

Microzonación sísmica partiendo de sismogramas sintéticos. Aplicación en peligrosidad sísmica determinística y probabilística

Leonardo Álvarez ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS), Cuba, leoalvar@cenais.cu

Recibido: septiembre 2, 2015	Aceptado: diciembre 20, 2015
------------------------------	------------------------------

Resumen

Se analiza una metodología para realizar microzonaciones sísmicas a partir de la modelación de sismogramas sintéticos de ondas superficiales. Se discuten las variantes de creación de escenarios de terremotos y de combinación con resultados de peligrosidad sísmica regional para confeccionar mapas de microzonación sísmica clásicos, incluyendo la confección de espectros de diseño del tipo usado en las normas sísmicas. Se presentan ejemplos de caso de estas aplicaciones tomados de trabajos ya publicados. La metodología es extensible al uso de resultados de modelación de otros tipos de ondas.

Palabras clave: microzonación sísmica, modelación de ondas superficiales

Seismic microzoning from synthetic seismograms. Applications in deterministic and probabilistic seismic hazard assessment

Abstract

It is analysed a methodology for making a seismic microzoning from synthetic seismograms modelling of surface waves. The variants of creation of earthquake scenarios and the combination with results of regional seismic hazard for preparing classical seismic microzoning maps, included preparation of design spectra of the kind used in seismic codes, are discussed. Case studies for these applications, took from published works, are presented. The methodology can be extended to the use of results of modelling of other kind of waves.

Keywords: seismic microzoning, seismic waves modeling

1. 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.

En este trabajo se describe como pueden ser usados los resultados de la modelación de ondas superficiales a lo largo de perfiles en la microzonación sísmica. Este método, desarrollado en la Universidad de Trieste a mediados de los 80 – principios de los 90, fue aplicado durante mucho tiempo sólo para analizar la influencia general de la estructura de una cuenca en la señal sísmica, sin particularizar en la preparación de mapas de microzonación sísmica (Panza et al., 2002). Sin embargo, el mismo puede ser adaptado a la selección de sitios de referencia y al cálculo de funciones de transferencia, como es habitual en ese tipo de trabajo, e incluso puede ser combinado con estudios regionales de peligrosidad sísmica probabilística para presentar estimados en términos de espectro uniforme de riesgo. Se presenta el fundamento teórico de este proceso y se dan ejemplos de aplicación a zonas específicas.

2. Materiales y métodos

2.1. El cálculo de sismogramas sintéticos

Se estudia el caso de modelación de ondas superficiales, con la característica que para obtener los sismogramas sintéticos se usa una modelación 1D para el tramo trayectoria-ciudad, combinado con una modelación 2D a lo largo de perfiles que cruzan el área de estudio: una ciudad que se ha desarrollado en una cuenca sedimentaria. Es por ello que este método 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 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 1D regional corteza-manto superior (técnica conocida como “suma modal”) y aplicar ese movimiento como entrada a la estructura local 2D para ser procesado por el método numérico de las diferencias finitas. El problema se resuelve en dos etapas (Fig. 1):

(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 Panza, 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 desarrollados en el grupo SAND del ICTP y el Departamento de Ciencias de La Tierra de la Universidad de Trieste (SMLAC, 2009). 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 (1987). No es objetivo del presente trabajo el ahondar en los aspectos teóricos del método. El lector puede consultar las explicaciones detalladas que presentan Fäh (1992) y Panza et al. (2000).

2.2. Los datos para la microzonación sísmica

Para enfrentar la microzonación sísmica, 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.

Consideremos que se han calculado los sismogramas sintéticos para un total de “np” puntos. Para cada uno de ellos se realiza la extracción automatizada de información sobre el movimiento del terreno. 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:

- **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). Supongamos que hay un total de “nl” parámetros diferentes. Los cocientes se simbolizan como

$$XR(x_i, y_i)_l = X_{2D}(x_i, y_i)_l / X_{1D}(x_i, y_i)_l, \quad l=1, nl; i=1, np \quad (1)$$

- **funciones de la frecuencia “G(ω)”**, donde G puede corresponder a cualquiera de las funciones que caracterizan el movimiento del terreno (como el espectro de respuesta). Supongamos que hay un total de “nm” funciones diferentes. Las funciones cociente se simbolizan por

$$GR(\omega, x_i, y_i)_m = G_{2D}(\omega, x_i, y_i)_m / G_{1D}(\omega, x_i, y_i)_m, \quad m=1, nm; i=1, np \quad (2)$$

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.

Hasta aquí la metodología corresponde a la desarrollada en la Universidad de Trieste - ICTP. En base a estas XR y GR se puede hacer una zonación. El método de realizar dicha zonación puede ser tan simple como comparar algunas de estas características con mapas geológicos o geofísicos (Panza et al., 2002) o procesar las mismas con métodos matemáticos más sofisticados (Alvarez et al., 2005).

Supongamos que como producto de esta zonación se han identificado “nz” zonas diferentes, cada una de las cuales se va a caracterizar por unas XR y GR particulares. Lo más lógico es que éstas se obtengan como el valor medio de todos los puntos que se encuentran en su interior (Alvarez et al., 2005)

$$XR(k)_l = (\sum_{i \in k} XR(x_i, y_i)_l) / nz_k \quad l=1, nl; k=1, nz \quad (3)$$

$$GR(\omega, k)_m = (\sum_{i \in k} GR(\omega, x_i, y_i)_m) / nz_k \quad m=1, nm; k=1, nz \quad (4)$$

donde por nz_k se simboliza la cantidad de puntos incluidos en la zona “k”. Los valores de $XR(k)_l$ pueden ser considerados como factores de escala y los de $GR(\omega, k)_m$ como funciones de transferencia.

