

Forma de presentación:

Evento \_\_\_\_\_ GEOFÍSICA'2013

Oral  Poster \_\_\_\_\_

## MICROZONACIÓN SÍSMICA DE CIUDADES DE AMÉRICA LATINA. RESULTADOS DEL PROYECTO 487 DEL PICG

Leonardo Alvarez(1), Leandro Rodríguez(2), Margaret Grandison(3), Leonardo Alvarado(4), Zulima Rivera(1), Twiggy Velesvilla(2), Víctor Schmidt(4), Priscilla Paniagua(4)

1 Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Caja Postal 2775, Habana 13, Cuba, leoalvar@cenais.cu; 2. Centro Regional de Sismología para América del Sur ([CERESIS](#)), Perú; 3. The Earthquake Unit, University of West Indies, Mona Unit ([UWI](#)); 4. Laboratorio de Ingeniería Sísmica, Universidad de Costa Rica ([LIS](#))

### Resumen

Se presentan los resultados del proyecto internacional UNESCO/ICGC 487 e ICTP Network Net-58 "Seismic microzoning of Latin America cities". En el mismo se estudiaron 5 ciudades: Lima(Perú), Kingston (Jamaica), Barquisimeto (Venezuela), Bayamo (Cuba) y San José (Costa Rica). El grado de estudio no fue el mismo en todas ellas, llegándose a la confección de mapas de microzonación sísmica en Bayamo, Barquisimeto y Lima, mientras que en Kingston y San José se estudiaron los efectos de terremotos en un número reducido de perfiles. El método utilizado consistió en el cálculo de sismogramas sintéticos de ondas superficiales P-SV y SH a lo largo de perfiles que atravesaran las ciudades bajo estudio y la extracción de ellos de parámetros (como la aceleración máxima) y funciones (como los espectros de respuesta) que permitieron caracterizar el comportamiento de sus suelos ante el paso de las ondas sísmicas. En los casos en que la cantidad de perfiles estudiados garantizaba una buena cobertura espacial se pasó a confeccionar los mapas de microzonación sísmica. El método de cálculo de sismogramas sintéticos usado es conocido como técnica híbrida y combina suma modal con diferencias finitas. El mismo había sido probado con anterioridad en diferentes condiciones geólogo tectónicas. El procesamiento espacial de la información para confeccionar los mapas de microzonación se hizo con un paquete de programas desarrollado en este proyecto.



## **Introducción**

La microzonación (o microzonificación) sísmica es una disciplina conocida desde los años 60 del pasado siglo. Surgida en la antigua Unión Soviética, tenía como objetivo cartografiar las variaciones de la intensidad sísmica esperada a nivel regional en una escala más detallada (para ciudades) en función de las características de los suelos que la componían. La base fundamental de tales trabajos la constituían la geología de los estratos superficiales y sus propiedades fundamentales, lo que era apoyado por mediciones instrumentales (microsismos y terremotos débiles). Un análisis completo de tales procedimientos es presentado en (Sadovskii et al. 1973; Medvedev, 1977). Diversas técnicas se han desarrollado desde entonces, todas ellas con el objetivo de representar en el mapa de una ciudad o de cualquier zona de desarrollo, distintas zonas que tienen un comportamiento similar ante los terremotos, y que por lo general se aparta del esperado de acuerdo a los estudios de peligro sísmico regional. La microzonación a partir de mediciones de microsismos obtuvo una gran difusión y continúa siendo realizada en la actualidad (Nakamura, 1989; Bard, 1999; Seo, 1996); es quizás el más “popular” método de microzonación sísmica. Su gran limitante es la necesidad de efectuar costosas campañas de medición. La modelación compleja del movimiento del terreno es otro de los enfoques utilizados, donde se calculan, a partir de las propiedades físicas de los diferentes estratos que forman el suelo, los incrementos en los efectos de las ondas sísmicas (aceleraciones, espectros, etc.), los cuales son cartografiados también. Este tipo de trabajo es conocido como estudio de los efectos de sitio y es realizado por computadoras. Diferentes tipos de ondas (de cuerpo y superficiales), diferentes geometrías (1D, 2D y 3D) y diferentes métodos caracterizan estos estudios, un muestrario de los cuales se puede ver en (Irikura et al., 1999).

Un aspecto importante de los trabajos de microzonación sísmica es que el resultado final, mapa o estimados puntuales, está formado por valores relativos del comportamiento del suelo de unos puntos o tipos de suelo respecto a otros. Es por tanto que la selección de ese patrón de referencia es determinante en los resultados finales. En los trabajos de la escuela soviética inicial se le llamaba “selección del suelo patrón”, mientras que en los trabajos de modelación se le llama “selección del sitio de referencia”. Es común en estos últimos casos referir el sitio de referencia como “roca”. La esencia de los trabajos es obtener, para una red de puntos dentro del área objeto de microzonación, información de diferente tipo que pueda ser referida al patrón de referencia y cartografiar los resultados de esa comparación.

## **Materiales y métodos**

Para enfrentar la microzonación, en este trabajo se parte de las siguientes hipótesis:

- La microzonación sísmica se realiza sobre la base de valores relativos suelo/roca, donde por “roca” se entiende una estructura regional formada por estratos consolidados y por “suelo” se entiende una estructura local formada por estratos no consolidados.
- En lugar de usar mediciones in-situ (extremadamente caras), los valores relativos roca/suelo se extraen de sismogramas sintéticos. El problema se traslada a la obtención de modelos confiables de estructura regional y local.
- El proceso de microzonación se realizará por la delimitación de zonas que presenten un comportamiento cuasihomogéneo ante los terremotos, reflejado en un conjunto de valores y funciones relativos suelo/roca.

La definición de roca utilizada en este trabajo se aparta de la común de seleccionar algún afloramiento rocoso en el área de estudio con velocidades mayores que un valor mínimo. En

nuestro caso el patrón de referencia se traslada al basamento en el que se encuentra insertada la cuenca.

