

efectos de cada sitio. La RESR se aplicó utilizando solamente los registros obtenidos por los acelerógrafos K2.

La estación de referencia seleccionada fue NFL, en la cual el instrumento se ubicó sobre lavas que no presentan efectos de meteorización. Asimismo, NFL es el lugar que presenta el nivel de ruido de fondo más bajo de todos los sitios. La Figura IV-6 muestra el resultado de los valores espectrales promedio, por cada estación, al usar la técnica de RESR para la componente vectorial horizontal dada por (2).

Del análisis de cada uno de los gráficos de la Figura IV-6 se nota que en algunos casos el periodo predominante aparece claramente, como en el caso de la estación LPF a los 0,3 segundos. En otros casos es menos claro y es mejor hablar de rangos de valores, con amplitudes importantes apareciendo a diferentes periodos, como el caso de CAR y HAT, aunque sobresalen de ellos picos en los periodos de 0,3 y 0,6 segundos y a un valor mayor de 1,0 seg.

Con excepción de LPF (0,33 seg.) y DES (que presenta amplificación solamente a 1 seg.), las demás estaciones presentan un primer periodo predominante entre 0,2 y 0,3 segundos.

La estación DES presenta el nivel más bajo de amplitud relativa mediante el uso de esta técnica, y el periodo obtenido de un segundo parece un poco alto de acuerdo con el mapa de espesores. Esto se aprecia también en las formas de onda que se presentan en la Figura IV-7 para un sismo registrado en la mayoría de los sitios de observación. El evento se ubicó cerca de la península de Osa al suroeste del país, por lo que se considera que las diferencias en amplitudes observadas se deben al efecto de sitio de cada lugar. Nótese que en ambos casos, la estación DES presenta la más baja amplitud, mientras que otros sitios ubicados sobre sedimentos presentan una mayor amplificación en los bajos periodos.

