

Capítulo 3

Estimación de la demanda sísmica

3.1 Antecedentes

Los investigadores del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI) han planteado la hipótesis de la ocurrencia de un terremoto de magnitud aproximada M_w 7.5 frente a las costas de la Península de Nicoya dentro de los próximos diez años (ref. 3.1) . El evento sería generado por la subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa Caribe y se localizaría cercano a la costa de Sámara. El periodo estimado está relacionado con la capacidad o límite físico de resistencia de las rocas de la zona de acople de las placas Cocos y Caribe para soportar presiones.

En 1989, el sismólogo estadounidense Stuart Nishenko (ref. 3.2) determinó el potencial sísmico en los 96 segmentos en que se divide el Cinturón del Pacífico, en términos de la probabilidad de ocurrencia de grandes terremotos para los siguientes 10 y 20 años. Este científico establece que en la Brecha Sísmica de Nicoya, la probabilidad de ocurrencia de un sismo de M_s 7,3 antes de 1999 es de un 64 % , y para antes del 2009 aumenta a un 99 %

El OVSICORI ha realizado estudios durante los últimos años que demuestran que la Placa de Cocos se desplaza anualmente cerca de 86 mm por debajo de la Placa Caribe, por lo que debería existir una zona de compresión dentro de la península. La inexistencia de esta sugiere la acumulación de una gran cantidad de energía que debería liberarse en los próximos años en la denominada Brecha Sísmica de Nicoya. Mariano Protti, investigador del OVSICORI, determinó que el terremoto de Cóbano de 1990 de magnitud M_w 7.0 no liberó la Brecha Sísmica de Nicoya, ya que la zona de ruptura se ubicó en el límite sureste de la misma. (ver fig. 3.1)

3.2 Medición de los sismos

Existen muchas variables que sirven para cuantificar el tamaño de un terremoto. Una de las más ampliamente utilizadas es la magnitud del sismo, la cual se define como una medida cuantitativa e instrumental del tamaño del evento, relacionada con la energía sísmica liberada durante el proceso de ruptura de la falla.

Sin embargo, debido a la complejidad del fenómeno sísmico, dentro de la literatura científica se encuentran diferentes maneras de considerar la magnitud de un terremoto, y es preciso diferenciarlas para evitar confusiones al respecto.

- a) Magnitud Local (Richter): Está definida como el logaritmo en base 10 de la amplitud máxima en micrómetros del registro de un sismógrafo Wood-Anderson localizado a 100 km del epicentro del sismo. Vale mencionar que esta medida no distingue entre los diferentes tipos de onda. Se refiere generalmente como M_L . Esta es la escala más difundida, aunque no siempre la más apropiada para la descripción del tamaño del sismo.

- b) Magnitud de ondas de superficie: Se utiliza generalmente para distancias epicentrales grandes, donde las ondas de cuerpo son atenuadas lo suficiente para que predominen las ondas de superficie. En 1936, Gutenberg y Richter desarrollaron la siguiente expresión para la magnitud de ondas de superficie M_S basada en la amplitud de las ondas de Rayleigh con un período de aproximadamente de 20 segundos.

$$M_S = \log A + 1,66 \log \delta + 2,0 \quad (\text{Ec. 3.1})$$

donde A: máximo desplazamiento del terreno en micrómetros
 δ : distancia epicentral del sismógrafo medida en grados

La magnitud de onda de superficie está basada en la máxima amplitud del desplazamiento del terreno, más que en la máxima amplitud de un sismógrafo en particular.

Esta magnitud se utiliza generalmente para sismos con una profundidad focal menor a 70 km y distancias no mayores de 1000 km.

- c) Magnitud de ondas de cuerpo: Se utiliza en general para sismos de foco profundo en los cuales las ondas superficiales son muy pequeñas. En 1945 Gutenberg desarrolló una expresión para la magnitud de ondas de cuerpo m_b basada en la amplitud de los primeros ciclos de las ondas P cuando no son fuertemente influenciadas por la profundidad focal. La expresión es la siguiente

$$m_b = \log A - \log T + 0,01 \delta + 5,9 \quad (\text{Ec. 3.2})$$

donde A: amplitud de las ondas P en micrómetros
 T: período de la onda P (usualmente cercano a 1 segundo)
 δ : distancia epicentral del sismógrafo medida en grados

