

ESPECTROS DE RESPUESTA SÍSMICA EN MICROZONAS DE CARACAS INCLUYENDO EFECTOS DE SITIO 1D, 2D Y 3D

JULIO J. HERNÁNDEZ¹, MICHAEL SCHMITZ², ÉLISE DELAUAUD³, HELOÏSE CADET⁴, JEAN DOMÍNGUEZ²

¹Consultor en Ingeniería Sísmica y Estructural, Caracas, correo-e: julher@cantv.net

²FUNVISIS, Prolongación Calle Mara, El Llanito, Caracas, correo-e: mschmitz@funvisis.gob.ve

³IPGP Paris; ahora: Univ. Potsdam, Alemania, e-mail: delavaud@geo.uni-potsdam.de

⁴LGIT Grenoble; ahora: ITSAK, Salónica, Grecia, e-mail: kdhello@gmail.com

Recibido: octubre de 20

Recibido en forma final revisado: ulio de 20

RESUMEN

Como parte del Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas, se desarrollaron espectros elásticos de respuesta, en microzonas del Área Metropolitana de Caracas, incorporando detallados efectos de sitio para mejorar el diseño sísmico, en superación de los espectros normativos. Como núcleo se efectuó un estudio paramétrico 1D de respuesta de sitios, en función de la rigidez del suelo superficial y el espesor de sedimentos, contando como insumos un estudio de amenaza sísmica local, el modelo geofísico de los depósitos y un modelo geotécnico ad-hoc. Los espectros se agruparon y validaron con registros reales de terremotos, con pequeñas correcciones. Se añadieron efectos de cuenca a partir de un estudio 2D de respuesta de la zona del valle con mayores sedimentos ante el terremoto de 1967 y se extendieron mediante un estudio 3D de amplificaciones sísmicas en el valle. También se estimaron efectos 2D topográficos. Se definieron macrozonas de distinto peligro sísmico y microzonas según el suelo superficial, los depósitos y las pendientes, para las que se obtienen espectros promedios esperados con efectos 1D-2D, válidos para edificaciones comunes, los cuales se suavizan para uso en ingeniería estructural; luego se añaden modificaciones para edificaciones esenciales y masivas.

Palabras clave: Microzonificación sísmica, Espectros de respuesta, Análisis 1D, Efectos de cuenca, 2D, 3D, Caracas.

SEISMIC RESPONSE SPECTRA IN MICROZONES OF CARACAS INCLUDING 1D, 2D AND 3D SITE EFFECTS

ABSTRACT

Elastic response spectra were developed within the purposes of the Caracas Seismic Microzoning Project, on microzones of the Caracas Metropolitan Area, including detailed site effects to improve the seismic design, overcoming the code spectra. As its core an 1D site response parametric study was performed, as function of shallow ground stiffness and sediment thickness, relying on a local seismic hazard study, the geophysical deposit model and a particular geotechnical model as inputs. The spectra were grouped and validated by means of actual earthquake records, doing small corrections. Basin effects were added from a 2D response study of the area of the valley with larger sediments, undergone to 1967 earthquake, and were extended by means of a 3D study of seismic amplifications in the valley. 2D topographical effects were also estimated. We defined macrozones of diverse seismic hazard and microzones according to shallow ground, deposits and slopes, obtaining expected mean spectra with 1D-2D effects for them, valid for common constructions, which are smoothed for using in structural engineering; then modifications are added for essential and massive constructions.

Keywords: Seismic microzoning, Response spectra, 1D analysis, Basin effects, 2D, 3D, Caracas.

INTRODUCCIÓN

El Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas (PMZS-CCS) desarrollado por FUNVISIS (Schmitz *et al.* 2011) se planteó como objetivo primordial disponer de espectros de respuesta elástica en las distintas microzonas para diseño de ingeniería y ofrecerlos como sustitutos de

los dispuestos en la norma sísmica nacional, tras incorporar los efectos de la cuenca sedimentaria del valle, pues la norma sólo considera los efectos del suelo más superficial. El análisis del terremoto de Caracas de 1967, reconoció que los mayores daños ocurridos en el valle, incluyendo 4 derrumbes de edificios, estuvieron asociados con la zona de grandes espesores de sedimentos de Los Palos Grandes

(LPG) y cercanías (Seed *et al.* 1970; Briceño *et al.* 1978). Este terremoto fue determinante para la ingeniería sísmica mundial en cuanto a la ratificación de la importancia de los efectos de sitio y, en particular, del espesor (H) de los sedimentos. Inicialmente esta conciencia abarcó solamente el efecto 1D del espesor de la columna de suelo debajo de cada sitio. Posteriormente, diversos estudios mundiales (Bard & Bouchon, 1980) probaron que la configuración geométrica de las cuencas sedimentarias conduce a los llamados efectos 2D-3D: generación de ondas superficiales con ampliificaciones para ciertas frecuencias de respuesta e incremento de la duración de los movimientos fuertes del terreno. Tras la determinación del terremoto de 1967 como multi-evento por Suárez & Nábělek (1990), con M6.6 total y M6.4 el más cercano a Caracas, se llevó a cabo un detallado estudio 2D de la zona más profunda del valle (Los Palos Grandes y cercanías) que representó el complemento necesario para comprender las causas de los daños que produjo este terremoto (Papageorgiou & Kim, 1991).

Es bueno aclarar por qué la norma sísmica nacional vigente (COVENIN, 2001) no estima bien las respuestas que pueden ocurrir en la cuenca del valle: asigna la forma espectral S2 a los depósitos profundos con suelos superficiales rígidos e intermedios, tal como la norma de 1982 (COVENIN, 1982). Por el contrario, la versión anterior de la norma (COVENIN, 1998), acogiendo la propuesta de Echezuría *et al.* (1991) incorporada en el documento base (Hernández *et al.* 1996), cubría este problema en forma conservadora, asignando las formas espectrales S3 o S4 a los depósitos profundos (según la rigidez del suelo superficial); pero luego se redujeron en demasía. En la figura 1 se comparan los espectros elásticos normativos post-1982 aplicables a la zona LPG: S2 de las normas de 1982 y 2001, más S3 y S4 de la norma de 1998, con los obtenidos por Papageorgiou & Kim (1991) escalados a $A_{0,ROCA} = 0.3 \text{ g}$. Son evidentes los extremos normativos de liberalidad y conservadurismo que deben evitarse.

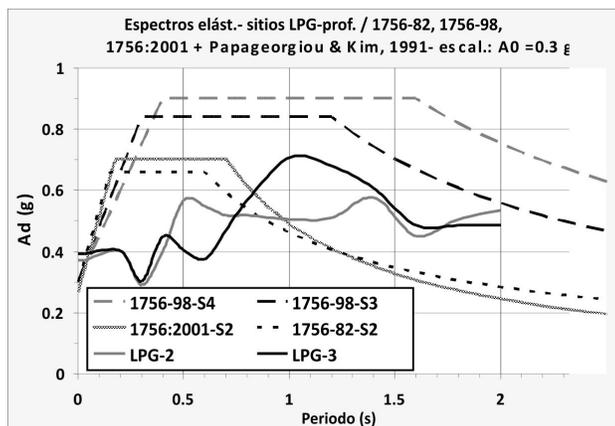


Figura 1. Espectros normativos post-1982 y espectros escalados desde Papageorgiou & Kim (1991) en LPG.

En la concepción general normativa (de todas sus versiones) subyace una simplificación del estimado de las respuestas de sitio: las formas espectrales asignadas son promedios de grupos relativamente amplios que suponen grandes subestimaciones y sobreestimaciones en algunos sitios, las cuales pueden disminuirse tras agrupaciones menores. En efecto, la realización de estudios de sitios discriminando ciertos parámetros puede conducir a la reducción de la incertidumbre involucrada (Stewart & Baturay, 2000); comparaciones con registros reales muestran que, en general, los estudios de sitio 1D la reducen para respuestas espectrales de periodos hasta un segundo y que la inclusión de los efectos 2D-3D la reducen para los periodos más largos. Justamente, en el PMZS-CCS se efectuaron análisis detallados 1D y se añadieron estimados de efectos 2D-3D, para así obtener la reducción de dicha incertidumbre con recomendaciones realistas, de mayor confiabilidad que las normativas sin penalizar excesivamente, cumpliendo con una esperada contribución a la ingeniería nacional.

La complejidad del fenómeno de respuesta sísmica, veda el empleo de una geometría precisa junto con todas las variables involucradas: acción sísmica y propiedades del suelo, por dificultades computacionales. Para las intensidades sísmicas de diseño el suelo responde no-linealmente, pero un modelado no lineal aproximado y la precisión de las capas de los depósitos y de la acción sísmica se dispuso sólo para el análisis 1D; los efectos de ondas superficiales se han dispuesto en los estudios 2D y 3D, aunque espectros sólo en el citado estudio 2D. Se impone la necesidad de conjugar los diferentes tipos de análisis según los recursos humanos y materiales disponibles, siendo los análisis 1D el núcleo central, para incorporar racionalmente las variables del fenómeno y con calibraciones, ofrecer resultados confiables. Se han elaborado para el valle de Caracas varios estudios 2D (Papageorgiou & Kim, 1991, 1993; Semblat *et al.* 2002; Rocabado *et al.* 2006) y 3D (Delavaud, 2007; Lee, 2007), cuyos resultados principales se analizaron e integraron en el presente trabajo. También se revisaron diversos estudios generales de efectos 2D-3D (los referidos y otros).

Pueden citarse estudios para (micro o macro) zonificaciones en el ámbito mundial con combinaciones de análisis 1D y 2D-3D (Rovelli *et al.* 1995; Pitilakis, 2004; Frankel *et al.* 2007), por lo que podemos considerar que la variante escogida para este proyecto está inserta dentro del conjunto de soluciones modernas al problema y que aún siendo una aproximación es una sustancial mejora respecto a las normas. En este trabajo se expone la generación de los espectros de respuesta para las microzonas de respuesta sísmica similar identificadas en el PMZS-CCS, basados en 12 clases principales, definidas por la variación del espesor de sedimentos y de la V_{s30} , añadiendo de manera aproximada los efectos de cuenca y de topografía.

ESTUDIO PARAMÉTRICO 1D

Para distinguir las respuestas en las diferentes áreas, se llevó a cabo un estudio paramétrico de respuestas de sitios (Hernández *et al.* 2009a). Un soporte fundamental fue el modelo geofísico del subsuelo que, tras el primero elaborado luego del terremoto de 1967 (Murphy *et al.* 1969), fue actualizado para el proyecto (Kantak *et al.* 2005; Sánchez *et al.* 2005; Amarís *et al.* 2009). En el estudio paramétrico se varían los depósitos de suelo según rangos de espesores con el modelo geofísico de velocidades y pesos específicos expuesto en la figura 2 para el subsuelo de $H > 30$ m, y un modelo geotécnico ad-hoc del suelo superficial ($H \leq 30$ m), caracterizado mediante la velocidad promedio de las ondas de corte en los 30 metros superiores (V_{s30}), considerada un buen indicativo del tipo de respuesta esperada en los depósitos (Choi & Stewart, 2005), junto con pesos específicos razonables.

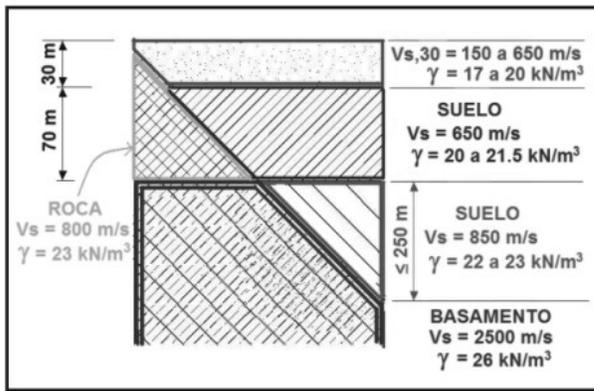


Figura 2. Esquema de velocidades y pesos específicos del modelo geofísico/geotécnico empleado.

