

Capítulo 5

Respuesta Dinámica de los Suelos: Estimaciones Analíticas

Laboratorio de Ingeniería Sísmica, INII-UCR

RESUMEN

El objetivo principal de este capítulo es identificar el comportamiento dinámico del suelo del Area Metropolitana de San José y de sus alrededores, por medio del uso de modelos matemáticos creados para este fin.

Se realizaron pruebas geofísicas en diferentes puntos del área en estudio para caracterizar los distintos perfiles de suelo según su estratigrafía (espesores de capas), velocidad de onda cortante de cada capa, módulo de rigidez y amortiguamiento. Dos métodos fueron utilizados para la obtención del valor de la velocidad de la onda cortante: a) midiendo el valor directamente a partir de pruebas SASW y b) estimando su valor con base en pruebas de refracción sísmica y resistividad eléctrica. Los resultados de ambas pruebas fueron utilizados y complementados para mejorar los modelos empleados.

El programa de cómputo utilizado en los análisis fue el SHAKE. Este permite estimar la respuesta en superficie de una señal que atraviesa un medio estratificado de material blando a partir del nivel de roca.

Estas estimaciones permitieron obtener acelerogramas modelados en la superficie, sus respectivos espectros de respuesta, razones de amplificación y funciones de transferencia, resultados que son necesarios para conocer en detalle el comportamiento dinámico del suelo (identificación de los principales periodos de vibración y factores de amplificación), así como estimar espectros para el diseño de estructuras sismo-resistentes, que son los productos finales que se presentarán al final de este estudio. Como datos de entrada del modelo fueron utilizados registros de aceleraciones de señales sísmicas pequeñas, moderadas y grandes, de manera que los resultados reflejen el globalmente la sismicidad del país.

Se obtuvo un rango de valores de amplificación dinámica máxima del terreno entre 3 y 5 y una amplificación promedio de 2,0 a 2,5 para los 11 sitios analizados. Respecto a los modos naturales de vibración de los distintos sitios, se obtuvo un rango de valores entre 0,25 s (en suelos más firmes) y 0,45 s (suelos menos firmes), utilizando registros débiles como entrada (aceleraciones menores que 0,15 de la aceleración de la gravedad (g)). Este rango de periodos fundamentales se incrementó a valores entre 0,3 s y 0,55 s para los registros moderados y fuertes (aceleraciones mayores que 0,15g). Hay dos sitios que presentaron condiciones singulares: Sabana y Curridabat. En ellos, las velocidades de onda cortante en las capas más superficiales fueron menores que 100 m/s. Esto produjo un incremento considerable en el periodo fundamental de estos sitios con respecto al resto de los puntos analizados, llegando a valores de 1,0 s.

5.1 MODELO GEOFISICO DE LOS SUELOS SUPERFICIALES

La Figura V-1 muestra el gráfico de velocidad de onda cortante (V_s) estimada vs. profundidad según los resultados obtenidos con las pruebas de sísmica de refracción y resistividad eléctrica realizadas en ocho sitios dentro del Area Metropolitana de San José. Puede observarse que en los sitios Sabana y Curridabat las velocidades de onda cortante

varían relativamente poco con la profundidad, entre 100 y 400 m/s en 30 m. Estos sitios están localizados al centro y al este del área en estudio. Por el contrario, los puntos llamados: Rivera de Belén, Carretera Próspero Fernández (Escazú) y Rohrmoser (noroeste y oeste de la zona) muestran un incremento alto de la Vs con la profundidad: entre 100 y 700 m/s en 15 metros, lo que los hace los sitios más rígidos de la zona de estudio. Lo anterior hace esperar que los periodos mas altos (suelos menos rígidos) se observen hacia el centro y este de la ciudad, mientras que los periodos más bajos (suelos más rígidos) hacia el oeste y sur.

Se puede observar además que, a excepción del sitio denominado Rivera de Belén, las demás curvas siguen una tendencia bastante semejante: parten de una velocidad en los estratos más superficiales entre 100 y 150 m/s y llegan a velocidades entre 400 y 600 m/s a los 30 metros de profundidad.