- d) Magnitud Momento: Está basada en el concepto de momento sísmico, el cual es una medida del tamaño del sismo en función de las propiedades físicas de la roca y de las dimensiones del área de ruptura, de manera que permite comparar sismos entre sí. El momento sísmico M_0 se determina mediante la siguiente expresión:

$$M_0 = A D G \quad (\text{Ec. 3.3})$$

donde A: área de la falla
 D: longitud del desplazamiento de la falla
 G: rigidez al cortante (aprox. 3×10^{11} dinas/cm²)

Basado en lo anterior, la magnitud momento M_w en dinas-cm se define como sigue

$$M_w = \frac{\log M_0}{1.5} - 10.7 \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Las escalas de magnitud anteriores están basadas en la medición de las características de los sismos. Para sismos más fuertes, la medición de estas características comienza a ser menos dependiente del evento que para sismos menores, es decir, las escalas se saturan. La de ondas de cuerpo y Richter se saturan para valores de magnitud entre 6 y 7, y la de ondas superficiales para magnitudes superiores a 8. La gran ventaja de la escala de magnitud momento es que no se satura, precisamente porque se mide directamente a partir de los factores que producen la ruptura.

Existen otras denominaciones menos comunes para la magnitud de un sismo. Una de ellas es la magnitud de duración M_D , la cual está basada en la duración total del sismo y puede utilizarse para describir sismos pequeños.

3.3 Atenuación de la aceleración del terreno

A medida que el tren de ondas se propaga por la tierra desde el punto de ruptura, la energía sísmica se disipa produciendo una atenuación de la aceleración del terreno. Al atravesar formaciones muy heterogéneas, el tren ondulatorio sufre fenómenos locales que involucran refracciones, reflexiones y disipación especial de la energía. Debido a la complejidad del desplazamiento del tren de ondas sísmicas, muchos investigadores se han dado a la tarea de hacer estudios de regresión sobre muestras de aceleración pico, en función de la distancia y la magnitud del sismo que las originó.

Para la zona de Guanacaste no existen suficientes registros de sismos fuertes como para poder desarrollar las relaciones de atenuación. Por tal motivo, se decidió adoptar las relaciones de atenuación derivadas para regiones con características similares. En este análisis se utilizaron las relaciones de atenuación desarrolladas por Youngs et al (ref. 3.3), debido a que se derivaron específicamente para terremotos de subducción. Constituye hasta ahora el estudio más reciente y completo que se ha publicado, ya que considera la mayor cantidad de sismos de subducción y de diferentes regiones del mundo, por lo que su aplicación a la región de Nicoya puede considerarse aceptable. Además, su rango de aplicación es adecuado para la magnitud del evento a evaluar.

Youngs et al desarrollaron relaciones de atenuación para la aceleración pico y la aceleración espectral, para sismos de magnitud M_w igual o mayor a 5, distancias de 10 a 500 km de la zona de ruptura, y para sismos originados en la zona de contacto entre dos placas (interfase) o dentro de una placa (intraplaca). La base de datos utilizada comprende información de terremotos de Alaska, Chile, Cascadia, Japón, México, Perú y las Islas Salomón principalmente. Este estudio se basa en un análisis de regresión de dos etapas, tal como lo realizaron Fukushima, Tanaka e

Iai en sus trabajos de 1990 y 1993, con la salvedad de que estos últimos mezclaron información de terremotos de subducción y sismos someros en un solo juego de datos.

Los registros del estudio de Youngs et al se clasificaron en tres grupos: roca, suelos superficiales firmes y suelos profundos. Se clasificó como roca cuando sólo hay unos cuantos metros de suelo encima del lecho rocoso. Los suelos profundos son aquellos en los que no aflora roca hasta los 20 m, y los suelos superficiales firmes son aquellos en los que la profundidad del suelo es menor que 20 m y un significativo cambio de velocidad existe cerca de los 30 m de la superficie.

Youngs propone las siguientes relaciones de atenuación de la aceleración pico y espectral para suelo y roca, para un amortiguamiento del 5 %:

Ecuación para Suelo:

$$\ln(y) = -0,6687 + 1,438M + C_1 + C_2(10-M)^3 + C_3 \ln(r + 1,097e^{0,617M}) - 0,00648H + 0,3643Z_1$$

(Ec. 3.5)

Desviación estándar: $C_4 - C_5M$

Ecuación para Roca:

$$\ln(y) = 0,2418 + 1,414M + C_1 + C_2(10-M)^3 + C_3 \ln(r + 1,7818e^{0,554M}) + 0,00607H + 0,3846Z_1$$

(Ec. 3.6)

Desviación estándar: $C_4 + C_5M$

En estas ecuaciones M es la magnitud momento, r es la distancia más corta a la fuente (km), H es la profundidad del foco (km) y los C_1 son coeficientes determinados para el análisis de regresión, según se muestran en las tabla 3.1 y 3.2. La aceleración, ya sea pico o espectral está representada por y, como unidades de la aceleración de la gravedad g. El término Z_1 corresponde al tipo de fuente sísmica (0 para sismos interfase y 1 para sismos intraplaca).

