

**CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO CONSTRUIDO EN VENEZUELA:
APORTES DE LA GEOFÍSICA Y DE LA GEOLOGÍA CON ÉNFASIS EN LOS
ASPECTOS SÍSMICOS**

**Michael Schmitz (1), Franck Audemard (2),
Jorge González (3), Victor Rocabado (4)**

Fundación venezolana de Investigaciones Sismológicas –FUNVISIS-

**(1) mschmitz@funvisis.org.ve, (2) faudemard@funvisis.org.ve,
(3) jgonzalez@funvisis.org.ve 4) yrocabado@funvisis.org.ve**

RESUMEN

Las condiciones del suelo determinan las características dinámicas de un sitio en caso de ocurrencia de un sismo; es decir que se pueden observar variaciones fuertes en la respuesta sísmica y por ende en la distribución de daños en sitios cercanos, tal como fue evidenciado durante el terremoto de Caracas de 1967. La Norma COVENIN 1756-2001 de construcciones sismorresistentes contempla la distribución de las velocidades de las ondas de corte como un parámetro importante para la caracterización del perfil de suelo. Por esta razón, FUNVISIS ha desarrollado recientemente estudios destinados al conocimiento de la conformación del subsuelo en el marco de programas de microzonificación sísmica en varias ciudades de Venezuela. Se emplearon métodos sísmicos (refracción sísmica, mediciones de ruido ambiental) y gravimétricos, en conjunto con correlaciones entre parámetros geotécnicos y geofísicos para caracterizar el subsuelo. Cálculos de los espectros de respuesta dinámica, considerando los perfiles del suelo en la zona de estudio, permiten predecir los niveles de aceleración y las frecuencias desarrolladas en la superficie de los paquetes sedimentarios. Simulaciones numéricas ayudan a predecir la respuesta sísmica en diferentes partes de las cuencas sedimentarias. Por otra parte, además de las variaciones introducidas por el suelo sobre la señal sísmica, es fundamental considerar en cualquier proyecto la susceptibilidad local ante los movimientos en masa, como para la licuación de suelos, sin olvidar que el sitio en evaluación pudiese estar afectado directamente por una falla geológica activa.

XVIII Seminario Venezolano de Geotecnia

Geoinfraestructura: La Geotecnia en el desarrollo nacional

INTRODUCCIÓN

Para Venezuela, el sismo de Caracas de 1967 marcó un hito en la evaluación de los daños generados por la ocurrencia de un terremoto, ya que se observaron fuertes efectos de sitio (e.g. FUNVISIS, 1978, Seed et al., 1970). El objetivo principal de los estudios posteriores al sismo de 1967 fue determinar las condiciones del suelo que pudieran haber sido responsables de los altos índices de daño registrados en ciertas zonas de la ciudad, tal como Los Palos Grandes y San Bernardino. La caracterización del espesor de los sedimentos y los valores de las velocidades sísmicas fueron los objetivos específicos de las mediciones. A partir de dichos resultados, se determinó que las zonas que presentaron mayor daño eran las zonas con los mayores espesores de sedimentos. En el área de Los Palos Grandes se determinó que el espesor sedimentario supera los 300 m (Weston, 1969; FUNVISIS, 1978), lo cual ha sido confirmado recientemente por mediciones sísmicas de refracción.

La norma COVENIN 1756-01 (2001), publicada en la Gaceta Oficial No. 36635 del 3 de febrero de 1999, es el resultado de las investigaciones en las áreas de diseño y construcción de obras civiles, realizadas por FUNVISIS y otras instituciones. Entre los aspectos novedosos de esta norma destacan la nueva zonificación sísmica, con la definición de siete zonas congruentes con la división política nacional (figura 1), la definición de cuatro formas espectrales tipificadas de acuerdo a estadísticas de registros y resultados de estudios analíticos y la introducción de la velocidad de la onda de corte como factor determinante para definir el comportamiento del perfil geotécnico.

Se definen las formas espectrales a aplicarse en las construcciones en función de las velocidades promedio de las ondas de corte en los estratos con V_S menor a 500 m/s (tabla 1). Se recomienda el uso de ensayos sismoelásticos in situ para determinar la velocidad de la onda de corte. Sin embargo, en la práctica geotécnica se estima la velocidad de las ondas de corte a partir de correlaciones empíricas.