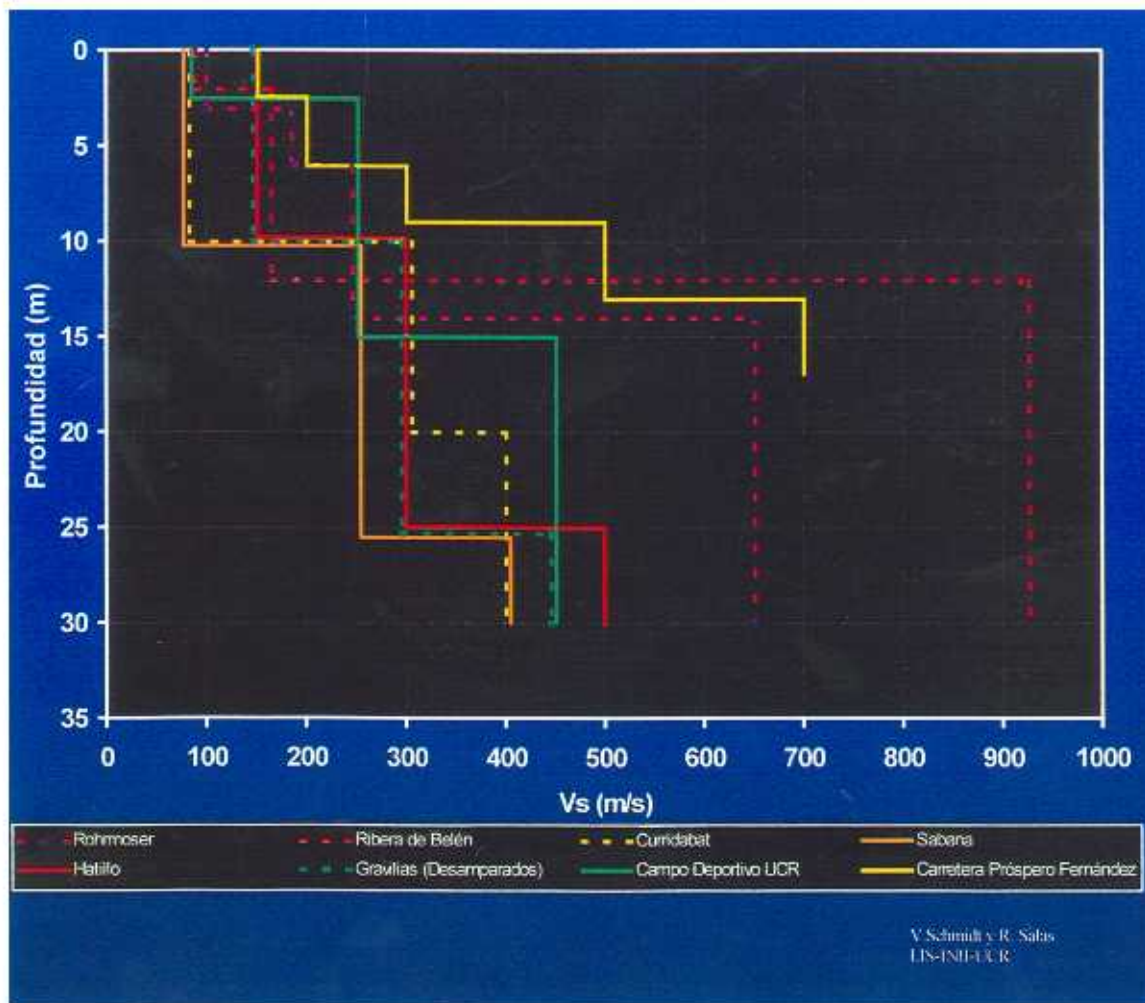


Fig. V-1. Variación de las velocidades de onda cortante con la profundidad según pruebas de refracción sísmica.

