

Capítulo 2

Estimación de la Amenaza Sísmica

*Red Sismológica Nacional, ECG-UCR
Instituto Costarricense de Electricidad, ICE*

RESUMEN

Con la participación de diferentes instituciones involucradas en el tema, se desarrolló un modelo sismo-tectónico del país y mediante el proceso en computadoras se integró la información sísmológica, tectónica y de atenuación de las señales sísmicas en la región para obtener los mapas de amenaza sísmica para el Area Metropolitana de San José. Dicho análisis considera zonas sísmicas y fallas activas, cada una caracterizada por parámetros de recurrencia sísmica, geometría, magnitud máxima y mínima y la profundidad. Se ha aplicado en este estudio un reciente modelo local de atenuación espectral, cuyas relaciones permiten analizar terremotos de fallas superficiales de la corteza continental y de la zona de subducción. Este estudio incluye un área de 20x15 km en donde se concentra la mayoría de la población y las actividades socioeconómicas del país, desde San Antonio de Belén a Tres Ríos (W-E) y desde Heredia hasta Aserrí (N-S).

La amenaza sísmica resultante se presenta mediante un ploteo de los valores de aceleración máxima horizontal del suelo (PGA) en condiciones de lecho rocoso, para periodos de retorno de 50, 100 y 500 años, así como los correspondientes espectros de respuesta. En el Parque Central de San José se encontraron los siguientes valores de PGA de $2,9 \text{ m/s}^2$ para 50 años, $3,5 \text{ m/s}^2$ para 100 años y $5,2 \text{ m/s}^2$ para 500 años. Estos valores indican que el grado de amenaza sísmica en el área es moderadamente alto. Se espera que estos resultados contribuyan al mejoramiento y actualización del código sísmico, así como a los planes de desarrollo urbano del Area Metropolitana.

2.1 INTRODUCCION

El avance en el proceso de localización de los eventos sísmicos y el mejoramiento en el conocimiento de la tectónica local y de las fallas activas en la parte central de Costa Rica, hace posible correlacionar de una forma más precisa sismos y fallas y estimar de una manera más confiable la amenaza sísmica.

Para este tipo de estudios se ha generalizado el uso de métodos de estimación probabilísticos, los cuales representan la amenaza por medio de diferentes niveles de aceleración sísmica asociados con una determinada probabilidad de excedencia o periodo de retorno.

Dos estudios regionales de amenaza han sido realizados anteriormente para Costa Rica, uno por la Universidad de Stanford (Mortgat *et al.*, 1977) y el otro por Laporte *et al.* (1994). El primero fue incorporado y es actualmente utilizado en el Código Sísmico vigente del país (Gutiérrez, 1986). El segundo, consideramos que representa mejor el conocimiento existente en 1994 de la tectónica y sismicidad del país y por lo tanto indica mejor el grado de amenaza o exposición sísmica en todo el territorio nacional.

Se presenta en este capítulo un resumen de los resultados obtenidos por Rojas *et al.* (1998) en el reporte *Seismic Hazard Analysis for the Metropolitan Area of the Central Valley, Costa Rica*. Este estudio presenta nuevos aportes a este tipo de estimaciones en el país, al emplear en los modelos de cálculo, eventos sísmicos actualizados a 1997 y

mayores a 2,3 M_w , así como la incorporación del conocimiento reciente de las fallas locales activas y tratadas como tales en el cálculo (Capítulo 2) También el uso del más reciente modelo de atenuación de las ondas sísmicas para Costa Rica (Schmidt *et al.*, 1997) y la aplicación del “árbol de lógica” para la consideración de la incertidumbre de los parámetros dentro del proceso de cálculo.

2.2 METODOLOGIA

La metodología probabilística de amenaza considera como elemento básico la estadística de la frecuencia de ocurrencia de los eventos sísmicos, su relación con la tectónica, las fuentes sísmicas y la característica de atenuación de las ondas sísmicas en una región determinada. Una explicación amplia y completa de esta metodología puede ser encontrada en Cornell (1968), McGuire (1976), Reiter (1991), Giardini y Basham (1993), Laporte *et al.* (1994), Laporte *et al.* (1995), Krinitzky (1995) y Rojas *et al.* (1998) entre muchos otros. Esta metodología asume que:

- la ocurrencia de eventos que exceden un nivel específico siguen una distribución de Poisson;
- los eventos son independientes entre ellos temporal y espacialmente;
- el modelo de recurrencia sísmica sigue la relación de Gutenberg y Richter (1954).

Para efectos de cuantificar e integrar todas las variables que participan en la estimación de la amenaza, se utilizó el programa NPRISK (NORSAR, 1999) el cual fue desarrollado con base en el programa PRISK (Woo, 1985) que toma como punto de partida los programas EQRISK (McGuire, 1976) y FRISK (McGuire, 1978), incorporándoles el análisis probabilístico de incertidumbre de los principales parámetros que participan en la estimación, esto último por medio de la metodología de árbol de lógica.

La metodología probabilística de estimación de la amenaza sísmica fue inicialmente desarrollada por Cornell (1968), y en forma simplificada sigue los siguientes pasos (Fig. 4. en la Introducción).

a) Definición de las fuentes sísmicas.