Los resultados que se obtienen usando las fórmulas (1-4), 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 los resultados obtenidos por este método con los obtenidos en los estudios habituales de microzonación sísmica 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. Esto se puede ver de 2 formas. La primera es suponer que de los “np” puntos en que se calcularon los sismogramas sintéticos, hay uno, digamos “j”, al que se quieren referir todos los parámetros y funciones del resto de los puntos.

$$XR^{i,j}(x_i, y_i)_l = XR(x_i, y_i)_l / XR(x_j, y_j)_l \quad l=1, nl; \quad i=1, np \quad (5)$$

$$GR^{i,j}(\omega, x_i, y_i)_m = GR_i(\omega, x_i, y_i)_m / GR_j(\omega, x_j, y_j)_m \quad m=1, nm; \quad i=1, np \quad (6)$$

La segunda es considerar que este análisis se hace luego del proceso de zonación, donde se han diferenciado “nz” tipos de “suelo” diferentes. Se puede elegir la zona “k0” como la que posee el tipo de suelo “de referencia”, y entonces referir los parámetros y funciones ge las zonas a ella de la forma:

$$XR^{k,k0}(k)_l = XR(k)_l / XR(k0)_l \quad l=1, nl; \quad k=1, nz \quad (7)$$

$$GR^{k,k0}(\omega, k)_m = GR_i(\omega, k)_m / GR_j(\omega, k0)_m \quad m=1, nm; \quad k=1, nz \quad (8)$$

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 “de referencia” se debe realizar de acuerdo al que más se asemeje a las condiciones para las que fueron obtenidas las fórmulas de atenuación usadas para el estimado de peligro sísmico. Los estudios de peligro sísmico regional modernos se hacen en términos del espectro uniforme de peligro (UHS, de sus iniciales en inglés: “Uniform Hazard Spectra”). Cuando se hace un estudio de este tipo se seleccionan una o varias fórmulas de atenuación que sean válidas para el mismo tipo de suelo (un valor de V_{S30} en un rango reducido y otras especificaciones). Si el suelo que se seleccione como “de referencia” tiene un valor de V_{S30} comparable al de las fórmulas de atenuación del UHS, podemos escalar el espectro de UHS del estudio regional de peligro utilizando las fórmulas (6) u (8) para el caso de espectro de respuesta.

2.3. De los sismogramas sintéticos a la microzonación sísmica

La realización de la microzonación sísmica es un proceso complejo que, partiendo de los sismogramas sintéticos, conduce a la delimitación de zonas con comportamiento cuasihomogéneo ante la ocurrencia de terremotos. Esas zonas son las que se denominaron “tipos de suelo” en el planteamiento de las fórmulas (3) y (4). Una vez extraídos de los sismogramas sintéticos los parámetros y funciones representados en las fórmulas (1) y (2), se pueden, de forma simplificada, señalar las 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 $GR(f, x, y)$ en k-valentes $G(i, x, y)$ 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 (SMZ, 2011). 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).

A partir de aquí se diferencia el tratamiento de los casos determinístico y probabilístico.

a) Determinístico

I. Obtención de los sismogramas sintéticos para el terremoto de escenario que se desee en el caso 1D (este puede ser por simple escalado, siempre y cuando la ubicación, distancia y mecanismo focal coincida con alguno de los usados en los cálculos)

II. Multiplicación del parámetro $X_{1D}(x_i, y_i)_l$ o la función $G_{1D}(\omega, x_i, y_i)_m$ por los cocientes suelo/roca correspondientes ($XR(x_i, y_i)_l$ y $GR(\omega, x_i, y_i)_m$) o ($XR(k)_l$ y $GR(\omega, k)_m$)

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.

b) Probabilístico

I. Determinación del suelo de referencia. El mismo debe corresponder al tipo de suelo para el cual se determinaron las fórmulas de atenuación para UHS que se emplearon en el trabajo regional de peligro sísmico (V_{S30} y otras especificaciones)

II. Multiplicar los valores del UHS regional por $GR^{ij}(\omega, x_i, y_i)_{mrs}$ (o $GR^{k,k0}(k)_{mrs}$) y se tendrá el espectro de respuesta para cada punto o zona. Aquí “mrs” corresponde a la función “espectro de respuesta de aceleración” (Schmitz et al., 2012).

De todo lo anterior, el proceso más complejo corresponde al punto (4), la delimitación de zonas. En él entran los resultados extraídos de los sismogramas sintéticos, todo tipo de información sobre geología y geofísica que se disponga y la intuición de los interpretadores. No hay un procedimiento estándar para ello. En cierta medida es un arte, y la forma mejor de llegar a una solución aceptable es que en el proceso participen varios especialistas.

3. Resultados

Se presentan 3 casos de estudio, dos determinísticos y otro probabilístico. Los determinísticos corresponden a Santiago de Cuba (Alvarez et al., 2005) y Bayamo (Alvarez et al., 2009) en Cuba, mientras que el probabilístico corresponde a Guarenas-Guatire en Venezuela (Schmitz et al., 2012).

3.1. Ejemplos de caso tipo determinístico

En este caso (Alvarez et al. 2005) se calcularon los sismogramas sintéticos en 6 perfiles de la ciudad de Santiago de Cuba (Fig. 2a). Los valores de las funciones $GR(x,y)$ correspondientes a la integral de la energía y el espectro de respuesta fueron objeto de un proceso de clasificación no supervisada que condujo a un mapa con 11 zonas cuasihomogéneas (Fig. 2b, 3). En dicho trabajo se presentan tablas con los valores medios de $XR(k)_i$ para cada zona, correspondientes a características que por un proceso de análisis no paramétrico de correlación se determinaron como independientes. También se presentan curvas de los $GR(\omega,k)_m$ para un conjunto de esas características funcionales. Las mismas se calculan aplicando las fórmulas (3) y (4) a los valores medios dentro de las zonas de los cocientes de parámetros $XR(k)_i$ y de funciones $GR(\omega,k)_m$.

En el caso de Bayamo y Manzanillo (Alvarez et al. 2009) el mapa de microzonación se hizo mediante la cartografía de un conjunto de parámetros $XR(x_i, y_i)_i$ (Fig. 4) y el análisis combinado de los mismos con la información geológica disponible. Para el caso de Bayamo se identificaron 4 zonas diferentes, para las que se realizó el mismo proceso de promediación dentro de cada una de ellas que en el ejemplo anterior para obtener los valores de $XR(k)_i$ y $GR(\omega,k)_m$. En la Fig. 5 se presentan 6 de estas últimas.