La Figura V-2 muestra en forma esquemática los resultados de las pruebas *Spectral Analysis of Surface Waves* (SASW) realizadas en la zona de estudio durante el segundo

semestre de 1997 (Capítulo 3). Al graficar todas las curvas juntas se observa una tendencia similar en todos los sitios (dentro de un rango de variación), lo que permite concluir que el medio presenta una condición que puede considerarse como homogénea. Desamparados (ubicado al sur de la zona) dio las velocidades más altas (suelos más rígidos) y, por el contrario, Napoleón Quesada (al norte de la zona) los valores de velocidad de onda cortante más bajos (suelos menos rígidos), aún cuando las diferencias entre estas curvas, que pueden considerarse como los extremos, son menos notables que en el caso de los resultados obtenidos a partir de las pruebas de refracción sísmica. La ubicación de los puntos donde fueron realizadas las pruebas de refracción sísmica y de SASW se muestran en la Figura III-4.

Debido a esta situación mostrada por los resultados de las pruebas SASW, que será interpretada como homogeneidad del medio, se decidió trabajar con una curva promedio que permitió proponer modelos en otros sitios dentro del Área Metropolitana. Aún así, la tendencia parece ser que los suelos son más rígidos al sur y al oeste, mientras se observan menos rígidos al norte y al este de esta zona. Considerando el promedio de V_s en los primeros treinta metros y de acuerdo con NEHRP (1997), los materiales superficiales del Área Metropolitana pueden considerarse como suelos rígidos o rocas suaves.