Corresponde en este paso, preparar una zonificación sísmica que represente el régimen sismotectónico de una región. Esta se realiza por medio de la delimitación de zonas o áreas fuente, las cuales están regidas por el mismo proceso de producción de sismos, y de fuentes definidas como fallas. La metodología y la mayoría de los programas de cálculo utilizados requieren que las fuentes sísmicas sean definidas geoméricamente, en este caso como áreas y fallas en tres dimensiones.

b) Recurrencia sísmica para cada área fuente.

Para calcularla se utiliza la relación frecuencia-magnitud propuesta por Gutenberg y Richter (1954), la cual es expresada como una relación lineal entre los logaritmos, de las frecuencias de ocurrencia y las magnitudes, y cuya expresión matemática esta dada por:

$$\log N = a - b \cdot M \quad (1)$$

donde N es el número de sismos que exceden magnitudes mayores a una magnitud M , a es una constante relativa a la actividad sísmica y que puede variar de acuerdo con el tamaño del área seleccionada y con el periodo de tiempo utilizado, b es una constante que caracteriza la distribución de magnitudes y que se denomina también "índice de sismicidad".

La relación frecuencia-magnitud permite cuantificar y caracterizar la actividad de cada área-fuente o falla geológica, estimando la frecuencia en el tiempo con que esa fuente va a generar sismos de diferentes magnitudes. La buena estimación de estas constantes definirá la confiabilidad de los resultados obtenidos por un estudio de amenaza sísmica. En este caso, el catálogo sísmico utilizado es la herramienta base de la cual se puede definir un modelo de ocurrencia espacial y temporal.

c) Definición de la atenuación de la señal sísmica

Cuando ocurre un evento sísmico en una fuente determinada, el efecto que la señal sísmica puede tener sobre un sitio o estructura determinada es obtenido por medio de la ley o relación de atenuación sísmica que rige una región. Esta ley relaciona el parámetro de aceleración del suelo con la distancia y magnitud de un terremoto específico. Actualmente hay una buena cantidad de ecuaciones que reflejan el patrón de atenuación de diferentes regiones a nivel mundial. Sin embargo, el uso de ellas debe ser visto con cautela y se recomienda, inicialmente, utilizar ecuaciones que hayan sido desarrolladas en los propios países y en el caso de no existir estas, utilizar aquellas que representen mejor el contexto sismotectónico a evaluar. En el caso de América Central se dispone de varias ecuaciones (Climent *et al.*, 1994; Dahle *et al.*, 1995; Schmidt *et al.*, 1997; Schmidt *et al.*, 1998), las cuales fueron desarrolladas a partir de un modelo matemático expresado de la siguiente forma:

$$\ln A = c_1 + c_2 \cdot M + c_3 \ln r + c_4 r + c_5 S + \ln \varepsilon, \quad (2)$$

donde A es la aceleración horizontal pico del suelo (m/s^2); c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , and c_5 son los coeficientes obtenidos por medio de la regresión; M es la magnitud momento; r es la distancia hipocentral; S es la variable relacionada al tipo de sitio (roca o suelo) y $\ln \varepsilon$ es el error de estimación. Los valores para los coeficientes pueden ser vistos en el trabajo de Schmidt *et al.* (1998).

2.3 INTEGRACION DE LA AMENAZA PARA EL SITIO DE INTERES

En este caso, los efectos de todos los terremotos de distintas magnitudes, ocurriendo a varias distancias en diversas zonas sísmicas y con diferentes probabilidades de ocurrencia, son integrados en una curva que muestra la probabilidad de excedencia de diversos niveles de aceleración en el sitio de interés durante periodos específicos de tiempo (Reiter, 1991). Para realizar este paso se empleó el programa NPRISK (NORSAR, 1998).

En la integración y estimación de la amenaza se realizó una zonificación sísmica (Rojas *et al.*, 1998) con base en el conocimiento actual de la geología estructural, neotectónica, sismicidad histórica e instrumental, patrones de fallamiento y fallas activas, elementos que fueron descritos en el Capítulo 1. Esta zonificación incluye zonas o áreas sísmicas (Fig. I-2), cuyos parámetros están resumidos en las Tablas II-1 y II-2 que representan condiciones sísmicas y tectónicas particulares. Solo se incluyeron las fuentes de subducción y de fallamiento superficial ya que los eventos de subducción profunda (mayores a 200 km), se consideró que aportaban poco en el valor de la amenaza para esta área.

Tabla II-1. Parámetros de la actividad sísmica para cada área fuente utilizada en el análisis. ZN: número de zona, N: número anual de sismos de magnitud mayor a 4,5 Mw. Valores *a* y *b* son los índices sísmicos de cada zona sísmica. Mag.: valor medio probable de máxima magnitud que podría generar la fuente sísmica.

