Determinación de períodos fundamentales del suelo de la ciudad de Mérida, Venezuela, a partir de mediciones de ruido sísmico ambiental

Determination of predominant periods of Mérida's city soils, Venezuela, from ambient vibrations measurements

***Mazuera, Fernando y González, Leonardo**
Grupo de Investigación en Geología Aplicada, Escuela de Ingeniería Geológica. Universidad de Los Andes.
Mérida 5101, Venezuela.
*mazueraf@ula.ve

Rocabado, Victor
Departamento de Sismología, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas.
Caracas, Venezuela.

Klarica, Stéphanie
Grupo de Geofísica, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes.
Mérida-Venezuela

Recibido: 13-12-2007 Revisado: 06-12-2008

Resumen

Los Andes Venezolanos representan una región de alta amenaza sísmica motivada a la presencia de la Falla de Boconó. En este sentido, se están llevando a cabo en diferentes ciudades de Venezuela, proyectos de microzonificación sísmica por parte de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas con la colaboración de las diferentes universidades del país. A partir de ello, surgió la necesidad de realizar este proyecto donde se determinaron los períodos fundamentales del suelo de la ciudad de Mérida, a partir de mediciones de ruido ambiental, y con la aplicación del Método de Nakamura. Para cumplir con dicho objetivo, se aplicó la técnica a 164 mediciones realizadas en diversas partes de la ciudad, de tal manera que cubriesen la totalidad de los sedimentos blandos de la terraza, y el límite de éstos con rocas del Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico. Se empleó un sismógrafo portátil modelo Orion y un sensor modelo Güralp. El espaciamiento entre las estaciones era de 500 metros aproximadamente, y se grabaron las microtrepidaciones en un rango de 15 a 25 minutos. Para el procesamiento e interpretación de los datos se emplearon los programas LabView y Sesame, a partir de los cuales se encontró el espectro H/V; a su vez, se elaboró un mapa de distribución de períodos, en donde se refleja un mínimo de período fundamental de 0,087 segundos para el sector de San Jacinto, en el sureste del área de estudio, y un máximo de 1,000 segundo, para la parte alta del sector Los Curos, al noroeste de la ciudad de Mérida. Con los datos obtenidos del modelado gravimétrico del Área Metropolitana de la ciudad de Mérida, se definió una relación entre el período y el espesor de sedimentos del abanico, donde los rangos más altos de períodos, corresponden por lo general, con los mayores espesores de sedimentos.

Palabras clave: Ruido sísmico, microtrepidaciones, período fundamental, microzonificación sísmica.

Abstract

The Venezuelan Andes represent a high seismic hazard region due to the presence of the right-lateral strike-slip Bocono fault, with an extension of more than 400 Km., which affects the main cities of the mountain range. Thus, the Venezuelan Foundation for Seismological Research, with the collaboration of the different universities in the country, is undergoing

several studies of seismic microzonation in different Venezuelan cities. As a part of this project, it was necessary to determine the fundamental periods for soft-sedimentary (soil) deposits of the city of Merida, based on measurements of ambient vibrations applying the Nakamura Technique. In order to reach this goal, the Nakamura Technique was applied to 164 measurements taken in different parts of the city with an approximate spacing of 500 meters between each station. The LabView and J–Sesame softwares were used to process and interpret the data. After the H/V spectral ratio was determined, a period's distribution map of the city was created, where the areas of high seismic hazard are pointed out in correlation with the site's geology. Proterozoic and Palaeozoic associations, Carboniferous-Permian, Jurassic and Tertiary formations and sediments belonging to the Pleistocene alluvial terrace of Mérida were found. On the other hand, a proportional relationship between the period and the thickness of fan's sediments was defined, where the highest ranges in periods correspond with the biggest thickness in the terrace, in agreement with the medium velocity and possible acoustics impedance contrasts. The values of thickness were obtained from the geophysical modeling project of the city´s metropolitan underlying basement area after processing and interpreting the gravimetric data. The ranges of periods that were determined for the city of Mérida oscillate between 0,087 and 1,000 seconds.

Key words: Seismic noise, microtremors, predominant period, seismic microzonation.

1 Introducción

Cuando un sismo ocurre, los impactos observados sobre un ambiente en particular pueden ser: amplificación del suelo, ruptura del suelo, licuefacción y deslizamientos; todos estos fenómenos son conocidos como efectos de sitio. La ocurrencia de tales fenómenos es controlada, en gran medida, por las condiciones geológicas locales.

Este trabajo de investigación se enfocará en la determinación de los períodos fundamentales del suelo sobre el cual se asienta la ciudad de Mérida (Fig. 1), con la finalidad de estudiar en detalle la amplificación del mismo, ya que por lo general éste fenómeno es el responsable de la mayoría de los daños ocasionados a estructuras, durante la ocurrencia de un evento sísmico.

En tal sentido, se conoce desde hace mucho tiempo que la respuesta sísmica puede variar en gran escala sobre distancias cortas dependiendo del tipo de depósitos, rocas o sedimentos no consolidados, naturales o modificados por acción antrópica (Frischknecht, 2000), por lo cual se hace necesario, como parte de este trabajo, el relacionar los espesores de los sedimentos, suprayacentes al basamento, con los períodos fundamentales del mismo.

Cabe mencionar, que al hablar de períodos fundamentales, teóricamente se considera el supuesto de que la masa de suelo es homogénea, isotrópica y elástica, y se analiza bajo la acción de la componente horizontal de un sismo originado en el sustrato de roca infrayacente al terreno.

En ese sentido, y más bien considerando la realidad de que los suelos son heterogéneos y están formados por varios estratos, el período del modo fundamental, también llamado período característico o simplemente período del suelo, se define como la relación entre el espesor del estrato considerado del suelo y la velocidad de las ondas de corte del mismo.

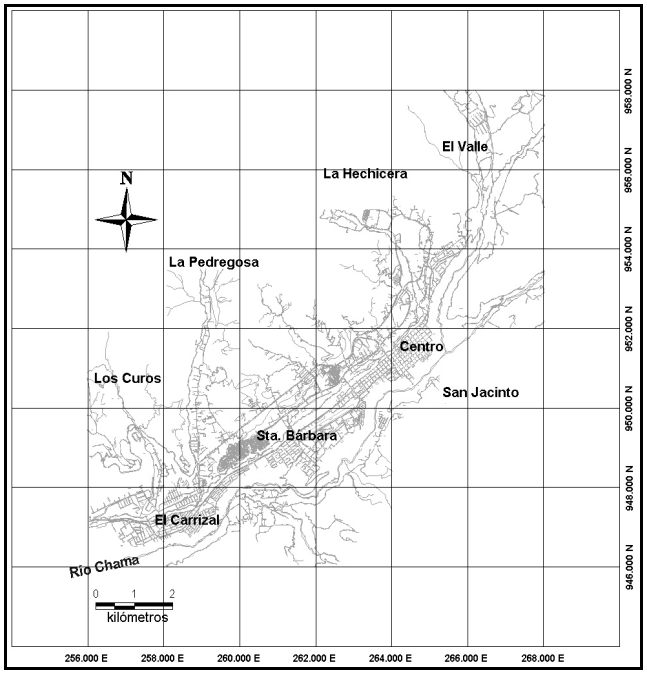


Fig.1. Ubicación del área de estudio

2 Objetivos

2.1 Objetivo general:

- Determinar los períodos fundamentales del suelo de la ciudad de Mérida, a partir de mediciones de ruido ambiental, aplicando el método de Nakamura.