Con base en las recomendaciones de la Norma y con la finalidad de evaluar la respuesta sísmica de perfiles geotécnicos típicos, se han realizado modelos dinámicos a través de métodos numéricos, para determinar las aceleraciones espectrales máximas en la superficie (González et al., 2004; Schmitz et al., 2004). En estos estudios, se han utilizado acelerogramas de sismos reales, obtenidos de la red mundial, pero de

XVIII Seminario Venezolano de Geotecnia

Geoinfraestructura: La Geotecnia en el desarrollo nacional

ambientes tectónicos similares a los de Venezuela, para caracterizar el comportamiento de los suelos de una determinada zona ante movimientos sísmicos fuertes.

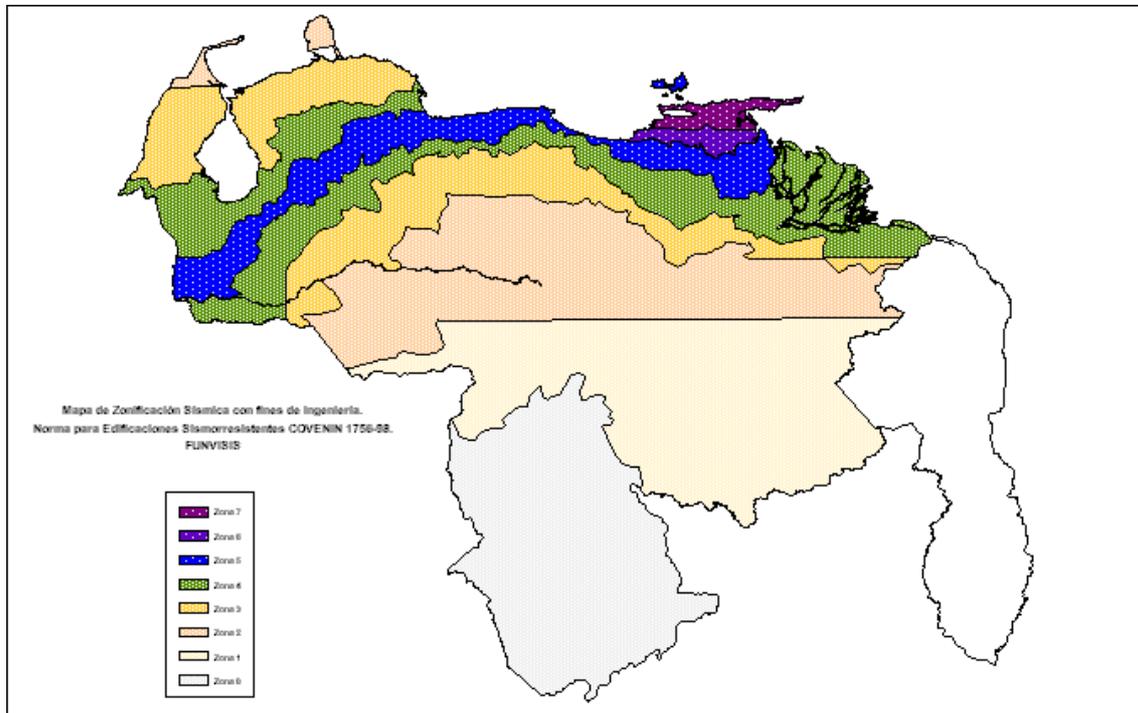


Figura 1. Mapa de zonificación sísmica con fines de ingeniería (COVENIN 1756-01, 2001). Los valores de aceleración, medidos en g, en las respectivas zonas son: zona 7 = 0,4; zona 6 = 0,35; zona 5 = 0,3; zona 4 = 0,25; zona 3 = 0,2; zona 2 = 0,15; zona 1 = 0,1; zona 0 = 0.