Para obtener los sismogramas sintéticos se usa una modelación 2D a lo largo de perfiles que cruzan la ciudad de Lima. El método empleado es conocido como “técnica híbrida” (Fäh, 1992). En el mismo se calculan sismogramas sintéticos de ondas superficiales (P-SV o de Rayleigh, y SH o de Love) en puntos de la superficie a lo largo de los perfiles. Como información inicial se tienen la correspondiente a la fuente (coordenadas, magnitud y mecanismo focal) y la correspondiente a las propiedades físicas de los suelos atravesados por las ondas sísmicas.

El cálculo de la propagación de ondas a lo largo de los perfiles 2D se realiza combinando métodos analíticos y numéricos. La idea principal es calcular analíticamente trenes de onda completos generados por una fuente sísmica ubicada dentro de una estructura regional corteza-manto superior (técnica conocida como “suma modal”) y aplicar ese movimiento como entrada a la estructura local para ser procesado por el método numérico de las diferencias finitas. El problema se resuelve en dos etapas (Fig. 1):

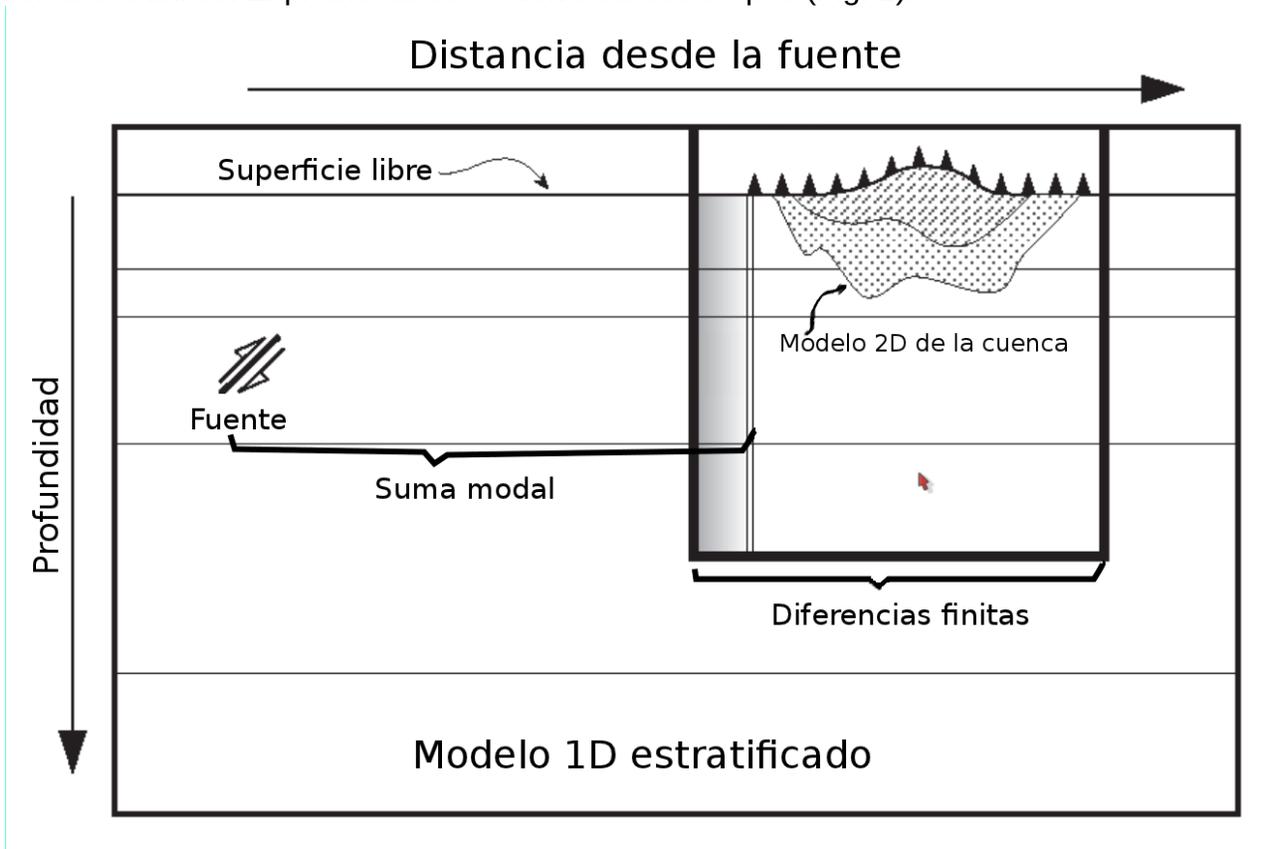


Fig. 1. Esquema de cálculo de los sismogramas sintéticos. Las ondas generadas en la fuente se propagan por el medio 1D y los sismogramas se calculan por el método de suma modal en dos columnas que se representan al inicio del modelo 2D. Este último está formado por un modelo 2D de la cuenca que se introduce en el modelo 1D regional, y se extiende en profundidad lo suficiente para considerar todas las contribuciones posibles. Al inicio del modelo 2D se ve una zona sombreada en la cual se considera una atenuación alta para evitar efectos de borde (Fäh, 1992).

(a) Las señales de las ondas P-SV y SH son generadas en la estructura rocosa anelástica 1D por el método de suma modal. Las técnicas de suma modal básicas para un problema clásico 1D han sido tratadas extensamente en (Panza, 1985; Panza y Suhadolc, 1987; Florsch et al., 1991; Panza et al., 2000). Se calculan 2 columnas de sismogramas ubicadas al inicio de la estructura 2D.

(b) Los trenes de ondas correspondientes a las mismas son usados como entrada para el esquema de diferencias finitas 2D que se emplea para obtener las formas de onda a lo largo de la estructura local anelástica, de variación lateral. Se comparan los resultados de la modelación en la estructura local con los que se obtienen al calcular los sismogramas en los mismos puntos, pero eliminando la cuenca 2D que se había introducido en el modelo (Fäh, 1992; Fäh et al., 1993, Fäh y Suhadolc, 1994).