El estudio paramétrico tiene por objeto estimar los espectros elásticos de respuestas promedios 1D en superficie en distintas clases de sitio, asociados con el espectro elástico de respuesta en afloramiento rocoso sano, obtenido en el estudio de amenaza sísmica (Hernández & Schmitz, 2009a). En todos los casos calculamos los espectros para 5% del

amortiguamiento crítico. Se efectúan análisis dinámicos de transmisión vertical de ondas SH en las columnas de suelo o roca definidas por los modelos indicados, de acuerdo con la reconocida teoría al respecto (e.g. Kramer, 1996), con la excitación aplicada en el basamento rocoso. El tipo de análisis empleado fue uno dinámico lineal equivalente (Schnabel *et al.* 1972) que opera en el dominio de la frecuencia; los efectos no-lineales se introducen para ajustar los movimientos en las capas hasta lograr la convergencia. Este método, utilizado por facilidad, ha tenido amplio reconocimiento mundial e incluso conduce a espectros semejantes a los de análisis no-lineales completos, para una componente del movimiento sísmico (Borja *et al.* 1999; Stewart *et al.* 2001). (Los análisis no-lineales son necesarios para estimar desplazamientos permanentes). Algunos sesgos generales que produce (Joyner & Chen, 1975), se corrigen luego con soporte en registros reales de terremotos. Por lo tanto, su empleo junto con correcciones empíricas más la posterior adición de efectos 2D-3D, conduce a espectros de suficiente confiabilidad, sin errores superiores a los derivados de la variabilidad del suelo y de la acción sísmica.

Para tomar en cuenta la variabilidad del suelo se usaron dos casos de material: suelos gruesos (o ‘arenas’) y finos (o ‘arcillas’), debido a su distinto comportamiento no-lineal, para luego promediar los resultados como aproximación ante el supuesto de que en los suelos reales suele existir una mezcla de ambos tipos de suelos y para obtener resultados intermedios, no extremos. Las variaciones de pesos específicos anotadas corresponden a los dos tipos de material (el mayor para finos).

Como curvas de conducta no-lineal se utilizaron las de Seed & Idriss (1970) y las de Vucetic & Dobry (1991), respectivamente para gruesos y finos (figura 3). Variando el grado de compacidad o el índice plástico, se emplearon tanto para los 30 metros superiores como para las capas profundas. Además, para roca se utilizaron las curvas dadas en Schnabel *et al.* (1972). Existen muchos tipos de curvas no-li-

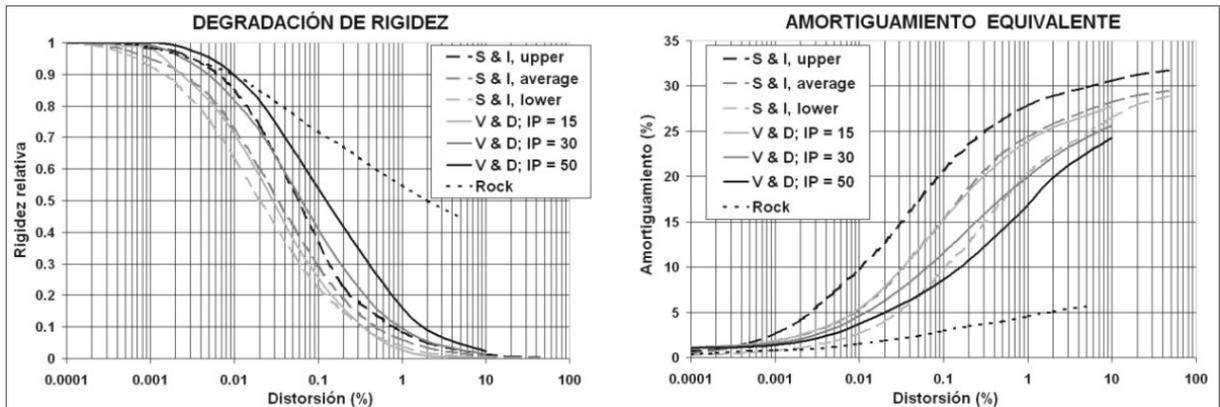


Figura 3. Curvas no-lineales de degradación de rigidez (izquierda) y de amortiguamiento equivalente (derecha), para arenas (gruesos), arcillas (finos) y roca, utilizadas en los análisis paramétricos de la respuesta dinámica.

neales y su selección es un problema mundial no resuelto (Ansal, 2004), por lo que la elección adoptada se sometió luego a calibración junto con el método completo de análisis, verificando su idoneidad.

Como excitación se aplican en el basamento acelerogramas asociados con el espectro deconvolucionado a basamento rocoso, los cuales reproducen el espectro en afloramiento al efectuar un análisis 1D de un perfil de roca. No se afirma que estos acelerogramas definan exactamente las vibraciones en el basamento, sino que son equivalentes para análisis 1D. El modelo supone que el movimiento en superficie se totaliza idealmente como transmisión de ondas SH a través de una columna desde el basamento; en realidad deriva también de ondas P y superficiales, cuyos efectos quedan incluidos aproximadamente en los de las ondas SH.

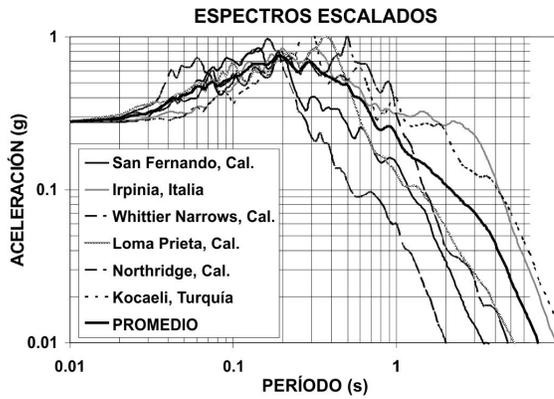
Para efectuar la deconvolución se seleccionaron 6 acelerogramas de la base de datos del PEER-NGA (PEER, 2005), de terremotos representativos de la intensidad de diseño en afloramiento rocoso en la macrozona del valle de Caracas para periodo medio de retorno (T) de 475 años (Hernández & Schmitz, 2009a). En la tabla 1 se listan los datos de estos registros, incluyendo terremoto, año, magnitud, profundidad hipocentral, distancia a la ruptura, calidad del suelo superficial (Vs30) y aceleración pico A_0 . Puede observarse que son adecuados para representar la amenaza sísmica en roca indicada: a) todos los registros lo fueron en suelo rocoso de $Vs30 > 800$ m/s; b) A_0 , promedio = 0.25 g, un 90% del valor obtenido en el estudio de amenaza sísmica, $A_0 = 0.28$ g; c) la magnitud promedio es $M = 6.8$, oscilando entre 6.0 y 7.5, valores razonables para esa intensidad; d) la profundidad hipocentral promedio es 14.5 km, valor casi idéntico al de 14.3 km obtenido para el sismo de Caracas de 1967 por Suárez & Nábělek (1990); e) las distancias a la ruptura oscilan entre 7 y 25 km, con promedio 16.5 km, el cual se puede asociar con la distancia de Caracas a la falla San Sebastián, única de la región que puede conducir

a esa intensidad en la ciudad en términos de aceleraciones pico, aunque la más lejana falla La Tortuga puede conducir en ocasiones excepcionales a las respuestas espectrales esperadas para periodos largos asociadas a $T = 475$ años. Pero aunque estas cercanías son deseables, el objetivo es el de disponer de un conjunto de registros cuyo promedio se ajuste al espectro de amenaza sísmica. Cierta práctica usual de buscar registros que se asocien estrictamente con los sismos contribuyentes a la amenaza sísmica, tras la realización de su desagregación, se ha demostrado que es innecesaria en los estudios no lineales de estructuras y basta disponer de un conjunto cuyo promedio ajuste bien (Iervolino & Cornell, 2005), mientras que para los estudios lineales es trivial que un espectro promedio da resultados promedios exactos. Es decir, las variables de magnitud sísmica y distancia a la fuente de los registros no son importantes, sino su contenido de frecuencias. Puede suponerse que lo mismo se aplica a las respuestas de los depósitos de suelos.

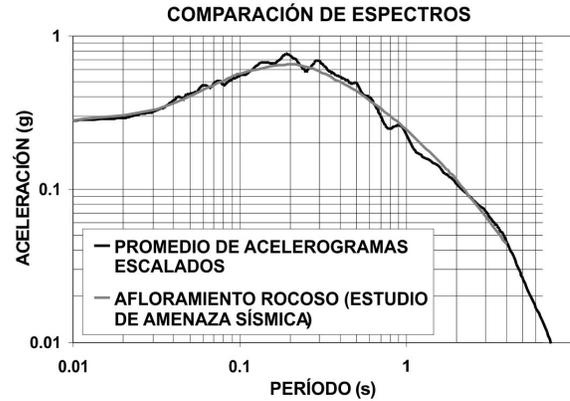
En la figura 4(a) se presentan los espectros de los acelerogramas indicados, escalados a $A_0 = 0.28$ g, junto con su promedio, el cual se observa también en la figura 4(b) junto con el espectro de amenaza sísmica indicado, mostrando el excelente acuerdo entre ellos. Un punto de interés es que se observa una gran variabilidad entre los espectros individuales y que todos tienen alguna zona por encima del promedio y otra por debajo. Esto representa la situación real que subyace al espectro de diseño en roca: los valores de amenaza sísmica uniforme no se supone que correspondan a un único sismo y menos a un único registro sino que son la envolvente del promedio de los valores de cierta probabilidad de ocurrencia. No parecen existir registros reales que se ajusten completamente al espectro de diseño en forma individual; la práctica tradicional de construir registros artificiales que se adapten al mismo no es defendible pues se ha comprobado que conduce en los estudios no lineales a valores excesivos de velocidades y desplazamientos (Naeim & Lew, 1995).

Tabla 1. Acelerogramas en afloramiento rocoso seleccionados (PEER, 2005).

TERREMOTO	AÑO	Nº en base de datos	M	Profundidad Hipocentral	Distancia a ruptura	Vs30	A_0
			--	(km)	(km)	(m/s)	(g)
San Fernando, California	1971	72	6.6	13.0	25.1	822	0.163
Irpinia, Italia	1980	292	6.9	9.5	10.8	1000	0.290
Whittier Narrows, California	1987	663	6.0	14.6	22.7	822	0.163
Loma Prieta, California	1989	765	6.9	17.5	9.6	1428	0.436
Northridge, California	1994	994	6.7	17.5	23.8	1016	0.246
Kocaeli, Turquía	1999	1165	7.5	15.0	7.2	811	0.204
PROMEDIOS:			6.8	14.5	16.5	983	0.250



(a)



(b)

Figura 4. a) Espectros escalados de los acelerogramas seleccionados; b) Promedio de los espectros escalados vs. espectro en afloramiento rocoso de amenaza sísmica en el valle de Caracas para $T = 475$ años.

Este método de empleo de acelerogramas (espectros dispersos con promedio ajustado) es adecuado y eficiente; en pruebas comparativas se encuentra que hasta con sólo 3 registros es posible obtener convergencia en metas planteadas; usando 6 registros disponemos de seguridad excedente; mientras que si se utilizaran acelerogramas ajustados individualmente al espectro, se necesitarían entre 10 a 15 para lograr la convergencia (Stewart & Baturay, 2000).