Macrozonificación Sísmica del Area Metropolitana de San José

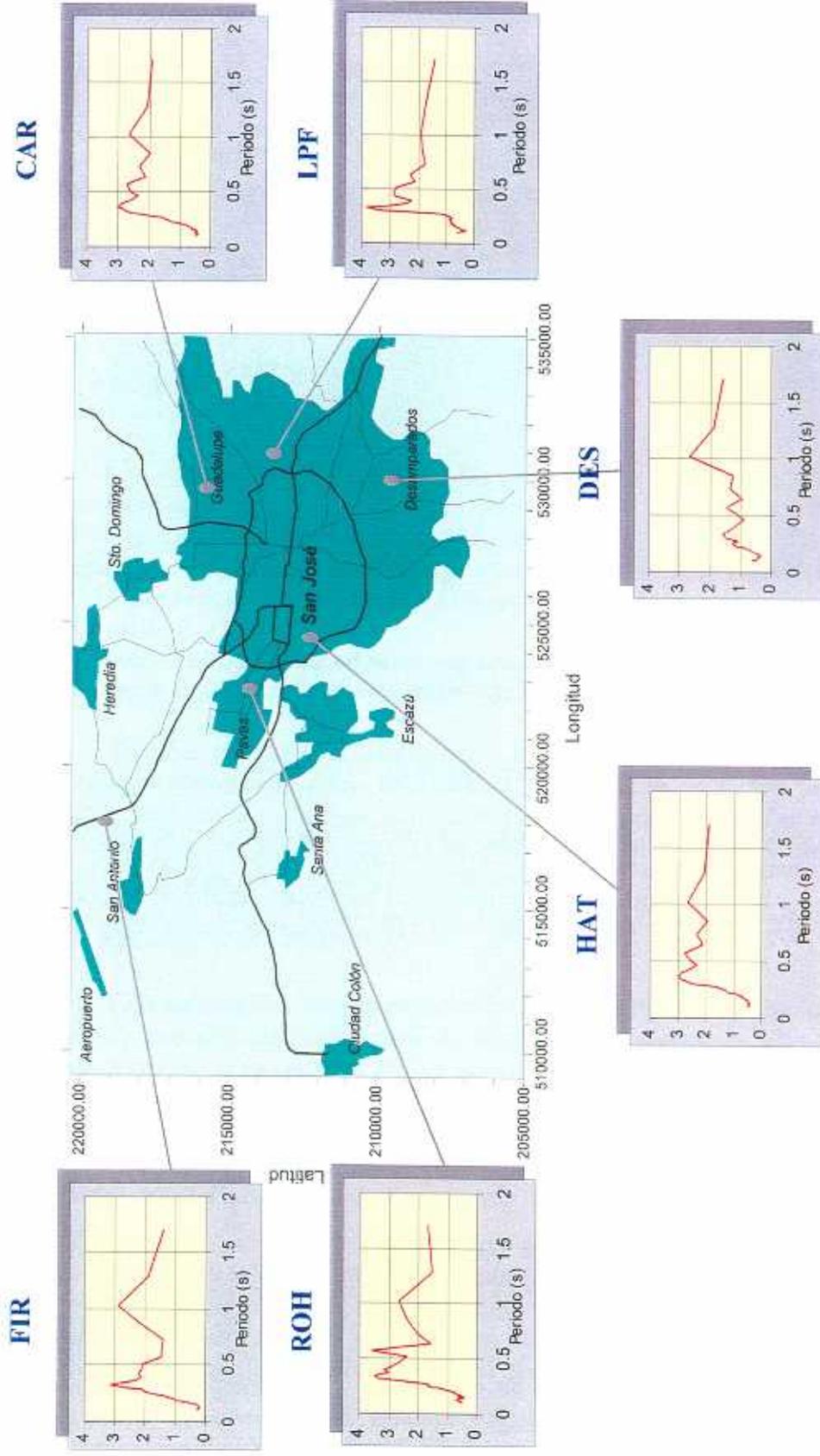


Fig. IV-6. Efectos de sitio estimados a partir de la razón espectral de sedimento contra roca para las estaciones K2. Todos los efectos de sitio fueron estimados tomando como estación de referencia a NFL.

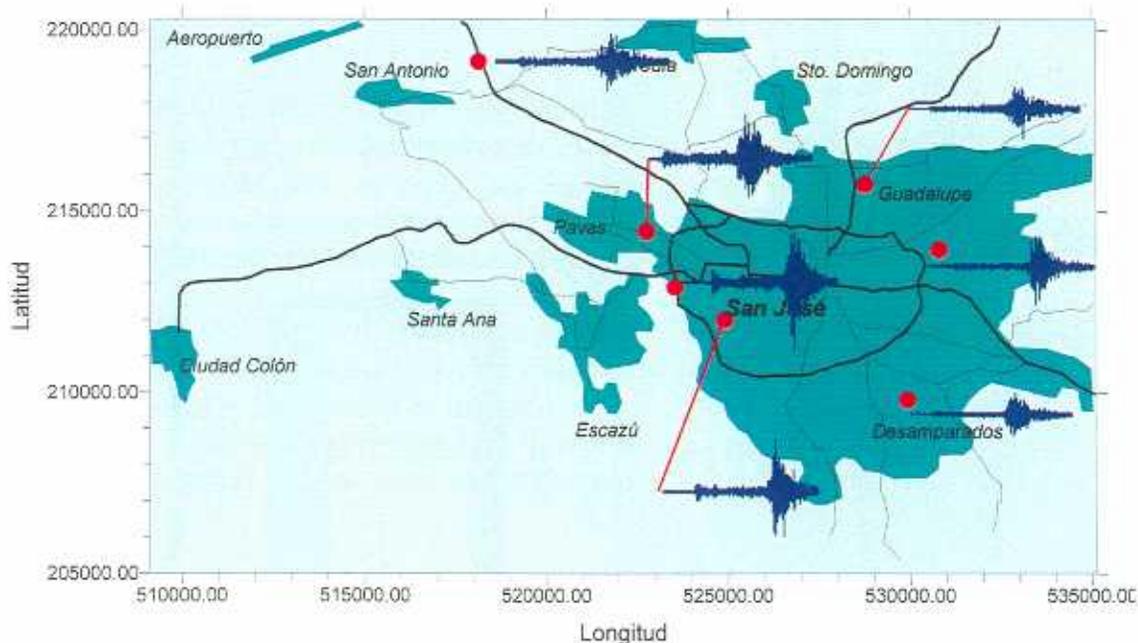


Fig. IV-7. Formas de onda para un sismo registrado por todos los acelerógrafos. Nótese que la amplitud de cada onda es diferente en cada sitio.

4.3.2. Razón Espectral Horizontal sobre Vertical (REHV)

Esta técnica está basada en la suposición de que los espectros de amplitudes de Fourier de las componentes horizontales de un registro sísmico pueden ser divididas entre la del espectro de la componente vertical, que experimenta poca o no amplificación (Lermo y Chávez-García, 1993; Coutel y Mora, 1998). El efecto de sitio queda dado por la expresión:

$$G_i(f) = \frac{H_y(f)}{V_y(f)} \quad (4)$$

donde $G_i(f)$ es el efecto de sitio determinado luego de dividir la componente horizontal, $H_y(f)$, por la vertical, $V_y(f)$ para el terremoto j registrado en la estación i .

Muchos autores se han referido a las ventajas de esta técnica (Lermo y Chávez-García, 1993; Chávez-García *et al.*, 1996; Atakan, 1995), en especial no requiere que el mismo evento haya sido registrado en forma simultánea por todas o varias de las estaciones y por supuesto, no requiere de una estación de referencia, de aquí lo atractivo del método. La Figura IV-8 muestra el resultado para cada uno de los sitios analizados por medio de esta técnica.

Al igual que en el método anterior, los resultados de la Figura IV-8 presentan algunas estaciones con un claro periodo predominante, como en DES, CAR, NFL y ROH,

de 0,25, 0,65, 0,35 y 0,75 segundos, respectivamente. En otras estaciones como FIR y LPF se presentan varios periodos importantes, como por ejemplo: 0,25, 0,5 y 0,8 segundos en el caso de la primera estación. La estación HAT presenta un comportamiento bastante singular en el cual los efectos de amplificación son uniformes para el rango de periodos estudiados. Los niveles de amplificación para todas las estaciones son ligeramente mayores que los observados usando la técnica RESR, variando entre factores de 4 a 6 para los máximos. La amplitud media de las estaciones HAT y FIR es de aproximadamente 3, mientras que para el resto de las estaciones ésta anda alrededor de 4 y 5, que son valores bastante elevados. Sin embargo, Moya *et al.* (1998) observaron que existe mayor similitud entre las componentes NS y EW con el uso de la REHV que con la RESR. En el mismo estudio se observa que la desviación estándar es también menor cuando se usa la técnica de REHV.