Tabla 3.1 : Coeficientes de regresión para suelo

Periodo(s)	C1	C2	C3	C4	C5
0 (PGA)	0	0	-2,329	1,45	-0,1
0,075	2,4	-0,0019	-2,697	1,45	-0,1
0,1	2,516	-0,0019	-2,697	1,45	-0,1
0,2	1,549	-0,0019	-2,464	1,45	-0,1
0,3	0,793	-0,002	-2,327	1,45	-0,1
0,4	0,144	-0,002	-2,23	1,45	-0,1
0,5	-0,438	-0,0035	-2,14	1,45	-0,1
0,75	-1,704	-0,0048	-1,952	1,45	-0,1
1	-2,87	-0,0066	-1,785	1,45	-0,1
1,5	-5,101	-0,0114	-1,47	1,5	-0,1
2	-6,433	-0,0164	-1,29	1,55	-0,1
3	-6,672	-0,0221	-1,347	1,65	-0,1
4	-7,618	-0,0235	-1,272	1,65	-0,1

PGA, aceleración máxima del terreno.

Tabla 3.2 : Coeficientes de regresión para roca

Periodo(s)	C1	C2	C3	C4	C5
0 (PGA)	0	0	-2,552	1,45	-0,1
0,075	1,275	0	-2,707	1,45	-0,1
0,1	1,188	-0,0011	-2,655	1,45	-0,1
0,2	0,722	-0,0027	-2,528	1,45	-0,1
0,3	0,246	-0,0036	-2,454	1,45	-0,1
0,4	-0,115	-0,0043	-2,401	1,45	-0,1
0,5	-0,4	-0,0048	-2,36	1,45	-0,1
0,75	-1,149	-0,0057	-2,286	1,45	-0,1
1	-1,736	-0,0064	-2,234	1,45	-0,1
1,5	-2,634	-0,0073	-2,16	1,5	-0,1
2	-3,328	-0,008	-2,107	1,55	-0,1
3	-4,511	-0,0089	-2,033	1,65	-0,1

PGA: aceleración máxima del terreno.

3.4 Aplicación de las relaciones de atenuación al terremoto de Nicoya

Para aplicar las relaciones de atenuación de Youngs et al , debe estimarse el valor de las variables que incluye el modelo. Para el análisis de daños se utilizó una magnitud momento del sismo de 7,5 , lo que corresponde a una superficie de ruptura menor a la que muestra la fig.

3.1. que sólo se rompería en su totalidad con el terremoto máximo creíble, de magnitud cercana a M_w 8.1, el cual tiene una muy baja probabilidad de ocurrir. El área de ruptura aproximada mediante un polígono se muestra en la figura 3.2, basándose en la información dada por el OVSICORI y en la investigación de Bravo y Calvo (ref 3.4). Vale aclarar que no es posible conocer la superficie exacta de falla que tendrá el sismo en cuestión.

Como puede apreciarse en la figura 3.2, la zona donde se ubica el puente se encuentra sobre la superficie de falla, por lo que el valor del parámetro r sería teóricamente cero. Sin embargo, como se mencionó en 3.3, las relaciones de Youngs se desarrollaron para distancias entre 10 y 500 km. Por tanto, se toma el valor más bajo posible para r , es decir, 10 km. No se estimó conveniente realizar una extrapolación para r igual a cero, pues puede sobrestimar los valores.

La profundidad del sismo se estimó a partir de los registros del OVSICORI que especifican las profundidades de los hipocentros de los sismos de la región de Guanacaste. Mariano Protti estableció que de los movimientos sísmicos registrados en la zona de Nicoya desde marzo de 1990, un 50 % han ocurrido a profundidades entre 12 y 17 km y en un 35% entre 20 y 26 km (ref. 3.5). Se consideró 15 km como un valor representativo de la profundidad del evento en estudio, ya que alrededor de esta profundidad se concentran los registros de sismos en la zona de falla. (ver figura 3.3)

Respecto al tipo de terremoto, el sismo de Nicoya calificaría como interfase, en el cual la ruptura se produce en la zona de contacto entre la placa subducida y la placa cabalgante. Los sismos intraplaca ocurren dentro de la placa subducida y responden a la tensión que se genera en dicha placa, y generalmente ocurren a profundidades mayores a los 50 km. Por tanto, el valor Z_1 de la relación de Youngs se tomó como cero.