ZN	Nombre de la zona	N (Mw >4,5)	<i>b</i>	<i>a</i>	Mag. (Mw)	Profundidad de la fuente (km)
1	Península de Nicoya	2,7542	0,88	4,4	7,7	0 – 40
2	Golfo de Nicoya	1,4125	0,74	3,48	7,1	0 – 40
3	Quepos – Sierpe	2,4266	0,93	4,57	6,8	0 – 40
4	Osa – Golfito	2,5409	0,71	3,60	7,4	0 – 35
5	Valle Central	0,1241	0,96	3,77	6,5	2 – 15
6	Tárcoles – Barranca	0,2065	0,61	2,06	7,0	2 – 15
7	Puriscal – Virilla	0,4953	0,78	3,26	6,1	2 – 15
8	Candelaria	0,1798	0,85	3,08	7,0	2 – 15
9	Jaris – Corralillo	0,2065	0,83	3,05	6,8	2 – 15
10	Escazú – Guarco	0,0865	0,83	3,31	6,5	1 – 15
11	Turrialba – Atirro	0,1758	0,63	2,08	6,5	2 – 15
12	Pérez Zeledón	1,2735	0,83	3,84	6,2	4 – 15
13	Limón – Changuinola	1,9054	0,74	3,61	7,7	5 – 25
14	Intraplaca Norte	1,5310	0,85	4,01	7,2	40 – 200
15	Intraplaca Cental	1,4125	0,88	4,11	7,2	40 – 125

Para efectos del programa es necesario desarrollar primero un árbol de lógica que integra todos los parámetros que van a contribuir en la evaluación de la amenaza, y cuyas principales variables sismológicas y geológicas son distribuidas discretamente, según el árbol, y se les asigna un peso o nivel de confianza de acuerdo con criterio de experto. El programa NPRISK desarrolla el árbol de lógica en función de variabilidad de la ecuación de atenuación, magnitud máxima, profundidad focal, geometría de la fuente, valor de b y la tasa de actividad sísmica. Más información sobre los árboles de lógica y su uso en los estudios de amenaza sísmica pueden ser consultados en Kulkarni *et al.* (1984), Coppersmith *et al.* (1986), Bender (1993), Laporte *et al.* (1994) y Rojas *et al.* (1998).

Un elemento novedoso en el análisis fue la inclusión de las principales fallas activas del Valle Central como tales y no como delgadas áreas fuente (como tradicionalmente se consideraban). En este sentido el aporte de cada una de ellas en el cálculo final de la amenaza es importante. Para las fallas modeladas, el rango de profundidad fue considerado entre 0-15 km en la mayoría de los casos. No hay evidencia disponible que indique fallas corticales profundas en el territorio de Costa Rica.

Para cada una de las fuentes (áreas o fallas), se calcularon los índices de sismicidad y la tasa de ocurrencia anual de eventos con magnitud mayor a 4,5 (M_w) que fue el valor límite inferior escogido para el cálculo. Toda la estimación fue basada en el catálogo sísmico preparado para Centroamérica por Rojas (1993), que cubre tanto la información histórica como los datos instrumentales recientes. Con base en ese catálogo se preparó un banco de datos específico para Costa Rica, se incluyó la sismicidad a partir de 2,3 (M_L) y se actualizó hasta el año 1997 (Rojas *et al.*, 1998). Además, todos los valores de diferentes tipos de magnitudes reportadas fueron homogenizados a la magnitud del momento sísmico (M_w).

2.3.1 Aporte del fallamiento activo en la liberación de energía del momento sísmico total.

Los resultados del análisis de la energía del momento sísmico que pueden liberar las fallas activas del Valle Central se muestran en la Tabla II-3. Se incluyeron en el análisis los sistemas de fallas mostradas en la Figura I-2 y Tabla II-2. Se determinaron diferencias en el momento de relajación generado por fuentes sísmicas individuales (zonas sísmicas y fallas) y el momento generado regionalmente. La energía del momento sísmico acumulado en las fallas fue modelado con base en las observaciones de las dimensiones de las fallas, y estimaciones del deslizamiento.

Tabla II-2. Principales parámetros para las fallas modeladas en el análisis de amenaza. F.Sist.: sistema de falla, F. seg.: segmento de falla, HD: distancia horizontal de la proyección de la falla en km, N (4,2): recurrencia anual de temblores de magnitud 4,2 Mw, b: índice de sismicidad, FL: longitud de la falla en km, FD: profundidad de la falla, F.Dip: inclinación de la falla en grados, Max.Mw: máxima magnitud del momento sísmico, Sr: deslizamiento anual de la falla en mm/año, μ : módulo de cizalla en gr/cm², Rec: recurrencia sísmica en años para Mw 6,0 y 6,5.

F.Sist.	F.Seg.	HD (km)	N (4,2)	b	FL (km)	FD (km)	Fdip (°)	Max. Mw	Sr mm/año	μ	Rec. 6,0 - 6,5 (años)
F. Lara	Lara	2,6	0,0854	0,83	18	15	80°SW	6,3	4,0	$0,197 \times 10^{12}$	371 - 950
	Rancho	1,3	0,0782	0,83	08	15	85°NW	5,8	4,0	$0,197 \times 10^{12}$	
	Dorita	1,3	0,0854	0,83	09	15	85°SW	6,0	4,0	$0,197 \times 10^{12}$	
	Laguna	1,3	0,0854	0,83	09	15	85°SW	6,0	4,0	$0,197 \times 10^{12}$	
Escazú-Aserri	Escazú	2,63	0,1023	0,83	10	15	80°NE	5,8	4,0	$0,283 \times 10^{12}$	310
	Alajuelita	00	0,1023	0,83	09	12	Vertical	5,8	4,0	$0,283 \times 10^{12}$	
	Higuito	2,6	0,1023	0,83	11	15	80°NE	5,8	4,0	$0,283 \times 10^{12}$	
F. Agua-caliente	Tablazo	2,11	0,1023	0,83	08	12	80°NE	5,5	4,0	$0,283 \times 10^{12}$	260 - 683
	Coris	2,6	0,1186	0,83	12	15	80°NE	6,2	4,0	$0,283 \times 10^{12}$	
	Paraiso	4,02	0,1186	0,83	18	15	75°NE	6,3	4,0	$0,283 \times 10^{12}$	
F. Alajuea	Grecia	14,0	0,1186	0,83	11	12	35°N	6,0	4,0	$0,197 \times 10^{12}$	260 - 683
	Itiquis	12,8	0,1186	0,83	17	12	40°N	6,2	4,0	$0,197 \times 10^{12}$	
Virilla	Virilla	1,76	0,075	0,73	08	10	Vertical	6,0	4,0	$0,283 \times 10^{12}$	330

