

Editada por el Centro de Información y Gestión Tecnológica. CIGET Pinar del Río
Vol. 18, No.2 abril-junio, 2016

ARTÍCULO ORIGINAL

Estimación del periodo dominante del suelo, una herramienta en la gestión local de riesgos geológicos

Estimate of the dominant period of the soil, a tool in the local management of geological risks

Alexis Ordaz Hernández¹, Cándido Montenegro Moracén² y Viana Poveda Brossard³

¹Doctor en Ciencias Técnicas, profesor Asistente. Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, México. Correo electrónico: alexisordaz.1978@gmail.com

²Ingeniero en Telecomunicaciones. Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. Calle 17 No. 61, e/ 4 y 6, Vista Alegre, Santiago de Cuba, Cuba. Teléfono.642583. Correo electrónico: candido@cenais.cu

³Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica. Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. Calle 17 No. 61, e/ 4 y 6, Vista Alegre, Santiago de Cuba, Cuba. Teléfono. 642583. Correo electrónico: viana@cenais.cu

RESUMEN

El análisis de los registros de microsismos para la obtención de periodos dominantes del suelo, es una valiosa herramienta en la planificación urbana y en la gestión local de riesgos, fundamentalmente frente a sismos. La investigación tuvo como objetivo la elaboración del mapa de periodos dominantes del suelo para la ciudad de San Cristóbal (Cuba occidental), empleando el análisis de microsismos como método principal. Los resultados alcanzados permitieron subdividir la ciudad en cinco zonas de acuerdo al comportamiento de periodo dominante del suelo. En particular la zona con periodo dominante superior a dos segundos, es la más favorable para la amplificación de las ondas sísmicas en la ciudad. La microzonación sísmica obtenida constituye una herramienta de consulta en el futuro ordenamiento urbano y en la gestión local de riesgos geológicos.

Palabras clave: Periodo dominante, microzonación, microsismos, San Cristóbal.

ABSTRACT

The analysis of the risks of microseisms for the obtaining of dominant periods of the soil, is a wealthy tool in the urban planning and in the local management of risks, mainly in cases of seisms. The investigation had as objective the elaboration of the map of dominant periods of soils for the city of San Cristobal (western Cuba), using the analysis of microseism as main method. The reached results allowed to subdivide the city in to five zones according to the behavior of the dominant period of the soil. Particularly the zone with dominant period of the soil superior in two seconds, is the most favorable zone for the amplification of the seismic waves in the city. The obtained seismic microzoning is a tool for the consult in the future urban ordering and in the local administration of geological risks.

Key words: Dominant period, microzoning, microsismic, San Cristobal

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el empleo de los microsismos en los pronósticos de las respuestas de los suelos frente a solicitudes sísmicas se ha incrementado considerablemente, especialmente en zonas de alto riesgo como Japón, México, Chile, Costa Rica entre otros países. El análisis y procesamiento de los registros de microsismos ha ofrecido resultados fiables, de forma rápida y a bajos costos. En Cuba los estudios de efecto de sitio y en este caso las determinaciones de parámetros dinámicos de los suelos, como el periodo dominante, se han concentrado fundamentalmente en las provincias orientales.

Desde la década de 1960 se inicia un vertiginoso desarrollo constructivo en Cuba, y paralelamente se incrementó notablemente las investigaciones ingeniero geológicas; elemento que permite alcanzar un conocimiento detallado de las condiciones geotécnicas de los suelos (Ordaz, 2012). Sin embargo, en general para Cuba Occidental, no son comunes los análisis a escala urbana del comportamiento de los suelos frente a solicitudes sísmicas. Justamente este trabajo tiene como objetivo la elaboración del mapa de periodos dominantes del suelo para la ciudad de San Cristóbal (Provincia de Artemisa), sitio donde ocurrió en 1880 un sismo de magnitud estimada 6.0 en la escala de Richter (Chuy, 1999).

La microzonación sísmica de ciudades (en este caso de estudio atendiendo al periodo dominante del suelo) en el ámbito mundial ha tomado gran fuerza, siendo la base fundamental para la formulación de normas sismo-resistentes Bermúdez *et al.* (2002) o para el trazado de estrategias consistentes en la reducción de la vulnerabilidad del patrimonio construido. Aspectos, estos últimos, que conforman la base de la gestión local de riesgos geológicos.