En el caso específico del sitio DES, los resultados de esta técnica indican un comportamiento un poco diferente al obtenido por medio de la técnica RESR, y aunque aparece una amplitud emergente en un segundo, las amplitudes más importantes aparecen para periodos inferiores a los 0,5 segundos. En el caso de NFL existe un pico importante a los 0,25 segundos. En la estación FIR existen dos picos de amplitud parecida como en el caso anterior.

4.3.3 Razón Espectral de Ruido Ambiente (RERA)

En años recientes, el uso de ruido ambiente se ha incrementado entre la comunidad sismológica e ingenieril como una manera alternativa de estimar el periodo fundamental de un sitio determinado. Luego de que la técnica se hiciera popular a partir del trabajo de Nakamura (1989), muchos autores se dieron a la tarea de investigar la aplicabilidad del método en diferentes ambientes geológicos (Lachet *et al.*, 1996; Lermo y Chávez-García, 1994; Coutel y Mora, 1998; Konno y Ohmachi, 1998; Mucciarelli, 1998; Bourd *et al.*, 1998; Raptakis, *et al.*, 1998).

En este estudio, para la estimación de los efectos de sitio utilizando ruido, se siguió el mismo procedimiento que para el cálculo de los efectos de sitio utilizando sismos. La información del pre-evento se utilizó para obtener ruido ambiente y se tomó una ventana de 15 segundos. Esta selección del ancho de la ventana no es tan larga como la que otros autores han utilizado (Lachet *et al.*, 1996; Konno y Ohmachi, 1998). Sin embargo, en un estudio llevado a cabo por Chávez-García *et al.* (1990) se obtuvieron resultados bastante similares entre el ruido y los sismos aún cuando esos autores utilizaron ventanas de 5 segundos del pre-evento de la señal.

En este análisis se incluyeron las estaciones que contenían un acelerógrafo tipo SSA y que corresponden al OVSICORI (OVS) en Heredia, Guachipelín (GUA) y la Escuela Católica Activa (ECA), cerca del Parque de la Sabana. La ubicación de estos sitios se muestra en la Figura IV-2. En el caso de estas estaciones fue necesario que se hicieran mediciones de campo para obtener registros de ruido. Estas pruebas se realizaron colocando uno de los acelerógrafos K2 junto a los SSA y se registró ruido por un periodo de tiempo lo suficientemente largo como para lograr una estabilidad de la señal y se tomó