2.2 Objetivo específicos:

- Recopilar y validar la información geológica y geofísica existente en el área de estudio.
- Estimar los valores de amplificación de los suelos a partir de la relación de la componente horizontal y la

componente vertical de movimiento del terreno (H/V).
- Analizar la relación entre los espesores y los períodos fundamentales de los sedimentos de la terraza de Mérida, a partir de la integración de los datos gravimétricos con los de ruido sísmico ambiental.

Delinear zonas de la ciudad en función de su capacidad de amplificar el movimiento del terreno.

3 Metodología

Para la consecución de los objetivos planteados en este proyecto, se estableció una planificación sistemática que comprendió la ejecución de diferentes etapas.

En primer término, se recopiló toda la información necesaria, relacionada al área de estudio y a las diversas técnicas que se aplicarían (estudios geológicos, geofísicos, geomorfológicos, geotécnicos, mapas topográficos, geológicos, vialidad, drenaje, anomalías de Bouguer, espesores, etc.). Seguidamente, se llevó a cabo la adquisición de los datos de ruido sísmico ambiental, para posteriormente procesarlos y por último realizar todas las interpretaciones geológicas-geofísicas correspondientes.

3.1 Adquisición de los datos geofísicos:

Se planificó una etapa de adquisición que permitió cubrir la totalidad del área prevista para el estudio, a partir del diseño de un mallado que separaba las estaciones de medición, aproximadamente 500 metros entre sí (Figura 2), de acuerdo a la recomendación del Proyecto SESAME (SESAME, 2004).

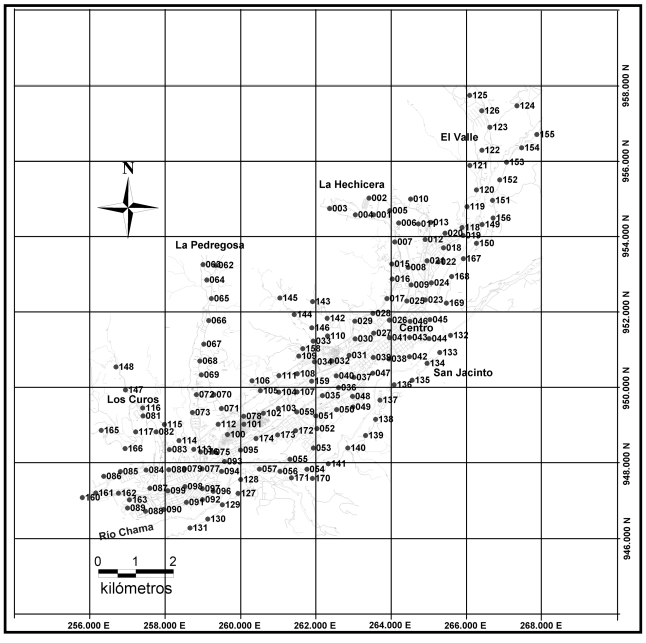


Fig. 2. Mapa de ubicación de las estaciones de medición de ruido sísmico ambiental.

Una vez establecidos los sitios de medición, se procedió a trasladarse en vehículo a cada uno de ellos, tomando en cuenta las facilidades de acceso y el nivel de ruido ambiental, para posteriormente iniciar los registros de las microtrepidaciones. Para ello se empleó un sismógrafo digital portátil, modelo Orion, marca Nanometrics de 24 bits de resolución, y un sismómetro portátil banda ancha de tres componentes, modelo CMG-40T, marca Güralp.

Al ubicar las estaciones, con la ayuda de un sistema de posicionamiento global (G.P.S.), se procedió a seguir las recomendaciones del Proyecto SESAME (Site EffectsS assessment using AMbient Excitations), para la implementación de la técnica de relación espectral H/V sobre vibraciones ambientales (SESAME *op cit.*), a saber, un tiempo mínimo de grabación de 15 a 20 minutos de acuerdo a la frecuencia natural mínima esperada del suelo (0,7 a 0,5 Hz); ajustar el nivel de ganancia del sensor a su máximo posible sin saturación de señal; se colocaba el sensor preferiblemente sobre asfalto y en caso contrario, sobre suelos duros no saturados de agua. Por otra parte, se evitaba grabar cerca de estructuras como edificios, muros altos, árboles (alejado de raíces), sobre estructuras como estacionamientos subterráneos, tuberías, alcantarillas; se evitó grabar cuando existiera un fuerte viento y cuando lloviese copiosamente; se protegía el sensor de temperaturas ambientales elevadas y se evitaban mediciones cercanas a maquinarias de construcción, fábricas, bombas hidroneumáticas, y en caso de estaciones cercanas a un fuerte tránsito vehicular y peatonal, se alejaba el sensor en la medida de lo posible y se aumentaba el tiempo de grabación, de manera que se garantizase una suficiente cantidad de ventanas de datos para su posterior análisis.

Una vez cumplidas las recomendaciones del Proyecto SESAME, se procedió a obtener los datos en cada punto de medición de acuerdo a una secuencia metodológica que se repetiría para cada estación (Fig.3).

Cabe destacar, que por cada estación se rellenaba una planilla de campo en donde se colocaba, con detalle, toda la información relevante del sitio de medición con la finalidad de tener un respaldo físico de dicha información, y para el posterior análisis e interpretación de posibles resultados anómalos

3.2 Procesamiento de los datos geofísicos:

Una vez adquiridos los datos de ruido sísmico en campo, se procedía a trasladar el disco duro portátil del Sismógrafo Orion, al final de cada campaña de medición, hacia una oficina en donde se descargaban los datos en un computador personal, de tal manera que se hiciese un preprocesamiento, con la finalidad de garantizar la calidad y confiabilidad de los mismos.