Material	V _{sp} (m/s)	H (m)	Zonas Sísmicas 1 a 4		Zonas Sísmicas 5 a 7	
			Forma Espectral	φ	Forma Espectral	φ
Roca sana/fracturada	>500	-	S1	0.85	S1	1.00
Roca blanda o meteorizada y suelos muy duros o muy densos	>400	<30	S1	0.85	S1	1.00
		30-50	S2	0.80	S2	0.90
		>50	S3	0.70	S2	0.90
Suelos duros o densos	250-400	<15	S1	0.80	S1	1.00
		15-50	S2	0.80	S2	0.90
		>50	S3	0.75	S2	0.90
Suelos firmes/medio densos	170-250	≤50	S3	0.70	S2	0.95
		>50	S3 ^(a)	0.70	S3	0.75
Suelos blandos/sueltos	<170	≤15	S3	0.70	S2	0.90
		>15	S3 ^(b)	0.70	S3	0.80
Suelos blandos o sueltos ^(b) intercalados con suelos más rígidos	-	H ₁	S2 ^(c)	0.65	S2	0.70

a) Si $A_0 \leq 0.15$ úsese S4

b) El espesor de los estratos blandos o sueltos ($V_{sp} < 170$ m/s) debe ser mayor que 0.1 H.

c) Si $H_1 \geq 0.25 H$ y $A_0 \leq 0.20$ úsese S3.

Tabla 1. Forma Espectral y factor de corrección φ (COVENIN 1756-01, 2001).

XVIII Seminario Venezolano de Geotecnia

Geoinfraestructura: La Geotecnia en el desarrollo nacional

Las investigaciones geofísicas han sido enfocadas en una caracterización general de la conformación de los paquetes sedimentarios a través de métodos sísmicos (e.g. Abeki et al., 1998; Rocabado et al., 2001; 2004; Schmitz et al., 2002; Sánchez et al., 2004) y gravimétricos (e.g. Sánchez et al., 2001; Romero et al., 2004). Uno de los parámetros críticos en la caracterización del subsuelo ha sido la velocidad de las ondas de corte, identificada en la norma COVENIN 1756-01 (2001) como uno de los parámetros fundamentales (tabla 1). Por sus características prácticas, se ha hecho el intento de determinar la velocidad de ondas de corte promedio de los primeros 30 m (BSSC-NEHRP, 2000). A continuación se detallarán algunos ejemplos de estudios de caracterización del subsuelo realizados recientemente en Venezuela.

CARACAS

Basados en los trabajos posteriores al terremoto de Caracas de 1967 (e.g. FUNVISIS, 1978), se iniciaron mediciones de ruido ambiental para la determinación del período predominante de vibración utilizando la técnica H/V (Abeki et al., 1998; Enomoto et al., 2001; Rocabado et al., 2001; Semblat et al., 2002). Con los resultados de las mediciones de microtemores, junto con información sobre el espesor sedimentario del valle de Caracas (Weston, 1969; Kantak et al., 2004; Sánchez et al., 2004), se elaboró un mapa de velocidades sísmicas promedio en el valle (figura 2). Los resultados de las investigaciones geofísicas han sido usados para configurar modelos de la respuesta sísmica (Papageorgiou y Kim, 1991; Schmitz et al., 2002), que confirman la complejidad de la respuesta sísmica en el valle de Caracas.

Adicionalmente a la geometría del valle y la topografía, hay una influencia fuerte de los estratos superficiales en la respuesta sísmica. El grupo de estudio JICA, que esta elaborando actualmente el "Plan Básico de Prevención de Desastres en el Distrito Metropolitano de Caracas", ha usado una recopilación de datos geotécnicos (P. Feliziani, comunicación personal) para caracterizar los mismos. Sin embargo, se usaron correlaciones entre los parámetros geotécnicos (número de golpes SPT) del Japón (número de golpes SPT) con las velocidades de las ondas de corte del Japón. En torno a la línea 4 del metro en Caracas, se investigaron los parámetros geotécnicos y geofísicos en pozos de unos 20 m de profundidad (ver Campos et al., estas memorias). Los

resultados demuestran la necesidad de sistematizar las correlaciones entre estos parámetros a partir de un número grande de pozos.