(c) Se obtienen cocientes de valores de parámetros y de funciones que caracterizan la variación local de los efectos de terremotos, y se realiza la división en microzonas de los suelos que forman el área de estudio en función de ellos (Alvarez et al., 2005)

El cálculo de sismogramas sintéticos se realiza para aceleración, velocidad y desplazamiento en las componentes radial, transversal y vertical. Para ello se usa un paquete de programas que el grupo SAND del ICTP y el Departamento de Ciencias de La Tierra de la Universidad de Trieste pusieron a disposición de este trabajo. Estos programas calculan todos los sismogramas para una fuente puntual de momento sísmico  $M_0=1.0 \times 10^{20}$  dina-cm, y son escalados en función de la magnitud de los terremotos usando la ley de escala de Gusev (1983), según es reportada por Aki (1980). Se realiza la extracción automatizada de información sobre el movimiento del terreno a partir de los sismogramas sintéticos. Esta información es utilizada para crear los cocientes [suelo(2D)/roca(1D)] que se usan como base de la microzonación. Los mismos son de 2 tipos:

- de parámetros univaluados "X", donde X puede ser cualquiera de los parámetros del movimiento del terreno de uso habitual en ingeniería sísmica (como la aceleración máxima). Los cocientes se simbolizan como

$$XR(x,y)=X_{2D}(x,y)/X_{1D}(x,y) \quad (1)$$

- de funciones de la frecuencia "G( $\omega$ )", donde G puede corresponder a cualquiera de las funciones que caracterizan el movimiento del terreno (como el espectro de respuesta). Las funciones cociente se simbolizan por

$$GR(\omega,x,y)=G_{2D}(\omega,x,y)/G_{1D}(\omega,x,y) \quad (2)$$

En lo anterior se usa la letra "R" para identificar los cocientes, y se ha reflejado, tanto para los parámetros univaluados como para las funciones, su dependencia de las coordenadas, lo que sugiere la posibilidad del uso de técnicas geoestadísticas de procesamiento.

Cuando se usa una misma fuente para generar todos los sismogramas sintéticos se puede, a partir de los parámetros ya definidos  $X_{2D}(x,y)$  y  $G_{2D}(\omega,x,y)$ , construir un escenario de terremoto.

El proceso, a partir de los sismogramas sintéticos, consta de 5 etapas fundamentales:

- 1) Generación automatizada de mapas conteniendo información de los parámetros extraídos de los sismogramas
- 2) Inspección visual de los mapas buscando aquellos que reflejen comportamiento parecido
- 3) Clasificación de curvas: conversión de las funciones continuas  $GR(\omega,x,y)$  en k-valentes  $G(k,x,y)$  y su representación gráfica con vistas a agrupar las que presenten características similares

- 4) Delimitación de zonas, que para los mapas seleccionados manifiesten un comportamiento parecido
- 5) Caracterización de las zonas seleccionadas a partir de la información real extraída de los sismogramas sintéticos

Para este procesamiento se usa un paquete de programas desarrollado dentro del proyecto SMLAC que se apoyan fundamentalmente en el GMT (Wessel y Smith, 1998) y el gnuplot (Williams y Kelly, 2010) para la construcción de gráficos y mapas típicos de forma automatizada. La clasificación de curvas se realiza por un método lógico combinatorio con el programa "P4", creado a partir del sistema "PROGNOSIS" (Ruiz et al., 1992; Pico, 1999)

Los materiales usados en todos los casos son de 3 tipos:

- a) Definición de los terremotos de escenario que podían afectar las ciudades. Para cada caso se determinaron coordenada, magnitud y mecanismo focal.
- b) Datos regionales de estructura de la corteza y el manto superior (hasta unos 100 Km de profundidad, los que permiten confeccionar modelos de estructura 1D (capas paralelas) caracterizadas por los parámetros ( $\rho$ ,  $V_P$ ,  $V_S$ ,  $h$ ,  $Q_P$ ,  $Q_S$ ).
- c) Datos de estructura de la cuenca donde está ubicada la ciudad hasta el basamento rocoso que permiten construir los perfiles a lo largo de los cuales se calculan los sismogramas sintéticos. Cada capa también está caracterizada por los parámetros ( $\rho$ ,  $V_P$ ,  $V_S$ ,  $Q_P$ ,  $Q_S$ ), siendo el espesor " $h$ " variable a lo largo del perfil.

## Resultados

Se dará una breve descripción de los resultados por ciudad:

**San José, Costa Rica.** Sólo se calculó un perfil considerando un terremoto ubicado a 105 Km de la ciudad. El perfil estaba formado por 3 capas de geometría bastante regular, una de arcilla de unos 10 m de espesor seguida por otra de sedimentos con un espesor de 90 m ubicada sobre el basamento rocoso. Por otra parte, el modelo de corteza-manto superior estaba formado por 10 capas alcanzando una profundidad de 73 Km. En la Fig.1 se muestran los gráficos del cociente del espectro de respuesta de aceleración en las 3 componentes a lo largo del perfil.

Kingston, Jamaica. Se calcularon dos perfiles de norte a sur de la ciudad que incluyen las características topográficas, para un terremoto de escenario de magnitud 7.2 ubicado a 10 Km al norte de la ciudad. Los perfiles están formados por dos tipos de sedimentos de diferente densidad (intercalados entre sí) sobre roca no muy densa, la que a su vez descansa sobre el basamento. El modelo de corteza-manto superior consta de 5 capas alcanzando una profundidad de 60 Km. En la Fig. 2 se muestra el comportamiento de los cocientes de la aceleración máxima a lo largo de uno de los perfiles.