La decisión de utilizar la relación de atenuación desarrollada para suelo se tomó con base en los siguientes criterios:

- Según la caracterización geológica de Guanacaste, la región costera cercana al sitio de emplazamiento del puente presenta un conjunto de depósitos aluviales.
- En ausencia de un conocimiento preciso de las características del medio soportante, resulta más conservador asumir suelo en vez de roca, debido a que la atenuación en esta última es mayor.

Con base en los parámetros definidos anteriormente, se evaluó en la ecuación 3.5, con lo que se obtuvo.

$$\ln(\text{PGA}) = -0,97844 \Rightarrow \text{PGA} = 0,38 \text{ (en unidades de g)}$$

donde PGA = aceleración máxima del terreno

3.5 Determinación del espectro de respuesta para el análisis

Para determinar la respuesta sísmica del puente al terremoto especificado, se decidió utilizar un análisis dinámico con base en un espectro de respuesta de pseudoaceleraciones. El espectro de respuesta es una función que representa el valor máximo de la respuesta de un sistema oscilatorio de un grado de libertad. Sus valores son función de la excitación sísmica, de la relación fuerza-deformación del sistema y de su capacidad de disipar energía. El espectro de pseudoaceleraciones es el que se obtiene multiplicando el espectro de desplazamientos por el cuadrado de la frecuencia del sistema. Sus valores numéricos, para excitaciones sísmicas, son muy similares a los del espectro de respuesta de aceleraciones, lo cual da origen a su nombre.

Como se mencionó en la sección 3.3, las investigaciones de Youngs et al no sólo abarcaron la determinación de relaciones de atenuación para aceleración pico, sino que también plantean relaciones para determinar las aceleraciones espectrales. El número de acelerogramas digitalizados y procesados para terremotos de subducción con los que se realizó la regresión constituyen sólo una parte de la base de datos de aceleraciones pico, y algunos registros estaban limitados a la fase fuerte de cada terremoto. Youngs et al primero desarrollaron relaciones la amplificación de la respuesta espectral (SA/PGA), donde SA es la pseudoaceleración espectral y PGA la aceleración pico del terreno. Luego se incluyeron los efectos debidos a magnitud y distancia en la amplificación de la respuesta. Con el procedimiento anterior se obtuvo una relación para la amplificación espectral para cualquier período, como sigue:

$$\ln(SA/PGA)_{ij} = B_1 + B_2(10 - M_j)^3 + B_3 \ln[(r)_{ij} + e^{\alpha_1 + \alpha_2 M_j}] \quad (\text{Ec. 3.7})$$

El segundo término toma en cuenta el efecto de la magnitud del evento y el tercer término la dependencia con la distancia. Los coeficientes α_1 y α_2 son equivalentes a los coeficientes C_4 y C_5 de la relación de atenuación para PGA. Las variables restantes tienen el mismo significado que en la respectiva relación de atenuación para PGA. Los coeficientes obtenidos para cada período fueron suavizados, de manera que las curvas espectrales resultantes fueran suavizadas sobre el rango completo de magnitudes y distancias. Youngs encontró una dependencia lineal aproximada entre los coeficientes B_2 y B_3 y el logaritmo del período espectral. Las formas espectrales para roca y suelo son similares para magnitudes pequeñas y empiezan a diverger para magnitudes mayores, con las formas espectrales para suelo teniendo movimiento sobre un rango mayor de períodos, como se podría esperar. Los coeficientes obtenidos ajustando la ecuación 3.7 a los valores de amplificación espectral fueron posteriormente combinados con las respectivas relaciones de atenuación para aceleración pico para producir relaciones de atenuación para pseudoaceleración, con un amortiguamiento del 5 %.

Para realizar el análisis dinámico al puente se decidió desarrollar un espectro de respuesta específico para las características del terremoto de Nicoya, ya que esto tiene la ventaja de que la selección del espectro no sólo está gobernada por el tipo de medio soportante, sea suelo o roca, sino que toma en cuenta la distancia del sitio a la zona de ruptura, la profundidad probable del foco y la magnitud del sismo.