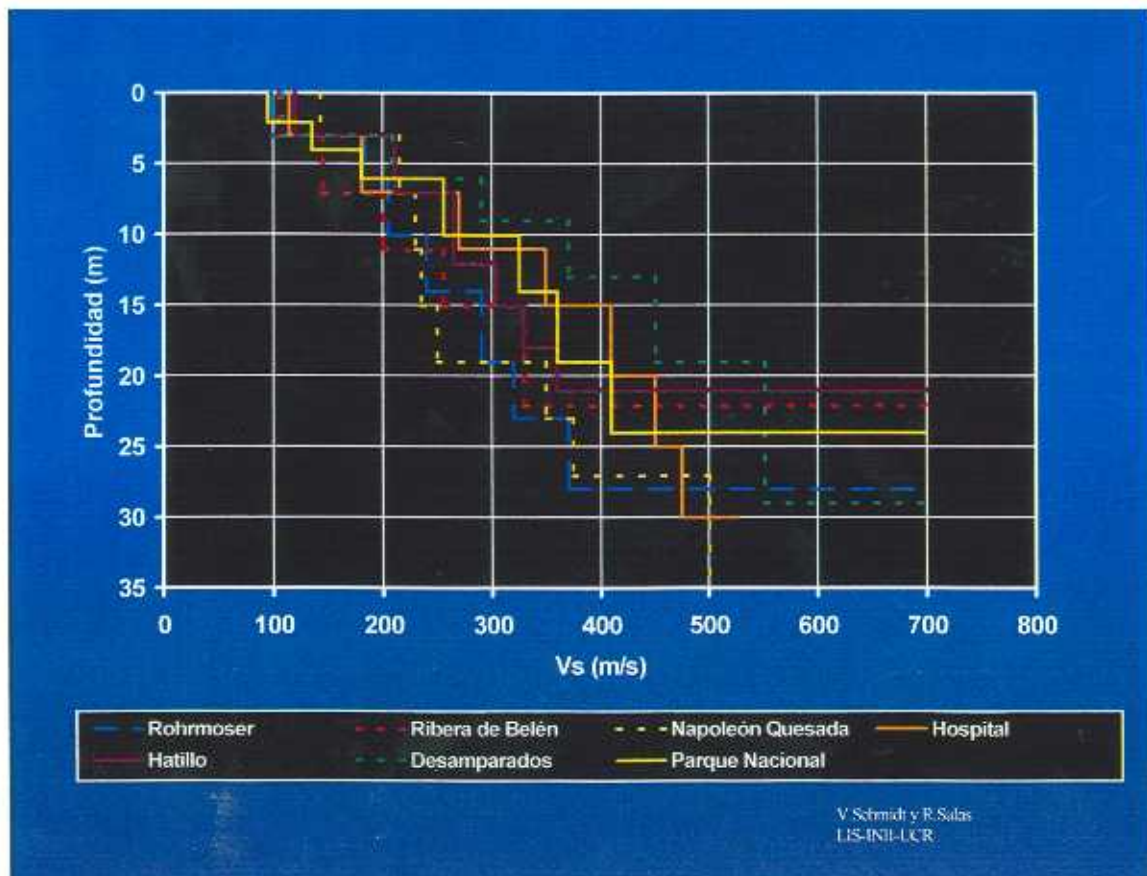


Fig. V-2. Variación de las velocidades de onda cortante con la profundidad según pruebas SASW.

5.2 CONSIDERACIONES DEL MODELO ANALITICO UTILIZADO

Se utilizó el programa SHAKE (EduPro, 1998) para modelar la respuesta dinámica y obtener acelerogramas a partir de la propagación de la onda (registro real), desde un nivel identificado como roca o suelo firme.

El algoritmo del programa se basa en la propagación unidimensional de la onda en forma ascendente desde la referencia (roca) hasta la superficie. El suelo es modelado como la sucesión de capas infinitamente horizontales sobre un semi-espacio elástico de profundidad infinita, definido como la roca (Shnabel *et al.*, 1972). La excitación de las capas se considera como el resultado de las ondas cortantes que se propagan verticalmente desde la base rocosa del depósito, sin considerar la acción de las ondas superficiales (Selnes, 1997). En la Figura V-3 se esquematiza un perfil de suelo y los datos de entrada que requiere el SHAKE para formular los modelos.

Se requieren como parámetros de entrada: la velocidad de onda cortante (V_s), el espesor, el amortiguamiento (ξ) y la densidad de cada capa (γ), de un registro sísmico (acelerograma) que sirva como excitación dinámica del sistema, así como la identificación de la base firme o roca de cada perfil, que en este caso será considerada aquella capa cuya velocidad de onda cortante supere los 500 m/s. A partir de estos parámetros, el programa ejecuta los cálculos a través de la solución iterativa de la ecuación de la onda adaptada para considerar movimientos transitorios a través de la transformada rápida de Fourier (Shnabel *et al.*, 1972).

