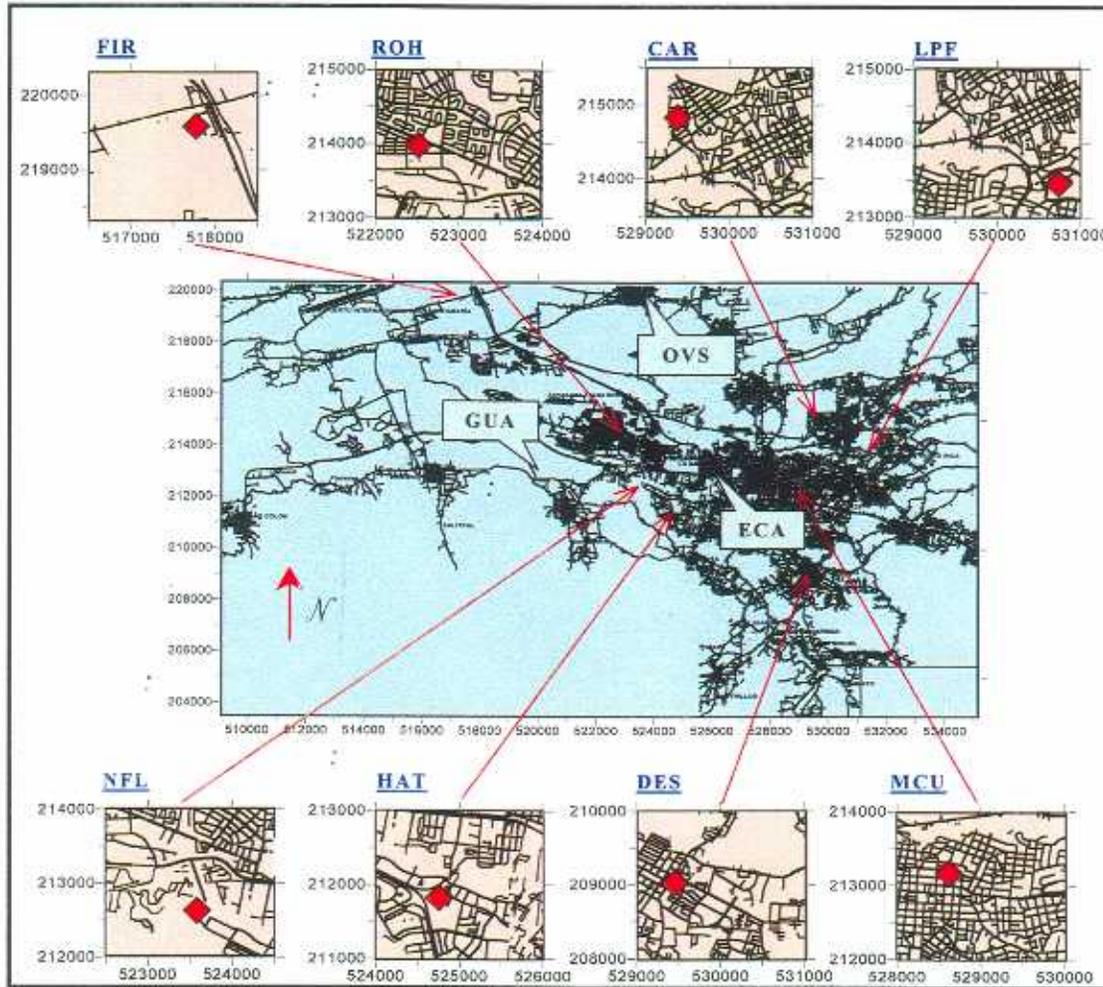


Fig. IV-2. Ubicación de las estaciones acelerográficas en el Area Metropolitana (red SAN). Aquellas mostradas en verde corresponden a los acelerógrafos SSA.

Tabla IV-1. Resumen de la ubicación y geología local en los sitios de los K2. La altitud está dada en metros sobre el nivel del mar.