Con los mismos parámetros con los que se calculó la aceleración pico del terreno se procedió a calcular los valores de las aceleraciones espectrales para periodos entre 0.075 y 4.0 segundos. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 3.3 y el espectro de respuesta generado se presenta en la figura 3.4.

Tabla 3.3 : Valores de aceleraciones espectrales con base en relación de atenuación de Youngs.

Periodo(s)	$\ln(a)$	$a(g)$
0,000	-0,9784	0,376
0,075	-0,3765	0,686
0,100	-0,2605	0,771
0,200	-0,1079	0,898
0,300	-0,2071	0,813
0,400	-0,3900	0,677
0,500	-0,5629	0,570
0,750	-0,9458	0,388
1,000	-1,3374	0,263
1,500	-2,1297	0,119
2,000	-2,6748	0,069
3,000	-3,2768	0,038
4,000	-3,8842	0,021

Adicionalmente al espectro generado a partir de relaciones de atenuación para terremotos de subducción, se consideró adecuado efectuar el análisis para dos espectros más con el fin de efectuar comparaciones entre los mismos.

Se consideraron las siguientes fuentes:

a) Código Sísmico de Costa Rica (CSCR) (ref. 3.6): Es la normativa para diseño sísmico utilizada en el país, por lo que resulta importante tomar en cuenta sus recomendaciones. En el capítulo 2.4 se proponen espectros de diseño para diferentes perfiles de suelo y tipos de estructuras. El puente en cuestión se clasificó como una estructura tipo 5, según especifica el código para "edificios de una planta y estructuras afines, tales como tanques elevados o chimeneas, que resisten las fuerzas sísmicas con una o varias columnas que actúan esencialmente como voladizos aislados, libres o articulados en su extremo superior y empotrados en la base". Respecto al perfil de suelo se escogió como firme, ya que presenta depósitos con estratos de arenas densas y arcillas duras (lutitas desintegradas). El espectro de respuesta sugerido se presenta como relación entre Factor de Amplificación Dinámica (FAD) y los periodos correspondientes. Para transformarlo en un espectro absoluto, debe multiplicarse la aceleración máxima por el FAD correspondiente a cada periodo. Debe resaltarse el hecho de que se aplicó la recomendación del CSCR sólo para efecto de comparar la forma espectral, pues se utilizó la misma aceleración pico de 0,38g calculada según Youngs. El CSCR en sus

mapa de isoaceleraciones para 100 años de periodo de retorno, recomienda para el sitio de ubicación del puente sobre el Río Nosara una aceleración máxima de 0.18g. Este es el periodo de retorno sugerido para estructuras del Grupo B, categoría dentro de la cual puede clasificarse el puente en estudio. Incluso, si se utilizara el mapa de isoaceleraciones para un periodo de retorno de 500 años (Estructuras del Grupo A), la aceleración máxima recomendada sería aproximadamente 0.29g. En ambos casos, los valores sugeridos por el CSCR quedan muy debajo de la aceleración máxima calculada según la relación de atenuación de Youngs. El espectro generado según lo mencionado anteriormente, se muestra en la figura 3.5.

b) Applied Technology Council (Improved Seismic Design Criteria for California Bridges ATC-32) (ref. 3.7) : Este organismo fue fundado por el Departamento de Transportes de California (CALTRANS). Emite criterios y especificaciones generales para diseño sísmico de puentes para el estado de California (EUA). El documento denominado como ATC-32 constituye la revisión más reciente de las Especificaciones para Diseño de Puentes (*Bridge Design Specification*) utilizadas por CALTRANS, y se publicó en junio de 1996, tomando en cuenta las últimas investigaciones del terremoto de Loma Prieta, California en 1989 y otros sismos en California. El ATC-32 ofrece espectros de respuesta para cuatro tipos diferentes de suelo y diferentes magnitudes. Se escogió un suelo tipo D (suelo firme), magnitud 7.25 ± 0.25 , y aceleración máxima de 0.38g. El espectro correspondiente para un amortiguamiento del 5%, se muestra en la figura 3.6.