**Lima, Perú.** Se consideró un terremoto de escenario de magnitud 6.5 a 75 Km de la costa. En esta ciudad se calcularon un total de 8 perfiles. El modelo de corteza-manto superior consta de 10 capas alcanzando una profundidad de 85 Km. En los perfiles aparece una gran variedad de estratos formados por arcillas, arenas, gravas, conglomerados, limos, etc. Dada la topografía del área estudiada y los datos disponibles no fue posible lograr una buena cobertura de toda la ciudad por lo que no es posible realizar una microzonación para toda ella. La zona más cercana a la costa – donde se concentra la mayor población- tiene una mayor definición en los resultados que la más alejada, por lo que para la misma se obtienen resultados propios de una microzonación sísmica, mientras que para las zonas más alejadas (a lo largo de valles intramontanos sólo pueden darse características generales. En la Fig. 3 se muestran la distribución de los perfiles y el comportamiento espacial de la aceleración pico efectiva.

**Bayamo, Cuba.** En este caso particular - una ciudad ubicada paralela a la zona de los terremotos más fuertes que la pueden afectar y con extensión en la misma dirección -, para cubrir completamente su área fue necesario calcular 11 perfiles con 3 escenarios diferentes de terremoto ubicados a distancias diferentes. Esto imposibilita la obtención de un escenario particular, pero garantiza la realización de una microzonación. El modelo de corteza-manto superior consta de 7 capas alcanzando una profundidad de 81 Km. Los perfiles trazados están formados indistintamente por material de relleno, arena, arcilla, gravas y calizas. En la Fig. 4 se muestran el mapa de microzonación y un conjunto de gráficos que muestran la variación del cociente de los espectros de respuesta de aceleración en las zonas mostradas en el mapa.

**Barquisimeto, Venezuela.** Se considera un terremoto de escenario de magnitud 7 ubicado a 30 Km al suroeste de la ciudad. Fueron construidos 8 perfiles de dirección suroeste noreste que abarcan toda el área de estudio. Los perfiles indistintamente contienen estratos con arenas, eluvios, arcillas, gravas; etc. El modelo de corteza-manto superior consta de 5 capas alcanzando una profundidad de 100 Km. Se confeccionó un mapa de microzonación, así como diversas representaciones del terremoto de escenario. En la Fig. 5 se muestran los sismogramas sintéticos para ese terremoto a lo largo de uno de los perfiles.

En cada una de las ciudades se usó el paquete de programas para el cálculo de sismogramas sintéticos desarrollado en el Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Trieste y el grupo SAND del ICTP, así como un paquete de programas específico para microzonación desarrollado en este proyecto.

## Discusión

Los resultados obtenidos en este tipo de trabajo, cocientes de valores y funciones del movimiento del terreno, siempre están referidos a un tipo de suelo, que será la roca que forma la capa superficial del modelo regional del terreno. Las velocidades que habitualmente se consideran en esta capa son por lo general superiores a las de los afloramientos rocosos que se usan como base en otros estudios de microzonación sísmica. Por ello, para hacer comparables nuestros resultados con los obtenidos en los mismos es necesario realizar consideraciones adicionales.

La más simple sería referir las variaciones no a la roca, sino a uno de los tipos presentes de suelo en la zona de estudio. Supongamos que se hayan diferenciado “n” tipos de “suelo” diferentes y por tanto se han obtenido “n” grupos de cocientes 2D/1D ( $XR_i$ ,  $GR_i(\omega, x, y)$ ,  $i=1, n$ ). Se puede elegir el tipo de suelo “j” como de referencia, y referir todos los parámetros y funciones a él de la forma:

$$XR_{i,j}(x, y) = XR_i(x, y) / XR_j(x, y) \quad (3)$$

$$GR_{i,j}(\omega, x, y) = GR_i(\omega, x, y) / GR_j(\omega, x, y) \quad (4)$$

Esto es muy útil en estudios de riesgo y planeamiento urbano, donde una de sus componentes, el peligro sísmico regional, ha sido determinado considerando un tipo de suelo específico, en función de las fórmulas de atenuación utilizadas. En tal caso la selección, del tipo de suelo “j” se debe realizar de acuerdo al que más se asemeje a las condiciones para las que fueron obtenidas las fórmulas de atenuación para el estimado de peligro sísmico.

La otra variante, es obviar la comparación y calcular directamente escenarios de terremoto usando los parámetros  $X_{2D}(x, y)$  y  $G_{2D}(\omega, x, y)$ , los cuales se obtienen de forma automática en el proceso. Se debe señalar que es imprescindible que todos los perfiles correspondan a una zona de fuente única y estén calculados para el mismo valor de magnitud. Pueden calcularse

con facilidad varios escenarios para magnitudes diversas, ya que este proceso es de simple escalado de los sismogramas básicos y extracción de sus parámetros y funciones.

## **Conclusiones**

Se realizaron estudios de microzonación sísmica en 5 ciudades de América Latina. La profundidad del estudio no fue la misma en todas ellas. Para San José sólo se estudió un perfil que cruza la ciudad, y para Kingston se estudiaron dos perfiles. En las ciudades de Bayamo, Lima y Barquisimeto se hicieron estudios más completos. Las mismas fueron cubiertas con múltiples perfiles lo que permitió realizar un procesamiento espacial de los resultados y obtener mapas de microzonación sísmica.