Estudios de microzonificación bien reconocidos han utilizado un número similar de acelerogramas para representar el movimiento sísmico en afloramiento rocoso, como por ejemplo el de Salónica (Grecia) que utilizó 5 registros (Pitilakis, 2004) y el de Silivri (Turquía) que utilizó 6 registros (Ansal & Biro, 2004). Y se compara favorablemente con el requisito de 4 registros de la norma sísmica nacional vigente (COVENIN, 2001) para análisis inelástico de estructuras. En síntesis: el número de acelerogramas es adecuado y exhibe en promedio el contenido de frecuencias asociado a la sismicidad actuante en forma realista, incluyente de su variabilidad.

Mediante análisis inverso se obtuvieron acelerogramas en basamento asociados con los acelerogramas en afloramiento sobre perfiles de roca, para 6 profundidades de la excitación base, de 100 a 350 metros. De los acelerogramas en basamento se obtienen espectros que promediados y suavizados se adoptan como espectros representativos en basamento (figura 5).

Los resultados difieren poco con la profundidad de la excitación: A_0 de 0.226 g a 0.237 g. Se puede observar que los espectros en basamento no son proporcionales a los de afloramiento; para A_0 en promedio son ~18% menores, pero para $P = 1$ s son ~28% menores.

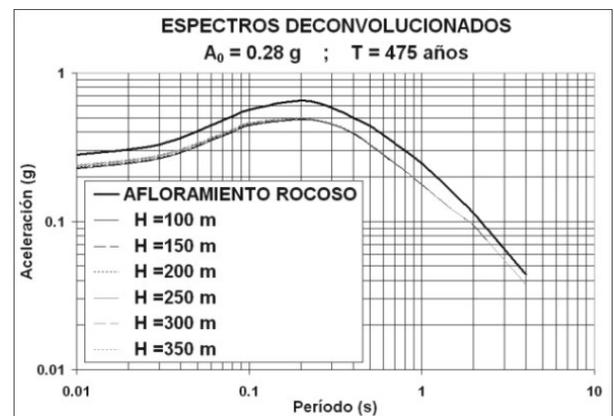


Figura 5. Espectros deconvolucionados a basamento.

Como ilustración del proceso efectuado, en la figura 6 se muestran los acelerogramas de afloramiento (original escalado a $A_0 = 0.28$ g) y de basamento deconvolucionado, para uno de los casos seleccionados, correspondiente al terremoto de Northridge de 1994.

Se seleccionaron 9 espesores básicos del depósito (30, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300 y 350 m) y 9 valores básicos de $V_{s,30}$ (150, 175, 200, 250, 300, 350, 400, 500 y 650 m/s). Los sitios fueron designados con una letra para representar el espesor (A, B, X, C, D, E, F, G, H) y un número igual a $V_{s,30}$. Para cubrir depósitos someros se añadieron casos con espesor de suelo de 10 y 20 m sobre roca o suelo de $V_s = 650$ m/s. En total, comprenden 103 perfiles de sitios (figura 7), de 3 capas en general.

Por otro lado, de acuerdo con la exploración geotécnica en el pozo de Inparques (GISCA, 2006), junto con un pozo para el Metro de Caracas cerca del centro de la ciudad, se encuentra que en algunos casos bajo los 30 metros de profundidad existe suelo con $V_s \sim 400$ m/s hasta una profundidad de 100 metros, aproximadamente. En consecuencia, se procedió a añadir el análisis de 12 sitios representativos,

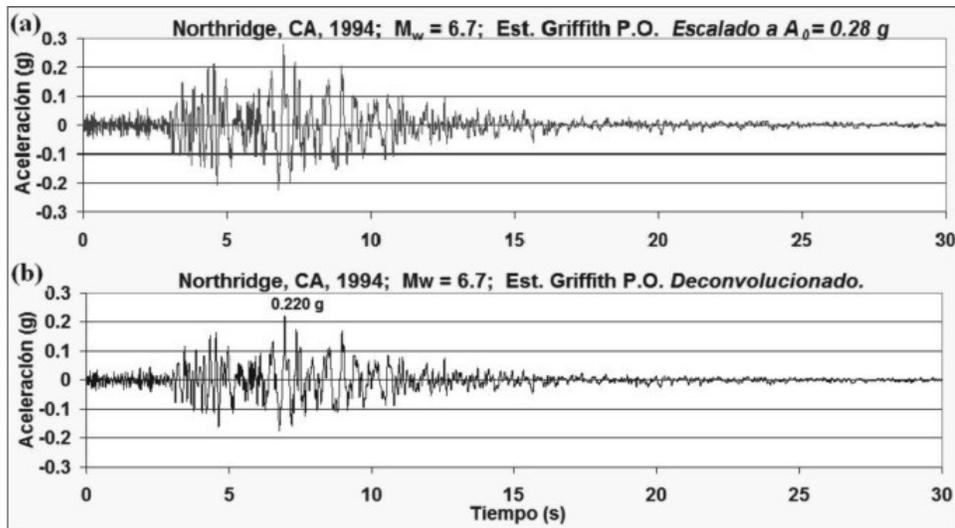


Figura 6. Registro “Northridge 994”; a) acelerograma en afloramiento rocoso escalado; b) acelerograma deconvolucionado a basamento ($H = 150$ m).

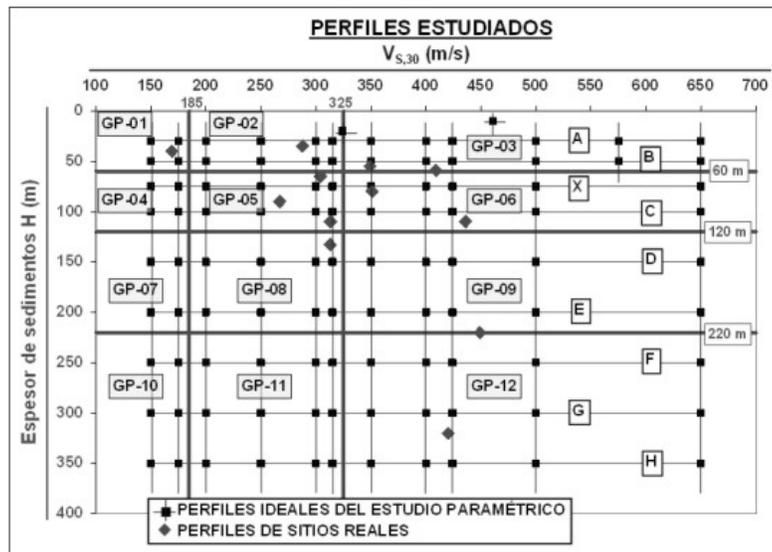


Figura 7. Esquema de la ubicación de los 103 perfiles del estudio paramétrico, grupos de perfiles GP-01 a GP-12, más sitios de perfiles reales analizados.

que permitieron luego incorporar la influencia de esa variación de V_s en los espectros recomendados.

En conjunto, entonces, se estudiaron 115 perfiles de sitios, cada uno con 2 variantes del tipo de material (granular y fino), sometidos a 6 acelerogramas diferentes en basamento rocoso, completando la ejecución de 1380 análisis dinámicos lineales equivalentes.

El procedimiento general para obtener los espectros de sitio consistió en: **1)** obtener acelerogramas en superficie mediante análisis dinámico con los acelerogramas de basamento como excitación, para cada tipo de material (gruesos y finos, llamados también arenas y arcillas en el curso del trabajo); **2)** obtener promedios de los espectros de los acelerogramas en superficie, para cada material; **3)** calcular

amplificaciones promedios del sitio respecto al basamento para cada material, como cocientes de los promedios de los espectros de superficie entre el promedio de los espectros de basamento; **4)** obtener amplificaciones promediadas entre ambos materiales, luego suavizadas; **5)** aplicar las amplificaciones promediadas al espectro representativo de basamento (éste difiere ligeramente del promedio de los espectros de los acelerogramas de basamento).

Se trata de espectros 1D básicos; posteriormente se construyen espectros agrupados, a los cuales se efectúan correcciones empíricas y se ajustan por efectos 2D-3D, como se ha anunciado anteriormente.

En la figura 8 se ilustran los resultados parciales obtenidos para el perfil G250 ($H = 300$ m; $V_{s30} = 250$ m/s) per-

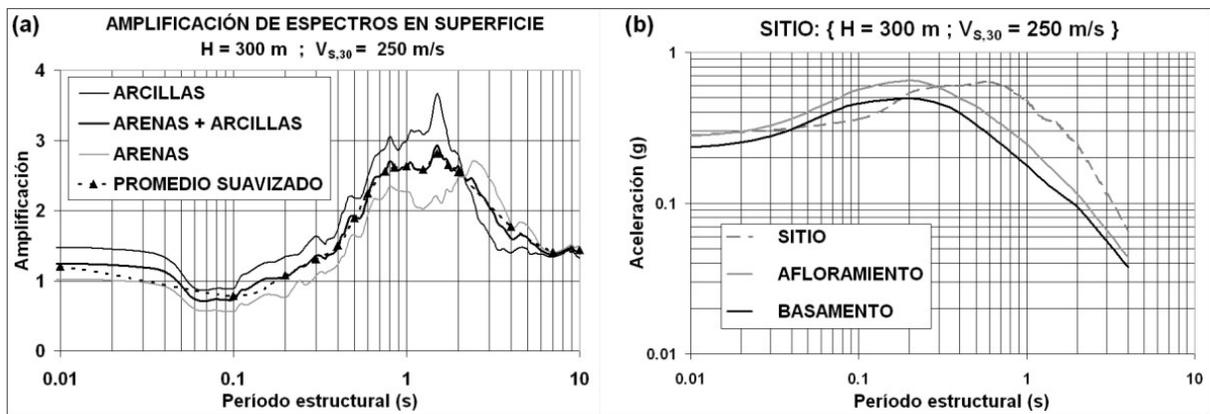


Figura 8. Perfil G250: $H = 300 \text{ m}$, $V_{s,30} = 250 \text{ m/s}$; a) amplificaciones para diferentes materiales; b) espectros promedio en superficie (preliminar, sin correcciones ni ajustes), en afloramiento rocoso y en basamento.

teneciente al grupo GP11: a) amplificaciones superficie/basamento para arcillas, arenas y su promedio suavizado; b) espectro promedio en la superficie del sitio, mostrando también los espectros de basamento y afloramiento rocoso como referencias.

Todos los espectros indicados son elásticos para fracción de amortiguamiento $\xi = 5\%$, válidos en la macrozona central del valle para periodo medio de retorno (PMR) de 475 años.

En la figura 9 se observa el conjunto de los 103 espectros obtenidos para los perfiles de los sitios indicados en la figura 7. Es importante destacar la variabilidad existente entre las distintas respuestas. Las envolventes del conjunto de espectros, superior e inferior, quedan en promedio entre 1.75 y 0.58 veces la media espectral, respectivamente, un rango de variación de 118%. Los coeficientes de variación de los valores espectrales oscilan entre 0.18 y 0.36 con un promedio de 0.27.