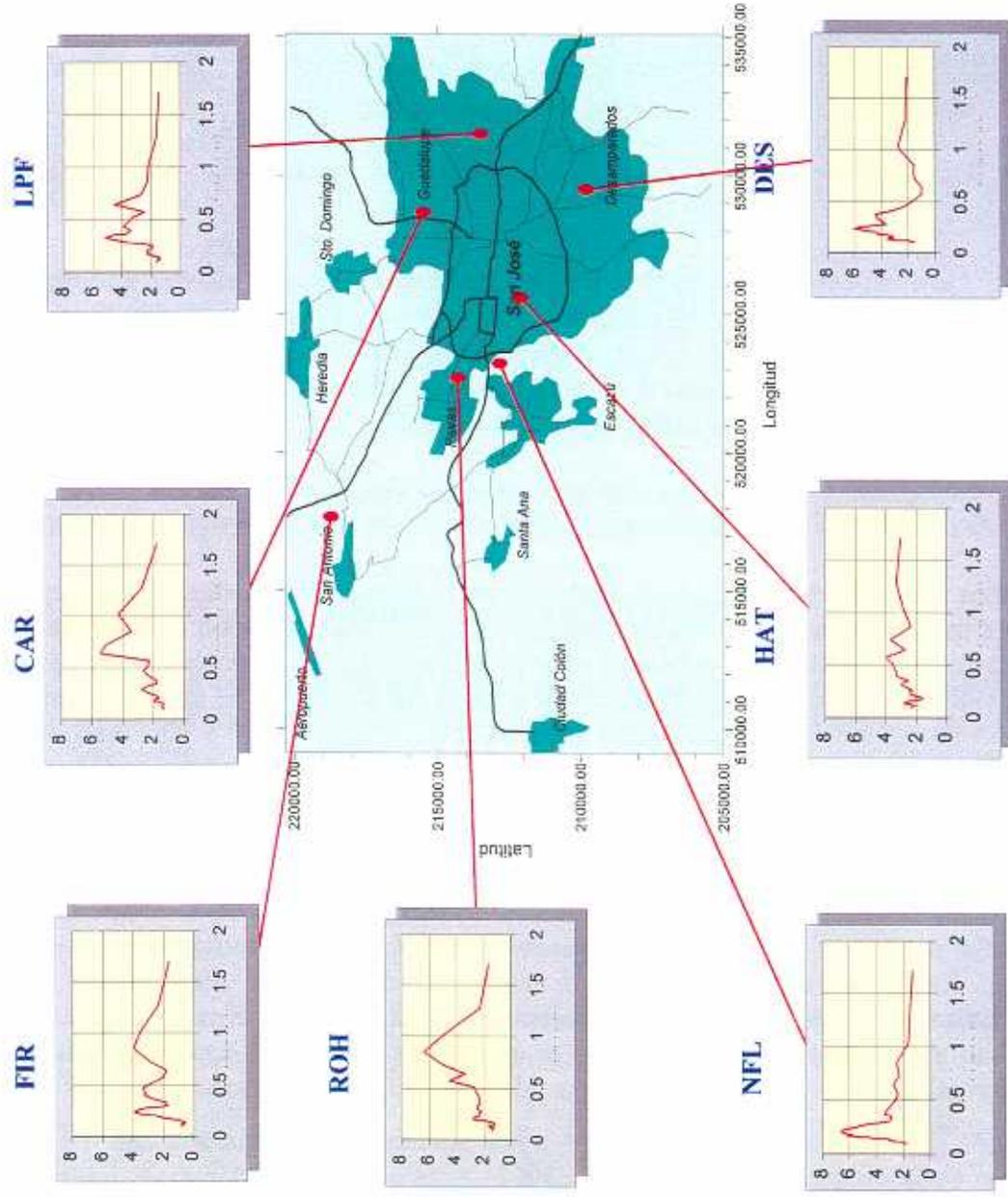


Fig. IV-8. Efectos de sitio determinados usando la técnica de la razón espectral de la componente horizontal contra la vertical.

el espectro promedio de las señales de ruido.

En la Figura. IV-9 se muestra el resultado de los análisis realizados a las señales de ruidos. Estos muestran, al contrario de las dos técnicas anteriores, periodos predominantes claramente identificables y que se encuentran entre los 0,2 y 0,4 segundos y siempre menores a 0,5 segundos. No aparece como en los casos anteriores, amplitudes importantes a 1 seg. Al igual que en otras investigaciones (Coutel y Mora, 1998) los periodos fundamentales identificados son sistemáticamente menores con ruido que con sismos. Los niveles de amplificación obtenidos con ruido son menores que los calculados con sismos

Según Lermo y Cháves-García (1994), sus resultados muestran que las medidas de microtemores pueden ser utilizadas para estimar el periodo predominante en un sitio con aceptable confiabilidad en el rango de 0,3 a 5 Hz (0,2 a 3,3 seg.). Este rango es un poco más amplio hacia el lado de las frecuencias altas, según Raptakis *et al.* (1998) entre 0,4 y 20 Hz (0,05 a 2,5 seg.) y según Mucciarelli (1998) este rango se ubica entre 1 y 10 Hz (0,1 a 1,0 seg.) Lo anterior indica que la técnica de microtemores trabaja bastante bien en el rango de las frecuencias altas.

4.3.4 Mapa de isoperiodos

Considerando el hecho de que los resultados obtenidos con registros sísmicos y con ruido fueron bastante similares en lo que respecta a la identificación del periodo fundamental, el Laboratorio de Ingeniería Sísmica (INII-UCR) realizó mediciones de ruido a distancias aproximadas de un kilómetro entre una medición y otra, en toda el área de estudio. Esto con el fin de determinar el periodo fundamental de cada punto, interpolar los resultados y realizar un mapa de zonificación sísmica con base en isoperiodos.

Un total de 185 puntos fueron seleccionados de forma tal que estuvieran regularmente espaciados y que fueran de fácil acceso. La cobertura de la malla no comprende la parte suroeste del Area Metropolitana debido a la presencia de los Cerros de Escazú. Las mediciones se realizaron durante los meses de febrero y marzo de 1999, todas ellas durante el día. En cada punto designado, se utilizó un acelerógrafo del tipo ETNA, de Kinematics y se tomaron de 3 a 4 mediciones de 1 minuto cada una con intervalos de 2 a 3 minutos entre ellas.

Para el análisis se utilizaron los primeros y los últimos 15 segundos de cada señal por sitio. De esta forma, cada punto contó con un promedio de 6 registros por componente (NS y EW) de los cuales se tomó el promedio vectorial de las componentes horizontales. Este vector fue entonces dividido por la componente vertical para obtener un cociente espectral y determinar así el periodo fundamental.