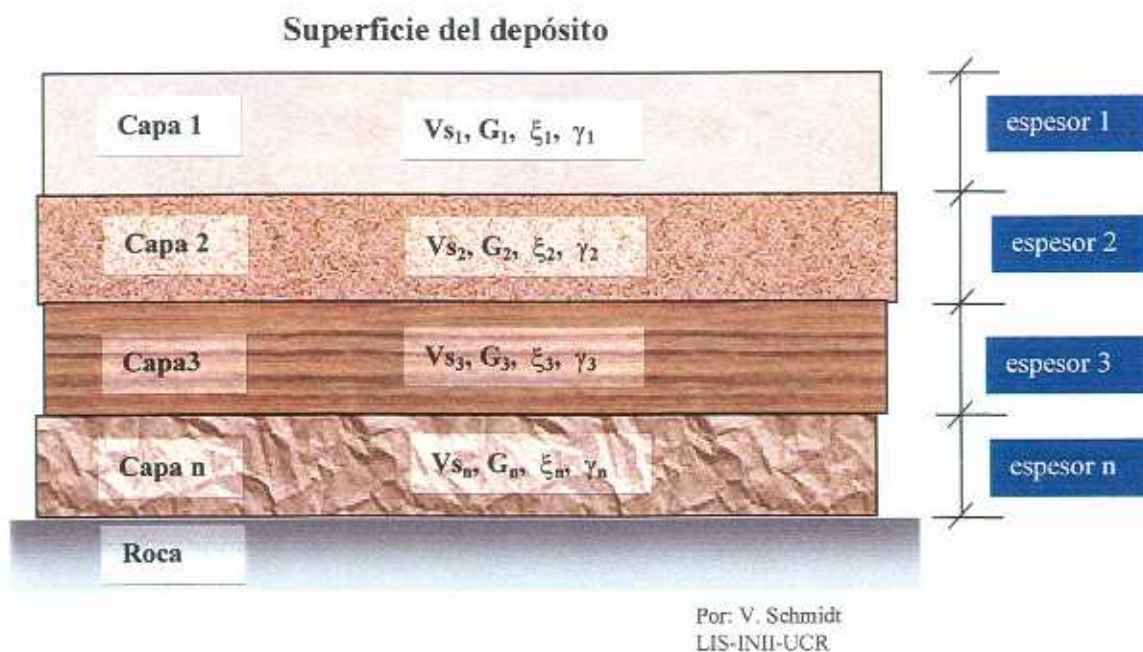


Fig. V-3. Esquema de datos de entrada requeridos por el programa SHAKE (Ver descripción de los parámetros en el texto).

La Figura V-4 muestra en forma esquemática el fenómeno modelado de la propagación de la onda a través de los estratos de suelo. Tal y como se representa en la figura, generalmente el registro de roca se obtiene en la superficie (afloramiento de la roca o del suelo firme, A). El programa deconvoluciona la señal hasta la base de los estratos de suelo (B) y a partir de este punto la propaga hasta la superficie.

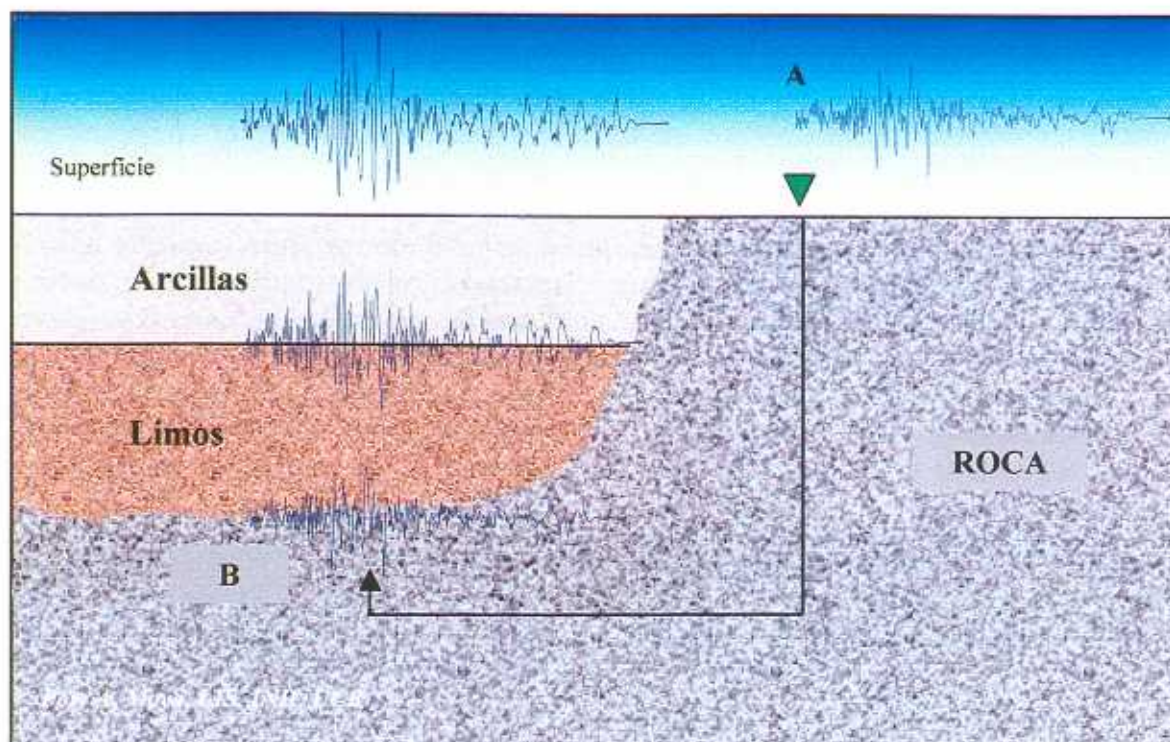


Fig. V-4. Explicación gráfica de la forma en que el programa SHAKE propaga la onda desde A (roca o suelo firme) a B (deconvolución) y finalmente hasta la superficie.

