

Capítulo 7

**Discusión Final
y Recomendaciones**

7.1 DISCUSION

Se ha realizado un estudio que se ha concentrado en la estimación de la amenaza sísmica en el Valle Central de Costa Rica y en el comportamiento dinámico de los suelos del Área Metropolitana de San José. Esto ha permitido, al final, obtener espectros de respuesta para condición de suelo y roca, así como un mapa de microzonificación sísmica del Área Metropolitana de San José.

Los resultados obtenidos están basados en la recopilación de información disponible y en la adquisición y compilación de nuevos datos. Los siguientes resultados se presentan:

- a) Identificación del fallamiento activo local en el Valle Central. Todas las fallas principales fueron cuantificadas en términos de su potencial sísmico (Fig. I-2, Tabla II-2).
- b) La amenaza sísmica ha sido estimada en términos de la aceleración pico del suelo, mapas de isoaceleración y espectros de respuesta de amenaza uniforme (Figs. II-1, II-2 y II-4).
- c) Mapas de espesores de materiales no consolidados y zonificación geotécnica en el Área Metropolitana (Figs. III-2 y III-3)
- d) Perfiles geofísicos con información de la velocidad de la onda cortante de los suelos (Figs. III-6, III-7, III-8, V-1 y V-2). Estos resultados han dado una clara indicación de que los suelos de San José pueden clasificarse como de comportamiento rígido, según la clasificación simplificada de NEHRP (Nadim, 1999).
- e) Mapa de microzonificación sísmica basado en el mapa de isoperiodos obtenido utilizando la medición de ruido ambiente. Se considera que el mapa de la Figura III-12 representa de una manera bastante confiable la distribución relativa de los periodos fundamentales de los suelos del Área Metropolitana de San José, y que puede ser considerada como una primera microzonificación sísmica de la misma.
- f) Tanto los resultados de los análisis empíricos como modelados muestran una clara correlación geográfica con los espesores de sedimentos.
- g) Con base en implicaciones prácticas de la ingeniería y en la respuesta dinámica presentada por los suelos, se propone dividir San José en dos zonas: Una localizada al sur, oeste y noroeste de la ciudad, la cual presenta periodos predominantes menores a 0,25 segundos y en la cual no se espera tener un efecto de sitio importante (amplificación de las señales sísmicas debidas a la presencia de estratos de suelos blandos). La otra zona corresponde a la parte central, este y noreste de San José en la que se espera la aparición de efectos de sitio, y que se caracteriza por tener periodos predominantes entre los 0,25 y 0,6s que en

algunos casos específicos se eleva hasta 1,0s, con factores de amplificación promedio máximos medidos de hasta 2,5.

- h) En la Figura VII-1 se presentan los espectros de respuesta obtenidos para roca y suelo, por medio del estudio de amenaza sísmica y la técnica de respuesta modelada, respectivamente.