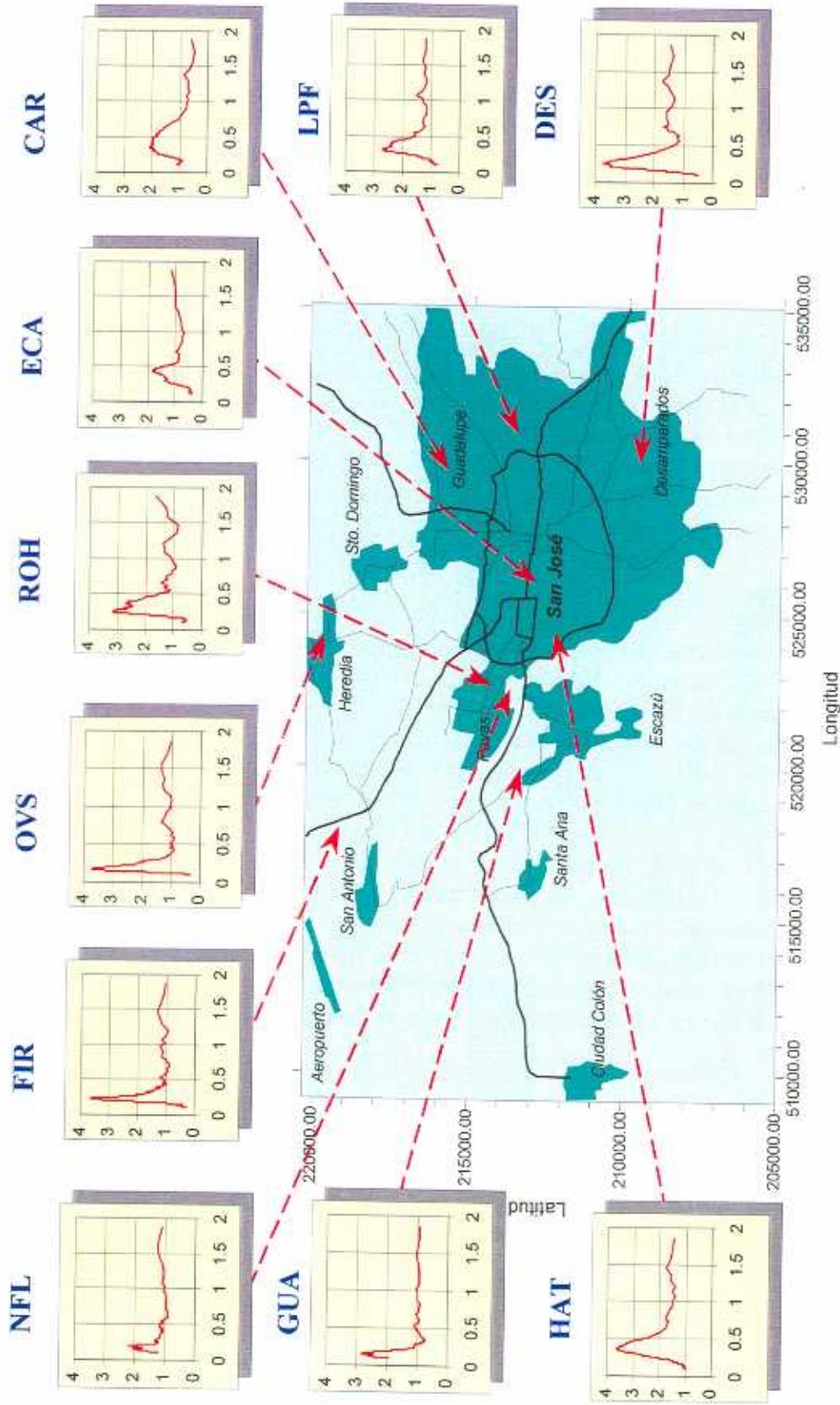


Fig. IV-9. Efectos de sitio determinados a partir de ruido ambiente para el área de estudio. Todos los resultados muestran la amplitud en función del periodo (segundos). Se incluye el resultado para las estaciones SSA.

La Figura IV-10 muestra la distribución de los puntos junto con el valor correspondiente al periodo identificado. El rango de los periodos fundamentales varía desde 0,08 hasta 0,4 segundos. En general se puede observar que existe una ligera tendencia hacia periodos más altos en la parte noreste del Area Metropolitana, mientras que la zona oeste presenta periodos más bajos. En el primer caso (periodos altos) esta observación concuerda con la distribución de los espesores de los sedimentos que es mayor al noreste del Area Metropolitana (Santo Domingo de Heredia y alrededores).

Los periodos bajos encontrados al suroeste son probablemente debidos a que en esta zona afloran lavas a lo largo de los cañones de diversos ríos (Guzmán, 1999), lo que indica que la roca se encuentra a poca profundidad. Todo esto se refleja mucho mejor una vez que los puntos son interpolados. El resultado de la interpolación se muestra en la Figura. IV-11. De esta figura se ve claramente, además de lo descrito anteriormente, que algunas zonas de La Sabana (Parque Metropolitan) y Curridabat presentan periodos altos bastante localizados.

4.4 CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados obtenidos por medio de la técnica empírica utilizando sismos, se ha observado que la amplificación espectral en el Area Metropolitana de San José, se encuentra en un rango cuyos factores varían entre 2 y 3, y que la frecuencia fundamental varía de un lugar a otro en un rango de 1 a 5 Hz. De especial interés fue la estación DES en la que la amplificación relativa fue cercana a uno, siendo éste el valor mínimo encontrado para el Area Metropolitana, utilizando la técnica de RESR. Simulaciones numéricas que tomen en consideración efectos de 2D y 3D necesitan llevarse a cabo para entender mejor esta condición.