En ambos casos el resultado final viene dado por los cocientes 2D/1D de características y funciones (fórmulas 1 y 2). Por tanto, para su aplicación práctica es necesario calcular un escenario 1D (se construye con el propio paquete de programas), preparar el mapa de la variable o función que se quiera representar y aplicar los factores de escala para las XR o funciones de transferencia para la GR (fórmulas 3 y 4) determinados para cada zona.

3.2. Ejemplo de caso probabilístico

Este forma parte de un estudio de riesgo sísmico para las ciudades de Guarenas y Guatire, cercanas a Caracas (Schmitz et al., 2012). Comenzó por el cálculo del espectro UHS para 475 años para las ciudades. Fue un caso clásico de peligrosidad sísmica puntual, tipo árbol lógico, con dos variantes de fuente (fallas y áreas) y 5 fórmulas de atenuación diferentes. Se usó el programa CRISIS'2007 (Ordaz et al., 2007) para el cálculo. Los espectros obtenidos para ambas ciudades son casi indistinguibles por lo que haremos referencia a solo uno. El mismo se muestra en la Fig. 6. El área de ambas ciudades fue cubierta con una red de perfiles sobre los que se aplicó se realizó el cálculo de sismogramas sintéticos (ver Fig. 7a). Una discusión acerca de los parámetros seleccionados para el método aplicado y de las características de la región se puede ver en (Morfe et al., 2015). La delimitación de zonas se hizo sobre la base del procesamiento de los cocientes de los espectros de respuesta, así como de mapas de distintos cocientes de parámetros, a la que se superpuso información geofísica y geológica (Schmitz et al., 2012). El mapa se presenta en la Fig. 7b.

En el proceso de análisis pudo determinarse que la zona “1” de este mapa tiene las características geofísicas del tipo de suelo considerado como “roca” en las fórmulas de atenuación usadas en la estimación de la peligrosidad sísmica. Es por tanto posible calcular los espectros de respuesta para todas las zonas considerando que el espectro de respuesta para la zona 1 es el UHS calculado en la peligrosidad sísmica regional $[GR_i(\omega, k0)_m]$, para lo cual se usa la fórmula 8 para calcular las funciones de transferencia de los espectros

restantes referidos a dicha zona $[GR^{k,k_0}(\omega,k)_m]$. En la Fig. 8 se presentan los espectros de respuesta. Como se ve de esta figura, el rango de períodos del UHS es mucho más amplio hacia los valores bajos, mientras que el de la modelación de los sismogramas sintéticos comienza algo después de $T = 1$ seg. Se puede hacer un procesamiento adicional de ajustar los espectros de respuesta a un modelo teórico de espectro de diseño. Diferentes códigos sísmicos presentan modelos diferentes de espectro de diseño. En el trabajo de Schmitz et al. (2012) se usó uno de 5 ramas. En el caso de la zona 1 el ajuste es perfecto (Fig. 9a), pero para las otras zonas el ajuste es extrapolado hacia la izquierda (Fig. 9b), ya que los sismogramas sintéticos no contienen períodos menores de 1.5 seg. El resultado de ese trabajo fue el gráfico de 4 espectros de respuesta que se observa en la Fig. 10.

3.3. Discusión

El método presentado fue inicialmente desarrollado para tratar el caso determinístico usando ondas superficiales P-SV y SH. Estaba orientado más a estudiar efectos de sitio locales que microzonación sísmica. La introducción de métodos matemáticos y geofísicos a los resultados de este tipo de modelación permitieron pasar gradualmente a la construcción de mapas de microzonación sísmica, cada vez más informativos. Con posterioridad se vio que podía ser combinado con un estudio de peligrosidad sísmica probabilística y obtener resultados probabilísticos, lo que abre el diapasón de las aplicaciones.

Otra cosa importante es que el enfoque dado al problema de la microzonación no es aplicable solamente a la obtención de sismogramas sintéticos de ondas superficiales. Siempre que se obtengan, por cualquier método, sismogramas sintéticos de cualquier tipo de onda y se siga el esquema del cálculo doble (1D, 2D esto es, calcular sin modelo sedimentario y con él), la formulación presentada es completamente aplicable.

Una limitante en el caso de combinación UHS – modelación es que el rango de períodos del segundo es más estrecho que el del primero, por lo que no se puede obtener un espectro completo para todos los tipos de suelo. La solución tomada por Schmitz et al. (2012) hace uso de las características “forzadas” de los espectros de diseño en las normas sísmicas, pero pueden ser usadas otras variantes para dar una respuesta aproximada al problema.

El procedimiento no tiene fijado a priori el tipo de salida, si es un mapa o un esquema. La clasificación final entre uno u otro tipo de resultado depende de los datos iniciales y se sigue el mismo criterio que en la confección de mapas geofísicos sobre densidad de observaciones – escala.

Conclusiones

Se presentó un procedimiento de microzonación sísmica basado en el cálculo de cocientes suelo/roca de parámetros y funciones de la frecuencia extraídos de sismogramas sintéticos de ondas superficiales y se discutió su aplicación a la estimación de la peligrosidad sísmica, tanto determinística como probabilística. El procedimiento puede ser extendido al uso de sismogramas sintéticos de otras ondas sísmicas. Se usaron casos de estudio cuyos resultados ya han sido publicados, por lo que no se discutieron aquí los mismos, simplemente se mostró como los diferentes aspectos metodológicos discutidos han sido utilizados en los mismos. El objetivo del trabajo es puramente metodológico, y se sintetizan los aspectos teóricos de un procedimiento que se ha venido desarrollado en el CENAIIS en los últimos años.