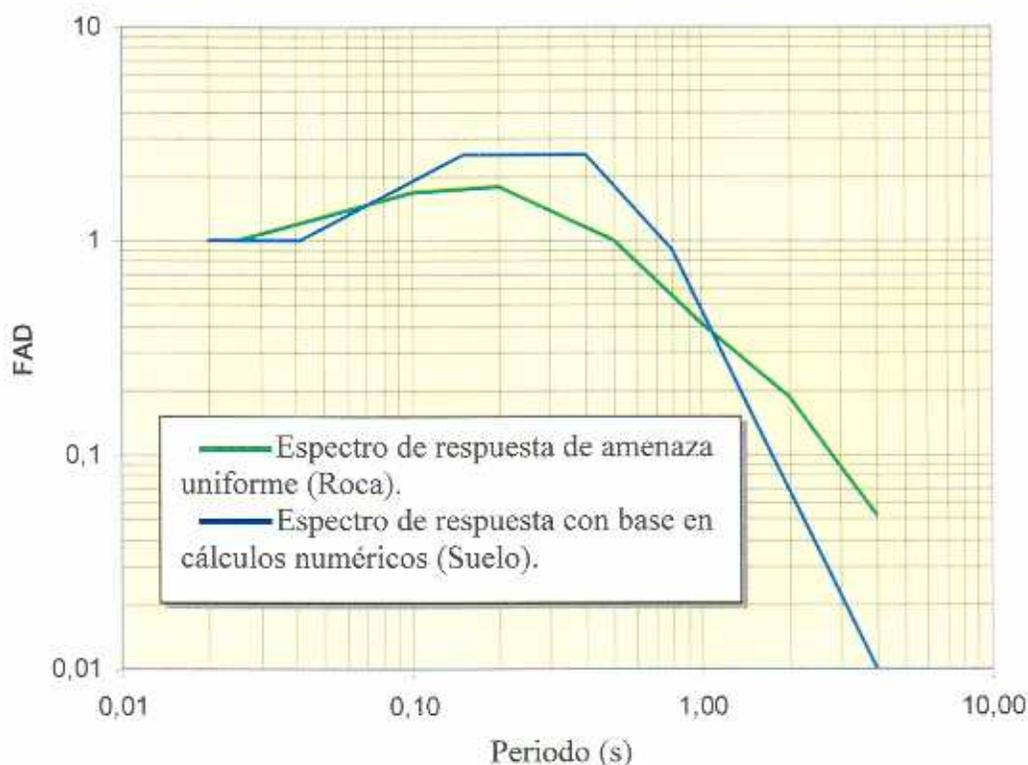


Fig. VII-1. Espectros de respuesta para el Area Metropolitana de San José, según resultados obtenidos en este estudio.

Para efectos de uso ingenieril, en el caso del espectro de respuesta obtenido para la condición de suelo por medio del uso del programa Shake, la experiencia ha mostrado que este programa puede subestimar el movimiento en la superficie en periodos sobre 1 a 2 segundos, ya que no se toma en cuenta el efecto de las ondas superficiales, debido a que sus algoritmos de cálculo consideran que los movimientos horizontales del suelo consisten en ondas de corte propagándose verticalmente (Nadim, 1999). Por lo tanto, se debe tener cuidado a la hora de utilizar estos espectros simulados en el rango anotado, especialmente si caen por debajo del espectro de amenaza uniforme. Por lo que el espectro de amenaza uniforme podría utilizarse como un límite inferior para periodos altos. Un espectro final de suelo de uso ingenieril podrá estar basado en la combinación de la forma espectral de ambos.

7.2 CONSIDERACIONES DE ORDEN INGENIERIL

La presentación de los resultados obtenidos en forma de espectros de respuesta, facilita su comprensión y su utilización para efectos de uso ingenieril. Es práctica común actualmente (Borcherdt, 1994; NEHRD, 1997) que, a partir de este tipo de resultados se desarrollen espectros de diseño para su uso en códigos y normativas de construcción. El objetivo final de este informe, no es el de llegar a ellos en forma explícita, ya que el desarrollo final de los mismos implica consideraciones propias de la práctica ingenieril, en las cuales debe haber un balance entre la sismicidad real de la zona y las reglas utilizadas para trasladar la misma al diseño, cumpliendo con un equilibrio adecuado entre el riesgo, la seguridad de la obra y el costo.

Es bien comprendido que las estimaciones de las sacudidas sísmicas del suelo, por sí solas, no determinan la forma en que la estructura se comportará durante un evento sísmico, pero sí esperamos que estos resultados sirvan como una herramienta para el mejoramiento de los espectros de diseño utilizado en el Código Sísmico de Costa Rica.

Considerando lo anterior, recomendamos que se utilice como espectro de referencia (roca) para el Valle Central el espectro de respuesta normalizado de igual amenaza obtenido en el Capítulo II (Fig. II-4) y mostrado en la Figura VII-2. Este espectro de amenaza uniforme, es un espectro elástico basado en la respuesta máxima esperada de un sistema de un grado de libertad evaluado para un 5 % de amortiguamiento. Se considera que la amenaza sísmica estará regida por las curvas de isoaceleración presentadas en los mapas de las Figuras II-1 y II-2. Estas representan valores de aceleración horizontal pico para periodos de retorno de 50, 100 y 500 años. A modo de ejemplo, en la Figura VII-3 se presentan las curvas correspondientes para un periodo de retorno de 100 años.