Atakan *et al.* (1997) utilizando la técnica de REHV y RERA con un grupo de sismos en Islandia, obtuvieron una muy buena correlación no solamente para las frecuencias fundamentales sino también para los niveles de amplificación. En nuestro caso, no fue posible obtener una buena correlación entre los niveles de amplificación para los lugares estudiados, pero sí en el caso de los periodos o frecuencias predominantes. De acuerdo con los resultados de este estudio, la amplificación determinada con la RERA es más baja que la dada por sismos.

El mapa de isoperiodos obtenido en el presente estudio muestra que existen dos grandes áreas claramente diferenciadas entre ellas: una de periodos más largos ubicada en la región noreste y la otra al sur y oeste de San José que es de periodos cortos. Por otro lado, debe quedar claro el hecho de que el mapa obtenido fue elaborado a partir de puntos de medición espaciados aproximadamente cada kilómetro. Variaciones puntuales inferiores a este espaciamiento son por supuesto omitidas por la interpolación de los resultados de los puntos examinados.

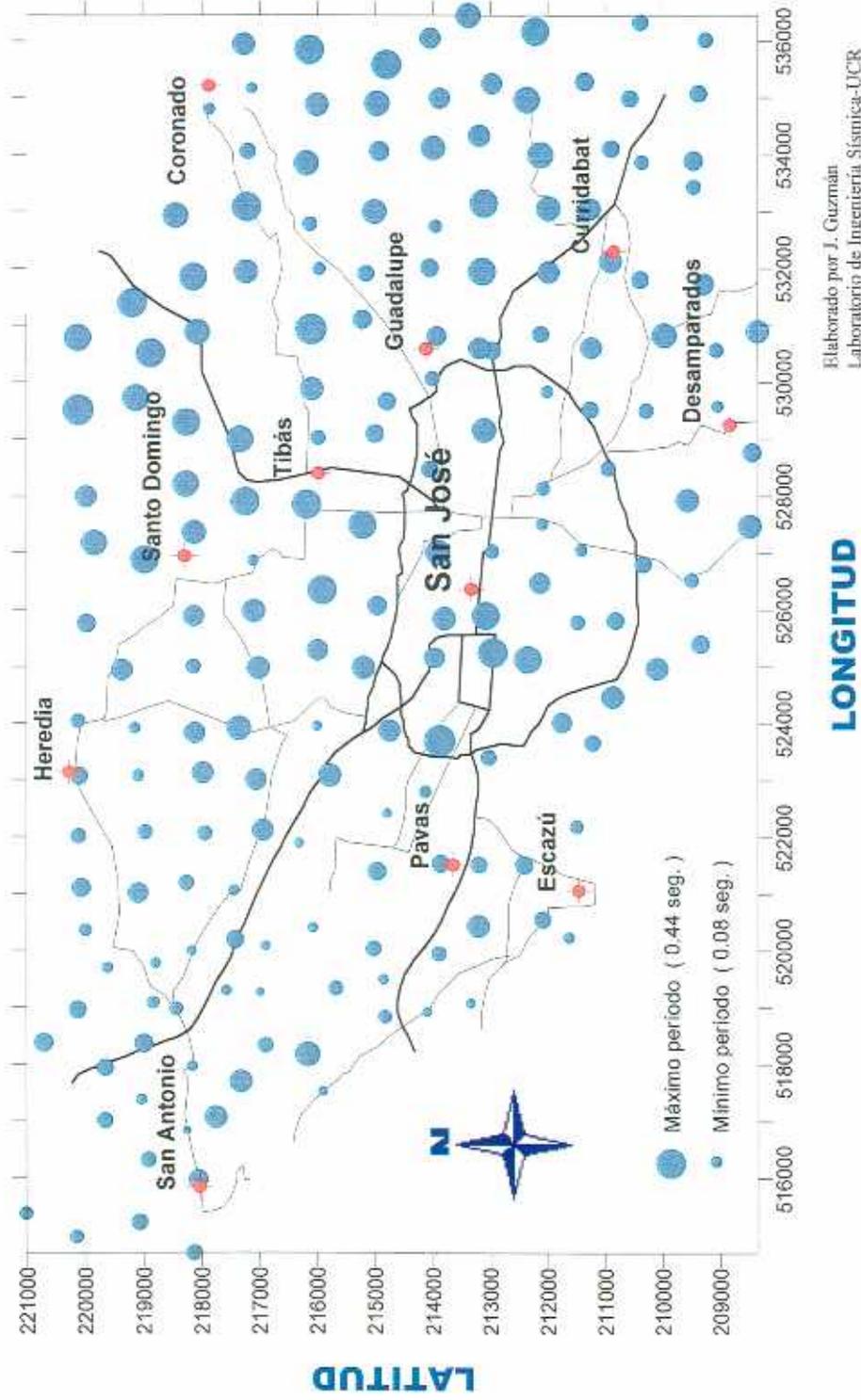


Fig. IV-10 Distribución de los puntos de medición junto al periodo fundamental identificado (Guzmán, 1999).