Tabla II-3. Momento sísmico para las fuentes sísmicas. ZMR: momento de relajación de la zona en dinas/cm², ZE: porcentaje de contribución de la energía de la zona, F.Sist.: nombre del sistema de falla, F.Mo.R: energía del momento sísmico que se libera en cada falla en dinas/cm², FE: porcentaje de contribución relativa de la energía de la falla a la contribución de energía del área (%), FET: porcentaje de contribución de la energía de la falla a la región (%).

Zona sísmica	ZMR (dina/cm ²)	ZE (%)	F.Sist.	F.Mo.R. (dina/cm ²)	FE (%)	FET (%)
Norte del Valle Central	$0,190 \times 10^{24}$	22	Alajuela	$0,442 \times 10^{23}$	6	56
			Lara	$0,625 \times 10^{23}$	8	
Sur del Valle Central Puriscal	$0,335 \times 10^{24}$	37	Virilla	$0,362 \times 10^{23}$	5	11
Sur del Valle Central Escazú-Guarco	$0,356 \times 10^{24}$	41	Escazú-Higuito	$0,987 \times 10^{23}$	12	77
			Aguacaliente	$0,770 \times 10^{23}$	20	
Total $0,880 \times 10^{24}$		100	Total $0,418 \times 10^{24}$		51	

Se ha estimado que las fallas activas incluidas en el modelo, contribuyen con cerca de la mitad de la energía sísmica somera para la región estudiada. La otra mitad puede provenir de fallas activas aún no descubiertas. Se determinó que el momento de relajación sísmica atribuido a las fallas, contribuye con cerca del 50% del momento total de relajación dentro de la región del Valle Central. Considerando toda la longitud de las fallas activas de la Tabla II-3, se obtienen 160 km, los que divididos en 17 segmentos de 9 km, puede corresponder con un retorno (recurrencia) de tiempo de cerca de 90 años para eventos de magnitud 6,0 Mw. Sin embargo, si consideramos las fallas ciegas, estas aportarían una cantidad similar de energía, de acuerdo a lo ya expuesto. Por esa razón el tiempo de recurrencia se reduce a unos 40 años para sismos de magnitud 6,0 y esto es muy similar a lo deducido por la sismicidad histórica. De lo anterior se tiene que para el Valle Central, se dan sismos destructivos aproximadamente cada 35 años. Alvarado *et al.* (1988) estiman que un sismo de magnitud 6,5 tiene un periodo de recurrencia de 34,1 años en esta zona.

2.4 RESULTADOS

Los resultados de la estimación de amenaza se presentan en las Figuras. II-1 y II-2 los cuales se expresan en forma de contornos de isolíneas de aceleración horizontal pico (PGA) para probabilidades de excedencia anual de 2×10^{-2} , 1×10^{-2} y 2×10^{-3} para condición en roca. Para las tres probabilidades anuales, los resultados muestran un pequeño aumento en los valores al suroeste del área estudiada. En el caso de 10^{-2} , el PGA se incrementa desde cerca de $3,2 \text{ m/s}^2$ en la parte norte a $3,75 \text{ m/s}^2$ en la parte sur. El fenómeno responsable del aumento de los valores de PGA en el sur de San José son las altas tasas de actividad en las zonas sísmicas de esa área, junto con las fallas activas modeladas.

Además de los mapas de isoaceleración obtenidos para el área completa de estudio, se realizó un cálculo específico para un sitio localizado geográficamente en el Parque Central de San José. Los resultados, para condición de roca, se presentan en la Figura II-3 y la Tabla II-4. De acuerdo a ellos, se obtiene que para un periodo de retorno de 100 años el valor de aceleración es un 30% mayor al obtenido previamente por Laporte *et al.* (1994) para el mismo sitio. La razón principal para este incremento es el empleo de una nueva relación de atenuación local, el uso de la sismicidad local de magnitudes inferiores, el modelo sismo-tectónico local propuesto por el panel de expertos locales (ICE, OVSICORI, UCR, CNE) y por supuesto, el uso directo por primera vez de las fallas activas más conocidas en el área, como tales.