La gestión local de riesgos asociados a peligros naturales, se ha convertido en una necesidad para los decisores locales. El gobierno cubano dedica cuantiosos recursos a los estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgos (PVR), para peligros de diferente génesis (hidrometeorológicos, tecnológicos, geológicos y otros). La Agencia de Medio Ambiente (AMA) es la institución encargada del control de estos trabajos, bajo el amparo de la Directiva 01/2005 de la Defensa Civil Nacional. Este trabajo es una contribución a los estudios de PVR, sobre todo en aspectos vinculados a la respuesta sísmica de los suelos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis dinámico de los suelos es la base que sustenta la microzonación con fines antisísmicos. La respuesta dinámica está estrechamente vinculada con el periodo dominante de los suelos. En la actualidad para la obtención del periodo dominante de los suelos o de la frecuencia, se emplean las mediciones de microsismos, también reconocidos en la literatura especializada como vibración, ruido ambiental o microtemblor.

Flores (2004) define a los microsismos como: a) vibraciones en la superficie debidas a la incidencia oblicua de ondas de cuerpo que se propagan en todas direcciones con la misma energía; b) una superposición de ondas superficiales, que constituyen un campo estacionario y homogéneo; y, c) el ruido ambiental generado por fuentes naturales y artificiales, como el tráfico vehicular o la actividad humana. Para el presente caso de estudio, se asume la tercera definición.

Se realizaron un total 125 mediciones instrumentales con una estación portátil (Bloque de sensor y registrador, MARSLITE) para el registro de microsismos, con una separación aproximada entre puntos de 300 m. La ubicación de cada punto de medición responde al nivel de accesibilidad dentro de la urbanización y a satisfacer un adecuado nivel de estudio (escala 1: 10 000) (*figura 1*). En este sentido, el TC4 (*Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering* (1999) sugiere escalas comprendidas entre 1: 25 000 y 1: 5 000 (Zonación rigurosa-Grado 3).

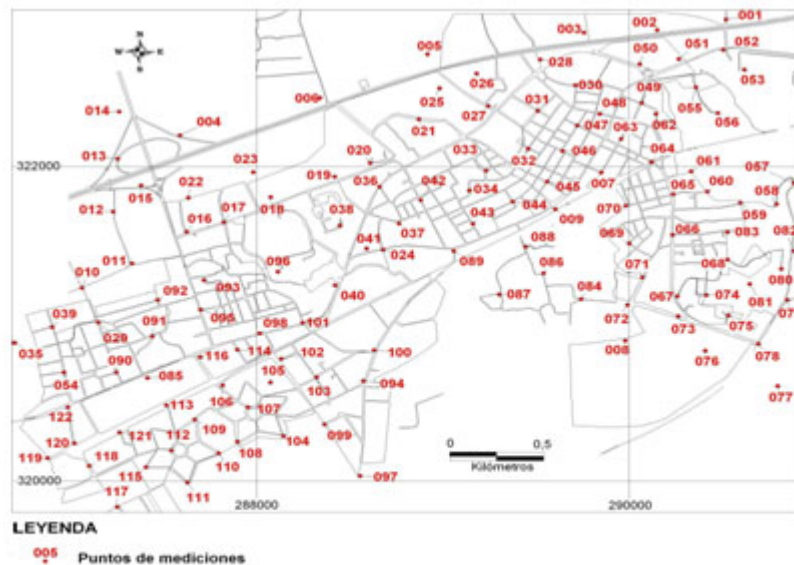


Figura 1. Puntos donde se realizaron las mediciones de microsismos, empleadas en la microzonación sísmica de la ciudad de San Cristóbal.

Los registros de microsismos obtenidos en las mediciones instrumentales fueron procesados con el programa *Degtra*, que permite el cálculo simultáneo de los espectros de Fourier, la promediación y suavizamiento de las señales.