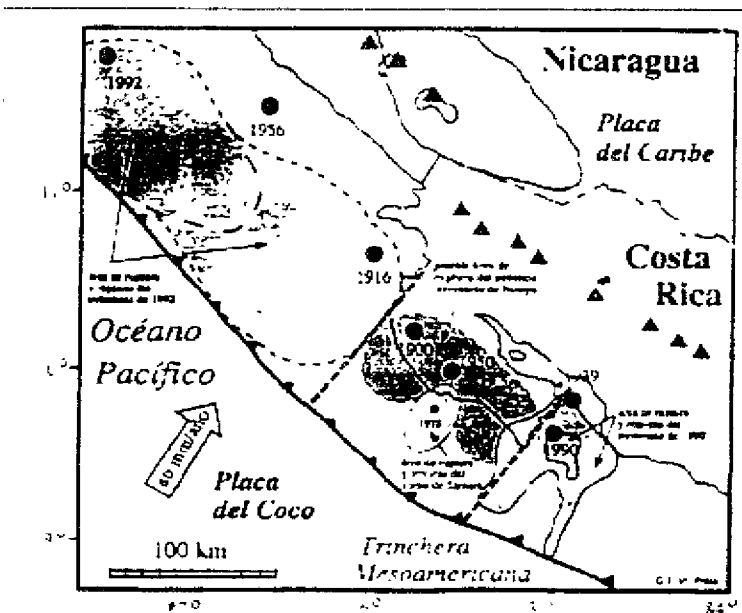


Figura 3.1 : Superficie de ruptura de la Brecha Sísmica de Nicoya, identificada con el área más oscura. (Tomado de ref. 3.1)