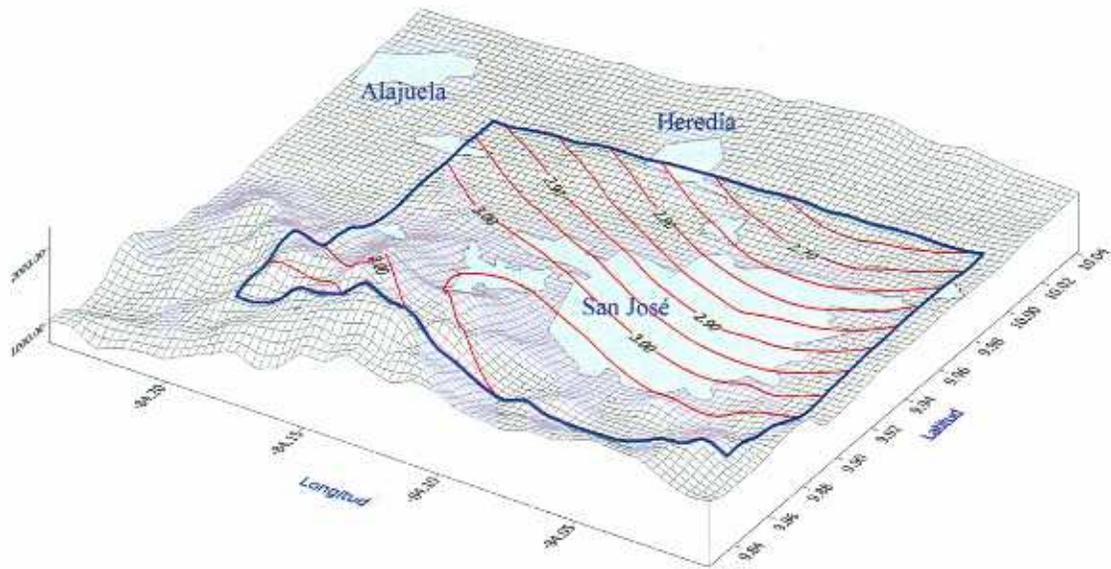


Fig. II-1. Aceleración horizontal pico esperada (m/s^2) para el área estudiada en el Valle Central. Las isolíneas representan igual valor de PGA para una probabilidad de excedencia de 2×10^{-2} .

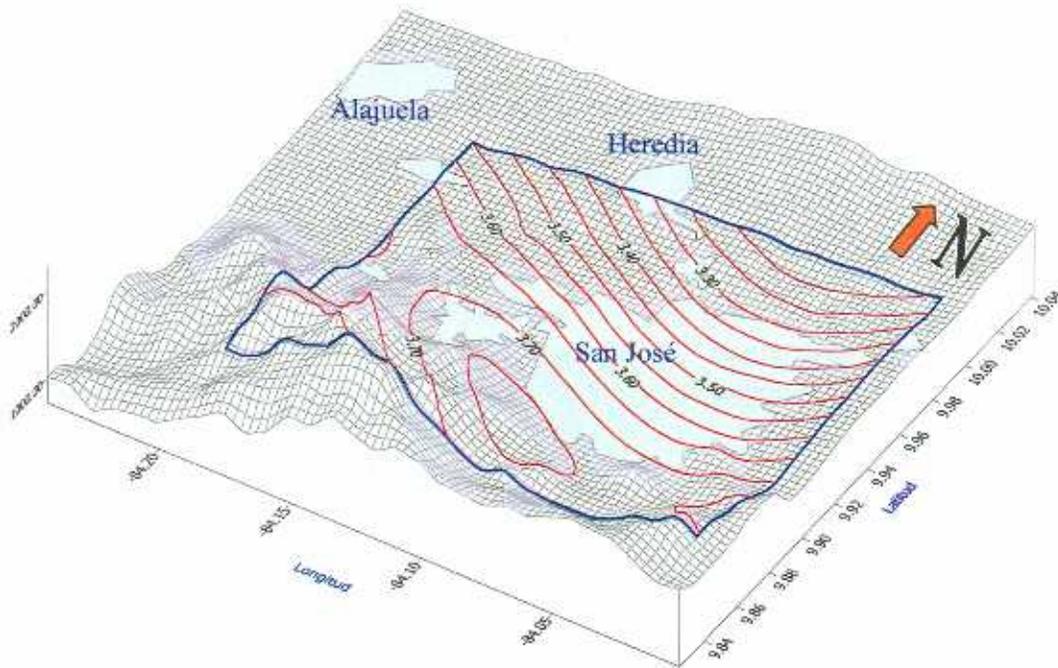


Fig. II-2a. Aceleración horizontal pico esperada (m/s^2) para el área estudiada en el Valle Central. Las isolíneas representan igual valor de PGA para una probabilidad de excedencia de 10^{-2} .