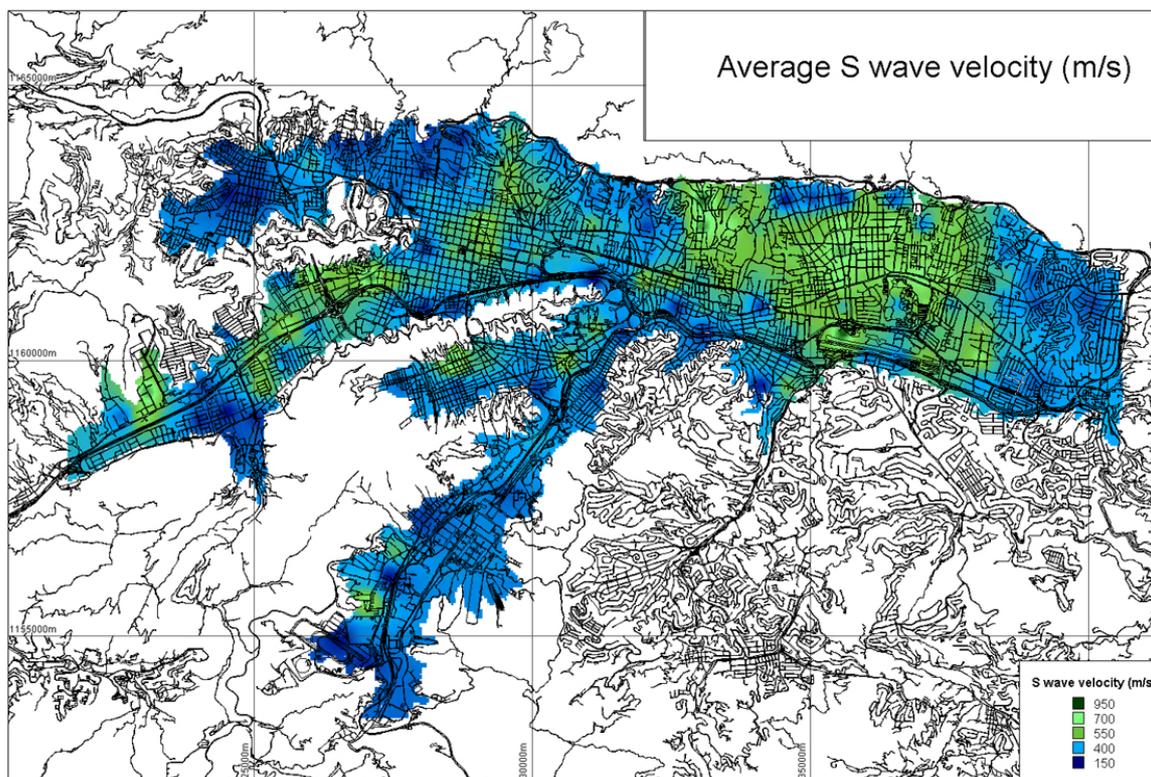


Figura 2. Mapa de velocidades sísmicas promedio en el valle de Caracas (Schmitz et al., 2003).

BARQUISIMETO

Barquisimeto, la capital del estado Lara, se encuentra ubicada en las cercanías de la Falla de Boconó, la cual ha originado a lo largo de la historia varios terremotos destructivos, tal como el terremoto de 1812, que causó alrededor de 4.000 víctimas en Barquisimeto (Grases, 1990). Motivado por su alta amenaza sísmica, se inició en 1998, un proyecto de microzonificación sísmica, incorporando a las autoridades del gobierno local, tales como Alcaldía del Municipio Iribarren y administración de la Gobernación del estado Lara, a objeto de caracterizar los parámetros físicos de la ciudad. Se realizaron mediciones de ruido ambiental y gravimétricas, cubriendo todo el territorio de la ciudad (Rocabado et al., 2004). Con el fin de estimar las velocidades de corte promedio para los primeros 30 m, se hicieron mediciones de refracción sísmica en diferentes zonas de la ciudad y se compilaron los análisis de perforaciones geotécnicas

en el centro y este de Barquisimeto para complementar los datos de la profundidad del suelo. Con los datos disponibles hasta la fecha, las velocidades de ondas de corte solamente pueden ser definidos en sitios aislados debido a la poca cobertura de los datos sísmicos (ver De Marco et al., estas memorias).