Estación	Latitud	Longitud	Altitud(msnm)	Geología
CAR	9° 54,14'	84° 03,92'	1160	Ceniza y lahar volcánico
DES	9° 53,96'	84° 03,86'	1100	Ceniza y lahar volcánico
FIR	9° 59,67'	84° 10,27'	940	Lahar y piroclastos
HAT	9° 55,41'	84° 06,35'	1090	Ceniza y lahar volcánico
LPF	9° 56,24'	84° 03,23'	1125	Ceniza y lahar volcánico
MCU	9° 56,23'	84° 04,50'	1100	Ceniza y lahar volcánico
NFL	9° 55,95'	84° 07,19'	980	Lava andesítica
ROH	9° 56,80'	84° 07,33'	1036	Ceniza y lahar volcánico

La red SAN registró un total de 68 sismos (Tabla IV-2) que dispararon al menos una estación. La información de la localización epicentral, magnitud y profundidad fue suministrada por la Red Sismológica Nacional (RSN) y por el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI). No todos los eventos sísmicos registrados por la red SAN fueron reportados por alguna de las redes sismológicas existentes en el país; sin embargo, éstos fueron incorporados en el estudio de amplificación, especialmente para el caso en el cual se utilizarán técnicas que involucran una sola estación. La distribución de los epicentros de acuerdo con la magnitud y a la profundidad se muestran en la Figura IV-3.

La gran mayoría de los sismos registrados durante esta época se localizaron hacia el suroeste de la zona de estudio como se muestra en la Figura IV-3. Los eventos de profundidades mayores son debidos a la subducción de la placa del Coco bajo la placa Caribe a lo largo de la Fosa Mesoamericana. La magnitud de los eventos fue relativamente baja durante los meses de medición y se ubicó en un rango de entre 2 y 5 grados.