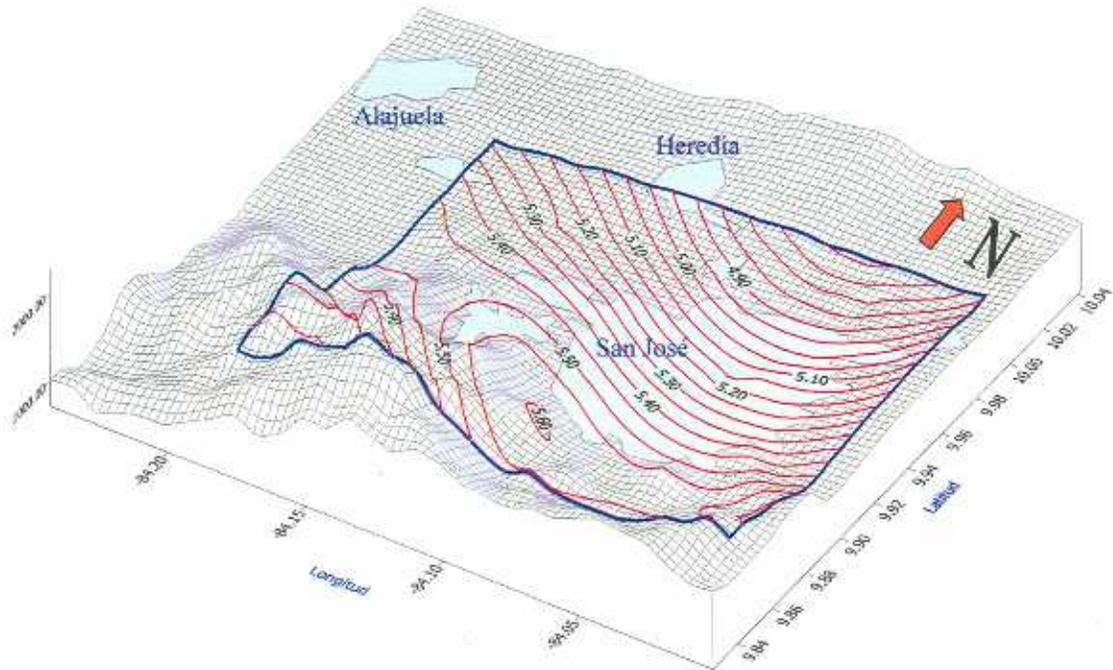


Fig. II-2b. Aceleración horizontal pico esperada (m/s^2) para el área estudiada en el Valle Central. Las isolíneas representan igual valor de PGA para una probabilidad de excedencia de 2×10^{-3} .

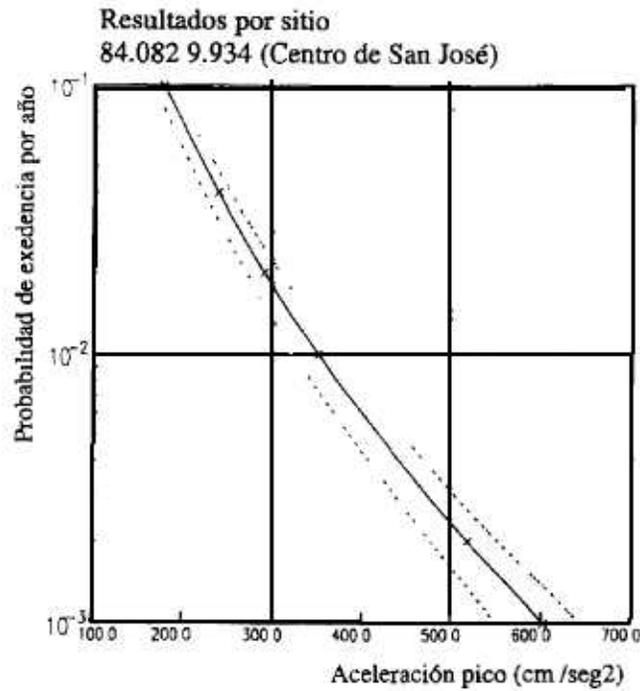


Fig. II-3. Curva de amenaza de PGA para San José. Valores calculados para sitio en roca en un periodo de retorno de 100 años.

Tabla II-4. Resultados de PGA (m/s^2) para el Parque Central de la ciudad de San José.

Periodo de retorno (años)	Aceleración máxima en roca (m/s^2)
10	1,779
25	2,387
50	2,894
100	3,508
500	5,184

Adicionalmente y como aporte directo para el uso en el campo de la ingeniería, se calcularon espectros de respuesta de amenaza uniforme (igual amenaza) para San José, para un sistema de un grado de libertad con 5 % de amortiguamiento. El espectro de respuesta de pseudo-velocidad relativa (PSV) fue obtenido calculando ordenadas espectrales de PSV para frecuencias de 0,25, 0,50, 1,0, 2,0, 5,0 y 10,0 Hz y para aceleración pico definida a 40 Hz. Los valores absolutos del espectro resultante de PSV para probabilidades de excedencia anual de 2×10^{-2} , 10^{-2} y 2×10^{-3} pueden consultarse en Rojas *et al.* (1998). En la Tabla II-5 se presentan los valores normalizados de las ordenadas espectrales (m/s) y en Figura II-4 el espectro de respuesta normalizado obtenido del promedio de los espectros calculados para San José.

Tabla II-5. Ordenadas espectrales normalizadas PSV (m/s) para roca, 5 % de amortiguamiento y probabilidades de excedencia de 2×10^{-2} , 10^{-2} y 2×10^{-3} para el Valle Central

Frecuencia (Hz)	Probabilidad anual de excedencia		
	2×10^{-2}	10^{-2}	2×10^{-3}
0,25	0,314250	0,317110	0,329437
0,50	0,550167	0,550490	0,579910
1,00	0,618336	0,623932	0,651439
2,00	0,763044	0,776490	0,787175
5,00	0,556808	0,547219	0,555733
10,0	0,262378	0,257283	0,259857
43,0	0,039039	0,039039	0,039039