Previamente, se debió establecer ciertos parámetros de conversión de los datos grabados en campo con el equipo sismológico Orion, de tal manera que se obtuviese un formato compatible con el programa informático de procesamiento J-SESAME, versión 1.08. (Formato SAF). Para ello

se debía seguir una secuencia de procesamiento que permitió transformar los datos Orion a formato ASCII. En una ventana del Sistema Operativo del Ambiente Windows (MS-DOS), se ejecutaba una línea de comandos denominada RBTRIM, la cual extrae los datos almacenados en el *buffer* asignado en el disco duro Orion. De esta forma se generan archivos de menor tamaño, con el nombre asignado a cada estación, precedidos de la letra "R", obteniendo cuatro tipos de archivos para cada punto de medición; por ejemplo: R001.BHE (información correspondiente a la componente Este–Oeste del sensor, en la estación 001), R001.BHN (correspondiente a la componente Norte–Sur), R001.BHZ (correspondiente a la componente Vertical) y R001.SOH (corresponde a información sobre estado el equipo)

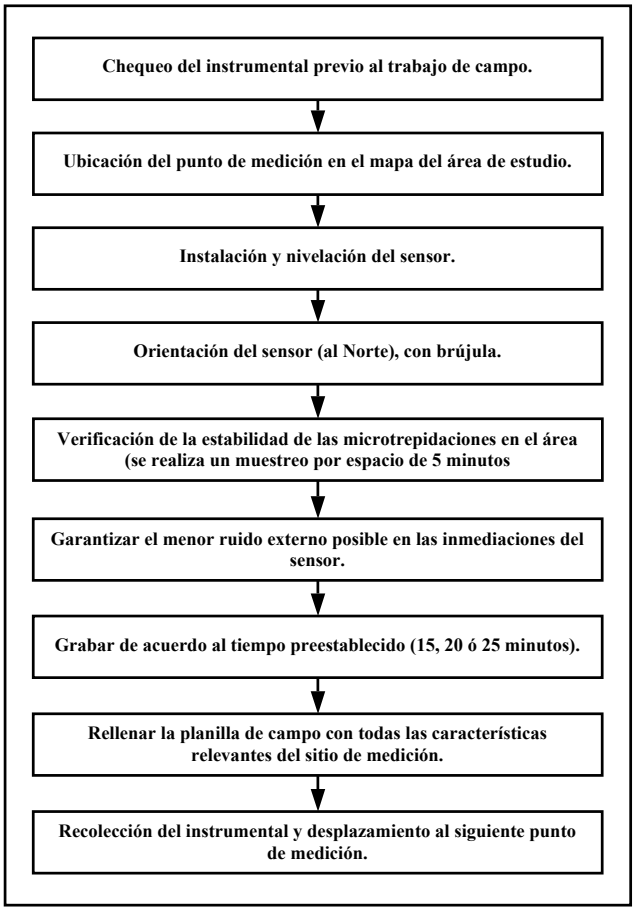


Fig. 3. Etapas para la adquisición de los datos de ruido sísmico en campo

Los pasos sucesivos permiten la transformación de los datos hasta llegar al formato ASCII, para posteriormente llevarlos a una aplicación desarrollada en el programa LabView (Rocabado, 2005), que permite transformarlos en el formato SAF (Sesame Ascii Format), reconocido por J-SESAME. Dichos pasos se resumen en la fig.4, con el ejemplo aplicado a la componente Este–Oeste de la estación denominada 001.

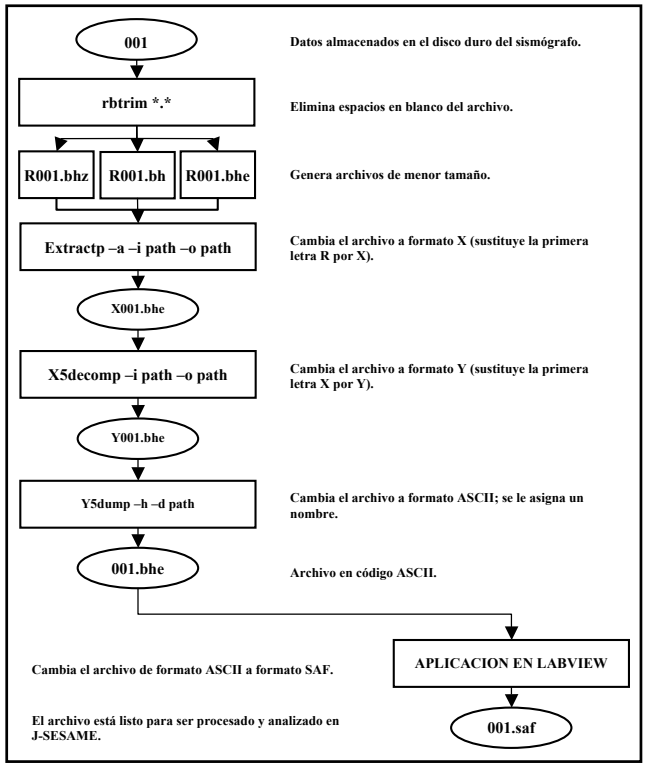


Fig. 4. Esquema del procesamiento de los datos de ruido sísmico ambiental.
(Modificado de Rocabado y Hecht, 2005).

3.3 Interpretación de los datos geofísicos:

Posterior al procesamiento y conversión de los datos a formato SAF, se utiliza el programa J-SESAME, versión 1.08, para realizar las interpretaciones de las mediciones de ruido sísmico ambiental, con la finalidad de obtener la frecuencia o período fundamental del sitio de medición, objetivo principal de este proyecto.

En efecto, una vez obtenidos los archivos en formato SAF se procedió a cargarlos en el programa J-SESAME, para lo cual previamente se debió configurar de acuerdo a los requerimientos de procesamiento. En este sentido, se ajustaron los parámetros de la siguiente manera: la longitud de la ventana para el promedio de período corto (sta, *short term average*), fue de 1 segundo; la longitud de la ventana para el promedio de período largo fue de 25 segundos (lta, *long term average*). El mínimo valor para la relación sta/lta fue de 0,5; también para el cociente sta/lta, se tomó como máximo nivel un valor de 2,0. La longitud de las ventanas, sobre las cuales todos los criterios debían ser cumplidos, fue de 20 segundos, permitiéndose un solapamiento entre ellas hasta un máximo de 10% (2 segundos). Se aplicó un filtrado (*tapering*), del tipo coseno a 5%, un suavizado (*smoothing*) de Konno y Ohmachi para un ancho de banda constante de 40 Hz, y una combinación de las dos componentes horizontales (*merging*), del tipo geométrica. No se aplicó

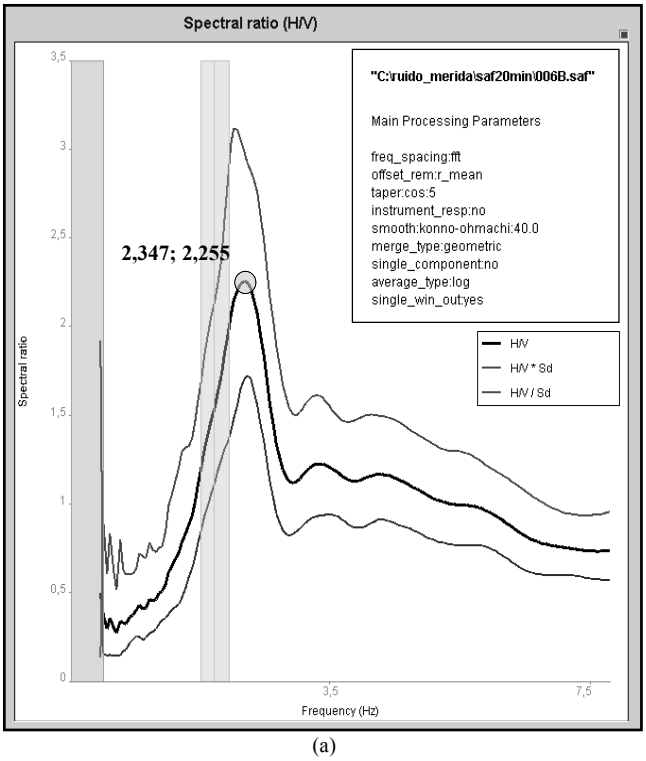
filtro pasabanda.