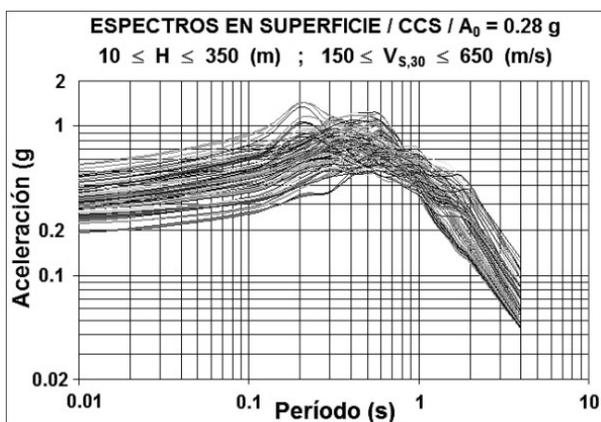


Figura 9. Espectros promedios suavizados de los 103 perfiles del estudio paramétrico.

Con el objeto final de obtener espectros de respuestas esperados en diferentes microzonas, los cuales deben corresponder a un número reducido de grupos para ser aplicables, se realizó un proceso de agrupación en el cual se exploraron diversas estrategias (Hernández *et al.* 2009b). Finalmente se dividieron en 4 rangos de espesor H (m), (10 a 60; 60 a

120; 120 a 220; > 220) y 3 rangos de $V_{s,30}$ (m/s), (≤ 185 ; 185 a 325; > 325). Estos últimos se asocian de manera aproximada con los perfiles S3, S2 y S1 de la norma, respectivamente, pero aquí se subdividen según H . Así se conformaron 12 grupos de perfiles (GP-01 a GP-12) resumidos en la tabla 2 y cuyos perfiles asociados pueden verse en la figura 7.

Tabla 2. Grupos de perfiles GP de la selección final.

H, depósito (m)	$V_{s,30}$ (m/s)		
	≤ 185	185 a 325	> 325
≤ 60	GP-01	GP-02	GP-03
60 a 120	GP-04	GP-05	GP-06
120 a 220	GP-07	GP-08	GP-09
> 220	GP-10	GP-11	GP-12

Para cada grupo GP se obtuvieron espectros 1D promedios, mostrados en la figura 10, los cuales cubren el conjunto de la figura 8. Adicionalmente, se muestra el espectro de roca sana (no-meteorizada, $V_{s,30} > 650 \text{ m/s}$). El caso de roca meteorizada (fuera de los depósitos aluviales) se asocia con el grupo GP-03, por similitud de propiedades geomecánicas.

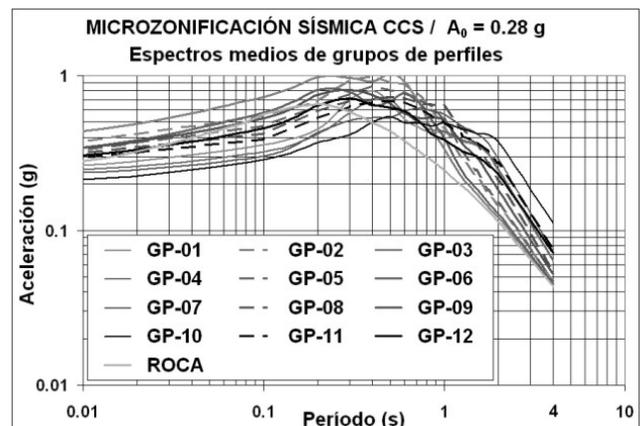


Figura 10. Espectros 1D por grupos de perfiles GP (preliminares, sin correcciones ni ajustes posteriores).

Las envolventes superior e inferior de los espectros de los distintos GP, respectivamente quedan en promedio entre 1.18 y 0.85 veces la media espectral, un 33% de rango promedio de variación, casi 1/4 de la del conjunto. Los coeficientes de variación promedios de los valores espectrales de los distintos GP varían entre 0.07 y 0.16 con un promedio global de 0.11, el cual es 41% del promedio del conjunto. Ambas variaciones indican el grado de agrupación obtenido.

En cambio, para los 3 grupos normativos (S1, S2 y S3) las envolventes superior e inferior, respectivamente quedan en promedio entre 1.42 y 0.69 veces la media espectral, un 73% de rango promedio de variación, más del doble que para los GP. Los coeficientes de variación promedios de los valores espectrales oscilan entre 0.16 y 0.22, con un promedio global de 0.19, el cual es tanto como 71% del promedio del conjunto.

La comparación de las variaciones ofrecidas por ambas soluciones espectrales permite valorar su cometido. Desde la perspectiva de la aplicación ingenieril, lo interesante es que los rangos de variabilidad se asocian con subestimaciones y sobreestimaciones de diseño; los espectros obtenidos para el PMZS-CCS las disminuyen, exhibiendo soluciones más balanceadas para el objetivo de equilibrio entre riesgo y economía.

A fin de detectar los sesgos del método (Joyner & Chen, 1975), los resultados promediados para cada GP fueron calibrados contra registros sísmicos reales, los cuales se tomaron de la base de datos del PEER (2005). Se asociaron sus clases de sitios con los grupos GP y se evaluaron las amplificaciones promedios respecto a roca para la aceleración pico, la meseta y las respuestas a periodo estructural de 1 segundo.

Por un lado, se revisaron sus amplitudes efectivas, encontrando valores satisfactorios (Hernández *et al.* 2009b). Los valores son semejantes en general, denotando la adecuación del método y la buena selección de las curvas no-lineales. Es importante destacar que en todos los grupos de perfiles de suelos rígidos e intermedios en depósitos someros se encontraron amplificaciones de las aceleraciones pico respecto al espectro de referencia en roca sana, lo cual se observa en general en los registros de terremotos y representa una mejora que necesitan los espectros normativos. De hecho, este fenómeno había sido referido desde hace bastante tiempo (Seed *et al.* 1974; Ugas, 1974), pero no ha sido recogido hasta ahora en la norma nacional, que asigna el mismo espectro a roca y a los depósitos someros de suelos rígidos. Así pues, el PMZS-CCS no sólo ofrece mejoras de los espectros para los depósitos profundos, sino también para los depósitos someros.

Por otra parte, se revisaron las formas espectrales, encontrando que se producen reducciones moderadas en la región de periodos cortos (0.1 a 0.3 s) a costa de incrementos para los periodos cercanos al periodo fundamental de la columna de suelo, es decir que ocurre un traslado de la energía de respuesta por efectos resonantes. Por este motivo se efectuaron correcciones para obtener espectros modificados, los cuales tras añadirles los efectos 2D-3D son los luego empleados para construir los espectros suavizados de diseño.

Como ejemplo, se pueden observar los 133 espectros normalizados de 45 terremotos mundiales con $A_0 \geq 0.1$ g, para los sitios tipo DS ($180 \leq V_{s,30} \leq 360$ m/s; $H \leq 60$ m) correspondiente al grupo GP-02, destacando la media geométrica y las curvas asociadas con más y menos la desviación estándar logarítmica σ_L (figura 11 (a)). Las correcciones efectuadas para cada GP siguieron el patrón mostrado en la figura 11(b); su principal efecto fue el de aumento de valores en periodos cortos y suavización de la meseta.

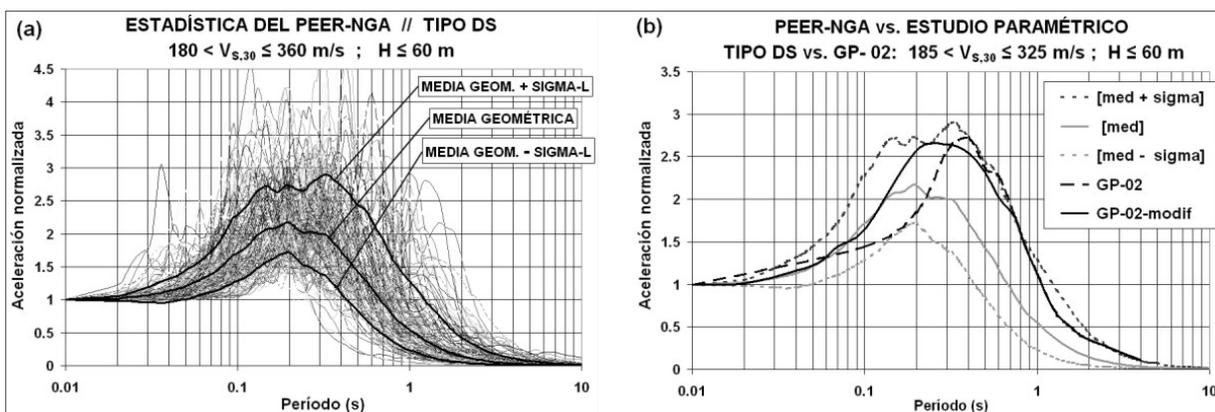


Figura 11. a) Registros normalizados en sitio DS (suelo intermedio, $H \leq 60$ m), tomados de la base de datos del PEER (2005); b) Corrección efectuada (GP-02-modif) al espectro preliminar del grupo GP-02.

Se efectuaron comparaciones con las amplificaciones derivadas de la red japonesa Kik-net (Cadet, 2007) válidas para respuesta cuasi-lineal, por lo que se cotejan con respuestas para excitaciones de poca amplitud con los modelos utilizados; en la figura 12(a) se advierten las amplificaciones de dos sitios equivalentes, una de dicho trabajo y dos de este proyecto, cuasi-lineal y no-lineal. Las primeras son algo cercanas y la última es algo menor, aunque dentro de los mismos rangos.

Se efectuó una comparación de los espectros obtenidos en el estudio paramétrico con algunos derivados para sitios reales del valle de Caracas en 3 sitios de perforaciones profundas en el este de Caracas, efectuadas para este proyecto, denominadas Los Chorros (figura 12(b)), Sebucán e Inparques, más 9 sitios adicionales en el valle, tomados de la recopilación geotécnica disponible (Feliziani *et al.* 2004), distribuidos entre los grupos GP como se observa en la figura 7. En los sitios reales tenemos normalmente mezcla de estratos de materiales arenosos y arcillosos, con muchos casos de arenas arcillosas y arcillas arenosas; se utilizaron curvas no-lineales intermedias a criterio. Por consiguiente, las comparaciones calibran la influencia de la existencia de materiales mixtos frente al promedio de materiales extre-

mos separados, y la influencia de la situación real de capas de espesor variable, frente a la utilización de un estrato uniforme de 30 m de espesor con propiedades promedios. El perfil de Inparques (de 17 capas) con $V_s \sim 400$ m/s hasta 100 m de profundidad determinó la adición de los 12 perfiles antes citados, los cuales definieron más ajustes a los espectros 1D preliminares. En comparación con los espectros de estos sitios reales, los espectros ajustados concuerdan bastante bien para los depósitos profundos y en promedio para los depósitos de espesor intermedio. En los depósitos someros se manifiesta un cierto déficit en las mesetas de los sitios con suelos rígidos e intermedios, pese a que los espectros ajustados son mayores que los de la norma. Sin embargo, debe mencionarse que los espectros de los sitios reales no llevaron correcciones del sesgo del método de análisis equivalente lineal y podrían reducirse algo.

EFFECTOS 2D DE CUENCA

Un estudio de enorme soporte para el PMZS-CCS fue el de Papageorgiou & Kim (1991). Su análisis del terremoto de 1967 estableció los efectos de cuenca en un perfil 2D del valle a lo largo de Los Palos Grandes y cercanías (figura 13), permitiendo explicar nítidamente los daños ocurridos.