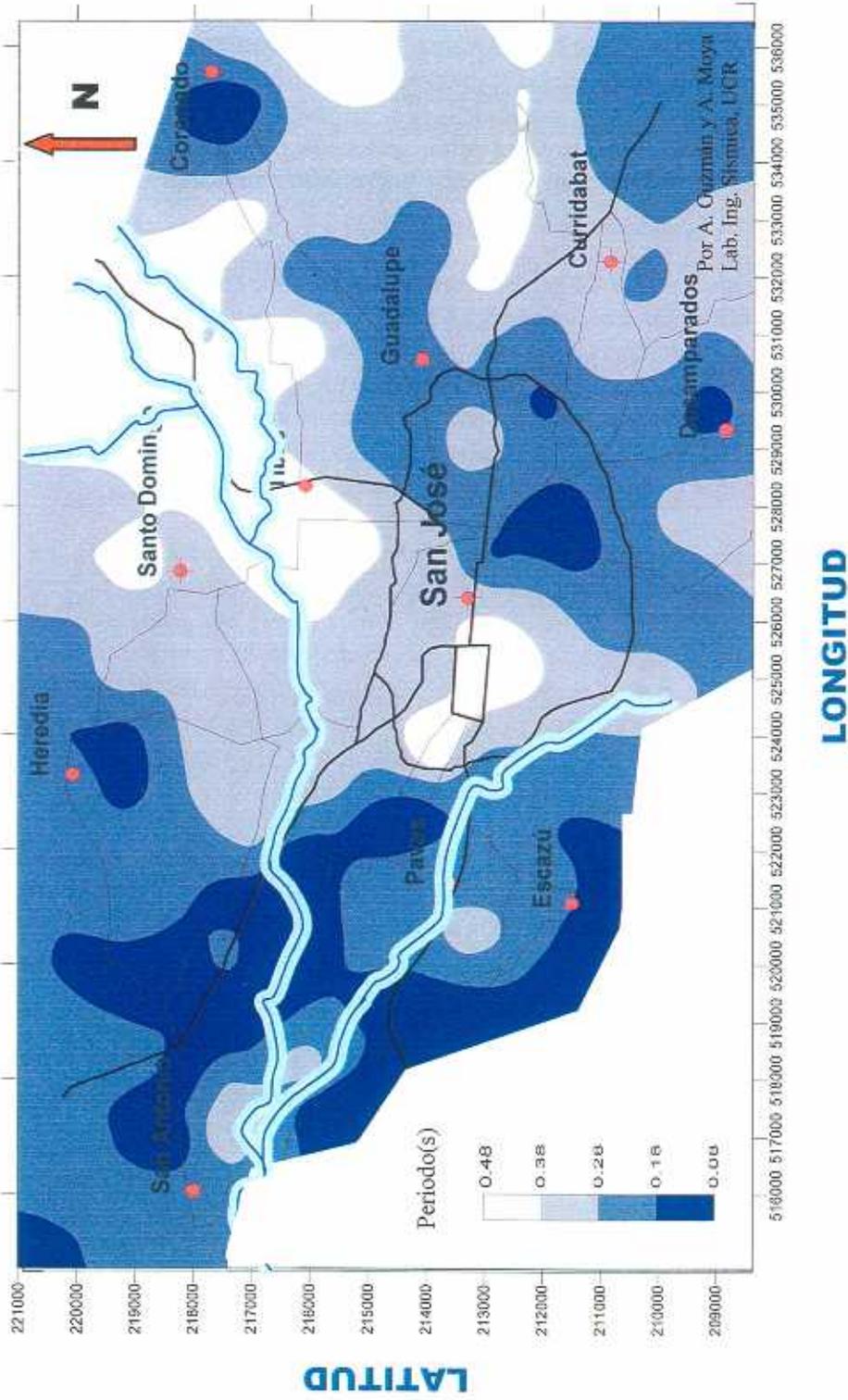


Fig. IV-11. Mapa de isoperiodos para el Área Metropolitana de San José. Se muestran los ríos Virilla (Norte) y Tiribí (Sur). Tomado de Guzmán (1999).

Por otra parte, el mapa fue estimado a partir de registros de ruido llevados a cabo durante el día. En este sentido, la contribución del ruido generado por la actividad humana puede que haya tenido algún peso en la estimación del mapa. Sería conveniente que nuevas mediciones se llevaran a cabo en horas de la noche y durante la estación lluviosa y ver los efectos tienen estos factores sobre los actuales resultados. Sin embargo, ha sido observado en trabajos recientes (Mucciarelli, 1998) que, tanto el ruido generado por tráfico, como las señales registradas en la noche o en el día, no producen variaciones importantes en las respuestas observadas.