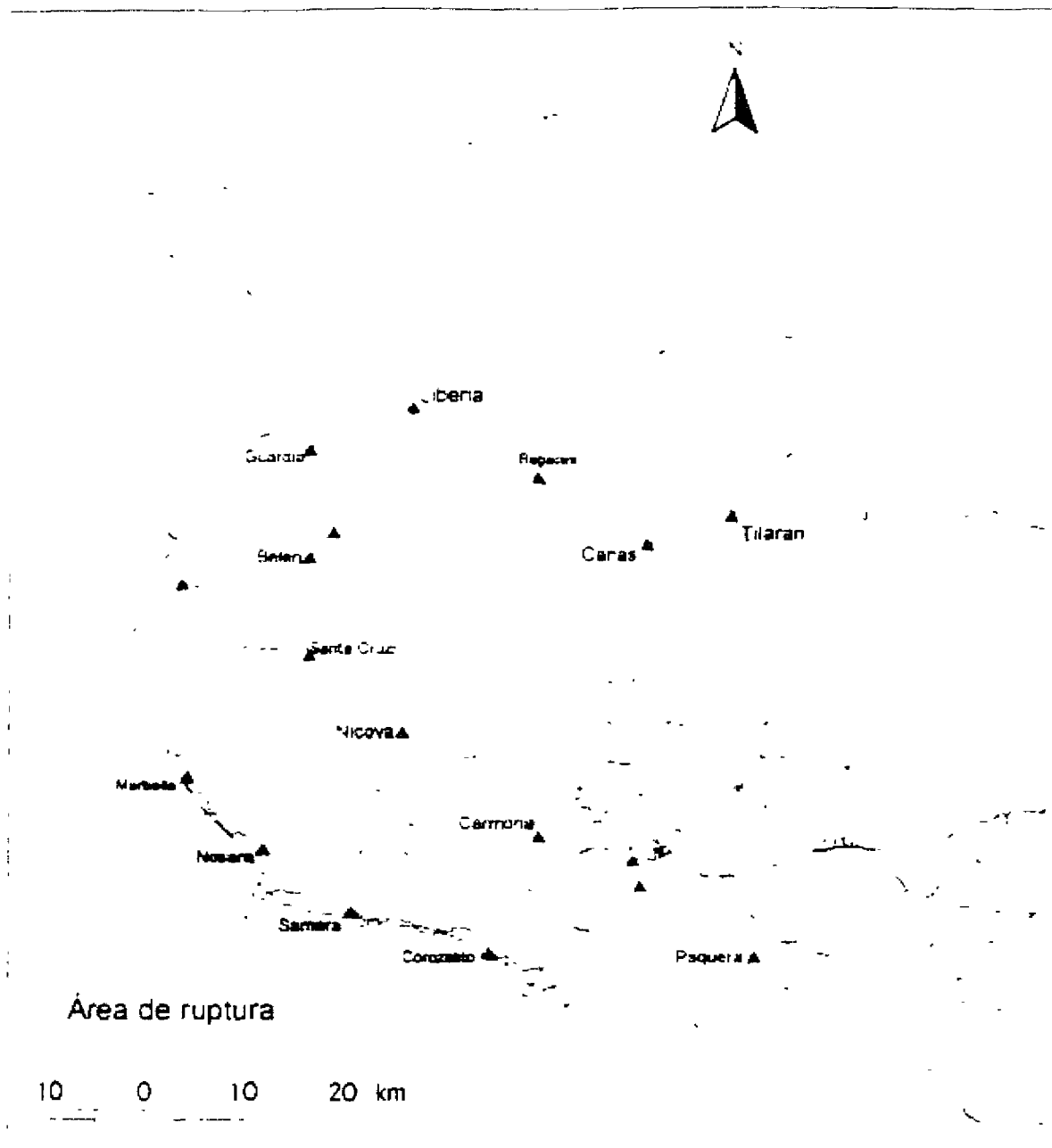


Figura 3.2 : Area aproximada de ruptura del terremoto de Nicoya (adap. ref. 3.4)

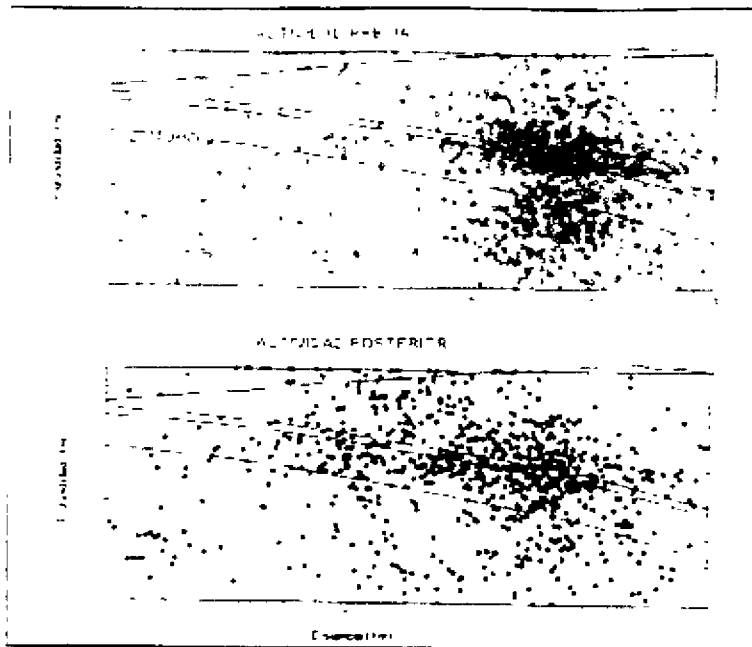


Figura 3.3 : Secciones transversales de la sismicidad previa y posterior al terremoto de Cóbano de 1990 (adaptado de ref. 3.5)

Espectro de aceleración para suelo (5% amort)

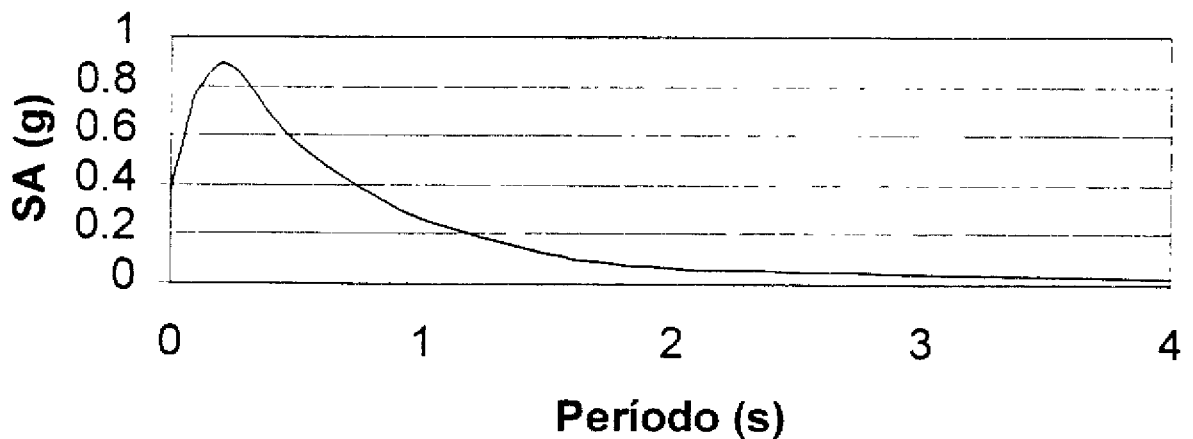


Figura 3.4 : Espectro de aceleraciones para el terremoto de Nicoya generado a partir de las relaciones de Youngs et al.