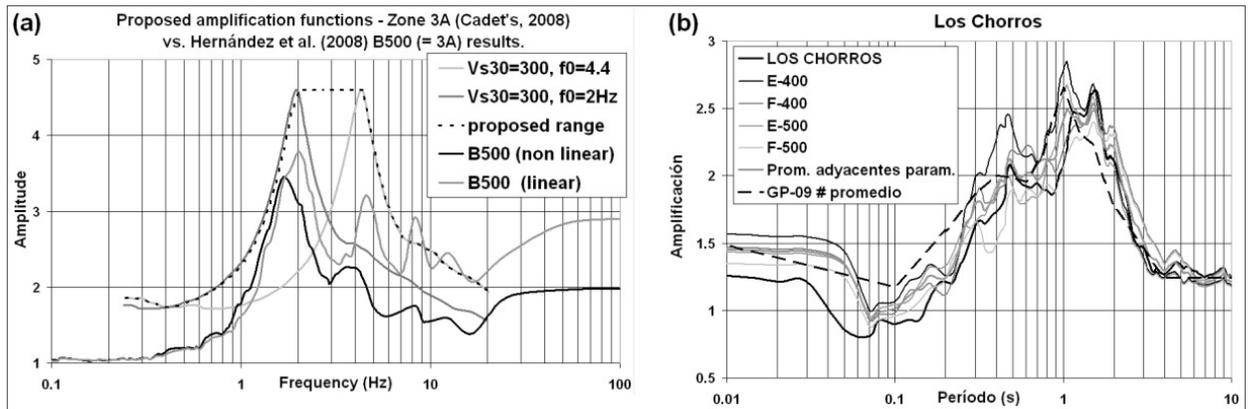


Figura 12. a) Comparación con resultados de la red Kik-net; b) Amplificación respecto al basamento. Perfil en el Colegio Don Simón, Los Chorros (de 17 capas), y perfiles adyacentes del estudio paramétrico (de 3 capas).

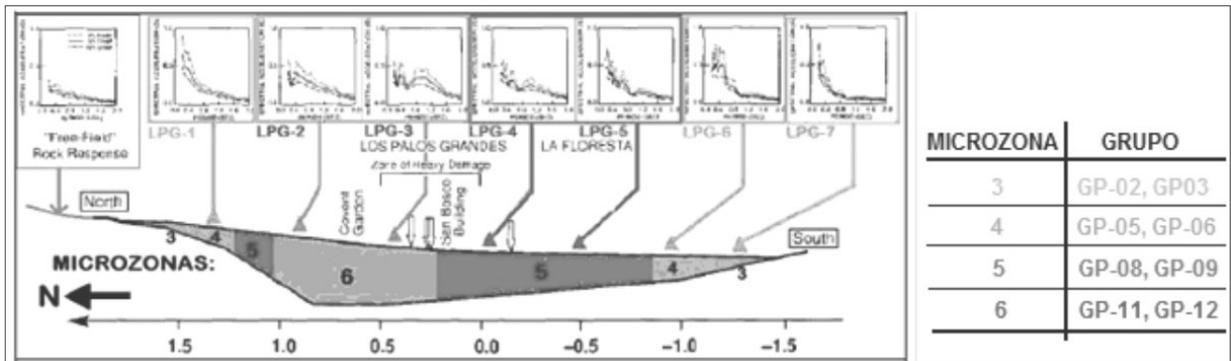


Figura 13. Espectros del estudio 2D, modificado de Papageorgiou y Kim (1991) en el perfil por la zona LPG. Los espectros se asocian a las microzonas (definidas mediante los grupos de perfiles de la tabla 1).

Se modeló la fuente sísmica incluyendo acelerogramas en roca con el resultado clave de los espectros de respuesta en superficie para los casos lineal y con amortiguamiento del suelo $\xi_s = 4.2\%$ (factor de calidad $Q = 12$). Los modelos geofísico y geotécnico utilizados fueron los dados en Murphy *et al.* (1969) y Briceño *et al.* (1978), respectivamente, para 2 capas en el último caso. La trascendencia de este estudio estriba en la determinación de los particulares efectos 2D, como la generación de ondas superficiales que se derivan de la geometría de cuenca, al mismo tiempo relacionados con la acción sísmica y las demandas estructurales.

Postulamos que a partir de este estudio pueden distinguirse aproximadamente los efectos netos de cuenca como cocientes entre los efectos generales obtenidos y los efectos 1D que se esperarían en ausencia de la geometría 2D de la cuenca. Podemos emplearlos para estimar los espectros de respuesta ante las nuevos modelos definidos, efectuando sensatos cálculos de proporcionalidad. Las variantes que se deben considerar son las de la acción sísmica, los modelos geofísico y geotécnico y la inclusión de la no-linealidad del suelo.

A tal fin, se calcularon espectros auxiliares 1D para la excitación de diseño actual, $\xi_s = 4.2\%$ (lineal amortiguado) y los antiguos modelos de capas usados por aquellos autores. En proporción a la acción sísmica del terremoto 1967, mediante cociente de su espectro en roca y el actual, inferimos los espectros ideales 1D que se esperarían en dicho terremoto en distintos puntos del perfil 2D de la figura 13. Entonces, como cociente de los espectros 2D obtenidos por los citados autores y estos espectros 1D, obtenemos estimados de los efectos netos de cuenca (2D/1D), los cuales son función del periodo de respuesta espectral y denominamos $\delta(T)$ o δ . Dada la asignación en el modelo de suelos superficiales algo rígidos, suponemos que la función obtenida es aplicable a este tipo de suelos. En la figura 14(a) se observa $\delta(T)$ para distintas microzonas (GP) definidas por el espesor H.

Se observa que para la microzona 3 ($H \leq 60$ m; GP-02, -03) los efectos 2D son menores a los 1D, pero no siempre para las otras microzonas, llegando a superarlos hasta en más de 50% para la microzona 6 ($H > 220$ m).

Por último, en forma forzosamente aproximada, tomando en cuenta resultados generales sobre la variación de los efectos de cuenca con la rigidez de los suelos (Bard & Bouchon, 1985; Marsh, 1992), definimos $\delta'(T)$ y $\delta''(T)$ para suelos intermedios y suaves, respectivamente, haciendo las diferencias con la unidad un 50% y un 33% menores a las de $\delta(T)$, (Hernández *et al.* 2009c).

Aplicamos las funciones δ , δ' y δ'' a los espectros 1D derivados en el estudio paramétrico (pero sin reducciones en ningún caso), obteniendo espectros no-lineales aproximados con efectos 1D-2D (Hernández y Schmitz, 2009b). En la figura 14 (b) se muestran los espectros corregidos con registros reales más luego los efectos 2D según se ha expuesto, la cual contrasta con la figura 10. Nótese los espectros que aumentaron para periodos entre 0.7 y 2 s, la modificación de las mesetas y que ahora menos espectros tienen respuestas inferiores al de roca para periodos menores de 0.4 s.

EFFECTOS 3D DE CUENCA

Un estudio 3D para el valle de Caracas (Delavaud, 2007) con distintos frentes de onda de excitación sísmica dados por pulsos de Ricker, determinó amplificaciones frecuenciales de la velocidad del terreno con un modelo lineal (sin amortiguamiento) de 1 capa sobre basamento ($V_s = 650$ m/s), más no espectros de respuesta. Mediante comparaciones, nos permite definir en el área del valle las zonas donde se pueden esperar incrementos semejantes de las respuestas según intervalos de frecuencias, para decidir la asignación de los espectros antes obtenidos. En la figura 15 se aprecian las amplificaciones de las velocidades en el valle para las frecuencias (f) 0,8, 1.6 y 2 Hz de ondas S provenientes del

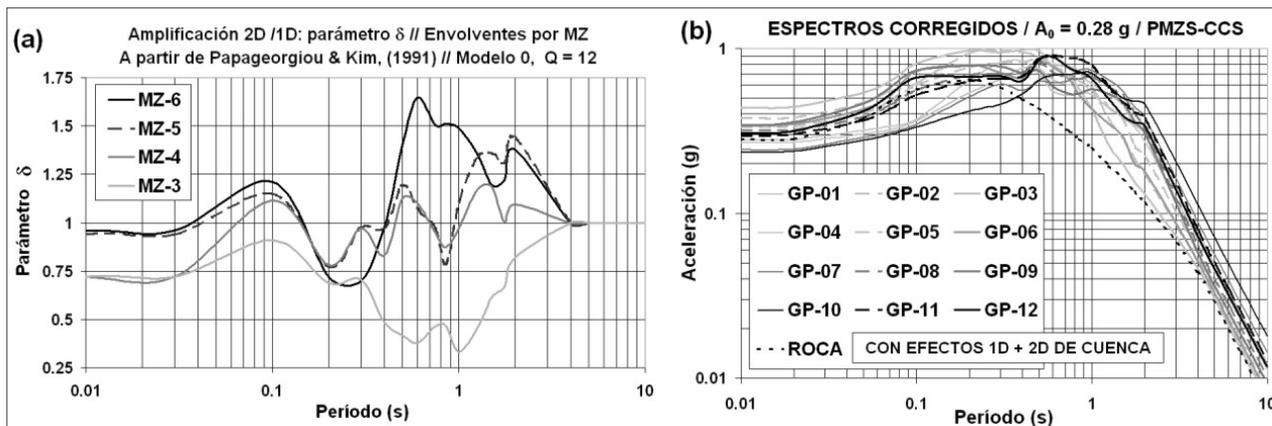


Figura 14. a) Efectos de cuenca 2D/1D; b) Espectros corregidos y luego ajustados con efectos 2D.

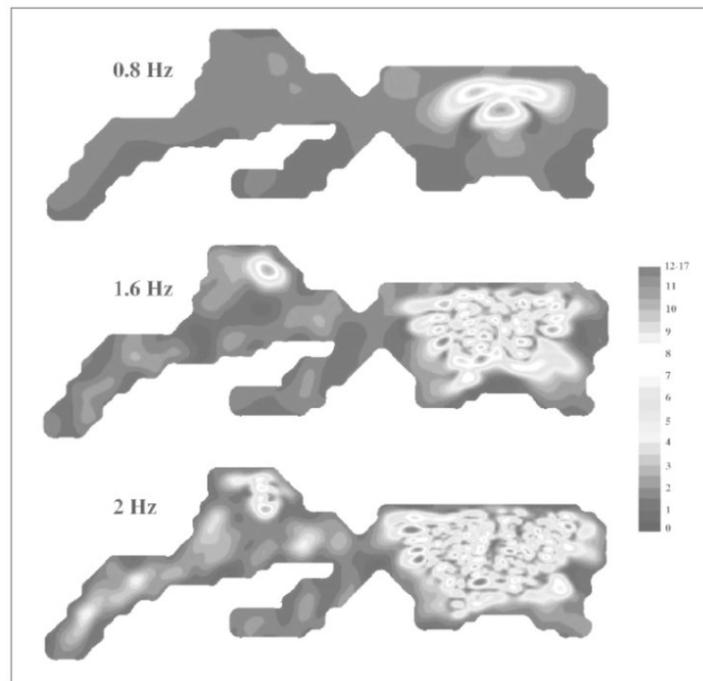


Figura 15. Función de transferencia para diferentes frecuencias de la componente N-S de la velocidad del terreno en la cuenca de Caracas, para ondas pulsantes S incidentes desde el norte a 35° con polarización E-O (Delavaud, 2007).

norte polarizadas este-oeste con un ángulo de incidencia de 35°. Por ejemplo, las mayores amplificaciones para $f = 1.5\text{--}1.6\text{ Hz}$ ($T = 0.625\text{--}0.667\text{ s}$) ocurren en los alrededores de Los Palos Grandes, y en la subcuenca de San Bernardino, donde el modelo 3D asignó una profundidad de 120 m, valor semejante a los bordes con profundidades intermedias de la subcuenca de Los Palos Grandes. Así es de suponer que esas zonas respondan en forma similar a sismos provenientes del norte que son los más severos esperados. Luego se comprobó que en el área de San Bernardino el espesor de sedimentos supera ligeramente los 220 metros, por cuyo motivo podrían esperarse ahí amplificaciones cercanas a las del área de Los Palos Grandes. Para frecuencias más altas

se encuentran amplificaciones más bajas y diseminadas casi uniformemente, las cuales se comprueba que casi no exceden, o son menores, a las correspondientes a los efectos 1D.