Referencias bibliográficas

- 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.
- Álvarez, 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.
- Álvarez, L.; Rivera, Z.; Escobar, E.; Hernández, E.; González, O.; Fernández, E.; Guasch, F. 2009. Influencia de las características del suelo sobre los parámetros del movimiento del terreno durante terremotos en las ciudades de Bayamo, Manzanillo y Pilón. Informe de Proyecto, Fondos del CENAIIS, 96 pp.
- 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.
- Morfe, J.; Schmitz, M.; Alvarado, L.; Álvarez, L.; Zapata, J; Rendón, H. 2015. Simulación del campo de ondas sísmicas y caracterización de amplitud y período con fines de microzonificación sísmica para las ciudades Guarenas-Guatire. *Boletín de Geología* (<http://boletindegologia.uis.edu.co>), vol. 37, pp. 27–43.
- Ordaz, M.; Aguilar, A.; Arboleda, J. 2007. CRISIS 2007 Ver 7.7, Program for computing seismic hazard, <http://www.iingwn.unam.mx>
- Sadovskii, M. A.; Nersesov, I.L.; Medvedev, S.V.;Liamzina, G. A. 1973. Principios fundamentales de la microzonación sísmica (en ruso). *Voprosii Inzheniarnoi 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. (chairman); Alvarez, L.; Aoudia, A.; Ayadi, A.; Benhallou, H.; Benouar, D.; Bus, Z.; Chen, Y-T.; Cioflan, C.; Ding, Z.; El-Sayed, A.; García, J.; Garofalo, B.; Gorshkov, A.; Gribovszki, K.; Harbi, A.; Hatzidimitriou, P.; Herak, M.; Kouteva, M.; Kuznetzov, I.; Lokmer, I.; Maouche, S.; Marmureanu, G.; Matova, M.; Natale, M.; Nunziata, C.; Parvez, I.; Paskaleva, I.; Pico, R.; Radulian, M.; Romanelli, F.; Soloviev, A.; Suhadolc, P.; Szeidovitz, G.; Triantafyllidis, P.; Vaccari, F. 2002. Realistic Modeling Of Seismic Input For Megacities And Large Urban Areas, (the Unesco/Iugs/Igcp Project 414). *Episodes*, Vol 25, No. 3, pp. 160-184.
- 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. Determinacion del umbral de semejanza β_0 para los algoritmos de agrupamiento logico-combinatorios, mediante el dendrograma de un algoritmo jerarquico. 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. México: LIMUSA, 1992; p. 561–86.
- Schmitz, M.; Álvarez, L.; Morejón, G.; García, K.; López, O.A.; Berenguer, Y.; Leyva, K.; Villalón, M.; Vega, I.; Rengel, J.G.; Aguilar, A.; Aguilar, I.; Alvarado, L.; Amarís, E.; Ascanio, W.; Audemard, F.; Betancourt, A.; González, J.; González, O.; Guasch, F.; Leal, A.; Miró, C.; Morales, C.; Morfe, J.; Olbrich, F.; Oliva, R.; Páez, V.; Rendón, H.; Rodríguez, L.; Rojas, R.; Singer, A.; Tagliaferro, M.; Vallée, M.; Viète, H.; Zapata, J. 2012. Microzonificación sísmica para la planificación urbana y la gestión local de riesgo de las ciudades en los ejes de desarrollo: caso piloto Guarenas y Guatire. Informe técnico final. Caracas, FUNVISIS, 432 pp.
- Seo, K. 1996. Application of Microtremors to Earthquake Damage Scenarios. Lessons learned from recent damaging earthquakes *11th Conference on Earthquake Engineering Paper* No. 2062.
- SMLAC. 2009: Project “Seismic microzoning of Latin America cities” ICTP Network NET58, UNESCO/IGCP 487, Computation of Synthetic Seismograms, Users' guide, 38 pp.
- SMZ. 2011. Project “Seismic microzoning of Latin America cities” ICTP Network NET58, UNESCO/IGCP 487, Processing of data for seismic microzoning, Users' guide, 33 pp.
- 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>

Acerca del autor:

Leonardo Álvarez: Graduado de Licenciatura en Física en la Universidad de La Habana en 1972. Desde 1973 trabaja en sismología. Candidato en Ciencias Físico-Matemáticas en el Instituto de Física de La Tierra de La Academia de Ciencias de la URSS en 1985, título equiparado a Dr. en Ciencias Físicas por el Ministerio de Educación Superior de Cuba. Investigador Auxiliar desde 1985. Especializado en peligrosidad sísmica y modelación de ondas sísmicas. Jubilado en 2016 siendo trabajador del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS) de Cuba. Actualmente es asesor de Geociencias en el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) .

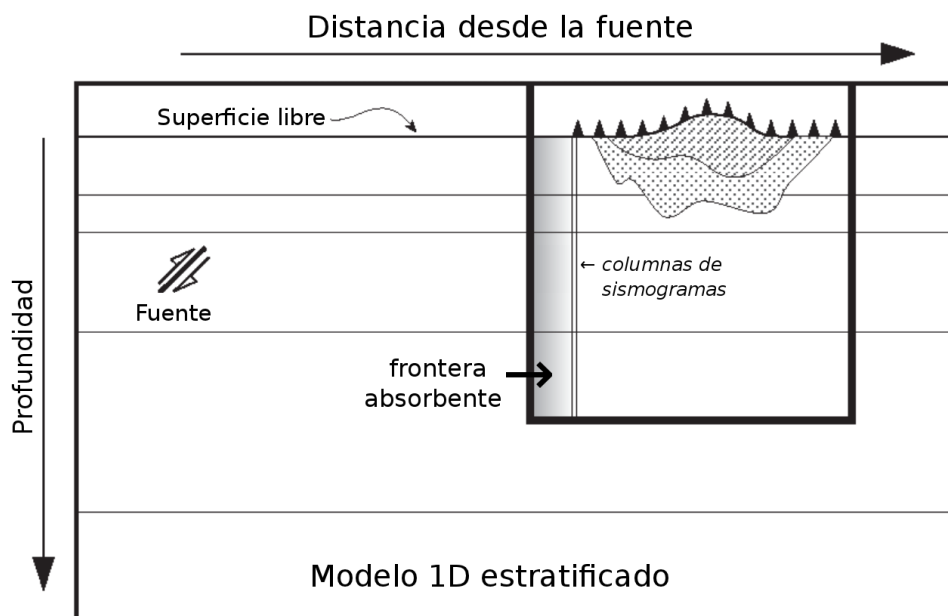


Fig. 1. Esquema de cálculo de los sismogramas sintéticos (modificado de Panza et al., 2000). Las ondas generadas en la fuente se propagan por el medio 1D y los sismogramas se calculan por el método de suma modal en dos columnas que se representan al inicio del modelo 2D. Este último está formado por 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).