Posteriormente se introducía el archivo de la estación a ser procesada e interpretada, se ploteaban cada uno de sus canales de grabación para luego obtener un número determinado de ventanas de procesamiento (que dependía de la calidad de los datos). Finalmente se calculaba la relación espectral H/V, la cual se podía visualizar en una gráfica de donde se obtenían el pico de frecuencia y la amplitud natural del sitio de medición (abcisa y ordenada, respectivamente, en la fig. 5).

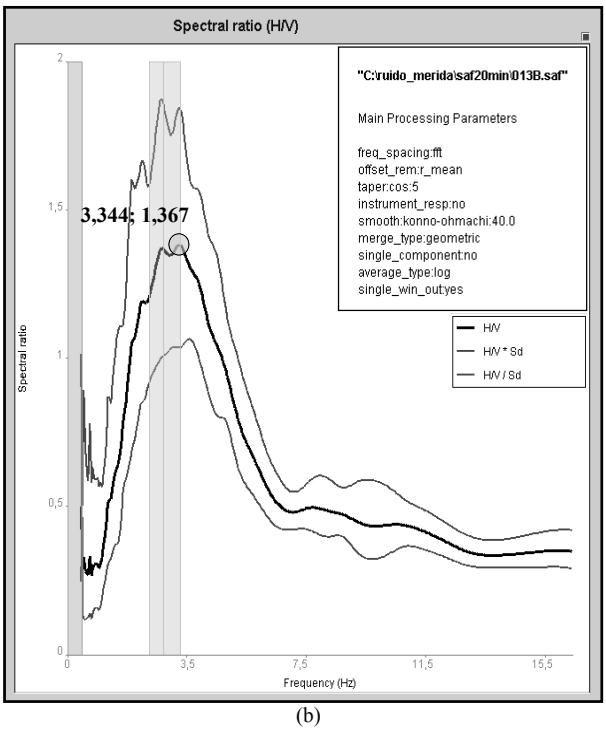
Al obtener los valores de períodos para cada una de las estaciones de medición, se le aplicaban una serie de criterios de confiabilidad propuestos por el Proyecto SESAME, para luego representarlos, a través de un Sistema de Información Geográfica, en un mapa de distribución de períodos fundamentales del suelo de la ciudad. Por último, se correlacionó esta información con la aportada por el modelado gravimétrico del Área Metropolitana de la ciudad de Mérida (Reinoza, 2006), y con la definición de una secuencia óptima de procesamiento de datos de ruido sísmico (Monsalve *et al.*, 2006).

4 Resultados y discusión

A partir de los datos de ruido sísmico ambiental obtenidos, se procedió a determinar los valores de períodos y amplitudes de cada sitio de medición a través del gráfico de la relación H/V. En la fig. 5, se muestra el ejemplo de la estaciones 006 y 013, respectivamente.



(a)



(b)

Fig. 5. Relación H/V para dos estaciones de medición pertenecientes a la zona 3 de procesamiento (La Hechicera – Los Chorros), con la selección de la frecuencia correspondiente al período fundamental. (a) Estación 006, ubicada en la sede de Fundacite, Sector La Hechicera, y (b) Estación 013, ubicada en la Urbanización Los Pinos, Sector Los Chorros

En las figs. anteriores se puede apreciar la relación H/V para las estaciones 006 y 013. En el primer caso (a), la frecuencia asociada al período fundamental (círculo), fue de 2,347 Hz (0,426 segundos de período), y una amplitud de la relación H/V de 2,255; para el segundo caso (b), la frecuencia determinada fue de 3,344 Hz (0,299 segundos de período), y una amplitud de 1,367. De esta misma manera, se procedió para determinar el período fundamental de las estaciones restantes.

Cabe destacar, que en muchas oportunidades el determinar el pico que representa al período fundamental fue más complicado de lo previsto, debido a que el mismo no se podía distinguir claramente en la curva, como consecuencia de un posible bajo contraste de velocidad entre los sedimentos de la terraza y la roca basamento (Konno, 1998), y en otros casos, la relación H/V mostraba más de un pico debido a posibles configuraciones complejas de varias capas en el subsuelo, y en consecuencia, a diversos contrastes de impedancia (Bard, 1998).

En la tabla 1 (al final del artículo), se pueden observar los datos de las 18 estaciones más representativas de cada zona de procesamiento, en las cuales se dividió el Área Metropolitana de la ciudad de Mérida. En dicha tabla, se puede observar, el sector de la ciudad en el cual se ubicó la estación de medición, las coordenadas de localización (U.T.M.), el número de ventanas de procesamiento empleadas para el cálculo de la relación H/V, los valores de fre-

cuencia y el período fundamental asociado, y el valor de amplitud H/V.

4.1 Mapa de períodos fundamentales:

En la fig. 6 (al final del artículo), se observa el mapa de distribución de períodos fundamentales del suelo, para el Área Metropolitana de la ciudad de Mérida. El rango de variación de los períodos del área está entre 0,087 segundos y 1 segundo, con una media de 0,33 segundos y una desviación estándar de 0,19 segundos, lo cual indica una baja dispersión de los datos alrededor de la media, y es comprensible cuando el 52% de los datos (84 estaciones), se ubican en un rango comprendido entre 0,2 y 0,4 segundos, que en base a trabajos previos, corresponde al rango en el cual se dan las mayores amplificaciones espectrales para la ciudad de Mérida (Grisolía *et al.*, 2003).

Al realizar un análisis general de los valores de períodos, se observa que el 88% de las mediciones se encuentran en un rango que va de 0,01 a 0,6 segundos, lo cual denotaría, al establecer una relación período–espesor, valores de espesores de sedimentos blandos relativamente bajos para la terraza donde se asienta la ciudad de Mérida.

Cabe destacar, que existe una zona al suroeste de la terraza conformada por los sectores Los Curos (parte alta, media y baja), y las urbanizaciones La Mata, La Mara y El Carrizal, que presentan los períodos más elevados en un rango de 0,6 y 1 segundo, lo cual se traduce, aparentemente, en ser las zonas de mayor espesor con respecto al resto del área de estudio. Esta región se formó por el aporte de sedimentos provenientes del Río Chama, Quebrada Carvajal, Río La Pedregosa y Río Albarregas, y al tomar en cuenta la dirección general de aporte de sedimentos, en sentido Noreste-Suroeste, se podría explicar el alto rango de períodos fundamentales de esta zona (posible depocentro de la cuenca). Pero por otra parte, este sector podría presentar un control tectónico (por fallas normales), que se traduciría en una depositación importante de sedimentos debido a la influencia de ese régimen estructural.