En la figura 16 se muestran las microzonas seleccionadas sobre la base del conjunto de criterios geológicos, geotécnicos más de espesores de sedimentos (estos dos condicionan las respuestas de sitio 1D, las cuales a su vez los representan) y efectos 2D-3D de cuenca. Las fronteras de espesores de sedimentos entre las microzonas numeradas 3, 4, 5 y 6 como primer dígito son 60, 120 y 220 metros. El segundo corresponde al tipo de suelo superficial (-1 los rígidos, -2 los intermedios y -3 los suaves).

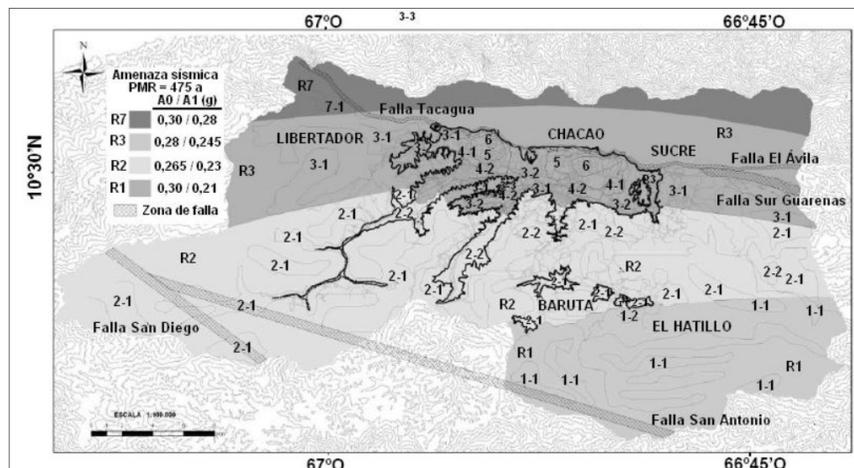


Figura 16. Microzonas seleccionadas en el valle de Caracas y alrededores, superpuestas a las macrozonas.

EFFECTOS 2D DE TOPOGRAFÍA

Para estimar los efectos 2D topográficos, en este proyecto se tomaron como guía las Recomendaciones AFPS (1990) tanto para la definición de situaciones, con simplificaciones razonables, como para los valores de amplificaciones de periodos cortos, las cuales se reducen para periodos largos (Hernández & Schmitz, 2009b). Conexamente, en el PMZS-CCS se trata el peligro de deslizamientos de las laderas, para revisión conjunta.

En lugar de una interpolación continua de amplificaciones en laderas y cimas de colinas, se ha optado por diferenciar dos casos representativos de efectos topográficos, denominados -T1 y -T2: a) tipo -T1 para colinas con laderas de pendientes entre 40% y 75% (22° a 37°), incluyendo la mitad superior de la ladera y la zona de la cima distante de la cresta menos de la altura de la ladera; b) tipo -T2 para colinas con laderas de pendientes superiores a 75% ($> 37^\circ$), incluyendo la mitad superior de la ladera y la zona de la cima a una distancia de la cresta menor a la altura de la ladera (figura 17(a)). Los sitios que no caen dentro de estos casos se definen como cuasi-planos (-T0) si son de roca sana ($V_{s,30} > 650$ m/s) y se les asignan los espectros de ame-

naza sísmica en roca sin alteraciones, o como GP-03 si son de roca meteorizada ($V_{s30} \leq 650$ m/s).

En la figura 17(b) se comparan los espectros en roca con y sin efectos topográficos del PMZS-CCS, suavizados de acuerdo con lo expuesto en la sección siguiente, más el S1 de la norma vigente. Nótese que éste es superior al de roca sana en sitio cuasi-plano ($-T_0$) pero inferior a los que incluyen efectos topográficos ($-T_1$ y $-T_2$). Además, véase que el espectro de roca meteorizada (GP-03) envuelve a todos los del PMZS-CCS hasta periodo 0.3 s y luego los supera, pero todos coinciden para periodos muy largos (> 3 s).

ESPECTROS DE DISEÑO PARA LAS MICROZONAS

Los espectros corregidos y ajustados con efectos 2D para cada microzona, válidos para PMR = 475 años, se suavizan a efectos de su empleo para análisis y diseño estructural. Para otros PMR se hacen factorizaciones posteriores. Como modelo de suavizado de aquellos espectros elásticos ($\xi = 5\%$), se adoptó una moderna variante consistente en cinco ramas (figura 18):

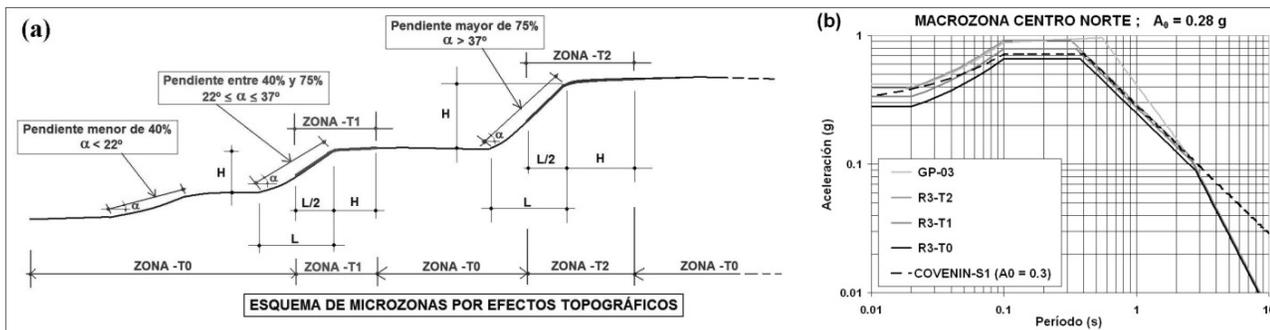


Figura 17. a) Microzonas por efectos 2D topográficos; b) espectros con efectos topográficos y de roca meteorizada.

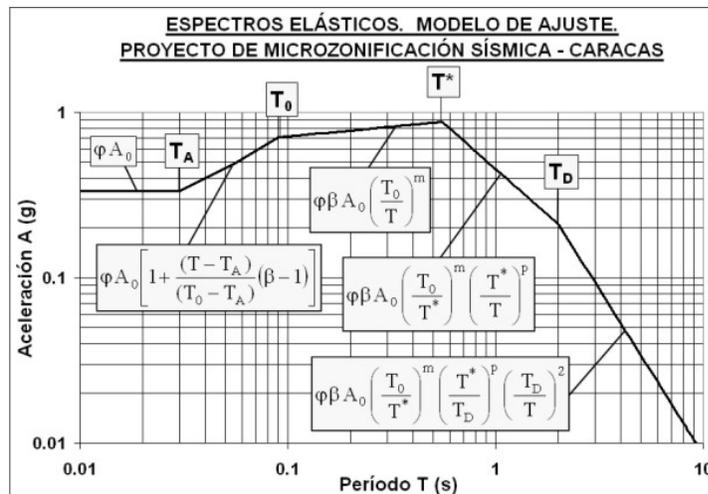


Figura 18. Modelo de suavizado de espectros elásticos.

Las expresiones expuestas en esta figura son función de: **a)** A_0 , aceleración pico en afloramiento rocoso cuasi-plano para PMR = 475 años, igual a 0.30, 0.265, 0.28 y 0.30 g para las macrozonas Sur, Centro-Sur, Centro-Norte y Norte, respectivamente (figura 15), según el estudio de amenaza sísmica (Hernández & Schmitz, 2009a); **b)** las amplificaciones ϕ y β ; c) los exponentes m , p y 2 ; y d) los periodos T_A , T_0 , T^* , T_D y T . Estos parámetros dependen de cada microzona / macrozona específicas y se presentan en Hernández & Schmitz (2009b).

En la figura 19(a) se presenta el conjunto de espectros suavizados (PMR = 475 a) para las microzonas del valle sedimentario de Caracas ($A_0 = 0.28$ g), a partir de los espectros ajustados de la figura 14(b). En las figuras 19(b), (c) y (d), respectivamente se presentan los espectros para suelos suaves, intermedios y rígidos, comparándolos con los espectros S3, S2 y S1 de la norma sísmica vigente, la cual presenta déficit de respuesta en varios casos. Puede apreciarse la consistencia lograda de las variaciones entre los espectros según el espesor del depósito; los depósitos someros amplifican más la respuesta para periodos cortos y los profundos lo hacen para periodos largos.

Similar consistencia se controló ante las variaciones de la rigidez del suelo para una misma profundidad, como se advierte en el caso de la figura 20(a); los suelos rígidos amplifican más la respuesta que los suelos suaves para periodos cortos, pero menos para periodos largos. En la figura 20(b) se expone una comparación de los espectros para suelos rígidos sobre depósitos no-someros ($H > 60$ m) con el S2 de la norma nacional, el tipo C del Eurocódigo (CEN, 2003) y el de Categoría C1 (adaptado a $A_0 = 0.28$ g) de la microzonificación sísmica de Salónica, Grecia, la cual fue motivada por el dañino terremoto M6.4 de 1978 (Pitilakis, 2004).

Los de ambas normas llegan a presentar hasta 33% de déficit respecto a los del PMZS-CCS, pero en promedio los del Eurocódigo son más cercanos y más aún los de la microzonificación sísmica de Salónica. Con estos son notables las semejanzas en general, revelando que el conjunto formado por el modelado, el análisis y los ajustes finales para Caracas puede considerarse validado por comparación.