## **Bibliografía**

- Aki, K. (1987): Strong motion seismology. En: Erdik MO, Toksoz MN, ed., Strong ground motion seismology, NATO ASI series,. Series C: Mathematical and physical sciences, vol. 204. Dordrecht: Reidel Publishing Company; p. 3–41.
- Alvarez, L.; Vaccari, F.; Panza, G.F.; Pico, R. (2005): Seismic microzoning from synthetic ground motion parameters: case study, Santiago de Cuba. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 25, No. 5, pp. 383-401.
- Bard, P.Y., (1999). Microtremor measurements: a tool for site effect estimation? En: Irikura, K., Kudo, K., Okada, H. & Sasatani, T. (eds.), The Effects of Surface Geology on Seismic Motion – Recent progress and new Horizon on ESG Study, vol. 3, Balkema, Rotterdam, 1251-1279.
- Fäh, D. (1992), A Hybrid Technique for the Estimation of Strong Ground Motion in Sedimentary Basins, Ph.D. Thesis, Nr. 9767, Swiss Fed. Inst. Technology, Zurich, 161 pp.
- Fäh, D., Iodice, C., Suhadolc, P., Panza, G. F. (1993), A New Method for the Realistic Estimation of Seismic Ground Motion in Megacities, the Case of Rome, Earthquake Spectra 9, 643–668.
- Fäh, D., Panza, G. F. (1994), Realistic Modelling of Observed Seismic Motion in Complex Sedimentary Basins, Ann. Geofis. 37, 1771–1797.
- Florsch, N., Fäh, D., Suhadolc, P., Panza, G. F. (1991), Complete Synthetic Seismograms for High-frequency Multimode SH-waves, Pure Appl. Geophys. 136, 529–560.
- Gusev, A.A. (1983): Descriptive statistical model of earthquake source radiation and its application to an estimation of short period strong motion. Geoph J Roy Astron Soc, vol. 74, pp. 787–800.
- Irikura, K.; Kudo, K.; Okada, H. ; Sasatani, T. (ed.) (1999: Proceedings of the Second International Symposium on the Effects of Surface geology on Seismic Motion, Yokohama, Japan, 1–3 Dec. 1998. Volume 3, The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Recent Progress and New Horizon on ESG Study, . Balkema, Rotterdam,366 pp.
- Nakamura, Y., (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. OR or RTRI, 30(1):12-14 p.
- Medvedev, S.M. (ed.) (1977): Microzonación sísmica (en ruso), Moscú, Nauka, 248 pp.
- Sadovskii, M. A.; Nersesov, I.L.; Medvedev, S.V.;Liamzina, G. A. (1973): Principios fundamentales de la microzonación sísmica (en ruso). Voprosii Inzheniernoii Seismologii, No. 15, Moscow, pp. 3-34.
- Panza, G. F. (1985), Synthetic Seismograms: The Rayleigh Waves Modal Summation, J. Geophys. Res. 58, 125–145.
- Panza, G. F. Suhadolc, P. (1987), Complete strong motion synthetics. En (B. A. Bolt, ed.) Seismic Strong Motion Synthetics, Computational Techniques 4 (Academic Press, Orlando, 1987), pp. 153–204.

Panza, G. F., Romanelli, F., Vaccari, F. (2000), Seismic Wave Propagation in Laterally Heterogeneous Anelastic Media: Theory and Applications to the Seismic Zonation, Advances in Geophysics, Academic Press 43, 1–95.

Pico, R.(1999): Determinación del umbral de semejanza  $\beta_0$  para los algoritmos de agrupamiento lógico-combinatorios, mediante el dendrograma de un algoritmo jerárquico. SIARP'99, IV Simposio Iberoamericano de Patrones. Memorias, 1999, p. 259–265

Ruiz, J.; Pico, R.; Lopez, R.; Alaminos, C.; Lazo, M.; Baggiano, M.; Barreto, E.; Santana, A.; Alvarez, L.; Chuy, T. (1992): PROGNOSIS y sus aplicaciones a las geociencias. En: IBERAMIA-92, III Congreso Iberoamericano de Inteligencia Artificial, Memorias. Mexico: LIMUSA, 1992; p. 561–86.

Seo, K. (1996): Application of Microtremors to Earthquake Damage Scenarios. Lessons learned from recent damaging earthquakes 11th Conference on Earthquake Engineering Paper No. 2062.

Wessel, P.; Smith, W.H.F. (1990): New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS Trans. Amer. Geophys. U., vol. 79 (47), pp. 579.

Williams, T.; Kelley, C. (2010): gnuplot 4.4, An Interactive Plotting Program <http://sourceforge.net/projects/gnuplot>