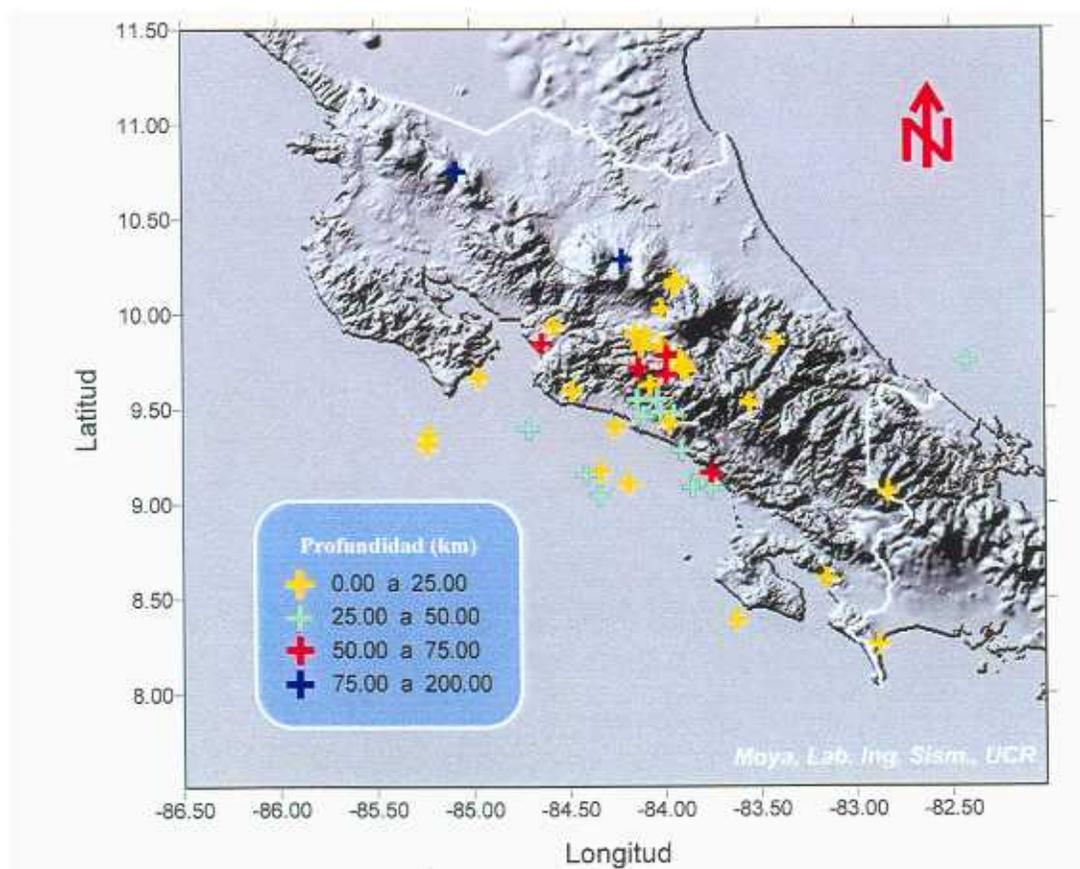


Fig. IV-3. Distribución de los epicentros y profundidad para los eventos registrados por la red SAN.

Tabla IV-2. Terremotos registrados por la red SAN.

Parámetros de localización					Estaciones										
Fecha	Longit.	Latit.	Mag	Prof.	K2							SSA			
(MesDía-Hora)	(Grados)	(Grados)	(Mc)	(km)	C A R	D E S	F I R	H A T	L P F	M C U	N F L	R O H	E C A	G U A	O V S
MAR28-11:15	-84,000	10,033	4,6	175,0	x	x	o	x		o					
MAR28-13:43	-84,010	10,023	2,8	11,6	x	x		x							
ABR12-11:45	-85,229	9,355	4,7	17,6	o		o								
ABR12-13:07	-85,239	9,300	5,0	14,4	o	o	o					o			
ABR14-17:51	-84,700	9,394	4,3	25,5	o	o	o					o			
ABR20-11:17	-84,030	7,034	5,0	--				o				o			
MAY02-02:04	-84,013	9,819	3,1	12,0	x										
MAY05-20:26	-83,941	10,142	3,7	22,9	x	x						x			
MAY09-16:55	-83,552	9,530	4,0	24,2	x	x	x	x	x			x			
MAY11-15:32	-83,622	8,380	4,5	8,8	x		x	x	x			x			
MAY17-11:14	-83,754	9,156	5,0	62,8	x	x	x	x	x		x	x			
MAY18-06:40	-84,634	9,840	3,1	58,0	x		x				x				
MAY24-19:34	-84,117	9,818	2,3	--							x				
JUN01-17:59	-84,064	9,759	--	--				x			x				
JUN21-15:18	---	--	--	--							x				
JUN25-20:43	--	--	--	--				x			x				
JUN30-20:25	-84,570	9,930	3,0	14,9							o				
JUL02-19:09	-83,849	9,085	3,8	30,5				x			x				
JUL03-23:40	-82,834	9,058	4,0	22,3							x				
JUL09-17:43	-84,139	9,547	3,3	40,0							x				
JUL10-04:56	-83,879	9,700	2,3	15,0		x					x				
JUL14-14:54	-83,422	9,842	3,6	20,0							x				
JUL14-21:27	-84,477	9,591	3,5	19,0							o				
JUL16-13:15	-83,949	9,467	3,8	33,0	x			x			x				
JUL17-08:49	-83,155	8,600	5,3	17,6	x	x	x	x			x	x			
JUL17-21:22	-84,184	9,099	2,5	8,0				x	x		x				

Tabla IV-2. (Continuación)