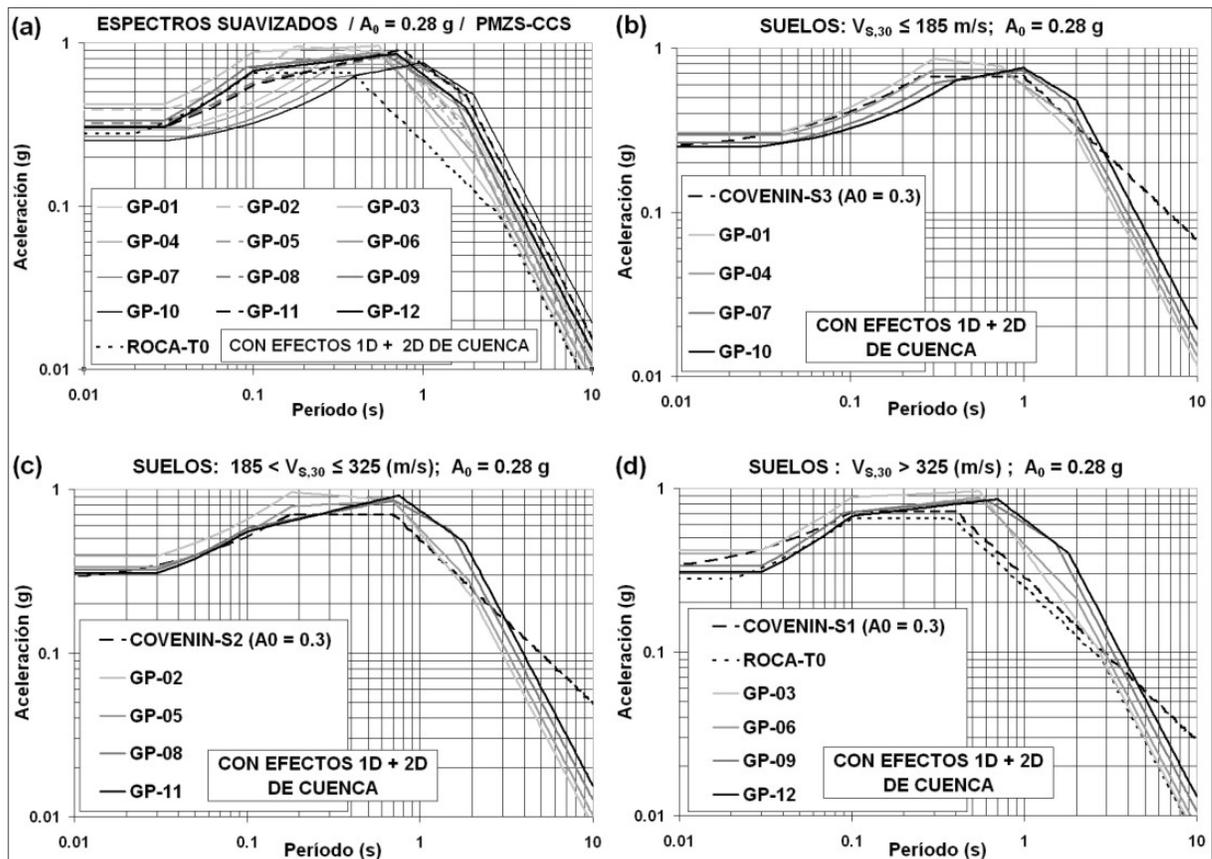


Figura 19. Espectros suavizados + COVENIN-Sn: a) Conjunto en el valle; b) Suelos suaves en el valle + S3; c) Suelos intermedios en el valle + S2; d) Suelos rígidos en el valle y roca sana en sitio cuasi-plano + S1.

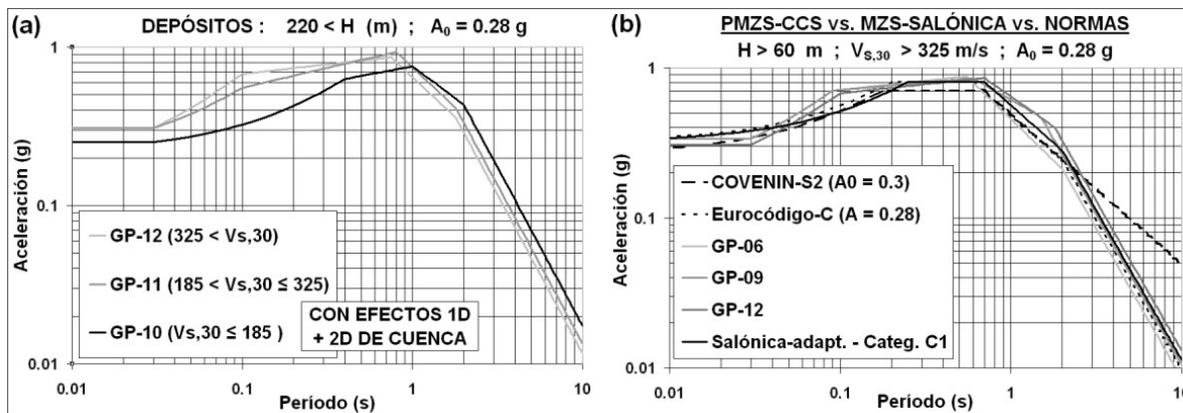


Figura 20. a) Espectros suavizados en microzona 6 ($H > 220$ m); b) Espectros en suelo rígido sobre depósitos no-someros ($H > 60$ m): derivados para el PMZS-CCS; norma nacional; Eurocódigo; y microzonificación de Salónica.

Los espectros elaborados para las otras macrozonas, con sólo microzonas de roca y depósitos someros, guardan las relaciones obtenidas en el estudio de amenaza sísmica, observadas en la figura 21. Adviértase que en la macrozona Sur (R1), a pesar de un gran valor de A_0 , el espectro cae para periodos largos (mediante menor valor de T^*) con un valor A_1 menor a los otros (figura 15).

Para edificaciones esenciales y masivas, grupos de uso A y B1 de la norma, se construyeron espectros elásticos a partir de los anteriores mediante factores de importancia α . Pero en lugar de los valores fijos de la norma (1.3 y 1.15) se definieron factores variables con el periodo según $\alpha(T) = \alpha_0 e^{0.06T} \leq \alpha_{\max}$ para el grupo A, a partir del estudio de amenaza sísmica con

PMR = 975 años. Para el grupo B1 se promedia $\alpha(T)$ con 1. El valor mínimo varía entre 1.28 y 1.35 y el máximo α_{\max} entre 1.5 y 1.7, según las macrozonas (Hernández y Schmitz, 2009b). En la figura 22(a) se muestra la variación de los espectros elásticos según el grupo de uso para la microzona 4-2 (GP-05), incluyendo el contraste con la aplicación de un factor fijo $\alpha = 1.3$ al grupo B2.

Los espectros inelásticos no son materia particular del PMZS-CCS. Sólo se adaptaron las expresiones de la norma a la posibilidad de meseta no-horizontal mostrada en la figura 17 (Hernández & Schmitz, 2009b). Una comprobación de su adecuada aplicabilidad se exhibe en la figura 22(b) para la misma microzona 4-2.

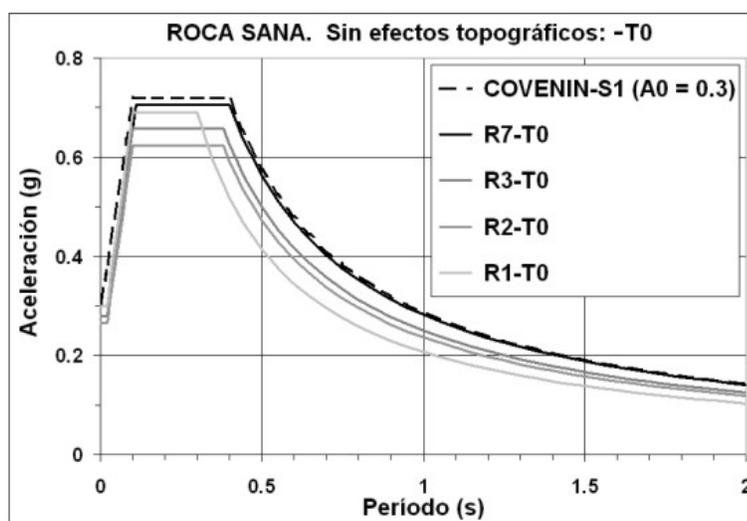


Figura 21. Espectros elásticos en roca sana de sitio cuasi-plano en distintas macrozonas.

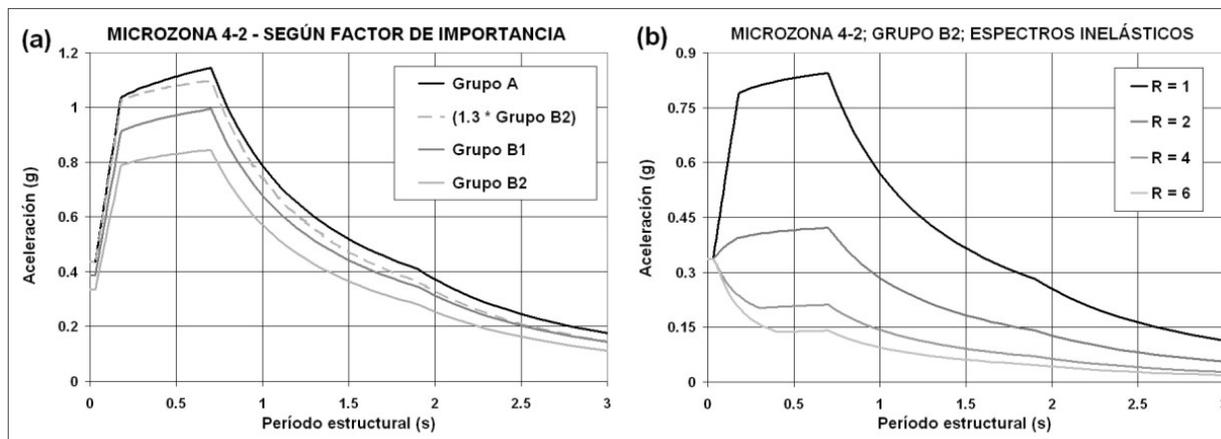


Figura 22. Microzona 4-2: a) Variación de espectros según grupo de uso; b) ejemplo de espectros inelásticos.

CONCLUSIONES

Sobre la base de un análisis local de amenaza sísmica, el modelo geofísico previamente desarrollado para el valle de Caracas y un modelo geotécnico ad-hoc, se efectuó un estudio 1D paramétrico en función de la $V_{s,30}$ y el espesor de los depósitos. Los espectros de respuesta obtenidos fueron agrupados, validados y corregidos con registros sísmicos reales. Se añadieron efectos de cuenca 2D a partir de un estudio detallado de la respuesta del perfil de la zona más profunda del valle ante el terremoto de Caracas de 1967, cuya valoración fue extendida a todo el valle mediante un estudio 3D de cuenca que obtuvo amplificaciones sísmicas. Además, se estimaron efectos 2D topográficos. Para las microzonas definidas en el valle y fuera de él, finalmente se definieron espectros suavizados para diseño estructural, con modificaciones para edificaciones esenciales y masivas.

Se juzga que se obtuvieron espectros más confiables que los normativos, tanto al respecto de las respuestas esperadas sobre depósitos profundos como sobre depósitos someros. Se ofrecen como contribución a la comunidad general, gubernamental y profesional para una más amplia mitigación del riesgo sísmico, cumpliendo un propósito primordial del PMZS-CCS.

En relación con la norma sísmica vigente (COVENIN, 2001) cabe apuntar que ella establece en su artículo 1.1 que se pueden efectuar modificaciones avaladas por estudios especiales aprobados por una Autoridad Ad-Hoc, la cual puede ser asumida por FUNVISIS en este caso, como institución de referencia nacional en el área de protección de la colectividad frente a la amenaza sísmica. Por lo tanto, no son necesarias actualizaciones de la norma para reglamentar el empleo de los estudios de microzonificación, aunque es conveniente que futuras versiones hagan referencias explícitas a ellos.

AGRADECIMIENTOS

Estudio financiado por FONACIT-BID II 2004000738

como parte del Proyecto de Micro-zonificación Sísmica de las ciudades Caracas y Barquisimeto. Aporte al Proyecto FONACIT-ECOS Nord 2004000347. Se agradecen al profesor Apostolos Papageorgiou las fructíferas discusiones acerca de la base conceptual de la incorporación de los efectos de cuenca.

REFERENCIAS

- AFPS, (1990). Recommendations of the French Association for Earthquake Engineering for the redaction of rules relative to structures and installations built in regions prone to earthquakes. Association Française du Génie Parasismique, Saint-Rémy-lès-Chevreuse, France.
- AMARÍS, E., SÁNCHEZ, J., ROCABADO, V., MONCADA, J., SCHMITZ, M., GONZÁLEZ, M. (2009). Espesores y características de los sedimentos profundos. Sub-capítulo 3.4, Informe Técnico Final, Volumen 1 Caracas, Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035a, pp. 354-384.
- ANSAL, A. (2004). Nonlinear soil models for site response; European experience. Workshop on uncertainties in nonlinear soil properties and their impact on modeling dynamic soil response. PEER-Lifelines Program, California.
- ANSAL, A. & BIRO, Y. (2004). Seismic microzonation: a case study. Chapter 8 in Recent advances in earthquake geotechnical engineering and microzonation, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- BARD, P-Y. & BOUCHON, M. (1980). The seismic response of sediment-filled valleys. Part 1. The case of incident SH waves. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 70, No. 4, pp. 1263-1286.
- BARD, P-Y. BOUCHON, M. (1985). The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys. Bull. Seis. Soc.