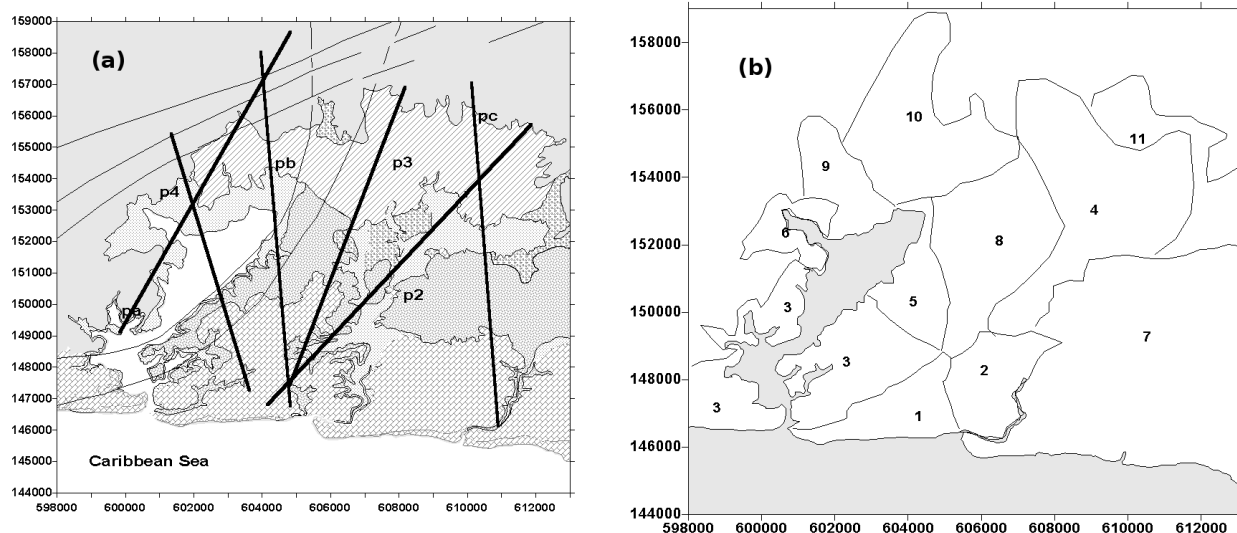


Fig. 2. Ejemplo de microzonación (Alvarez et al., 2005). (a). Trazado de los perfiles sobre una base geológica, (b) mapa de zonas obtenido como resultado final del proceso. Caso de Santiago de Cuba.

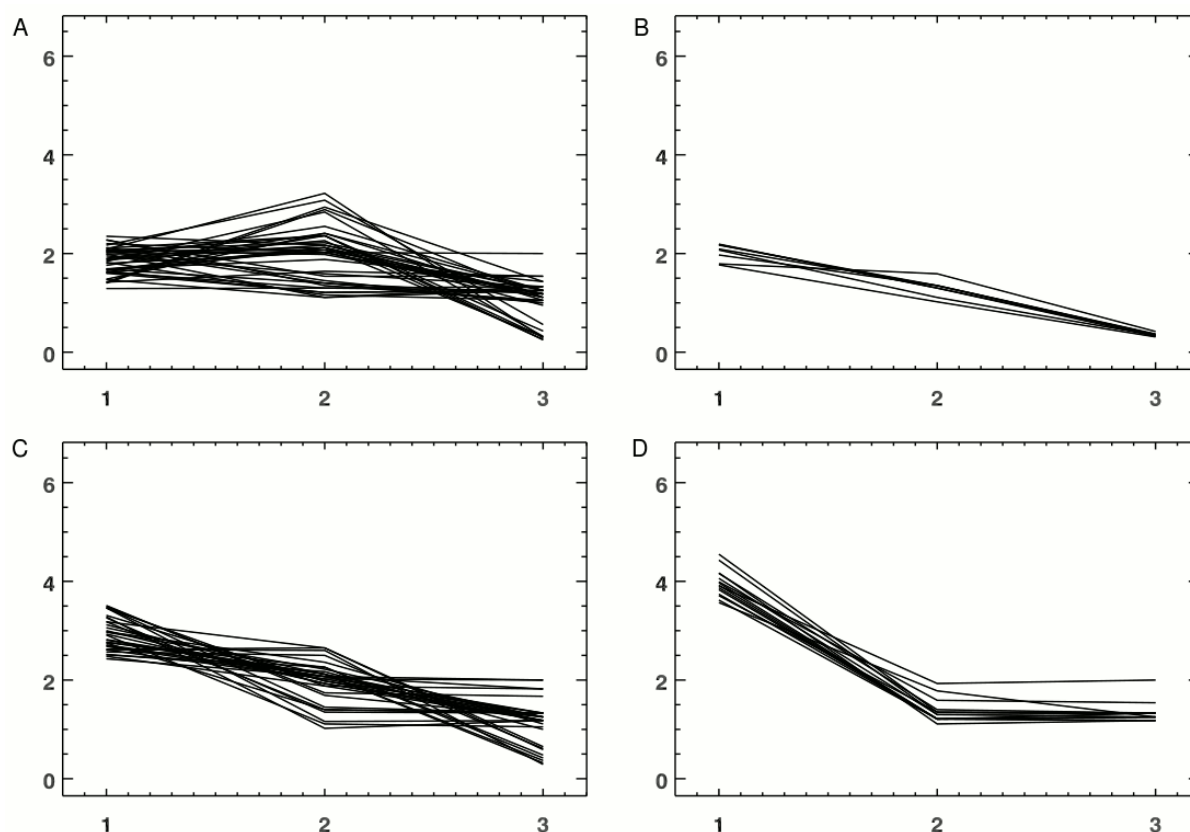


Fig. 3. Clasificación de 3 cocientes de variables XR en Santiago de Cuba. En el eje X el valor “1” corresponde al cociente de la velocidad pico (PGVR), el valor “2” a la frecuencia a que ocurre el máximo del cociente de espectros de respuesta y el “3” a la frecuencia a que ocurre el máximo del cociente de las integrales de energía $f(EIR_{max})$. En el eje Y se representa el parámetro adimensional XR. Cada curva en los gráficos corresponde a uno de los puntos (x_i, y_i) de las fórmulas (1 y 2). En total se determinaron 7 grupos de los cuales se muestran solo 4 (Álvarez et al., 2005).