Para utilizar el espectro recomendado anteriormente en las zonas donde se ha determinado que se pueden esperar efectos de sitio, se recomienda utilizar los factores de amplificación de la Tabla VII-1, los cuales son factores empíricos promedio desarrollados a partir de eventos sísmicos registrados en Estados Unidos y utilizados en las provisiones de carácter sísmico recomendadas por NEHRP (1997) para suelos similares a los presentes en San José, caracterizados por medio de los valores de velocidad de la onda cortante. En la Figura VII-2 se presenta el espectro de respuesta de referencia (roca) recomendado y el respectivo espectro para condición de suelo con base en los factores de la Tabla VII-2. Para efectos finales de diseño, este espectro de respuesta de suelo puede ser calibrado y ajustado con base en el espectro de respuesta modelado de la Figura VII-1. Es importante a la vez complementarlo con los resultados obtenidos en el estudio de amenaza sísmica regional realizado para Costa Rica por Laporte *et al.* (1994).

Tabla. VII-1. Factores de amplificación (efecto de sitio) promedio para suelos con características similares a los existentes en el Area Metropolitana de San José.

Periodo Espectral	PGA ≤ 0,1g	PGA = 0,2g	PGA = 0,3g	PGA = 0,4g	PGA ≥ 0,5 g
T ≤ 0,04 s	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90
T = 0,20 s	1,40	1,30	1,15	1,05	1,00
T ≥ 1,00 s	2,00	1,80	1,65	1,50	1,40

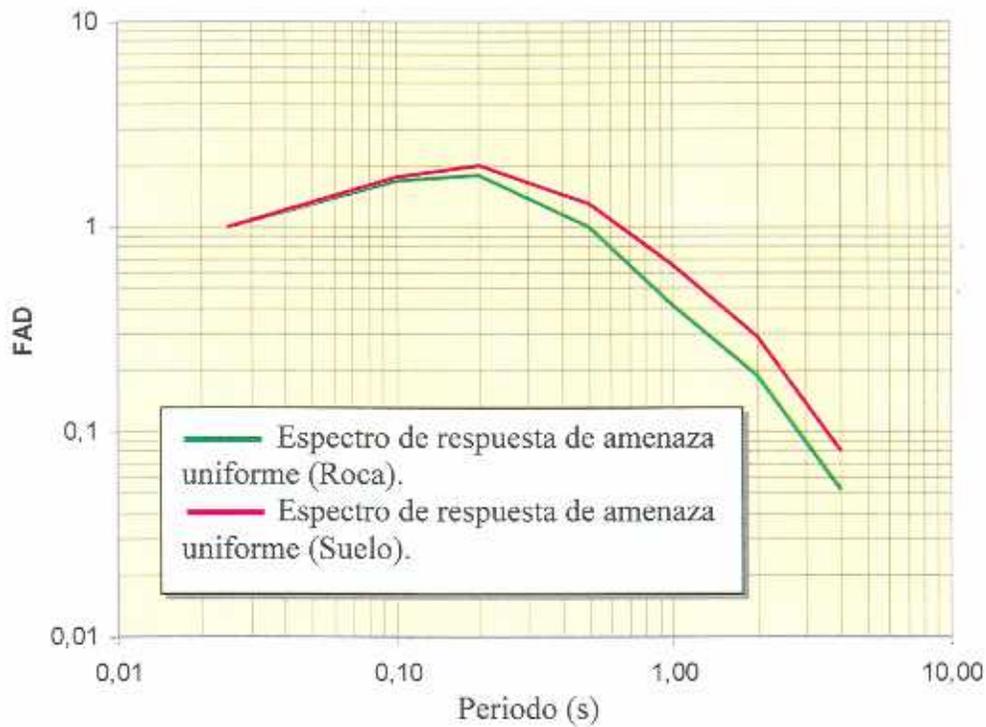


Fig. VII-2. Espectro de respuesta de amenaza uniforme para roca en el Area Metropolitana de San José y el espectro correspondiente para condición de suelo.