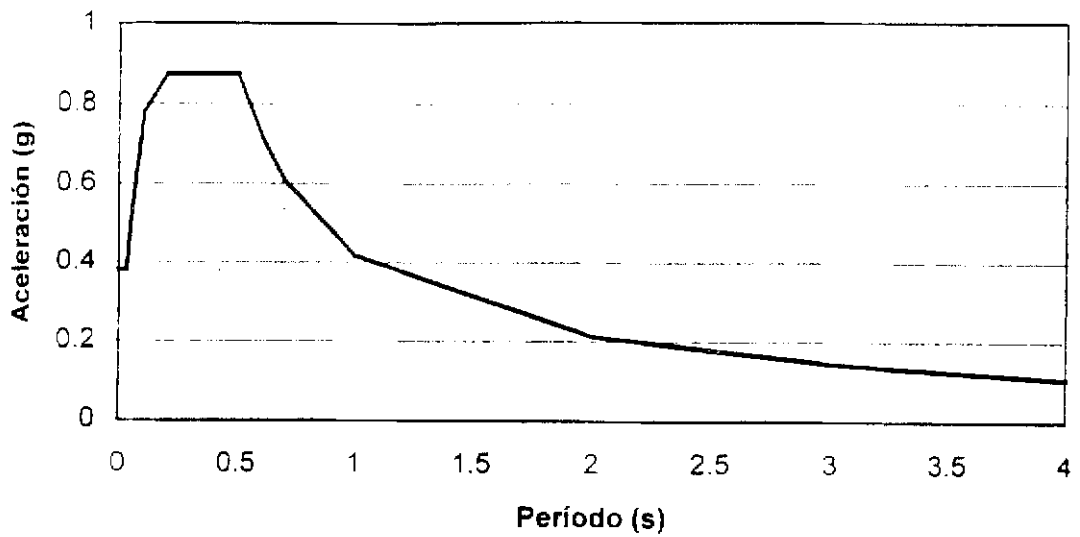


Figura 3.5 : Espectro de respuesta para suelo firme y tipo 5 CSCR (adaptado de ref 3.6)

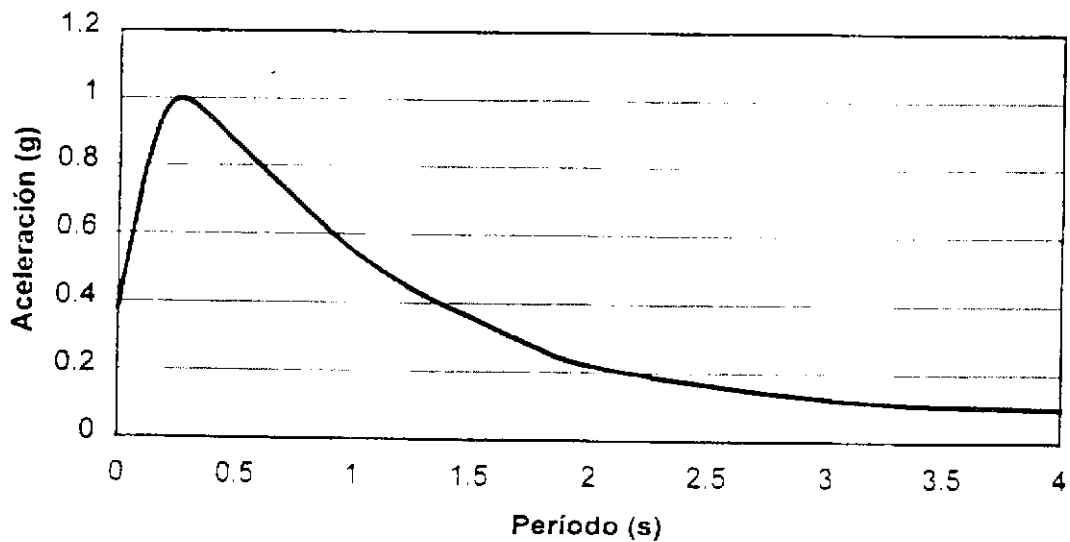


Figura 3.6 : Espectro de respuesta según ATC-32 para tipo de suelo firme, magnitud 7.25 ± 0.25 (adaptado de ref. 3.7)