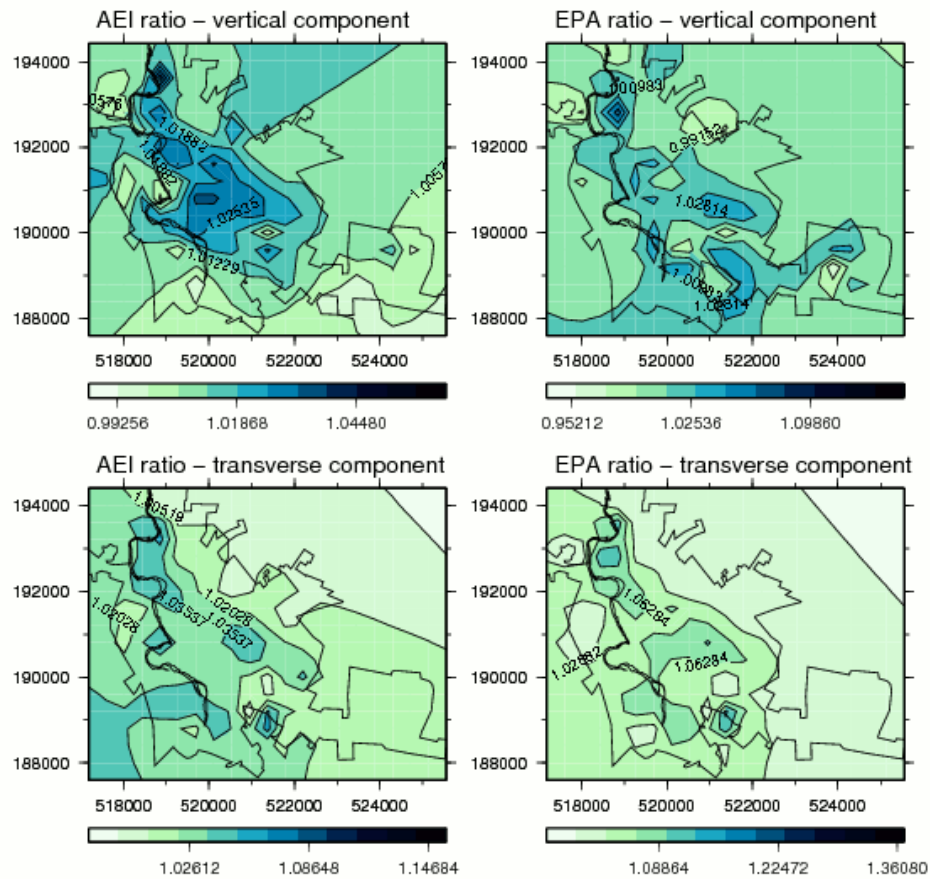


Fig. 4. Cartografiado de 4 características XR (fórmula1) para la ciudad de Bayamo. Se presentan dos diferentes - cocientes del área bajo la integral de energía (AEI) y de la aceleración pico efectiva (EPA) – para dos componentes del movimiento (vertical y transversal). Estos mapas, junto con la información geológica, fueron usados para delinear las zonas que forman el mapa de microzonación (Alvarez et al, 2009).