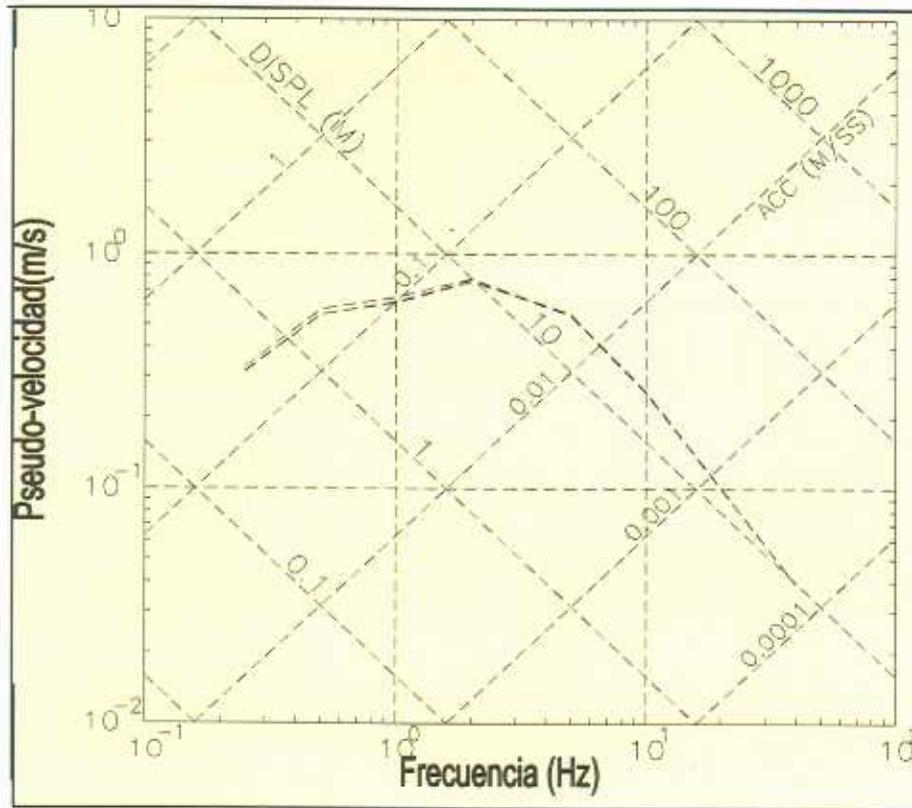


Fig. II-4. Espectro de respuesta normalizado de amenaza uniforme para el Valle Central de San José para periodos de retorno de 50, 100 y 500 años normalizado al 5% de amortiguamiento.

Para efectos de obtener el espectro para condición de suelo, las ordenadas espectrales de la Tabla II-5 deben ser multiplicadas por los factores de amplificación correspondientes de la región. Los factores de amplificación en el Area Metropolitana son discutidos en detalle en los Capítulos 4, 5 y 6.

En el estudio de Laporte *et al.* (1994) espectros de igual amenaza fueron calculados también para San José para condición de suelo. Todos los espectros calculados en ese informe presentan el valor pico de pseudo-velocidad a 1 Hz, en contraste con los resultados presentes donde el valor pico aparece a los 2 Hz. La principal razón de esta diferencia se puede asociar al uso de diferentes ecuaciones de atenuación en los estudios y al uso de un catálogo de datos actualizado con sismicidad mayor a 2,3 en magnitud.

2.5 CONCLUSIONES

La amenaza sísmica fue estimada a nivel de lecho rocoso utilizando la metodología probabilística. Los resultados indican, por ejemplo, valores de PGA para San José desde 3,2 a $3,75 \text{ m/s}^2$ para una probabilidad de excedencia de 10^{-2} (periodo de retorno 100 años). Estos valores tienden a ser bastante altos, reflejando una importante actividad sísmica

debido a la presencia de muchas fallas activas en la región de interés. Sin embargo, hay que recordar que son valores instantáneos de aceleración pico, y no dan información de la duración del movimiento fuerte ni del contenido frecuencial de la señal. También hay que considerar que en los últimos años, en distancias cercanas al epicentro se han registrado aceleraciones pico similares o mayores a las estimadas en este estudio. Por ejemplo, durante el terremoto de Piedras Negras del 22 de diciembre de 1990 ($M_1 = 5,7$) se registraron aceleraciones de $4,4 \text{ m/s}^2$ en roca a 7 km del epicentro. También es importante puntualizar que en la práctica ingenieril se utilizan cargas sísmicas efectivas de diseño, las cuales son una fracción del valor de la aceleración pico. Esta reducción se da para considerar la naturaleza temporal de la carga sísmica, ya que la aceleración pico solo actúa una fracción de segundo, y a la vez para considerar la respuesta no lineal de la estructura.

Los mayores valores de PGA fueron obtenidos para el sector Sur de San José y muestran correspondencia con la contribución de las principales fuentes sísmicas y la presencia de fallas activas someras. También esta región es topográficamente más irregular y por lo tanto más susceptible a los deslizamientos.

Fueron calculados espectros de respuesta de igual amenaza para el área central de San José, para frecuencias entre 0,25 y 40,0 Hz, los cuales indican un valor pico a los 2 Hz. El espectro normalizado es representativo para el Área Metropolitana para condición de roca. La velocidad máxima encontrada a 2,0 Hz para un probabilidad anual de excedencia de 2×10^{-3} fue de 0,42 m/s y de 0,28 m/s para un nivel de probabilidad de 10^{-2} . Estos espectros de respuesta han sido obtenidos con base en la utilización de una ecuación de atenuación espectral, por lo que estos resultados se considera serán de suma importancia para el desarrollo de espectros de diseño en el país.

En el modelaje de las fuentes sísmicas, se estudió en detalle el momento sísmico en términos de energía acumulada de cada fallamiento activo en relación con la totalidad para la región, obteniéndose un periodo de retorno de cerca de 40 años para un sismo de magnitud 6,0. Esto concuerda bien con los registros históricos que indican un periodo de retorno de 35 ± 6 años para un sismo de magnitud 6,0.