Otra zona de interés la representa el sector de La Hechicera, para la cual predomina un rango de 0,4 a 0,6 segundos de período, y en donde los sedimentos de este pequeño valle fueron aportados por la cuenca alta del Río Albarregas y en menor proporción por la Quebrada Milla. En La Pedregosa se produce un aumento gradual de los períodos conforme se avanza aguas abajo del Río La Pedregosa. Para el resto del área metropolitana (Urbanización Santa María, centro de la ciudad, Avenida Las Américas, Urbanización Santa Juana, Urbanización La Humboldt, Sector El Rincón, Urbanización San Cristóbal, Urbanización Belensate), se presenta un rango predominante que va de 0,2 a 0,4 segundos y ocasionalmente, en ciertas zonas llegan a 0,6 segundos. Cabe destacar que los mínimos relativos de período se encuentran en el área comprendida entre los sectores San Jacinto, Urbanización La Carabobo y La Chamita, lo cual corresponde a la llanura de inundación del Río Chama y en consecuencia, los espesores de depósitos no consolidados son relativamente bajos, ya que inclusive, en algunos lugares de la zona, se puede distinguir el contacto discordante entre la Asociación Sierra Nevada (rocas del basamento), y dichos sedimentos.

4.2 Relación entre períodos fundamentales y espesor de sedimentos:

El principal objetivo de establecer una relación entre los valores de períodos y el espesor de sedimentos es validar, partiendo del modelo generado por los datos de ruido sísmico ambiental, los resultados de espesores obtenidos del modelado gravimétrico (Reinoza *op cit.*). En este sentido, las zonas donde los valores de períodos son los más altos se pueden asociar con espesores de sedimentos mayores, y por analogía, en las zonas donde los períodos son mínimos, el espesor sedimentario será menor. Para realizar dicho análisis, se elaboró un mapa integrado en donde se representó la distribución de isoperíodos de la ciudad de Mérida y el mapa isópaco de espesores obtenido del modelado gravimétrico del Área Metropolitana de la ciudad de Mérida (Fig.7, al final del artículo).

En dicho mapa, es de resaltar el alto grado de correlación en diversas partes del área en lo que respecta a la relación período–espesor. Es así como, para el sector comprendido entre la Urbanización Santa Anita y el Núcleo La Liria de la Universidad de los Andes, en el centro-norte del área, se encuentra una buena relación: para un rango de 0,56 a 0,67 segundos de período se tiene un espesor de 80 a 100 metros de sedimentos. Por otra parte, al noreste de la ciudad, en el sector denominado Vuelta de Lola se determinó un período de 0,8 segundos que a su vez corresponde con espesores que van de 100 a 120 metros. En la parte baja del sector La Hechicera, al noreste de la ciudad, se puede apreciar un mínimo de espesor (0 metros), y el período para ese sector es de 0,17 segundos, denotando una apreciable correlación, lo cual posiblemente se deba a que esa zona se encuentra cercana al contacto de los sedimentos cuaternarios con rocas de la Formación Palmarito.

Al suroeste del área de estudio se determinaron, por mediciones gravimétricas, espesores que van de 60 a 80 metros para un rango de períodos de 0,61 a 0,67 segundos. Finalmente, una de las mejores relaciones se da en la zona correspondiente a la cuenca del Río Chama (poblaciones de San Jacinto, La Carabobo, La Chamita, al sur del área), en donde para un rango de espesores de 0 a 20 metros, se determinaron períodos de 0,09 a 0,23 segundos. En términos generales, hacia diversas partes del norte de la ciudad, se produce una considerable disminución del espesor y de los períodos del suelo, ya que se está en presencia de rocas de las formaciones Palmarito, Mucujún, Sabaneta y de la Asociación Sierra Nevada.

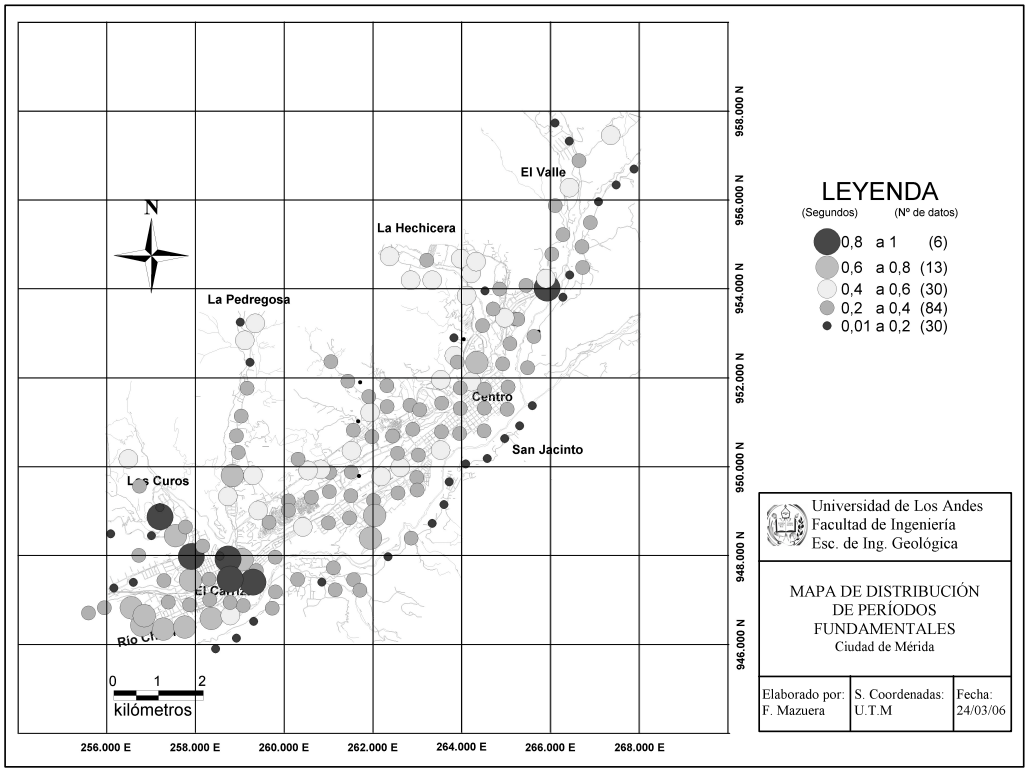


Fig. 6. Mapa de distribución de períodos fundamentales del Área Metropolitana de la ciudad de Mérida