Parámetros de localización					Estaciones										
Fecha	Lon	Lat	Mag	Prof	K2								SSA		
(MesDía-Hora)	(Grados)	(Grados)	(Mc)	(km)	C A R	D E S	F I R	H A T	L P F	M C U	N F L	R O H	E C A	G U A	O V S
JUL20-11:18	-84,333	9,043	4,0	43,7	x	x		x	x		x	x			
JUL20-14:17	-85,077	10,746	4,4	175,5	x	x	x	x	x		x	x			
JUL23-16:17	-84,132	9,710	3,2	54,0				x			x				
JUL26-09:44	-84,333	9,165	4,1	23,1	x	x			x		X				
JUL26-10:27	-83,914	9,753	3,2	10,7	x	x			x						
JUL28-23:51	-86,841	12,178	--	30,0	o										
AGO04-00:48	-82,881	8,251	4,9	23,5	x		x	x	x		x				
AGO05-15:53	---	--	--	--			o								
AGO08-11:17	---	--	--	--	x	x		x	x						
AGO09-02:33	--	--	--	--		x									
AGO11-10:13	-83,986	9,676	3,8	62,7	x	x		x	x		x				
AGO13-19:04	--	--	--	--							o				
AGO16-11:55	--	--	--	--							o				
AGO21-16:06	-83,910	9,280	3,5	48,2	x						x				
AGO22-04:15	-84,105	9,460	3,7	42,5	x				x		x				
AGO23-13:58	-87,685	11,460	5,3	110,4				x							
AGO23-23:32	-84,035	9,546	3,1	38,5	x				x		x				
AGO25-16:24	-84,093	9,880	2,6	22,5	x	x									
AGO27-13:49	-84,214	10,283	3,7	101,5							o				
AGO28-11:03	-84,018	9,480	3,2	46,1							x				
AGO28-11:47	-84,072	9,621	3,0	21,7	x				x		x				
AGO30-08:00	-84,149	9,887	2,6	7,7					x		x				
SET01-17:23	--	--	--	--			o								
SET04-21:29	--	--	--	--							o				
SET05-13:53	--	--	--	--							o				
SET05-22:52	--	--	--	--							o				
SET06-18:24	--	--	--	--					x		x				
SET24-15:02	--	--	--	--							x				

Tabla IV-2. (Continuación)

Parámetros de localización					Estaciones										
Fecha	Lon	Lat	Mag	Prof	K2								SSA		
(MesDia-Hora)	(Grados)	(Grados)	(Mc)	(km)	C A R	D E S	F I R	H A T	L P F	M C U	N F L	R O H	E C A	G U A	O V S
SET15-18:28	--	--	--	--							x				
SET18-07:43	--	--	--	--							x				
SET27-06:47	-83,985	9,774	3,4	71,2	x	x									
SET30-18:58	-83,937	10,167	4,1	20,0	x	x	x	x	x		x	x	x	x	o
OCT01-20:44	-82,420	9,745	5,1	27,5	x	x	x	x				x			
OCT02-18:01	--	--	--	--			x								
OCT08-21:54	-83,756	9,078	4,0	48,9		x	x	x			x				
OCT09-11:54	-88,068	12,124	5,4	30,0		x	x	x			x				
OCT20-19:53	-84,252	9,397	3,5	22,9							x				
OCT31-22:48	-83,971	9,421	2,8	16,4	x	x			x		x				
NOV01-08:04	-84,404	9,150	3,8	37,8	x	x		x	x		x	x			
NOV02-05:15	-84,967	9,658	4,4	20,9	x	x		x	x		x	x			
NOV02-11:28	-83,799	9,140	3,6	48,0	x			x	x		x				
NOV09-00:37	-83,903	9,711	2,5	--							x				

4.3 EFECTOS DE SITIO

Todo evento sísmico se puede caracterizar en función de tres factores: la fuente sísmica (falla activa), el medio de propagación (que es el recorrido de las ondas sísmicas desde que se generan hasta que llegan cerca de la superficie) y los efectos locales o de sitio. Los efectos de sitio son los responsables de todas las modificaciones en la amplitud que sufre la señal una vez que ésta alcanza la superficie. Por lo general, los suelos blandos amplificarán la señal proveniente de la fuente en un rango de frecuencias determinado, y van a afectar en forma directa los asentamientos humanos establecidos sobre ellos (Fig. IV-4).