INVESTIGACIONES REALIZADAS EN LOS ESTADOS VARGAS Y SUCRE

Impulsados por los desastres naturales del terremoto de Cariaco de 1997 (e.g. FUNVISIS et al., 1997) y de los aludes torrenciales de Vargas de 1999, se realizaron en ambas zonas mediciones geofísicas para caracterizar el comportamiento del suelo en caso de un sismo. El litoral central, aparte de las amenazas por deslizamientos, tiene una elevada amenaza sísmica, evidenciado en los terremotos de 1812, 1900 (Grases, 1990) y 1967 (e.g. FUNVISIS, 1978, Seed et al., 1970). Por esta razón, se realizaron entre las poblaciones de La Guaira en el oeste y Tanaguarena en el este, mediciones sísmicas y gravimétricas (Romero et al., 2002; 2004). Los resultados permiten caracterizar los sedimentos de los conos aluviales y estimar las velocidades de las ondas de corte en los primeros 30 m (figura 3).

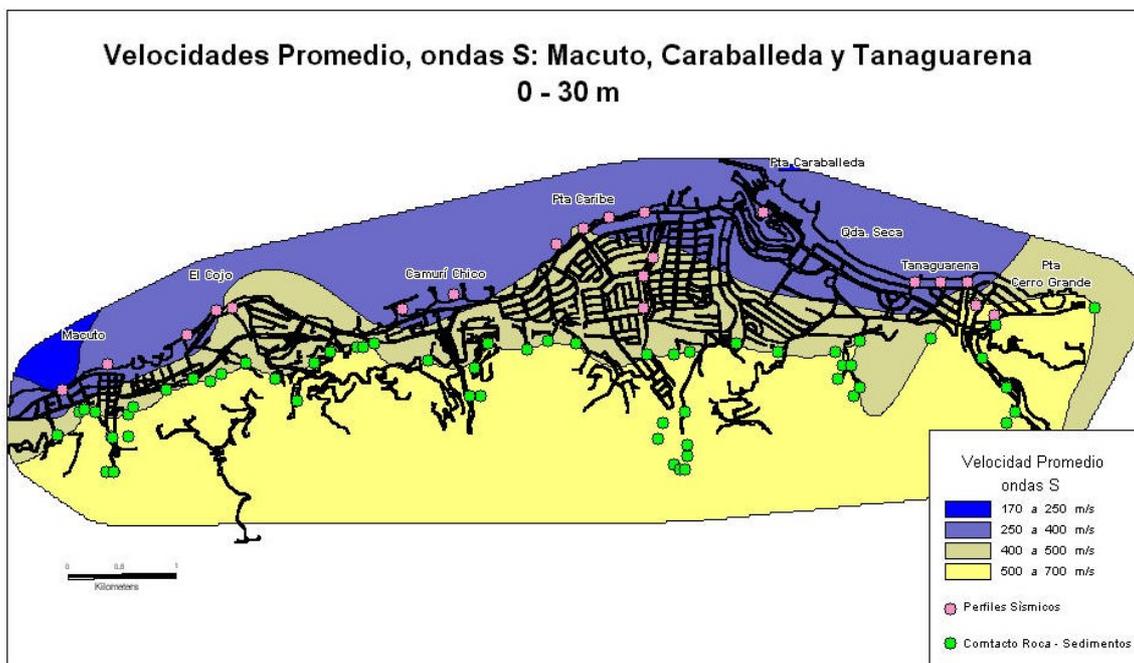


Figura 3. Mapa de velocidades de las ondas S, promediadas para los primeros 30 m, entre las zonas de Macuto y Tanaguarena (Romero et al., 2002).

Los daños ocurridos asociados al terremoto de Cariaco de 1997 se concentraron en las ciudades de Cariaco y Cumaná (e.g. FUNVISIS et al., 1997) y a lo largo del Golfo de Cariaco, donde predominaron efectos inducidos como licuación de suelo y “lateral spreading” (González et al., 2004). El hospital Dr. Antonio Patricio de Alcalá en Cumaná, a pesar de no haber sufrido daños mayores durante el terremoto, no prestó servicio para la atención de las víctimas durante varios días posteriores al sismo. Esta situación motivó un estudio detallado de los alrededores del hospital, que debía dar indicios para la ubicación exacta de la falla de El Pilar respecto al hospital, y las características del suelo de fundación.