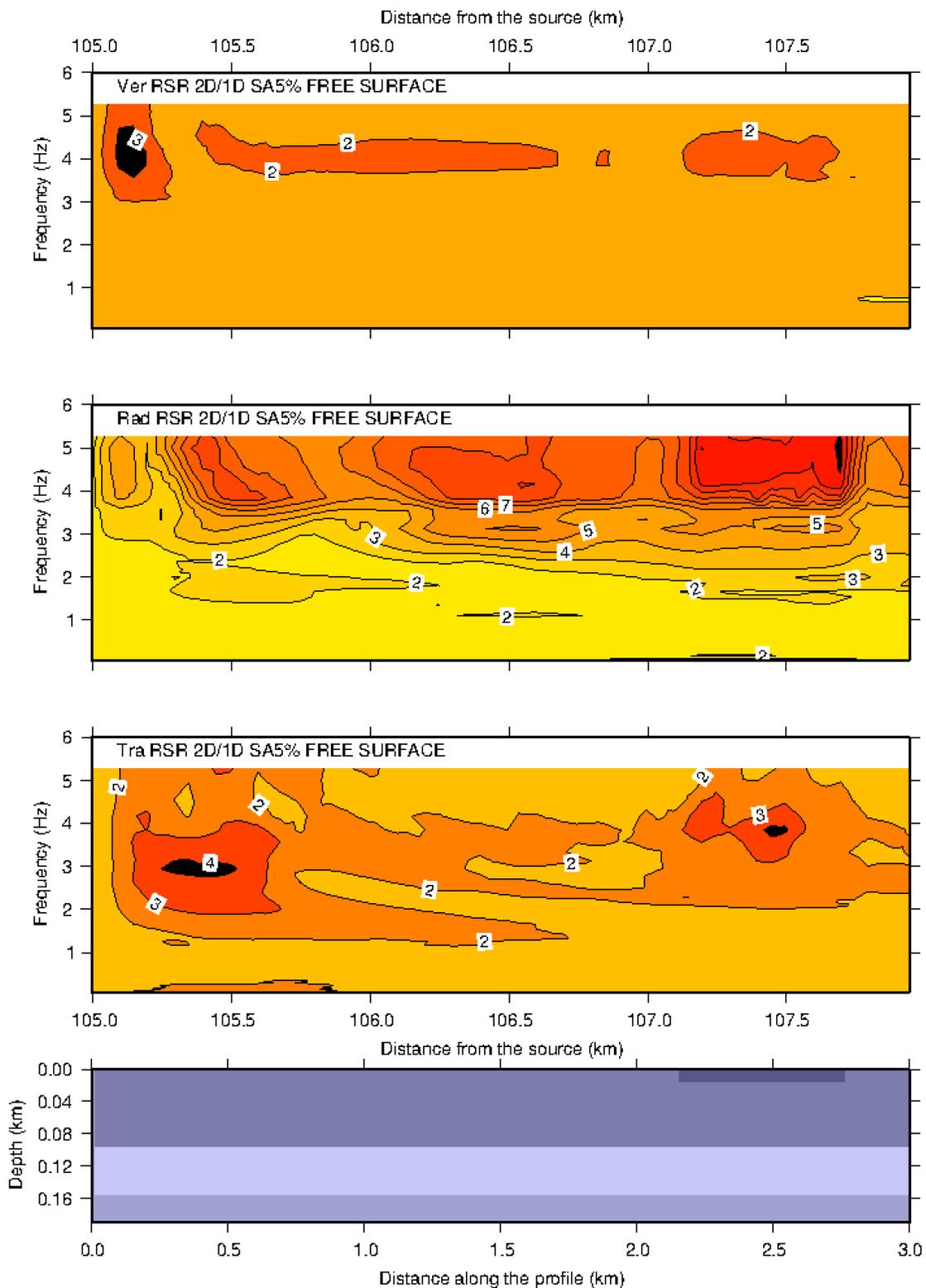


Fig. 1. Comportamiento del cociente 2D/1D de los espectros de respuesta de aceleración a lo largo del perfil estudiado en San José, Costa Rica.

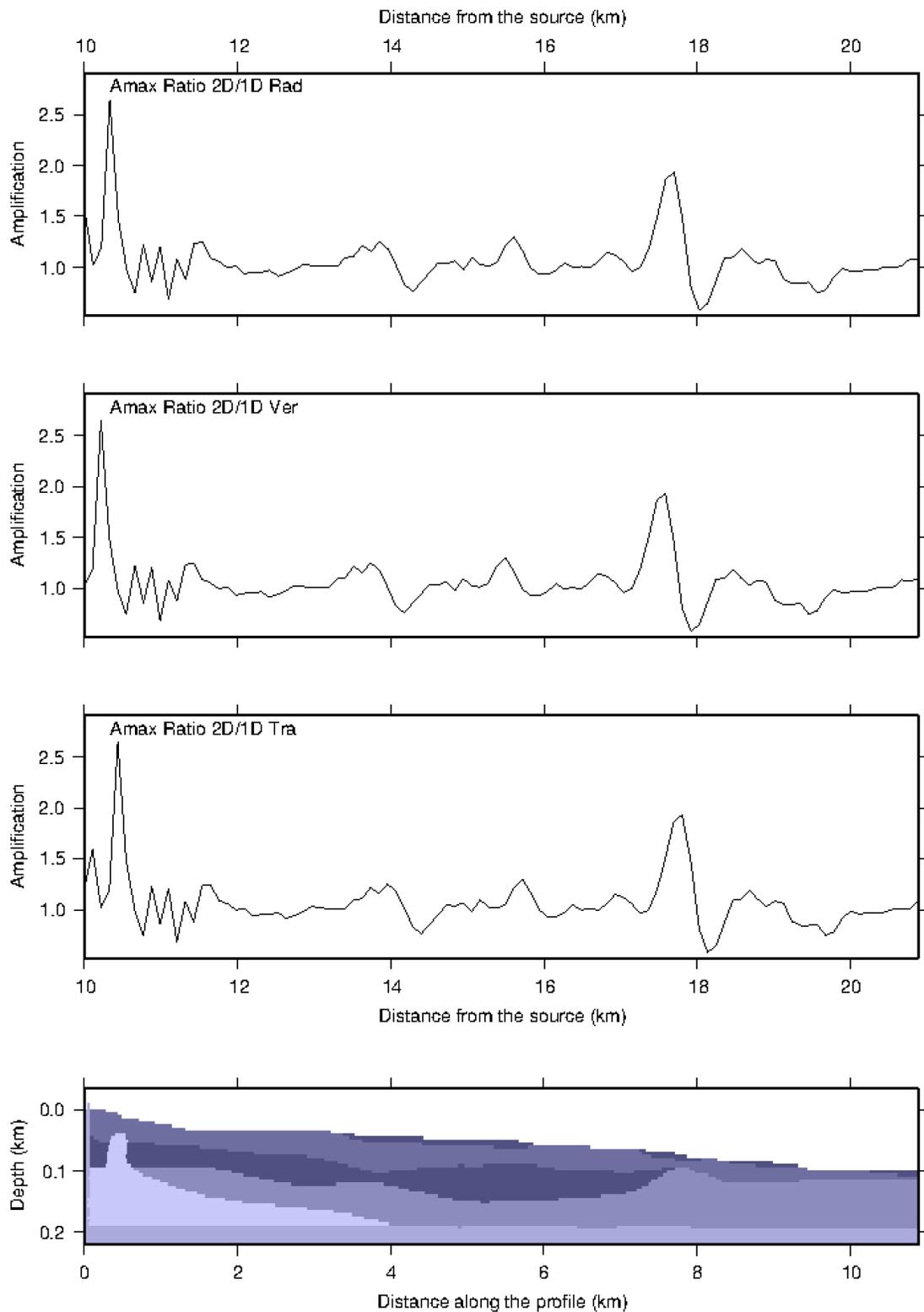


Fig. 2. Variación del cociente 2D/1D de las aceleraciones máximas a lo largo de uno de los perfiles estudiados en Kingston, Jamaica.