Como parte del procesamiento de los registros, todos ellos fueron corregidos por línea base. Una ventana de 4 segundos, a partir del arribo de la onda S, se tomó de las componentes horizontales y de la vertical. En el caso del ruido ambiente, se utilizó la información del pre-evento y se analizó una ventana de 15 segundos. Cuando la duración del pre-evento era menor que 15 segundos, el registro no fue utilizado. Fue necesario cerciorarse de que el filtro utilizado no interfiriera con la amplitud de la onda S, por esa razón, se utilizó un filtro de coseno, 0,5 segundos antes y después de la ventana de 4

segundos seleccionada. Luego de estas consideraciones, se estimó la transformada de Fourier para las componentes norte-sur (NS), este-oeste (EW) y vertical (UD).

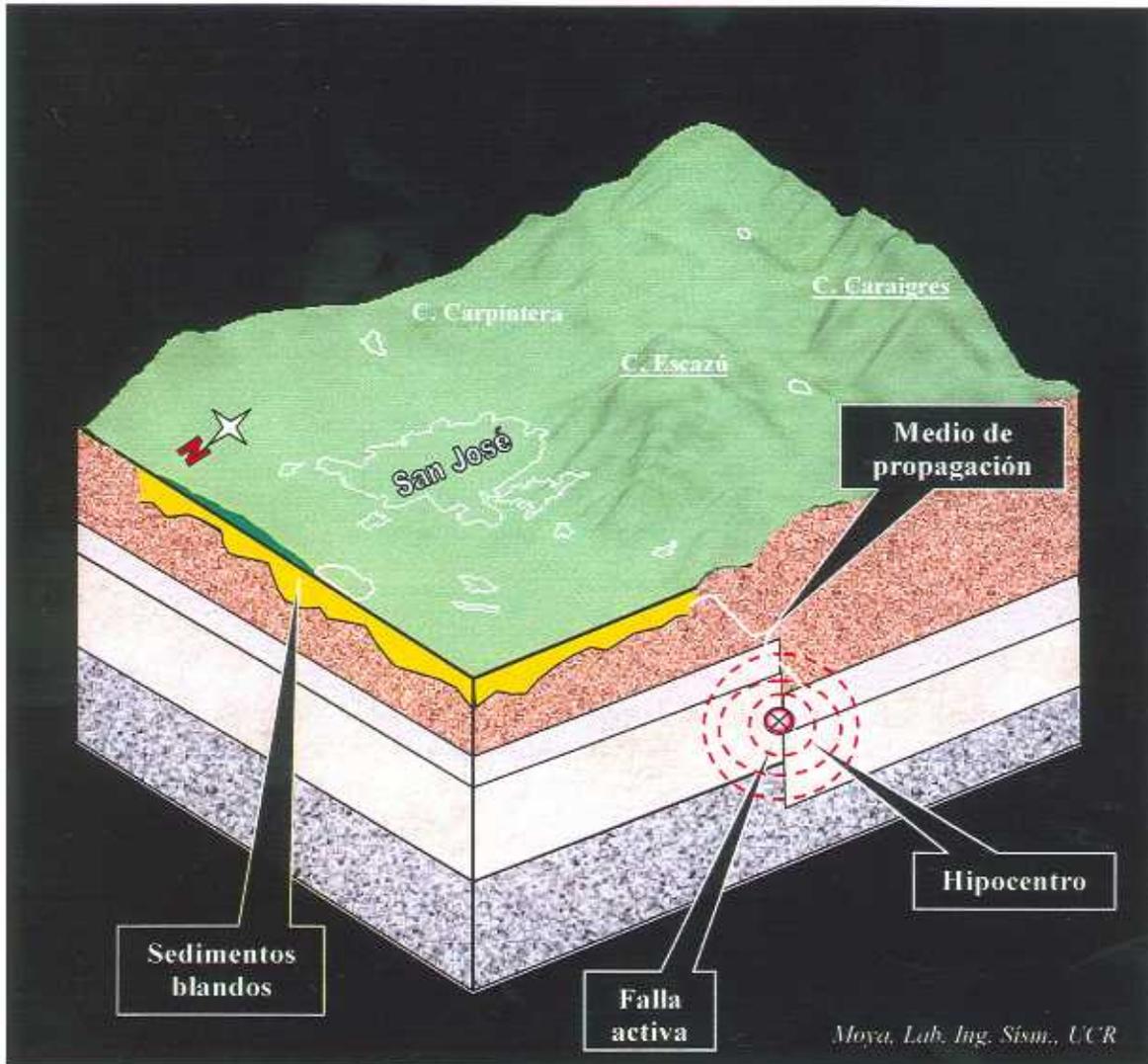


Fig. IV-4. Un registro sísmico (acelerograma) contiene información de ondas sísmicas que han sido originadas en una falla y han viajado a través de un medio de propagación hasta alcanzar los sedimentos blandos de la superficie.