Debido a que el material es un medio no lineal sometido a cargas dinámicas que varían en el tiempo, se debe considerar la variación no lineal de la variación del módulo de cortante y del amortiguamiento de cada capa con respecto al nivel de deformación. Para resolverlo, el procedimiento de cálculo se vuelve iterativo hasta lograr que el módulo de rigidez y el amortiguamiento sean compatibles con el nivel de deformación cortante de cada capa de suelo (Shnabel *et al.*, 1972).

Aún cuando el programa tiene diversas curvas normalizadas sobre la degradación del módulo de cortante y del amortiguamiento con la deformación, en este caso fueron utilizadas las propuestas por Seed and Idriss (EduPro, 1998) para arenas, ya que son las que se adaptan mejor a las características de los suelos estudiados (Nadim, com. verbal). En los sitios donde la información era disponible, se utilizaron las curvas propuestas por Vucetic y Dorby (EduPro, 1998) que dependen del índice de plasticidad del suelo. Sin embargo, los resultados fueron muy semejantes a los obtenidos utilizando las curvas de Seed e Idriss.

Debe mencionarse que este programa tiene la limitante de que no calcula la duración de la amplificación de la onda sísmica, siendo un parámetro importante al evaluar la severidad de los eventos sísmicos y el cual se ha observado en muchos casos en el ámbito mundial, cuando hay presencia de suelos blandos. Tampoco son considerados efectos de amplificación por cambios topográficos bruscos, pero este efecto no es tan importante en el área de estudio ya que las pendientes en general son suaves.

Se utilizaron registros sísmicos obtenidos por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica y por el Instituto Costarricense de Electricidad registrados en roca o suelo firme y se separaron en dos categorías, $PGA < 0,15$ g (débiles) y $PGA > 0,15$ g (moderados y fuertes).

5.3 REGISTROS SISMICOS UTILIZADOS

Se escogieron tres registros con aceleración pico del terreno (PGA) superior a 0,15 g y tres con PGA menor a 0,15 g. Todos fueron registrados en sitios ubicados sobre roca o suelo firme y con distintas distancias hipocentrales. En su mayoría, fueron utilizados registros acelerográficos obtenidos por la red del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (INII-UCR), específicamente de las estaciones: CCH, GTS, e ISD. Se utilizó un registro obtenido por el ICE en la estación Presa San Miguel, que corresponde al de más alto valor de PGA registrado en roca en el país hasta la fecha. En la Figura V-5 se muestran algunos de los acelerogramas utilizados.