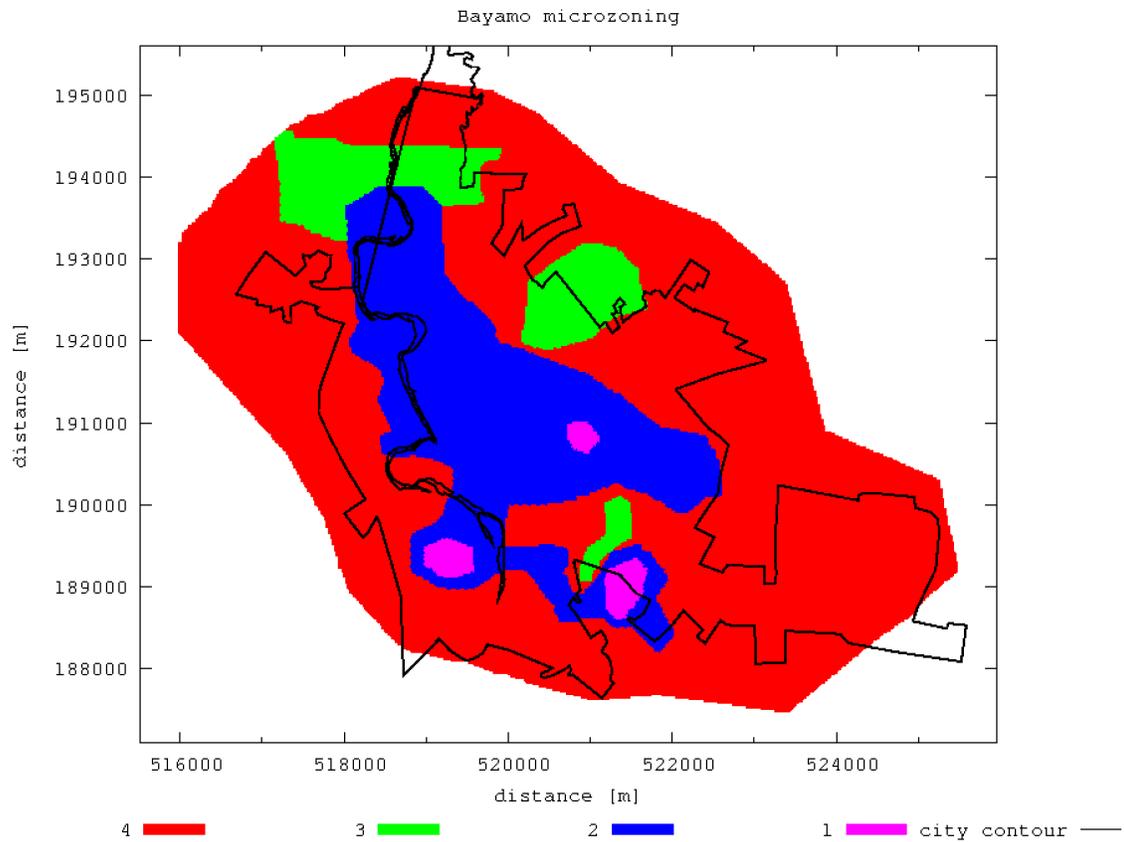


Fig. 4a. Microzonación sísmica de la ciudad de Bayamo, Cuba. Se distinguen 4 tipos de suelo con comportamiento cuasihomogéneo de los efectos de los terremotos.