Siguiendo el trabajo realizado por Cramer (1995), luego de suavizar las componentes, se procedió a calcular la resultante horizontal (RS) que esta dada por:

$$RS = \sqrt{\frac{(NS^2 + EW^2)}{2}} \quad (1)$$

Esta ecuación ha sido introducida por Huang (1982) y usada por Jarpe *et al.* (1988) como un medio de obtener la máxima amplitud horizontal que se considera invariable de la orientación del instrumento.

La determinación de los efectos de sitio se llevó a cabo mediante dos técnicas. Una de ellas es la que utiliza la razón espectral de sedimento contra roca (RESR) (Borcherdt, 1970) y la otra es la razón espectral horizontal sobre vertical (REHV) utilizando una sola estación (Lermo y Chávez-García, 1993). Ambas técnicas se aplican a la parte de la onda S del acelerograma. Como complemento a las estimaciones anteriores, se analizaron también los efectos de sitio determinados mediante el uso de la razón espectral del ruido ambiente (RERA) (Nakamura, 1989). Los posibles efectos de no linealidad del suelo no son tratados debido a que la mayoría de los sismos registrados corresponden a movimiento débil. Sin embargo, es una condición que siempre debe estar presente cuando se realizan análisis de repuesta de sitio.

En el trabajo realizado por Moya *et al.* (1998) se estimaron los efectos de sitio utilizando tanto las componentes NS y EW por separado como la RS. Sin embargo, en este capítulo nos limitaremos a discutir el resultado de la componente RS solamente.

4.3.1 Razón Espectral Sedimento contra Roca (RESR)

Esta técnica fue introducida por Borcherdt (1970). Se basa en la hipótesis de que un sitio ubicado en roca no experimenta amplificación durante un sismo. De esta forma, la amplificación relativa de un sitio en sedimento queda expresada como el cociente del espectro de amplitud de Fourier en suelo con respecto al del espectro de la señal sobre roca (Fig. IV-5).

En el dominio de las frecuencias, el espectro observado de un terremoto puede ser representado como la multiplicación de la fuente, el medio y el efecto de sitio (Fig. IV-4) (Iwata e Irikura, 1986):

$$O_y(f) = F_j(f)A_y(f)G_i(f)I_i(f) \quad (2)$$

donde: $O_y(f)$ es el espectro observado del terremoto j registrado en la estación i , $F_j(f)$ es el espectro de la fuente del terremoto j , $A_y(f)$ es la atenuación debida a la propagación de las ondas desde la fuente hasta la estación sísmica, $G_i(f)$ es el efecto de sitio de la estación i , $I_i(f)$ es la respuesta instrumental. La corrección por el factor de calidad, Q , y la radiación geométrica esta implícito en $A_y(f)$.