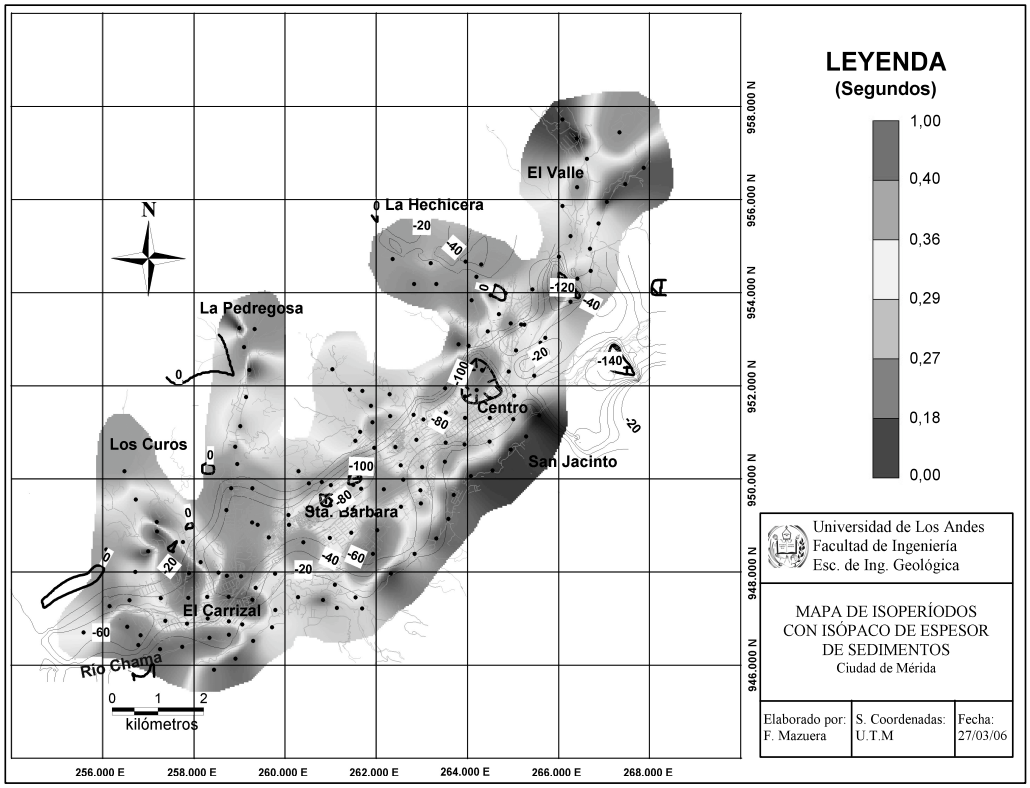


Fig. 7. Mapa integrado de isoperíodos con isópacas de espesor de sedimentos del Área Metropolitana de la ciudad de Mérida (Datos de espesores aportados por Reinoza C, 2006)

Tabla 1. Resultados del análisis de los datos de ruido sísmico ambiental.

Zona de Procesamiento	Estación	Coordenadas		Nº de ventanas	Frecuencia (Hz)	Período (s)	Amplitud (H/V)
		Este (m)	Norte (m)				
1 (El Valle)	122	266414	956271	20	2,299	0,435	2,416
2 (El Vallecito)	156	266709	954474	23	4,298	0,233	3,492
3 (La Hechicera)	006	264204	954345	59	2,347	0,426	2,255
4 (Santa María)	019	265910	954014	45	1,249	0,801	3,270
5 (Santa Anita)	025	264208	951912	38	1,799	0,556	1,036
6 (Centro)	038	263942	950747	23	2,549	0,392	3,960
7 (Las Américas)	031	262886	950843	60	3,948	0,253	1,694
8 (La Pedregosa)	069	258960	950323	25	2,649	0,378	1,821
9 (Aeropuerto)	059	261493	949348	17	3,348	0,299	0,936
10 (El Rincón)	145	261045	952361	21	4,198	0,238	1,186
11 (La Humboldt)	078	260085	949228	55	3,248	0,308	1,745
12 (San Jacinto)	132	265580	951369	50	11,544	0,087	1,818
13 (Av. A. Bello)	173	260989	948736	44	3,498	0,286	1,855
14 (El Chamita)	131	258452	945906	44	6,347	0,158	1,903
15 (Vía a Jají)	081	257202	948873	21	1,000	1,000	3,460
16 (La Mata)	080	257887	947450	19	1,349	0,741	1,749
17 (El Ciego)	162	256552	946828	36	1,499	0,667	2,384
18 (El Carrizal)	091	258353	946588	31	1,399	0,715	1,438

Pero es importante destacar, que la relación de períodos fundamentales y espesor de sedimentos, no siempre resultó lineal. Es así como por ejemplo, en el sector de Los Curos – La Mata – La Mara – El Carrizal, para el cual se determinó el mayor rango de períodos (0,6 a 1 segundo), los espesores resultaron relativamente bajos (0 a 40 metros). En el caso particular de esta zona, como se mencionó previamente, posiblemente exista un control tectónico, litológico o climático, que al determinarlo a través de futuras investigaciones geológicas y geofísicas, pudiese clarificar la no correspondencia entre el período y el espesor para este sector.

Otra de las zonas donde la relación de la frecuencia pico con el espesor no resultó unívoca, fue el sector de Santa Bárbara en donde para un rango de períodos de 0,21 a 0,33 segundos, el modelado gravimétrico estima espesores de 80 a 100 metros.

4.3 Perfiles Período–Espesor:

En base a los resultados obtenidos en este proyecto, es posible definir una relación cuantitativa que permitiría asignar un rango de valores de períodos fundamentales con intervalos de espesores de sedimentos no consolidados en el subsuelo.

Para obtener dicha relación, se trazaron seis perfiles, de diferentes orientaciones, sobre el mapa isópaco de espesores integrado con el de isoperíodos, en zonas donde se apreciaran los cambios más significativos de los espesores en el área (Fig. 8).

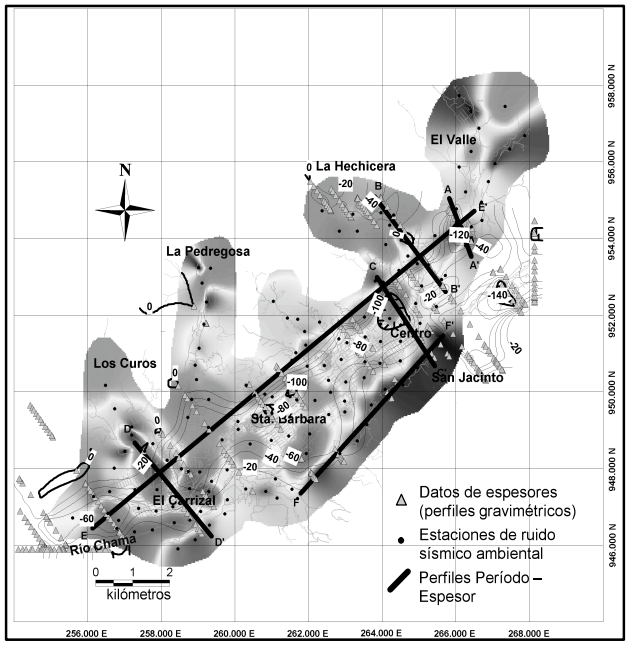


Figura 8. Mapa de ubicación de los perfiles período-espesor para el Área Metropolitana de la ciudad de Mérida.
(Datos gravimétricos aportados por Reinoza, 2006).

Se determinaron cada una de las estaciones que conformarían cada perfil con su respectivo valor de período fundamental. De los modelos elaborados en el programa IGMAS (Reinoza *op cit.*), se obtuvieron los espesores de sedimentos asociados a cada estación y se integraron con los períodos. En la figura anterior se pueden apreciar los siguientes perfiles: Perfil A–A', con orientación Noroeste–Sureste; Perfil B–B' (Noroeste–Sureste), Perfil C–C' (Noroeste–Sureste), Perfil D–D' (Noroeste–Sureste), Perfil E–E' (Suroeste–Noreste) y Perfil F–F' (Suroeste–Noreste). Se escogieron los tres más representativos de la relación, y los datos empleados para su elaboración, se muestran a continuación en las tablas 2, 3 y 4.