A modo de validación, tomando como base geológica el esquema ingeniero-geológico propuesto por Ordaz (2014); se compararon los resultados de periodos dominantes obtenidos, con las descripciones, que para cada tipo de suelo aparecen reflejadas en la Norma Cubana 46: 1999 "Construcciones sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción":

- Suelo S1: Roca de cualquier tipo, sedimentaria o cristalina. Puede caracterizarse por una velocidad de propagación de ondas transversales mayor que 800 m/s. Geológicamente son litologías rígidas de un espesor menor de 60 m hasta la base rocosa. Sus períodos dominantes están comprendidos entre 0.3 s y 0.5 s.
- Suelos S2: Depósitos estables de suelos no cohesivos o arcillas duras cuando su profundidad hasta la base rocosa excede los 60 m y los estratos superiores están compuestos por arenas, gravas o arcillas duras. Ese material puede caracterizarse por una velocidad de propagación de las ondas transversales entre 240 m/s y 450 m/s. Sus períodos dominantes están comprendidos entre 0.5 s y 0.8 s.
- Suelos S3: Depósitos de arcillas blandas o medias y arenas con espesores de 10 m o más, con o sin presencia de capas intermedias de arenas u otra clase de suelos no cohesivos. La velocidad de propagación de las ondas transversales generalmente es inferior a 240 m/s y el periodo dominante está comprendido entre 0.8 s y 1.2 s.
- Suelos S4: Litológicamente representado por depósitos de arcilla blanda con espesores mayores de 12 m, grandes espesores de arenas. Generalmente existen

niveles someros de aguas subterráneas. La velocidad de propagación de las ondas transversales generalmente no supera los 150 m/s y los periodos dominantes son mayores a 1.2 s.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos muestran un predominio de períodos dominantes en el rango comprendido entre los 1,21 y 2,0 segundos (s), para las componentes norte-sur y este-oeste (horizontales). Las componentes horizontales son las de mayor influencia en el efecto de sitio (Hammer y Mosquera, 2002; Hermanns *et al.*, 2012; entre otros). Siguiendo este criterio se contrastan los resultados de las mediciones de microsismos (*figura 2*) con la información ingeniero-geológica, para obtener entonces el mapa de periodos dominante de diseño para la ciudad de San Cristóbal (*figura 3*)

La información contenida en el mapa de períodos de diseño, debe ser tenida en cuenta en la configuración geométrica de nuevos edificios, y en la aplicación de medidas de reducción de vulnerabilidades de los ya existentes. En la Norma Cubana 46: 1999 "Construcciones sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción" se puede verificar estas aplicaciones, entre ellas está la determinación del período fundamental de vibración del edificio, la distribución de la fuerza cortante de la base y la evaluación del fenómeno de resonancia.