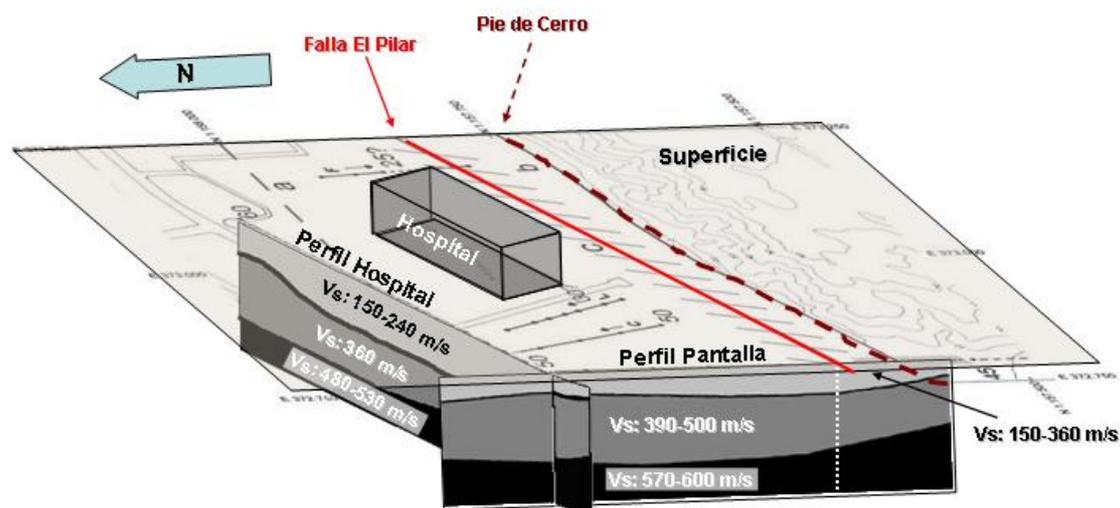


Figura 4. Vista oblicua del hospital Dr. Antonio Patricio de Alcalá y posición de la falla de El Pilar desde nor-oeste con los modelos de velocidad de perfiles sísmicos realizados en la zona (Schmitz et al., 2004).

En torno al hospital, se determinaron las velocidades de propagación de las ondas sísmicas a lo largo de 5 perfiles sísmicos (Schmitz et al., 2004). En los modelos de las ondas P destaca el nivel freático con profundidades entre 3 y 6 m. En los modelos de las ondas de corte se identificaron tres capas, donde la capa más superficial tiene una velocidad sísmica entre 150 y 280 m/s, interpretado como sedimentos cuaternarios de la

XVIII Seminario Venezolano de Geotecnia

Geoinfraestructura: La Geotecnia en el desarrollo nacional

llanura aluvial costera, con una profundidad entre 10 y 20 m (figura 4). La segunda capa está representada por velocidades entre 325 y 520 m/s hasta una profundidad de 25 - 65 m, interpretados como sedimentos de la llanura aluvial o del cordón litoral. La última capa y más profunda, con velocidades de la onda de corte entre 460 y 700 m/s, es interpretada como sedimentos plio-pleistocenos de las formaciones Caigüire y Cumaná, principalmente compuestos por arenas y arcillas intercaladas con gravas y conglomerados. Para conocer el comportamiento dinámico del perfil geotécnico, se realizó el modelado de los espectros de respuesta para 3 escenarios locales, lo que resultó en aceleraciones espectrales promedio máximas superiores a los 0,50 g, lo que supera a los valores de aceleraciones máximas en roca previsto en la Norma COVENIN 1756-01 (2001) de “Edificaciones Sismorresistentes”, que señala valores de 0,40g para la zona (Schmitz et al., 2004).