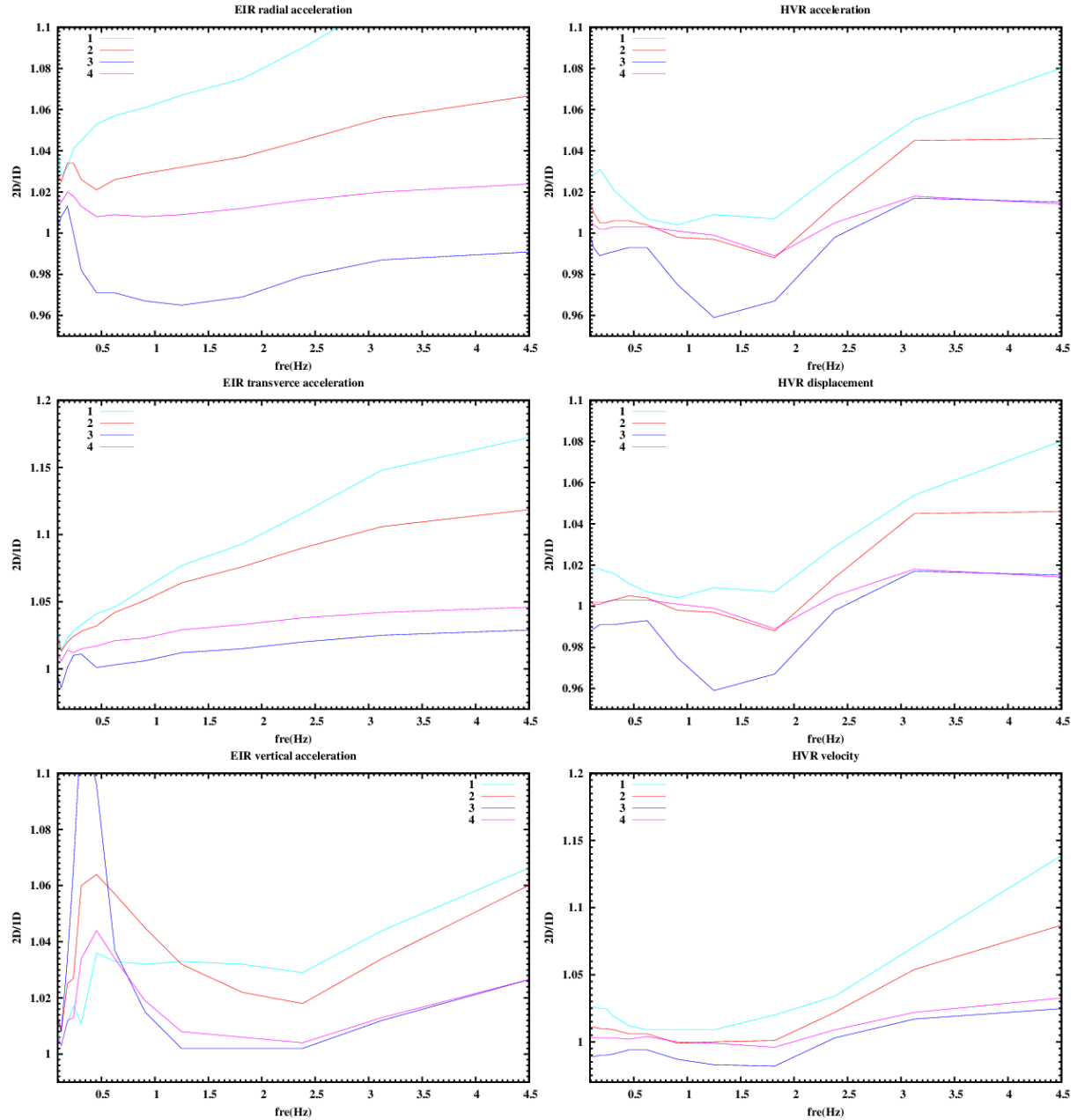


Fig. 5. Valores de EIR (cociente de las integrales de energía) de aceleración en 3 componentes y cocientes de la relación HV (razón entre componentes horizontales y verticales) para aceleración, velocidad y desplazamiento. Se muestran 4 curvas diferentes en cada gráfico, correspondientes a cada una de las zonas que se delimitaron en el mapa de microzonación sísmica. Cada curva representa la función para una zona diferente en el mapa de microzonación. Caso de la ciudad de Bayamo, Cuba (Álvarez et al., 2009).

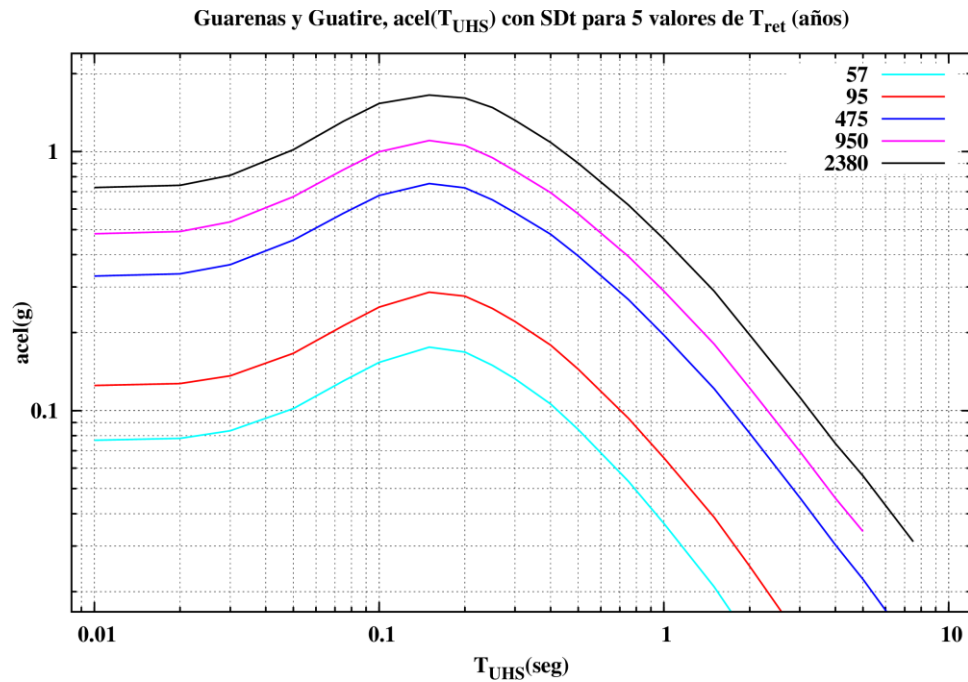


Fig. 6. Espectro de peligro uniforme (UHS) para las ciudades Guarenas y Guatire. Se presentan las curvas para 5 períodos de retorno (Schmitz et al., 2012).

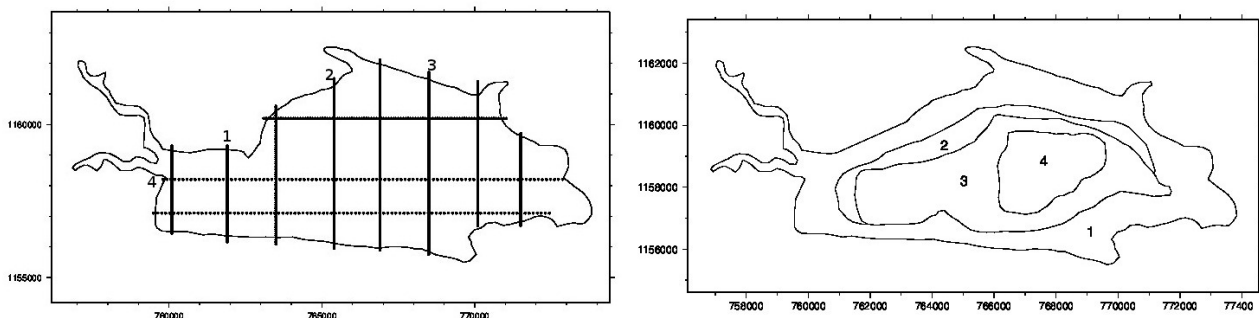


Fig. 7. Microzonación de las ciudades de Guarenas y Guatire (Schmitz et al., 2012). (a) Trazado de los perfiles, (b) mapa de zonas.