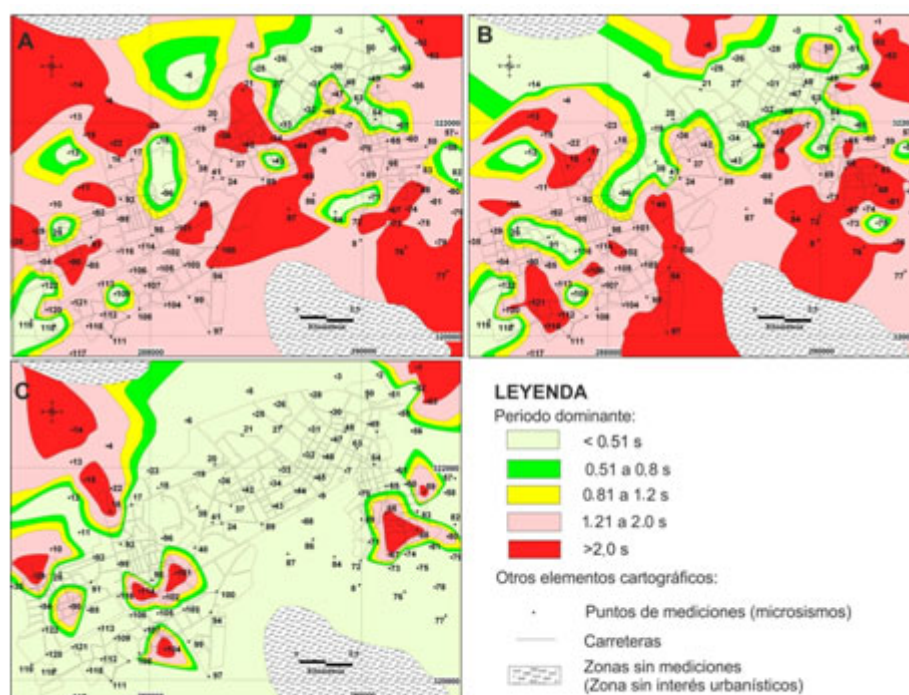


Figura 2. Mapas de periodos dominantes en las tres componentes. **A:** Componentes este-oeste, **B:** Componente norte-sur y **C:** Componente vertical. Escala original 1: 10 000.

Esta última aplicación, es una de las más importantes, existen múltiples ejemplos en casos de sismos importantes (Caracas, 1967; México, 1985; Loma prieta, 1989; entre otros), donde ha coincidido el periodo dominante de los suelos con el periodo de oscilaciones de los

edificios, ocurriendo el fenómeno de resonancia, provocando severos daños a las estructuras. Obsérvese en el mapa de períodos dominante de diseño (*figura 3*), como existen máximos de períodos dominante, estos se relacionan espacialmente con espesores considerables (entre 20 y 40 m) de sedimentos no consolidados de la Formación Guane o con los sedimentos areno-gravosos vinculados genéticamente con las terrazas de río San Cristóbal.

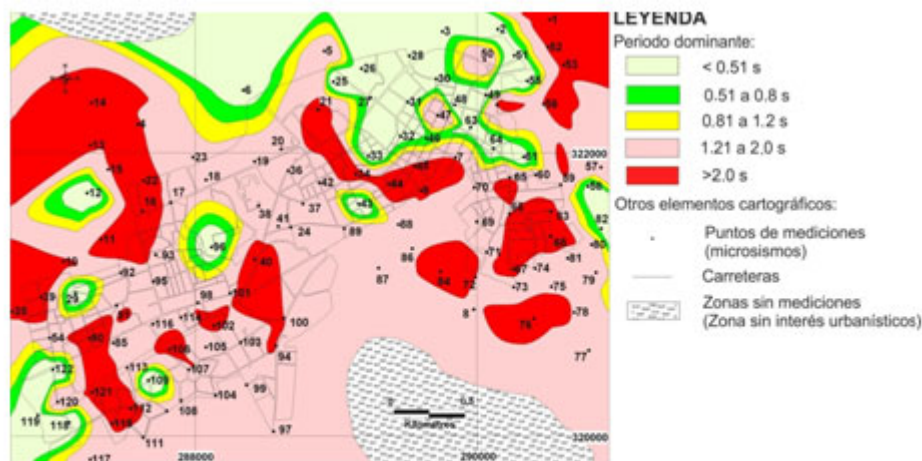


Figura 3. Mapa de períodos dominante de diseño para la ciudad de San Cristóbal. Escala original 1: 10 000.

Los resultados obtenidos en este trabajo, en conjunto con las descripciones de suelos contenidas en la Norma Cubana 46: 1999, se compararon con el esquema ingeniero-geológico de San Cristóbal (Ordaz, 2014). De este análisis integral, se determinan las características para cada zona cartografiada en el mapa de períodos dominantes de diseño de San Cristóbal:

- Zona A. Período dominante de diseño $> 0.51s$. Es la zona menos proclive a amplificar las ondas sísmicas. Se relaciona espacialmente con los sedimentos y rocas del conjunto facial genético carbonatado del Neógeno. Según la Norma Cubana 46: 1999, el corte estratigráfico puede clasificar como S1.
- Zona B. Período dominante de diseño de 0.51 a 0.80s. Representada por depósitos estables de suelos no cohesivos o arcillas duras, generalmente corresponden a la zona de interperismo de las rocas de la Formación Paso Real (Suelos S2).
- Zona C. Período dominante de diseño de 0.81 a 1.2s. Depósitos de arcillas blandas o medias y arenas con espesores de 10 m. Este material puede caracterizarse por una velocidad de propagación de las ondas de cortante menor de 240 m/s (Suelo S3).
- Zona D. Período dominante de diseño de 1.21 a 2.0s. Arenas arcillosas formando capas de potencia variable entre 10 y 20m. Son recurrentes los niveles someros de aguas subterráneas y existen pronósticos de susceptibilidad a la licuefacción (Ordaz

et al., 2013). La velocidad de propagación las ondas de corte generalmente son inferiores a 150 m/s (Clasifican como suelos S4).