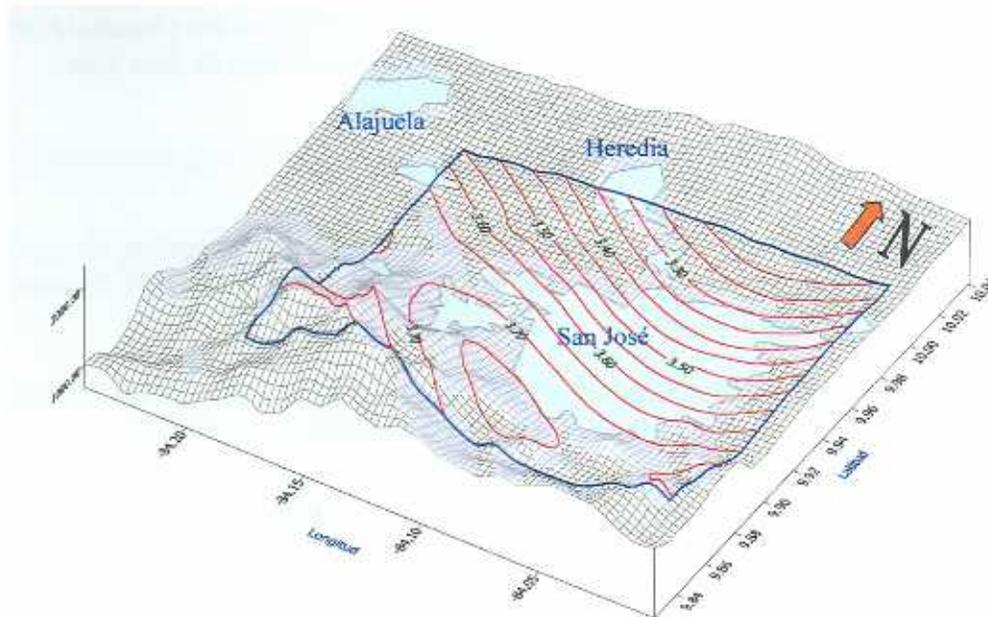


Fig. VII-3. Curvas de isoaceleración horizontal pico esperadas (m/s^2) en el Área Metropolitana de San José, para un periodo de retorno de 100 años.

Desde el punto de vista práctico y de implicaciones en la ingeniería, los efectos de respuesta de sitio (amplificaciones) tienen relevancia cuando el periodo natural de los suelos es mayor de 0,25-0,30 segundos (3-4 Hz), en caso contrario los espectros de respuesta desarrollados para una referencia en roca representan adecuadamente la respuesta dinámica de esos sitios (Nadim, 1999; API, 1993).

Actualmente, para aplicaciones ingenieriles, es práctica común el uso de cargas sísmicas efectivas de diseño, las cuales son una fracción del valor pico de aceleración. Esta reducción es para considerar la condición natural transitoria de la carga (la aceleración pico solo actúa una fracción de segundo) y la respuesta no lineal de la estructura. Por ejemplo, el espectro de diseño propuesto por NEHRP es 2/3 el espectro de respuesta elástico.

Los factores de reducción aplicados a los espectros de respuesta elásticos deberían idealmente ser función de la capacidad de la ductilidad de cada estructura. El factor 2/3 se considera como un mínimo a ser utilizado en todos los tipos de estructuras. Factores de reducción adicionales son aplicados a menudo para edificios tipo en los códigos, pero la especificación de estos factores queda fuera de los alcances de este estudio.

En general San José presenta un comportamiento de suelo rígido. Sismos cercanos, incluso de magnitudes intermedias, de foco superficial con contenidos de alta frecuencia, podrían tener una alta amenaza para las edificaciones de la ciudad, caracterizada por el predominio de edificaciones rígidas y de poca altura.

Se recomienda realizar mediciones geofísicas y cálculos adicionales en la zona noreste de San José, especialmente hacia Tibás y Santo Domingo de Heredia. Finalmente se recomienda el uso de los resultados obtenidos en este informe en los planes de desarrollo urbano que desarrollan los gobiernos locales del Área Metropolitana de San José.

7.3 REFERENCIAS

American Petroleum Institute, 1993: Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platform-load and resistance factor design. API Recommended Practice 2A-LRFD, First edition, July 1.

Borcherdt, R., 1994: Estimates of site-dependent response spectra for design (Methodology and Justification). *Earthquake Spectra*, Vol. 10, No.4, 617-653.

Building Seismic Safety Council, 1997: NEHRP Recommended provisions (National Earthquake Hazards Reduction Program). Part 1: Provisions (FEMA 302) prepared for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

Nadin, F., 1999: Site effects-practical design implications. Project 963020 – Earthquake hazard mitigation in Central America – Phase II (Memo). Norwegian Geotechnical Institute.

Laporte, M., C. Lindholm, H. Bungum, y A. Dahle, 1994: Seismic hazard for Costa Rica. Technical Report No. 2-14. NORSAR, PO. Box. 51 N-2007 Norway. 73 pp.