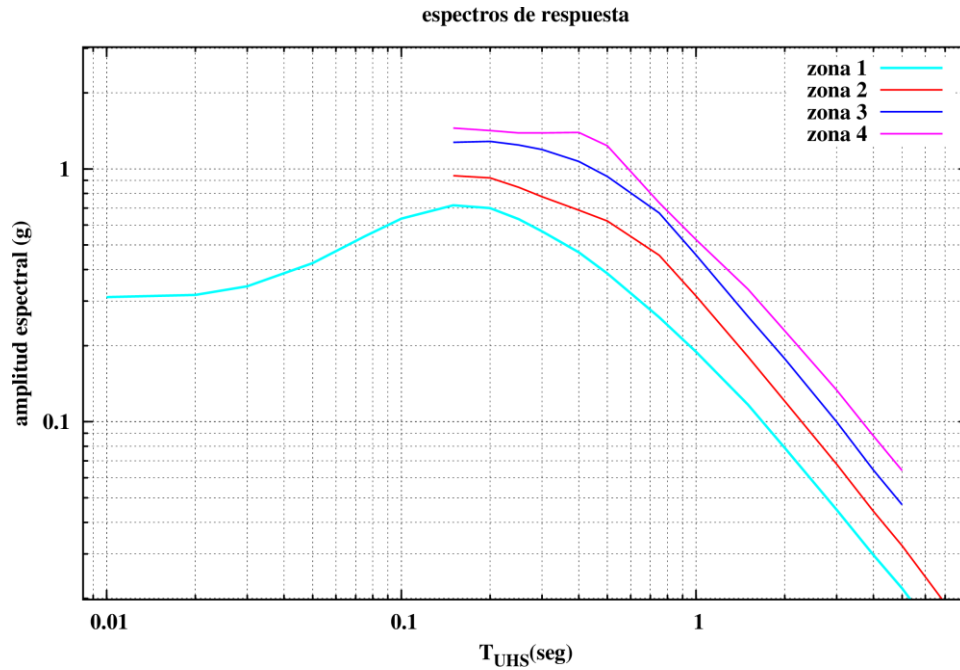


Fig. 8. Espectros de respuesta formados a partir del UHS (equivalente al de la zona 1) mediante la aplicación de la fórmula (8) (Schmitz et al., 2012).

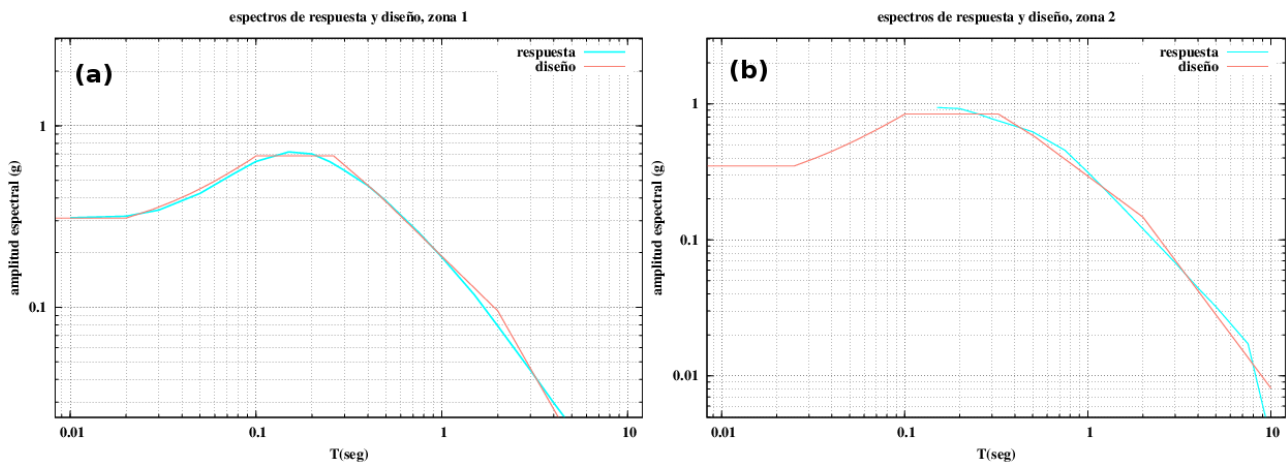


Fig. 9. Ajuste de los espectros de diseño a los de respuesta (Schmitz et al., 2012). (a) Zona 1, espectro completo por asumir que el suelo corresponde al usado para el trabajo de UHS; (b) Zona 2, escalado usando la función de transferencia para la zona, solo para $T > 0.15$ seg.

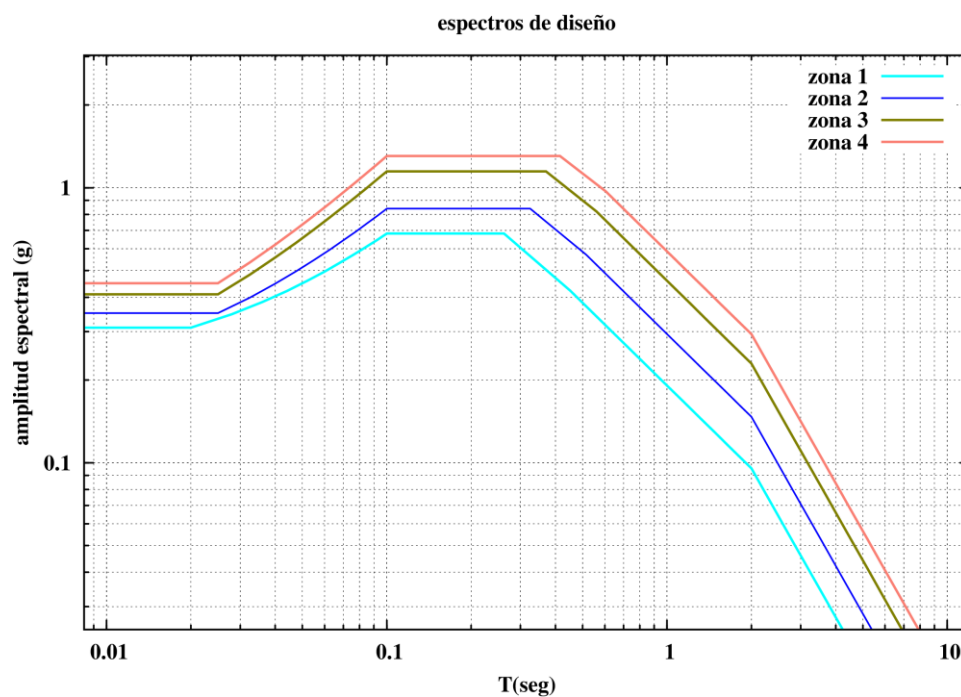


Fig. 10. Propuesta de espectros de diseño realizada sobre la base del ajuste a los espectros de diseño obtenidos (Schmitz et al., 2012).