No se pudo ubicar con certeza la traza de la Falla de El Pilar, por lo que se recomienda la realización de mediciones geofísicas adicionales como gravimetría y tomografía eléctrica para que se puedan comparar sus resultados con los de la sísmica, junto con una evaluación neotectónica detallada mediante el análisis de fotos aéreas y recopilación en campo, para la definición de un lugar óptimo para la realización de una trinchera de exploración paleosísmica con el fin de obtener evidencias directas sobre la ubicación de la traza de la falla de El Pilar.

CONCLUSIONES

El conocimiento de los parámetros geofísicos en el subsuelo de las ciudades es importante para poder modelar con más precisión el comportamiento dinámico en un sitio dado. En varias ciudades de Venezuela, tal como Caracas, Barquisimeto y en los estados Vargas y Sucre, se han hecho importantes adelantos en la información geológica y geofísica en la última década. En muchos casos, se requiere de un mayor nivel de detalle, sobre todo respecto a las velocidades de las ondas de corte, para poder delimitar zonas con suelos con un comportamiento similar, dentro de un concepto de microzonificación sísmica. Pero el ejemplo del sismo de Cariaco de 1997 ha demostrado, que para las construcciones y para las infraestructuras importantes se deberán evaluar los sitios respecto al potencial de licuación y las deformaciones

XVIII Seminario Venezolano de Geotecnia

Geoinfraestructura: La Geotecnia en el desarrollo nacional

permanentes del sitio por rupturas cosísmicas, o sea por la ruptura en superficie o sea por efectos indirectos como “lateral spreading” y remoción en masa (deslizamientos).

REFERENCIAS

- Abeki, N., Seo, K., Matsuda, I., Enomoto, T., Watanabe, D., Schmitz, M., Rendón, H. and Sánchez, A., 1998. Microtremor observations in Caracas city, Venezuela. In: Irikura et al. (eds.), *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Balkema, Rotterdam, 619-624.
- BSSC-NEHRP, 2000. NEHRP Recommended Provisions for seismic regulations for new buildings and other structures. Part 1: Provisions (FEMA 368); Part 2: Commentary (FEMA 369). Prepared by the Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington DC. (www.bssconline.org/NEHRP2000/).
- Campos, A., Schmitz, M., Cataldi, A., 2004. Definición de las relaciones entre parámetros geofísicos y geotécnicos en pozos disponibles a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas. XVIII Seminario de Geotecnia, Caracas, sometido.
- COVENIN 1756-01, 2001. Edificaciones Sismorresistentes, Ministerio de Desarrollo Urbano – FUNVISIS, 71 pp. + 123 pp. comentarios.
- De Marco, R., Bechtold, M., Audemard, F., Sánchez, J., Rocabado, V., Schmitz, M., 2004. Caracterización geofísica/geológica de la terraza de Barquisimeto, estado Lara: Integración de Ruido Sísmico Ambiental, Sísmica de Refracción, Gravimetría y Geología. XVIII Seminario de Geotecnia, Caracas, sometido.
- Enomoto, T., Schmitz, M., Matsuda, I., Abeki, N., Masaki, K., Navarro, M., Rocabado, V. and Sanchez, A., 2001. Fundamental study on seismic risk assessment using soil dynamic characteristics in Caracas, Venezuela. International Workshop “Study on Countermeasures for Earthquake Disaster in Caracas (1999 – 2001)”, Caracas, Venezuela, August 24 - August 25, 2000, Série Técnica, FUNVISIS, Caracas, 40-45.
- FUNVISIS, 1978. Segunda Fase del Estudio del Sismo ocurrido en Caracas el 29 de Julio de 1967. Ministerio de Obras Públicas, Comisión Presidencial para el Estudio del Sismo, FUNVISIS, Caracas, Venezuela, Volumen A, pp. 517.
- FUNVISIS, IMME-UCV, UDO, ACV, CAV and CI-Sucre, 1997. The July 9, 1997, Cariaco, Eastern Venezuela Earthquake. EERI-Newsletter, Vol. 31 (10), EERI Special Earthquake Report, 1-8.
- González, J., Schmitz, M., Audemard, F., Contreras, R., Mocquet, A., Delgado, J. and De Santis, F., 2004. Site effects of the 1997 Cariaco, Venezuela earthquake. *Engineering Geology*, 72, 143-177.
- Grases, J., 1990. *Terremotos destructores del Caribe. 1502-1990*. 1° ed., Orcyt-Unesco, Montevideo, Uruguay, 132 pp.
- Kantak, P., Schmitz, M., Audemard, F., 2004. Sediment thickness and a west-east geologic cross section in the Caracas Valley. *Boletín de la Sociedad Venezolana de Geólogos*, aceptado.
- Papageorgiou, A.S. and 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. *BSSA*, 81, 2214-2233.
- Rocabado, V., Schmitz, M., Malavé, G. y Enomoto, T., 2001. Períodos fundamentales y amplificación del suelo de la ciudad de Caracas utilizando la técnica de Nakamura. International Workshop “Study on Countermeasures for Earthquake Disaster in Caracas (1999 – 2001)”, Caracas, Venezuela, August 24 - August 25, 2000, Série Técnica, FUNVISIS, Caracas, 130-139.