Se considera que el número de sitios de registro utilizados en este estudio, así como la localización de cada uno de ellos, no son suficientes para llegar a tener un panorama completo de la variación de la amplificación sísmica en el Area Metropolitana de San José, pero permiten tener un conocimiento general de la posible respuesta dinámica cada vez que un evento sísmico ocurra en el país. Muchos estudios han confirmado la variabilidad de los efectos de sitio de un lugar a otro (Gagnepain-Beyneix *et al.*, 1995) incluso en arreglos de estaciones que se encuentran bastante cercanas entre ellas (Hartzell *et al.*, 1994)

La amplificación observada en NFL podría ser causada por una combinación de efectos de sitio y topografía. La estación se encuentra ubicada cerca del borde de un cañón, el cual alcanza profundidades de entre 60 y 70 m. Pedersen *et al.* (1994) han estudiado los efectos de amplificación debidos a la topografía y han encontrado que la contribución de los sedimentos es comparativamente mayor y que existe amplificación en las crestas de montañas y bordes de cañones. Ligorria y Atakan (1997) en un estudio llevado a cabo para la Ciudad de Guatemala, han señalado el efecto de topografía como el responsable de la amplificación observada en un sitio de roca ubicado cerca de un cañón

Los resultados presentados deben ser corroborados cuando se registren eventos fuertes, asimismo se considera conveniente llevar a cabo estudios similares utilizando un mayor número de instrumentos para formar una red más densa en el área de estudio.

4.6 REFERENCIAS

Atakan, K., 1995: A review of the type of data and techniques used in the empirical estimation of local site response, in *Proceedings of the Fifth International Conference on Seismic Zonation* Oct. 17-19, Nice, France, 1451-1460.

Atakan, K., B. Brandsdottir, P. Halldorsson y G. O. Fridleifsson., 1997: Site response as a function of near-surface geology in the South Iceland Seismic Zone, *Natural Hazards*, Vol 15, 139 - 164.

Borcherdt, R. D., 1970: Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 60, 29-61.

- Bourd, M., D. Fouissac, P. Dominique, y C. Martin, 1998: On the use of microtremor recordings in seismic microzonation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 17, 465-474.
- Chávez-García, F. J., G. Pedotti, D. Hatzfeld, y P. Y. Bard., 1990: An experimental study of site effects near Thessaloniki (Northern Greece), *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 80, 784 - 806.
- Chávez-García, F. J., L. R. Sánchez, y D. Hatzfeld., 1996: Topographic site effects and HVSR. A comparison between observation and theory, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 86, 1559 - 1573.
- Coutel, F. y P. Mora., 1998: Simulation-based comparison of four site-response estimation techniques, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol 88, 30 - 42.
- Cramer, C. H., 1995: Weak-motion observations and modelling for the Turkey Flat, U.S., site-effects test area near Parkfield, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 85, 440 - 451.
- Gagnepain-Beyneix, J., J.C. Lépine, A. Nercessian, y A. Hirn., 1995: Experimental study on site effects in the Fort-de-France area (Martinique Island). *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 85, 478 - 495.
- Guzmán, J., 1999: Comportamiento dinámico en suelos del Area Metropolitana de San José utilizando técnicas empíricas. Informe final de Trabajo de Graduación para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. San José.
- Hartzell, S.H., D.L. Carver, y K.W. King. (1994) Initial investigation of site and topographic effects at Robinwood Ridge, California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 84, 1336 - 1349.
- Huang, M., 1982: On the characteristics of 3-dimensional ground motion, in *Proceedings of the 2nd International Conf. on Earthquake Microzonation*, Vol. 2, Seattle, Washington, 435 - 446.
- Iwata, T. y K. Irikura., 1986: Source parameters of the 1983 Japan Sea Earthquake sequence. *J. Phys. Earth*, Vol. 36, 155 - 184
- Jarpe, S. P., C. H. Cramer, B. E. Tuchker, y A. F. Shakal., 1988: A comparison of observations of ground response to weak and strong ground motion at Coalinga, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 78, 421- 435.
- Konno, K. y T Ohmachi., 1998: Ground-Motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 88, 228-241.

Lachet, C., D. Hatzfeld, P.-Y. Bard, N. Theodulidis, C. Papaioannou, and A. Savvaidis., 1996: Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki (Greece) comparison of different approaches, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 86, 1692 - 1703.

Lermo, J. y F.J. Chávez-García., 1993: Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 83, 1574 - 1594.

Lermo, J. y F.J. Chávez-García., 1994: Are microtremors useful in site response evaluation? *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 84, 1350 - 1364.

Ligorria, J. P. y K. Atakan., 1997: Empirical site response estimation in Guatemala City, Proceedings of the seminar on Assessment and Mitigation of Seismic Risk in the Central American Area, San Salvador, El Salvador, Sept. 22-27, 141-156.

Moya A., V. Schmidt, C. Segura, I. Boschini y K. Atakan., 1998: Empirical evaluation of site effects in the Metropolitan Area of San José, Costa Rica. *Technical Report No. II 1-09*. University of Bergen.

Mucciarelli, M., 1998: Reliability and applicability of Nakamura's technique using microtremors: an experimental approach. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 2, No. 4, 625-638.

Nakamura, Y., 1989: A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *QR Railway Tech. Res. Inst.*, 30, 25 - 33.

Pedersen, H., B. Le Brun, D. Hatzfeld, M. Campillo, y P.Y. Bard., 1994: Ground motion amplitude across ridges, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 84, 1786 - 1800.

Raptakis, D., N. Theodulidis, y K. Pitilakis, 1998: Data Analysis of the Euroseistest strong motion array in Volvi (Greece): standart and horizontal-to-vertical spectral ratio techniques. *Earthquake Spectra*, Volume 14, No. 1, 203-224.