El mayor valor de índice de sismicidad, b , para las zonas sísmicas de fallamiento cortical encontrados en este estudio, es de 0,96, lo cual indica que eventos con magnitudes por encima de 6,5 es improbable que ocurran en esta zona.

Es importante indicar que el comportamiento de los movimientos sísmicos en campo muy cercano es realmente caótico y que en sitios localizados muy cerca de la falla (zona epicentral) son difíciles de pronosticar y en algunos casos estarían fuera de lo pronosticado por los resultados de este informe.

Para finalizar, es importante recalcar nuevamente que los valores de PGA obtenidos en este informe son mayores que los reportados en estudios anteriores. De aquí que es importante dejar claro que el presente estudio está basado en una cuantificación detallada del potencial sísmico de las fallas locales del Valle Central y la nueva ley de atenuación de las ondas sísmicas desarrollada para Costa Rica. El modelo utilizado en los cálculos fue revisado detalladamente tratando de evitar elementos desconocidos contribuyan en una

mala estimación de la amenaza, y está basado en algoritmos que representan el estado del arte.

2.6 REFERENCIAS

Alvarado, G., L. D. Morales, W. Montero, W. Rojas y A. Climent, 1998: Aspectos sismotectónicos y morfotectónicos en el extremo occidental de la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica. *Rev. Geol. Am. Central*, (9):75-98.

Bender, B. K. y D. M. Perkins, 1993: Treatment of parameter uncertainty and variability for a single seismic hazard map. *Earthquake Spectra*, (9):165-195.

Coppersmith, K. J. y R. R. Youngs, 1986: Capturing uncertainty in probabilistic seismic hazard assessment within intraplate tectonic environments. *Third US Natl. Conf. on Earthq. Eng.*, Earthquake Engineering Research Institute, (1):301-312.

Cornell, C. A., 1968: Engineering Seismic Hazard Analysis. *Bull. Seismic. Soc. Amer.*, (58):1583-1606.

Giardini, D. y P. Basham eds., 1993: Global Seismic Hazard Assessment Program. Instituto Nazionale di Geofisica, *Annali di Geofisica*, Special issue, UN/IDNDR. XXXVI, N. 3-4, 257.

Gutenberg B. y C. Richter, 1954: *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*. Hajner. New York.

Havskov J y C. Lindholm, 1992: *The Seisan Earthquake Analysis Software*. Institute of Solid Earth Physics University of Bergen, Bergen, Norway.

Krinitzsky, E L., 1995: Deterministic versus probabilistic hazard analysis for critical structures. *Engineering Geology* 40. 1-7.

Kulkarni, R. B., R. R. Young y K. J. Coppersmith, 1984: Assessment of Confidence intervals for results of seismic hazard analysis. *Proc. Eighth World Conf. on Earthquake Eng.* San Francisco, (1):263-270.

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

Laporte, M., R. Barquero y A. Climent, 1995: Estudio de Amenaza Sísmica para los P.H. Peñas Blancas y Laguna Hule y el P.G. Miravalles III. *Inf. Interno ICE*. 56 pp.

McGuire. R. K.. 1976: Fortran Computer Program for Seismic Risk Analysis. USGS, Open File Report. 67 pp.

McGuire, R. K., 1978: FRISK Computer Program for Seismic Risk Analysis Using Faults as Earthquake Sources. USGS, Open File Report.

NORSAR, 1998: NPRISK users guide, version 2.1, March, 1999. NORSAR PO Box 51, N-2007 Norway, 35 pp.

Reiter, L., 1991: Earthquake Hazard Analysis, Issues and Insights. Columbia University Press, New York. 254 pp.

Rojas, W., 1993: Catálogo de sismicidad histórica y reciente en América Central: desarrollo y análisis. Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica , 91 pp.

Rojas, W., H. Cowan, C. Lindholm, A. Dahle y H. Bungum, 1993b: Regional seismic zonation for Central America: A preliminar model. In: Technical Report, NORSAR, PO Box 51, N-2007 Kjeller, Norway, 40 pp.

Rojas, W., M. Fernández, M. Mora y V. Schmidt, 1997: Estudio de amenaza sísmica y peligro volcánico para el proyecto industrial INTEL, en Belén de Heredia. En: Informe particular de la Fundación para la Investigación de la Universidad de Costa Rica para la empresa FPMG Ambiental, S.J.Costa Rica, 47 pp.

Rojas, W., C. Lindholm, H. Bungum, I. Boschini, A. Climent, R. Barquero, G. Alvarado, G. Soto, W. Montero, M. Fernández, M. Protti, A. Moya, L. Esquivel y V. Schmidt, 1998: Seismic Hazard Analysis for the Metropolitan Area of the Central Valley, Costa Rica. Technical Report, Norsar, Norway, 45 pp.

Schmidt, V., A. Dahle y H. Bungum, 1997: Costa Rican Spectral Strong Motion Attenuation. NORSAR, Technical Report, 45 pp.

Schmidt, V., A. Climent, A. Dahle y H. Bungum, 1998: Relaciones Espectrales de Atenuación para América Central y para Costa Rica. Memorias del X Congreso Latinoamericano de Ingeniería Sísmica, San José, Costa Rica.

Woo, G., 1985: PRISK manual. Principia Mechanica Ltda. London.