- Zona E. Periodo dominante de diseño de 2.0s. Presenta los parámetros dinámicos más favorables para la amplificación de las ondas sísmicas. Se vincula con grandes espesores de sedimentos no consolidados del conjunto facial genético aluvial marino del Plioceno-Pleistoceno inferior (entre 20 y 40 m) y con las terrazas del río San Cristóbal (Suelos S4). Esta zona puede ser susceptible a licuar en presencia de suelos de baja densidad natural, como ocurre hacia el suroeste de la ciudad (Entronque de La Muralla) (Ordaz *et al.*, 2013).

CONCLUSIONES

- Actualmente el empleo de técnicas geofísicas, en especial las estimaciones del periodo dominante del suelo, a partir de la frecuencia de resonancia fundamental del terreno, resulta de gran efectividad para la identificación de sitios proclives a la amplificación de las ondas sísmicas.
- Se definieron cinco rangos de periodos dominantes de diseño para la ciudad de San Cristóbal; 0.51s, de 0.51 a 0.8s, de 0.81 a 1.2s, de 1.21 a 2.0s y 2.0s. Donde el 64% de la superficie del caso de estudio, se desarrolla en el cuarto rango (1.21 a 2.0s).
- Los decisores locales especialmente la Dirección Municipal de Planificación, el Centro municipal para la Gestión de riesgos y el Gobierno Municipal, a partir de estos resultados, contarán con una herramienta de trabajo para organizar los planes de desarrollo urbano y de reducción de vulnerabilidad sísmica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bermúdez, M.L., Franco, L.E. y Martínez, S.E. (2002). *Cálculo del período fundamental del suelo como herramienta para la microzonificación sísmica: casos colombianos*. En: III Coloquio Microzonificación Sísmica. Caracas. 14p.
- Chuy, T.J. (1999). *Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de peligrosidad y microzonación sísmica*. (Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Geofísicas). Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. Santiago de Cuba. 178 p.
- Flores, H.C., Lomnitz, C. y Yussim, S. (2004). Estimación de velocidades de fase a partir del análisis de microtemores con el método SPAC. *Geos*, 24(3), 438-445p.
- Hammer, J. y Mosquera, S. (2002). *Microzonificación Sísmica y Ordenamiento Territorial*. En: III Coloquio Microzonificación Sísmica, Caracas. 5p.

- Hermanns, L., Fraile de Lerma, A., Alarcón, E. y Álvarez, R. (2012). Comportamiento de las fábricas no estructurales en el terremoto de Lorca. *Física de la Tierra* (24), 315-341p.
- Ordaz, A., Chuy, T.J., Hernández, J.R. y García, J.A. (2012). División geológico-geotécnica aplicada a la zonación sísmica urbana: San Cristóbal, Cuba Occidental. *Cuaternario y Geomorfología*, 26(1-2), 89-104p.
- Ordaz, A., Chuy, T.J., Hernández, J.R. y García, J.A. (2013). La susceptibilidad a la licuefacción en el emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal, Cuba Occidental. *Minería y Geología*, 29(2), 1-15p.
- Ordaz, A. (2014). *Evaluación de las condiciones ingeniero-geológicas para el pronóstico de la respuesta dinámica de los suelos. Caso de estudio: ciudad de San Cristóbal, Cuba occidental*. (Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas). Universidad de Pinar del Río, Cuba. 171 p.
- Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, TC4. (1999). *Manual for zonation on seismic geotechnical hazards*. The Japanese Geotechnical Society. 219p.

Recibido: febrero 2016

Aceptado: mayo 2016

Dr.C. Alexis Ordaz Hernández. Profesor Asistente. Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, México. Correo electrónico: alexisordaz.1978@gmail.com