Tabla 2. Datos para el perfil período-espesor B – B'.

Perfil	Estación	Coordenadas		Período (s)	Espesor (m)
		Este (m)	Norte (m)		
B – B' (NO-SE)	005	263966	954673	0,43	44,49
	006	264204	954345	0,43	23,32
	011	264515	953952	0,17	0,00
	021	264958	953343	0,47	28,91
	022	265254	953313	0,29	54,46
	168	265612	952928	0,30	60,00

Tabla 3. Datos para el perfil período-espesor C – C'.

Perfil	Estación	Coordenadas		Período (s)	Espesor (m)
		Este (m)	Norte (m)		
C – C' (NO-SE)	015	263812	952893	0,14	9,91
	009	264327	952340	0,67	120,28
	046	264502	951742	0,24	99,25
	044	265011	951287	0,22	9,58
	133	265292	950916	0,12	9,50

Tabla 4. Datos para el perfil período-espesor F – F'.

Perfil	Estación	Coordenadas		Período (s)	Espesor (m)
		Este (m)	Norte (m)		
F – F' (SO-NE)	141	262331	947974	0,12	17,20
	140	262850	948393	0,23	30,21
	138	263590	949148	0,15	20,00
	136	264082	950063	0,12	6,72
	135	264561	950185	0,11	8,50
	133	265292	950916	0,12	9,58
	132	265580	951369	0,09	9,58

La relación entre el período y la profundidad de los sedimentos, se puede apreciar gráficamente en las siguientes figuras 9, 10 y 11.

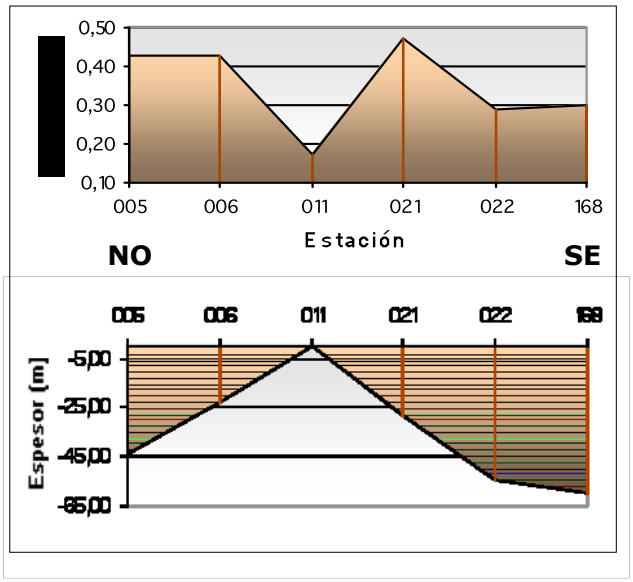


Fig. 9. Relación entre período y espesor (profundidad), para el perfil B – B'.

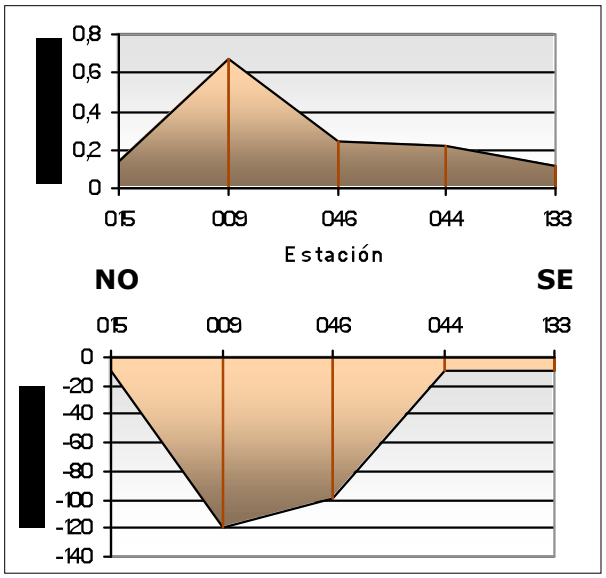


Fig. 10. Relación entre período y espesor (profundidad), para el perfil C – C'.

Como se puede observar en los modelos elaborados para los perfiles escogidos, existe una relación aparente entre los períodos fundamentales y el espesor de sedimentos, es decir, para valores elevados de períodos se observan profundidades mayores en el subsuelo. Cabe recordar, que esta relación no siempre es lineal, pero en el caso de los tres perfiles mostrados anteriormente, se conserva, y a partir de ellos se pueden determinar algunos rangos de variación de períodos para diferentes intervalos de profundidad.

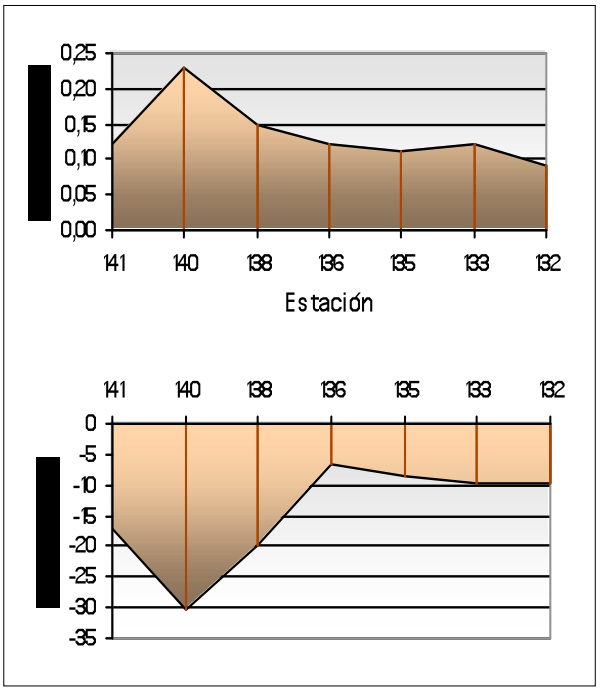


Fig. 11. Relación entre período y espesor (profundidad), para el perfil F – F'.

A partir del perfil B – B' (Figura 9), se determinaron dos rangos de variación aparentes; el primero de éstos de 0,10 a 0,45 segundos, se asocia a espesores de sedimentos de 0 a 45 metros. El segundo de 0,30 a 0,50 segundos corresponde a espesores entre 30 y 60 metros. En el perfil C – C' (Figura 10), se aprecia un rango principal que va de 0,50 a 0,70 segundos y se asocia con espesores de 80 a 120 metros. Para el perfil F – F' (Figura 11), ubicado en las márgenes del Río Chama, se observa un rango principal, lo cual denota que para períodos de 0,09 a 0,25 segundos se asocian de 5 a 30 metros de espesores de material sedimentario no consolidado.

5 Conclusiones

Con este trabajo se pudo estimar los períodos fundamentales de vibración de los suelos del Área Metropolitana de la ciudad de Mérida, los cuales variaron en un rango de 0,09 y 1 segundo, mientras que los picos de frecuencia oscilaron entre 1,0 y 11,5 Hz.