XVIII Seminario Venezolano de Geotecnia

Geoinfraestructura: La Geotecnia en el desarrollo nacional

- Rocabado, V., Sánchez, J., Andrade, L. y Schmitz, M., 2004. Características del suelo en Barquisimeto, estado Lara, aplicando métodos geofísicos y geotécnicos. Boletín de la Sociedad Venezolana de Geólogos, aceptado.
- Romero, M., Cragno, A., Schmitz, M. y González, J., 2002. Evaluación geofísica integral de los conos aluviales en Macuto, Caraballeda y Tanaguarena, edo. Vargas. III Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Caracas, 15 al 18 de Julio 2002, Memorias, Serie Técnica No. 1-2002, FUNVISIS, Caracas, 103-108.
- Romero, M., Cragno, A., Ambrosio, R., Schmitz, M. y González, J., 2004. Evaluación geofísica de los conos aluviales en Macuto, Caraballeda y Tanaguarena, edo. Vargas. Boletín de la Sociedad Venezolana de Geólogos, aceptado.
- Sánchez J, Orihuela N, Meza R, Ambrosio R., 2001. Modelaje gravimétrico de la cuenca de Los Palos Grandes. International Workshop "Study on Countermeasures for Earthquake Disaster in Caracas" (1999 – 2001), Caracas, Venezuela, Serie Técnica N° 01-2001, FUNVISIS, 158-165.
- Sánchez, J., Schmitz, M. y Cano, V., 2004 Mediciones sísmicas profundas en Caracas para la determinación del espesor de sedimentos y velocidades sísmicas. Boletín de la Sociedad Venezolana de Geólogos, aceptado.
- Schmitz, M., Enomoto, T., Ampuero, J.-P., Rocabado, V., Kantak, P., Sánchez, J., Rendón, H., González, J., Abeki, N., Villotte, J.-P., Navarro, M. and Delgado, J., 2002. Seismic microzoning study in Chacao district, Caracas, Venezuela. 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, 9-13 September 2002, extended abstract, 10 pp.
- Schmitz, M., Sánchez, J., Rocabado, V. and enomoto, T., 2003. Geophysical investigations as the base for a seismic microzoning study in Caracas, Venezuela. International Conference Risk, Vulnerability & Reliability in Construction. Algiers, October 11-12, 2003, Actes Volume I, 123-131.
- Schmitz, M., Romero, M., Bonvive, F., Audemard, F., y González, J., 2004. Resultados de mediciones sísmicas e implicaciones de dinámica de suelo en torno al hospital Dr. Antonio Patricio de Alcalá, Cumaná, Estado Sucre. Boletín de la Sociedad Venezolana de Geólogos, aceptado.
- Seed HB, Idriss IM, 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.
- Semblat, J.F., Duval, A.M. and Dangla, P., 2002. Seismic site effects in a deep alluvial basin: numerical analysis by the boundary element method. Computers and Geotechnics, 29, 573-585.
- Weston (Weston Geophysical Engineers International INC), 1969. Investigaciones Sísmicas en el Valle de Caracas y en el Litoral Central (bajo la planificación y supervisión de la Comisión Presidencial para el Estudio del Sismo), Caracas, 22 pp.