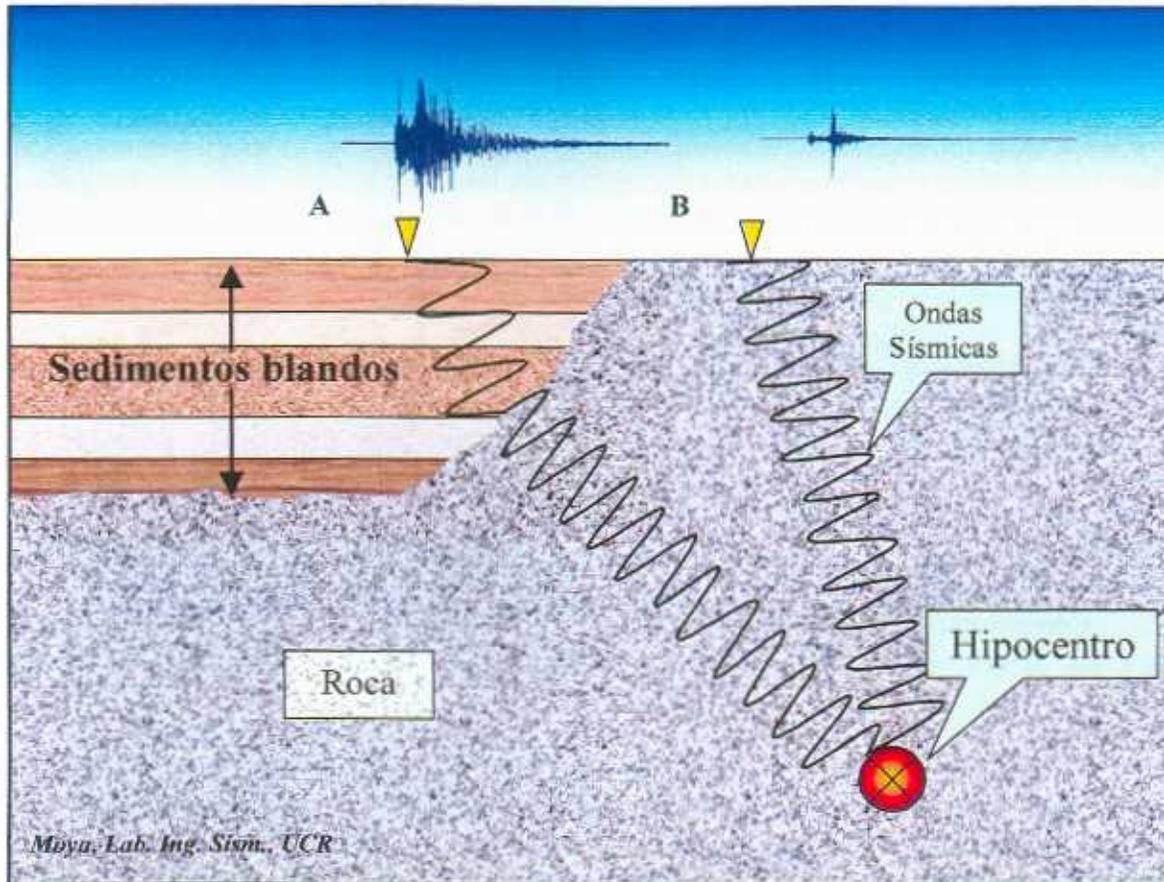


Fig. IV-5. Ante la ocurrencia de un sismo que es registrado en dos estaciones, una señal sísmica obtenida sobre sedimentos blandos (A) es amplificada mucho más que una ubicada en roca (B)

El espectro relativo se calcula utilizando la ecuación 2 al dividir el espectro de la señal en suelo blando (estación A en la Fig. IV-5) entre el espectro de la señal en roca, r (estación B en la Fig. IV-5). Se ve claramente que el término correspondiente a la fuente se cancela si ambas estaciones han registrado el mismo sismo. También, si se utiliza un solo tipo de instrumento, como por ejemplo los K2 o los SSA, el término debido a la corrección instrumental, $I(f)$, también se cancela. De la Figuras. IV-3 y IV-4 se nota que la distancia para la mayoría de los eventos registrados por la red SAN es mucho mayor que la distancia entre estaciones acelerográficas. Por lo tanto, podemos asumir que las ondas sísmicas viajan por un mismo camino, así el término de la atenuación sería el mismo tanto para la estación i como para la estación de referencia r . De esta manera, la ecuación 2 se resume a:

$$O'_i(f) = G'_i(f) \quad (3)$$

donde, $O'_i(f)$ es el cociente de los espectros observados en la estación i con respecto al espectro observado en la estación de referencia, r , y $G'_i(f)$ es por lo tanto el cociente de los