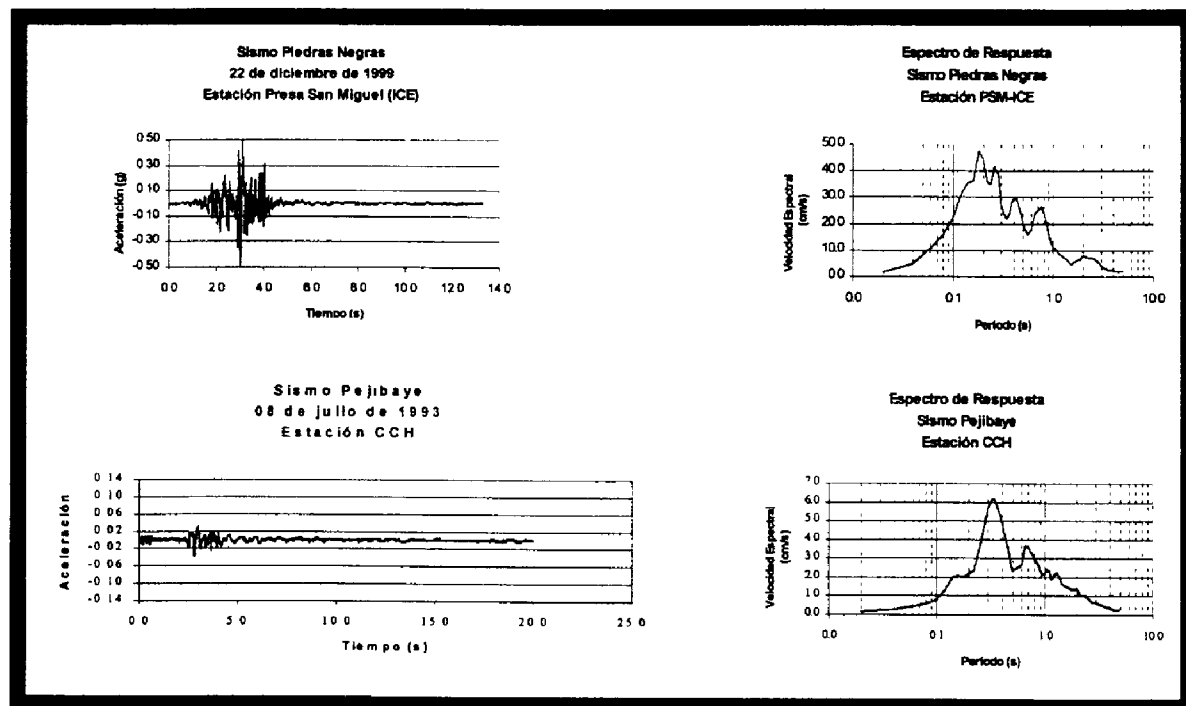


Fig. V-5. Ejemplos de un registro fuerte y de un registro débil utilizados para el modelado, con su respectivo espectro de respuesta.

El acelerograma del sismo de Piedras Negras (22/12/90 en la estación Presa San Miguel) es un registro típico de roca y cercano al epicentro: predominio de altas frecuencias y una fase fuerte relativamente corta, además de valores de aceleración altos ($PGA > 50\%$ g).

El registro correspondiente al sismo de Pejibaye (08/07/93) en la estación CCH es el que tiene el PGA menor de todos los considerados. Sin embargo, fue escogido para evaluar el efecto de amplificación debido a registros débiles. Al estar la estación CCH ubicada sobre roca, los registros que se obtienen en ella son generalmente de periodo corto.

En Tabla V-1 se suministra información de las principales características de los acelerogramas utilizados. Se observa que todos los registros fueron obtenidos a distancias relativamente cercanas y tienen un periodo predominante corto (alta frecuencia), típico de estaciones ubicadas en suelos rígidos o roca, a excepción del sismo de Limón registrado en CCH, en cuyo espectro de Fourier es difícil determinar un único máximo, debido probablemente a que su distancia epicentral no es corta, por lo que la onda experimentó modificaciones en su contenido frecuencial (filtrados, amplificaciones en frecuencias específicas) antes de llegar al punto de registro.

Tabla V-1. Principales características de los registros utilizados para la formulación de los modelos.

Sismos con $PGA > 15\%$						
Sismo	Fecha	Magnitud	Estación	Distancia epicentral (Km)	PGA (%g)	Periodo predominante
P. Negras (90d22PM)	22/12/90	5,7	PSM (ICE, roca)	10,0	54,0	0,15
P. Negras (90d22gt1)	22/12/90	5,7	GTS (suelo firme)	28,0	17,0	0,18
Limón (91a22is)	22/04/91	6,6	ISD (firme)	66,0	20,0	0,15
Sismos con $PGA < 15\%$						
Sismo	Fecha	Magnitud	Estación	Distancia epicentral (Km)	PGA (%g)	Periodo predominante
L. Santos (91g09gt)	09/08/91	4,9	GTS (firme)	22,0	6,0	0,46
Pejibaye (93l08cc)	08/07/93	3,7	CCH (roca)	14,0	4,0	0,29
Limón (91a22cc1)	22/04/91	6,6	CCH (roca)	76,0	14,0	0,85 (*)