Cabe destacar, que para la fase de adquisición, los resultados más confiables de datos de ruido sísmico se obtuvieron para un tiempo de grabación de 15 a 25 minutos, y con la aplicación de una serie de parámetros de procesamiento, que se mencionaron con detalle en la sección correspondiente a la metodología.

Al hacer un análisis de la correspondencia entre los períodos determinados y la geología del área, se pudo comprobar que en zonas asociadas a rocas duras (asociaciones Sierra Nevada y Tostós, y las formaciones Sabaneta, Palmarito, La Quinta y Mucujún), los valores de períodos eran tendientes a cero. En algunos casos los períodos eran relativamente bajos, producto de que la roca expuesta de estas unidades geológicas, posiblemente tenga algún grado de alteración. Del mismo modo, los períodos para los sedimentos correspondientes a los depósitos de terraza, mostraban un aumento gradual partiendo de las zonas de contacto de éstos con las formaciones duras.

La relación período–espesor estimada por la integración del método de ruido sísmico ambiental con los resultados del modelado gravimétrico, no fue absolutamente lineal, pero en varias regiones se comprobó que los mayores espesores de sedimentos se asociaban con los mayores valores de períodos, y viceversa. Tal es el caso del sector del Núcleo La Liria (Universidad de Los Andes), sector La Hechicera y el sector Vuelta de Lola.

Para estudiar en detalle tal relación, se elaboraron un total de seis perfiles período – espesor, en diferentes orientaciones de la terraza, en donde se pudo concluir la existencia de una correlación aparentemente directa entre los períodos fundamentales y el espesor de sedimentos, es decir, para valores elevados de períodos se observaron profundidades mayores al basamento rocoso. La relación se conservó lineal en el caso de cuatro de los seis perfiles elaborados, y a partir de ellos, se pudo determinar algunos rangos de variación de períodos para diferentes intervalos de profundidad.

Al realizar un análisis geológico de los resultados provistos por la integración de los datos de períodos y los de espesores, se definieron tres zonas ejemplares de la ciudad, en donde no fue posible apreciar una relación unívoca entre el período fundamental y los espesores de sedimentos no consolidados (Los Curos – El Carrizal, Humboldt – Santa Bárbara y aparentemente El Arenal). A raíz de esto, se concluye sobre la posible intervención de causas tectónicas que pudiesen controlar las condiciones de sedimentación en dicha zonas.

Los mapas de períodos fundamentales realizados en este proyecto, pueden ser considerados como una zonificación preliminar de amenaza sísmica del área de estudio, que lógicamente debe ser complementada con estudios geotécnicos, otros estudios geofísicos y modelos dinámicos del comportamiento de los suelos.

Cabe recalcar, que la metodología aplicada y sus correspondientes resultados no representan la respuesta real y definitiva del comportamiento del suelo ante la demanda de un fuerte evento sísmico, sin embargo sí se corresponden con una estimación preliminar, en virtud de estudios similares realizados en Ciudad de México, luego del Terremoto de 1985; en este caso, se determinó posterior al evento, y en base a la aplicación de diferentes técnicas geofísicas, entre ellas la de ruido sísmico ambiental, que la gran mayoría de los daños a estructuras se dieron en zonas con valores altos de períodos de vibración, y suelos predominantemente arcillosos. Otros casos similares, donde se ha demostrado la relación entre período-espesor-grado de daño, han sido los terremotos de Loma Prieta (1989) y Kobe (1995), en Estados Unidos y Japón, respectivamente.

Análogamente, en nuestro país, luego del terremoto de Caracas (1967), se realizaron numerosas investigaciones que derivaron en concluir, que las zonas donde se produjeron la mayor cantidad de colapsos y daños a estructuras, coincidían con las zonas del valle de Caracas, con mayores espesores de sedimentos, y en consecuencia, mayores valores de períodos fundamentales del suelo, como lo fue el Este de la Capital (Palos Grandes y Altamira).

6 Recomendaciones

Finalmente, se recomienda validar los resultados obtenidos en esta investigación con la elaboración de perfiles de equilibrio en los principales ríos y quebradas del área, que permitan determinar con mayor precisión los mecanismos controladores de la sedimentación, y de esta forma poder comprobar, por ejemplo, en el caso particular del sector Los Curos, si existe un control estructural por fallas; cabe recordar que para esta zona se determinaron los mayores períodos pero de acuerdo al modelado gravimétrico, los espesores eran relativamente bajos.

En este sentido, la adquisición de datos a partir de levantamientos de sísmica de refracción, también se recomienda para dilucidar las indeterminaciones al momento de las interpretaciones.

Por otra parte, se recomienda obtener datos de ruido sísmico y gravimétricos con un mallado más denso que permita obtener una mejor correlación entre ambos métodos, debido a que las anomalías gravimétricas en esta región responden considerablemente a la componente regional del área, mientras que los datos de ruido sísmico responden más a condiciones locales, es decir, a los efectos de sitio.

También se exhorta vehementemente a la perforación de pozos que permitan la recopilación de datos geotécnicos, empleados para verificar los valores de densidades, composición y profundidad de los estratos que conforman el subsuelo, y con ello calibrar los diferentes modelos geofísicos.

Se recomienda que para estudios futuros, relacionados con la respuesta sísmica del suelo, se analice la influencia de las variaciones del nivel freático (hidrogeología), con dicha respuesta, ya que las aguas subterráneas posiblemente introducen variaciones en las tensiones del suelo.

Finalmente, debemos recomendar que la aplicación de la Técnica de Nakamura sobre las mediciones de ruido sísmico ambiental en diferentes ciudades de los Andes Venezolanos, sería de gran apoyo para futuros proyectos de microzonificación, en aquellas ciudades de considerable amenaza sísmica.

Referencias

Bard P, 1998, Microtremor measurements: A tool for site effect estimation, Proceeding of the Second International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Yokohama, Japan, pp. 1251-1279.

Frischknecht C, 2000, Seismic soil amplification in Alpine valleys, A case study: the Rhone Valley, Valais, Switzerland, Thèse Docteur. Université de Genève. 144 p.

Grisolía D, Barboza J y Rivero P, 2003, Estimación de la respuesta sísmica de la terraza de la ciudad de Mérida, Venezuela, Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

Konno K, 1998, Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremors, Bulletin of the Seismology Society of America, Vol. 88, pp. 228-241.

Monsalve M, Torres M, Klarica S, Rocabado V y Mazuera F, 2006, Adquisición de datos de ruido sísmico ambiental en el Área Metropolitana de la ciudad de Mérida, Estado Mérida, con énfasis en obtener una secuencia óptima de procesamiento, Trabajo Final de Grado, Universidad de Los Andes. 210 p.

Reinoza C, Klarica S y Sánchez J, 2006, Modelado geofísico del basamento del Área Metropolitana de la ciudad de Mérida, Estado Mérida, Trabajo Final de Grado, Universidad de Los Andes. 145 p.

Rocabado V, 2005, Manual práctico de procesamiento de ruido ambiental, Departamento de Sismología, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas. 23 p.

Site Effects assessment using AMbient Excitations, SESAME, 2004, Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation. European Research Project. 62 p.