- Am., Vol. 75, pp. 519–541.
- BORJA, R.I., CHAO, H-Y., MONTÁNS, F.J., LIN, C-H. (1999). Nonlinear ground response at Lotung LSST site. *J. Geot. & Geoenviron. Eng.* Vol. 125 (3), pp. 187-197.
- BRICEÑO, F., SANABRIA, J., AZPÚRUA, P., PLANCHART, M., CASTELLANOS, S., OLIVARES, A., LUSTGARTEN, P., KELEMEN, J., GARCÍA, J., GONZÁLEZ DE J., C., CARRILLO, P., PÉREZ, H., SEED, H., WHITMAN, R., MURPHY, V., LINEHAN, D., TURCOTTE, T., STEINBRUGGE, K., ESPINOSA, A., ALGERMISSEN, S., ARCIA, J., PUIG, J., SCHMIDT, L., GONZÁLEZ, J.V., MARTÍNEZ, J., KNUDSON, C., CRAN, C., PRESHEL, M., HOLOMA, S., GÓMEZ, J., LUCHSINGER, J., SILVA, M., FORTOUL, C., LAMAR, S., GRASES, J., VIGNIERI, L., VALLADARES, E., SUÁREZ, J., GÓMEZ, G., AZPÚRUA, J., PAPANONI, M., RAMOS, C., ROMERO, A., DELGADO, J., AZOPARDO, P., GRINSTEINS, V., ISAACURA, J., CASTELLANOS, H. Y VARGAS, J. (1978). Segunda fase del estudio del sismo ocurrido en Caracas el 29 de julio de 1967. Comisión Presidencial para el Estudio del Sismo, Ministerio de Obras Públicas, 2 volúmenes, 1281 pp. (FUNVISIS, editor, Caracas).
- CADET, H. (2007). Utilisation combinée des méthodes basées sur le bruit de fond dans le cadre du microzonage sismique, Thèse de Doctorat, Joseph Fourier Université, Grenoble, France, 301 pp.
- CEN, (2003). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. European Standard, English version, Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels.
- CHOI, Y. & STEWART, J.P. (2005). Nonlinear site amplification as function of 30 m shear wave velocity. *Earthquake Spectra*, Volume 21, No. 1, pp 1–30.
- COVENIN, (1982). Edificaciones antisísmicas, Norma COVENIN 1756-82. Comisión Venezolana de Normas Industriales, FONDONORMA, Ministerio de Fomento, MINDUR, FUNVISIS, Caracas.
- COVENIN, (1998). Edificaciones sismorresistentes, Norma COVENIN 1756-98. Comisión Venezolana de Normas Industriales, FONDONORMA, MINFRA, FUNVISIS, Caracas.
- COVENIN, (2001). Edificaciones sismorresistentes, Norma COVENIN 1756:2001. Comisión Venezolana de Normas Industriales, FONDONORMA, MCT, MINFRA, FUNVISIS, Caracas.
- DELAVAUD, É. (2007). Simulation numérique de la propagation d'ondes en milieux géologiques complexes: application à l'évaluation de la réponse sismique du bassin de Caracas. Thèse de Doctorat, IPGP, France, 155 pp.
- ECHEZURÍA H., ALONSO, J., PARRA, E. (1991). Primer informe de avance. Comisión para la Revisión de la Norma para Edificaciones Antisísmicas, FUNVISIS, Caracas.
- FELIZIANI, P., PISCITELLI, G., CASTILLO, A. (2004). Sistema de Información Geográfica aplicado al subsuelo del Área Metropolitana de Caracas – Proyecto SIGAMC. XVIII Seminario de Geotecnia, Caracas, Memorias.
- FRANKEL, A., STEPHENSON, W., CARVER, D., WILLIAMS, R., ODUM, J., RHEA, S. (2007). Seismic hazard maps for Seattle, Washington, incorporating 3D sedimentary basin effects, nonlinear site response, and rupture directivity. USGS Open-File Report 2007–1175, Virginia.
- GISCA, (2006). Informe N°: ING-IP-P-050536-4 Rev. 1. Servicios de consultoría para la realización de estudios de exploración del subsuelo en la ciudad de Caracas. Geotecnia e Ingeniería Sísmica, Caracas.
- HERNÁNDEZ, J.J., LÓPEZ, O.A., GUTIÉRREZ, A., BONILLA, R. (1996). Documento base con la versión preliminar de la nueva Norma COVENIN 1756. Comisión de Revisión de la Norma Antisísmica, FUNVISIS, Caracas.
- HERNÁNDEZ, J.J. & SCHMITZ, M. (2009^a). Evaluación actualizada de amenaza sísmica para la microzonificación de Caracas. V Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Caracas, 4p.
- HERNÁNDEZ, J.J. & SCHMITZ, M. (2009^b). Espectros de diseño para microzonas. Sub-capítulo 6.4, Informe Técnico Final, Volumen 1 Caracas, Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035a, pp. 876-924.
- HERNÁNDEZ, J.J., DOMÍNGUEZ, J., HERNÁNDEZ A. (2009^a). Estudio paramétrico de respuestas 1D de sitio. Sub-capítulo 4.1, Informe Técnico Final, Volumen 1 Caracas, Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035a, pp. 388-411.
- HERNÁNDEZ J.J., SCHMITZ, M., DOMÍNGUEZ, J., GONZÁLEZ, M. (2009^b). Espectros 1D por clases de sitio. Sub-capí-

- tulo 4.2, Informe Técnico Final, Volumen 1 Caracas, Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035a, pp. 412-502.
- HERNÁNDEZ, J.J., SCHMITZ, M., DELAUAUD, E., ALVARADO, L., ROCABADO, V., VILOTTE, J.-P., RENDÓN, H. (2009c). Efectos 2D y 3D de cuenca. Sub-capítulo 4.3, Informe Técnico Final, Volumen 1, Caracas, Proyecto de micro-zonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035a, pp. 503-539.
- IERVOLINO, I. & CORNELL, C.A. (2005). Record selection for nonlinear seismic analysis of structures. *Earthquake Spectra*, Vol. 21, No. 3, pp. 685–713.
- JOYNER, W. & CHEN, A. (1975). Calculation of nonlinear ground response in earthquakes. *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 65, No. 5, pp. 1315-1336.
- KANTAK, P., SCHMITZ, M., AUDEMARD, F. (2005). Sediment thickness and a west-east geologic cross section in the Caracas Valley. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la UCV*, Vol. 20, (4), pp. 43-56.
- KRAMER, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ.
- LEE, J., (2007). Earthquake site effect modeling in sedimentary basins using a 3-D indirect boundary element-fast multipole method. PhD thesis, Binghamton University, New York, EEUU, 213 pp.
- MARSH, J. (1992). Two dimensional nonlinear seismic ground studies. PhD Thesis, Univ. of Auckland, New Zealand.
- MURPHY, V., LINEHAN, D., TURCOTTE, T. (1969). *Seismic Investigations, Valley of Caracas and the Litoral Central*. Weston Geophysical Engineers International, Inc., Weston, Massachusetts.
- NAEIM, F. & LEW, M. (1995). On the use of design spectrum compatible histories. *Earthquake Spectra*, Vol. 11, No. 1, pp. 111–127.
- PAPAGEORGIOU, A.S. & KIM, J. (1991). Study of the propagation and amplification of seismic waves in Caracas valley with reference to the 29 July 1967 earthquake: SH waves. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 81, pp. 2214-2233.
- PAPAGEORGIOU, A.S. & KIM, J. (1993). Propagation and amplification of seismic waves in 2-D valleys excited by obliquely incident P- and SV-waves. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 22, pp. 167-182.
- PEER, (2005). PEER NGA Database. Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), California.
- PITILAKIS, K. (2004). Site effects. Chapter 5 in *Recent advances in earthquake geotechnical engineering and microzonation*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- ROCA BADO, V., SCHMITZ, M., RENDÓN, H., VILOTTE, J.-P., AUDEMARD, F., SOBIESIAK, M., AMPUERO, J.-P., ALVARADO, L. (2006). Modelado numérico de la respuesta sísmica 2D del valle de Caracas. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la UCV*, Vol. 21 (4), 81-93.
- ROVELLI, A. MALAGNINI, L., CASERTA, A., MARRA, F. (1995). Using 1-D and 2-D modelling of ground motion for seismic zonation criteria: results for the city of Rome. *Annali di Geofisica*, Vol. XXXVIII, N. 5-6, pp. 591-605.
- SÁNCHEZ, J., SCHMITZ, M., CANO V. (2005). Mediciones sísmicas profundas en Caracas para la determinación del espesor de sedimentos y velocidades sísmicas como aporte para el estudio de microzonificación sísmica. *Boletín Técnico IMME*, Volumen 43, N° 2, pp. 49-67.
- SCHMITZ, M., HERNÁNDEZ, J.J. AND THE CARACAS SEISMIC MICROZONING PROJECT WORKING GROUP. (2011). Principal results and basic methodology of the Caracas, Venezuela, Seismic Microzoning Project. 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Santiago, Chile, Paper No. PRASC, 13 pp. Descarga en línea: http://www.5icege.cl/images/stories/congress_sessions/papers/session_5/5.10.PRASC.pdf
- SCHNABEL, P., LYSMER, J., SEED, H. (1972). SHAKE. A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. *Earthq. Eng. Research Center*, Rep. No. UCB/EERC-72/12. Univ. of Calif., Berkeley.
- SEED, B. & IDRIS, I. (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. UCB/EERC-70/10, *Earthquake Engineering Research Center*, University of California, Berkeley.
- SEED H.B., IDRIS I.M., DEZFULIAN H. (1970). Relationships between soil conditions and building damage in the Caracas earthquake of July 29, 1967. EERC-Report

70-2, Berkeley, California, 40 pp.

- SEED, H.B., UGAS, C., LYSMER, J. (1974). Site-dependent spectra for earthquake-resistant design. Report No. UCB/EERC-74/12, Earthq. Eng. Research Center, University of California, Berkeley.
- SEMBLAT, J., DUVAL, A., DANGLA, P. (2002). Seismic site effects in a deep alluvial basin: numerical analysis by the boundary element method. *Computers and Geotechnics*, Vol. 29, pp. 573–585.
- STEWART, J.P. & BATURAY, M.B. (2000). Evaluation of uncertainties in ground motion estimates for soil sites. Report No. UCLA/CEE -2000/01, Department of Civil & Environmental Engineering, University of California, Los Angeles.
- STEWART, J.P., CHIOU, S-J., BRAY, J.D., GRAVES, R.W., SOMERVILLE, P.G., ABRAHAMSON, N.A. (2001). Ground motion evaluation procedures for performance-based design. PEER Report 2001/09. Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley.
- SUÁREZ G. & NÁBĚLEK J. (1990). The 1967 Caracas earthquake: Fault geometry, direction of rupture propagation, and seismotectonic implications. *J. Geophys. Res.*, 95, pp. 17459-17474.
- UGAS, C. (1974). Espectros de diseño antisísmico en función de las condiciones locales del suelo. *Boletín Técnico IMME*, N° 48, pp. 25-57.
- VUCETIC, M. & DOBRY, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *J. Geot. Eng.*, Vol. 117-1, pp. 89-107.