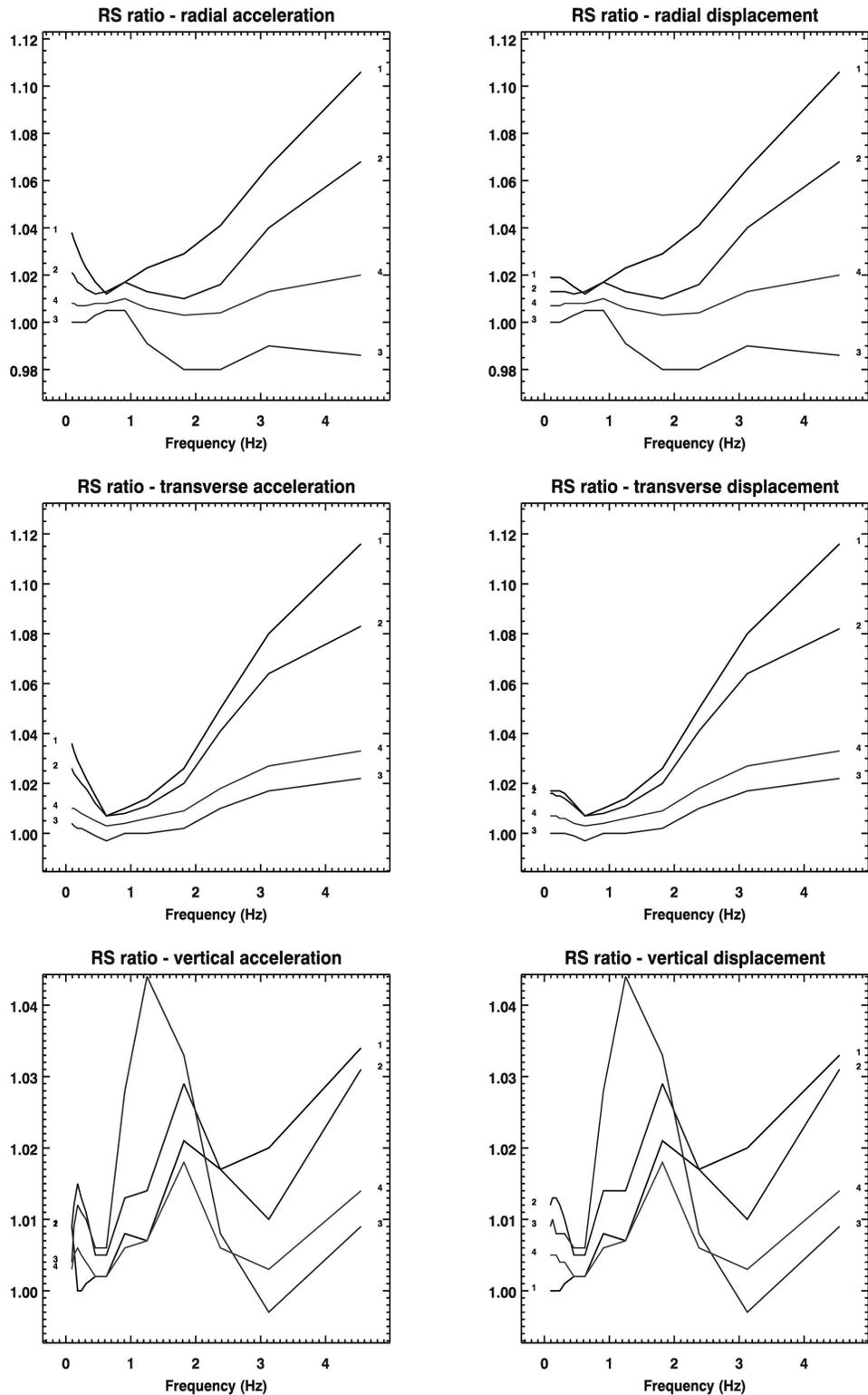


Fig. 4b. Comportamiento en función de la frecuencia de los cocientes 2D/1D del espectro de respuesta de aceleración en las 3 componentes para cada una de las zonas delimitadas en el mapa anterior.

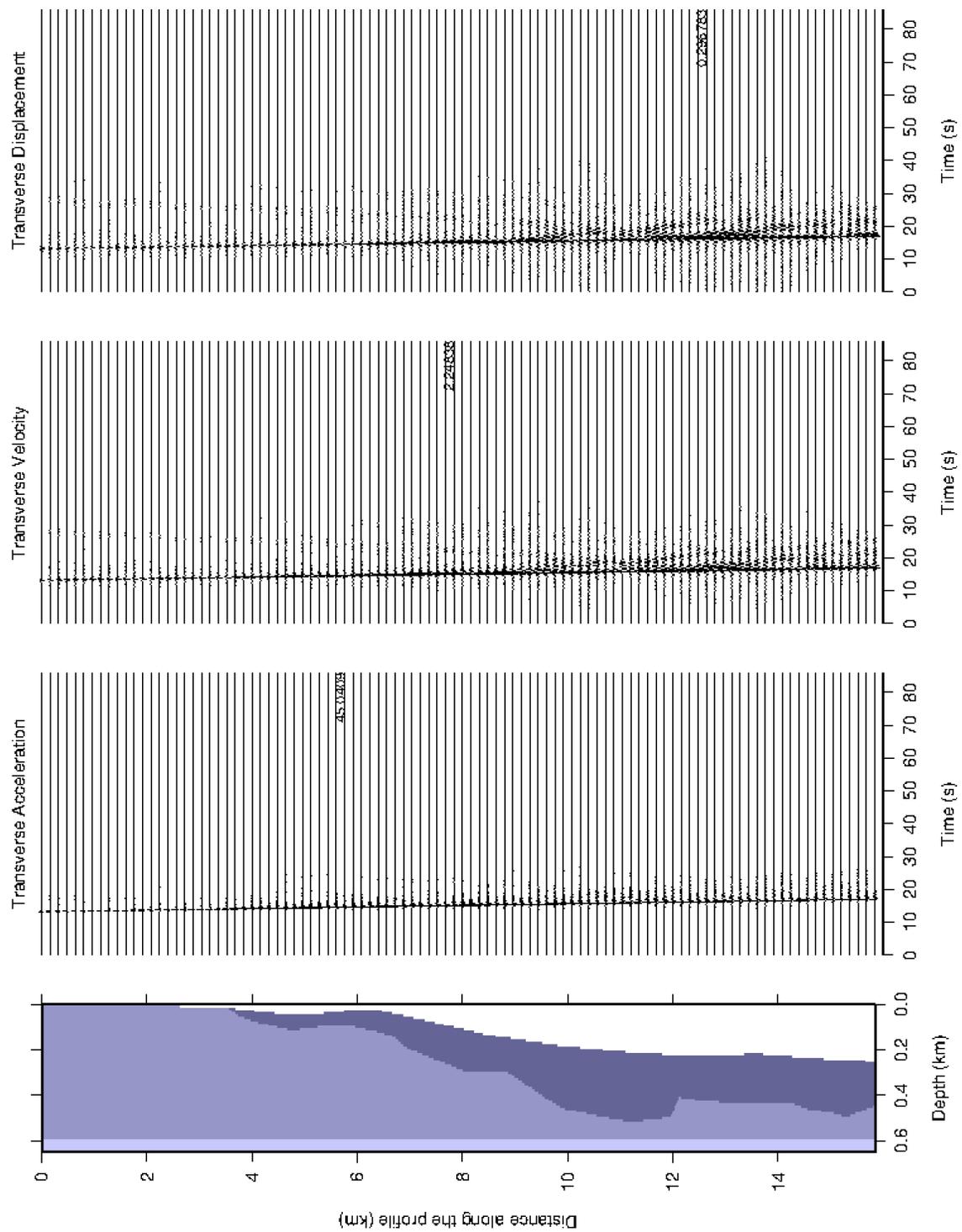


Fig. 5. Sismogramas sintéticos para el terremoto de escenario (M=) en uno de los perfiles estudiados en la ciudad de Barquisimeto, Venezuela.