

Investigaciones de Microzonación Sísmica en Cuba

González B.E.; Sierra L.O.; Chuy T.; Pérez L.D. *

* Colaboradores del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas

Resumen

En el trabajo se presentan los resultados de algunas de las investigaciones de microzonación sísmica realizadas en zonas urbanas y sitios de construcción de objetivos económicos importantes de la República de Cuba.

Abstract

In this paper several results concerning seismic microzoning of urban areas and construction sites of important industries facilities of the Republic of Cuba are presented.

Introducción:

El archipiélago cubano se caracteriza por ser una zona de baja actividad sísmica, a pesar de que su región Oriental, y en especial la parte Sur de la misma, ha sido afectada por terremotos fuertes que han ocasionado grandes pérdidas materiales.

La historia de la Sismología en Cuba recoge la ocurrencia de 29 eventos considerados fuertes ($I \geq VII$ MSK), 25 de los cuales, se han originado en la región Sur Oriental del país. Esta actividad está fundamentada en que dicha región se encuentra cercana al contacto entre las Placas Norteamericana y del Caribe. Conocida además la ocurrencia de fuertes sismos en el interior del país (San Cristobal 1880, Gibara 1914, Remedios 1939, Jagüey Grande 1982, etc), y teniendo en cuenta el futuro desarrollo socio-económico y el conocimiento alcanzado en la Sismología, se tomó la decisión de desarrollar estudios sismológicos complejos para todo tipo de obras, tanto económicas como sociales, con el objetivo de disminuir el riesgo a que pudieran estar sometidas las mismas. Entre estos estudios se encuentran las investigaciones de Microzonación Sísmica, cuyo objetivo fundamental es la división de los territorios en zonas geográficas donde se pronostican respuestas diferentes ante la ocurrencia de un sismo fuerte (a escalas cartográficas que oscilan entre 1:25000 y 1:5000 ó mayores).

Los mapas de Microzonación Sísmica constituyen en Cuba documentos normativos que rigen el desarrollo urbano y sirven de guía para el diseño sismorresistente de las nuevas construcciones y el reforzamiento de las ya existentes.

Los trabajos de Microzonación Sísmica en los sitios de construcción de las obras de importancia capital están normados y poseen alto rigor y grado de detalle. Los mismos están basados, por lo general, en la utilización de complejos de métodos instrumentales y numéricos y estudios geotécnicos muy detallados.

En los últimos años, debido a las perspectivas de desarrollo de la energética nuclear en el país, surgió la necesidad de realizar trabajos de este tipo, no sólo en las regiones de elevada sismicidad (VII grados o más), sino también en aquellas con sismicidad de fondo ($I \leq V$ grados MSK).

Estudios realizados:

En la República de Cuba se han realizado investigaciones de Microzonación Sísmica en áreas urbanas y sitios de construcción de obras importantes. Una breve descripción de las particularidades de algunos de estos trabajos se ofrece a continuación.

En sitios de construcción de obras importantes :

1- Refinería de Cienfuegos. Cuba Central.

En el área propuesta para la construcción de la Refinería de Cienfuegos, en la región Central de Cuba, se realizaron investigaciones de Microzonación Sísmica a escala 1:10000 (Chuy T. y González B.E. 1982) con la ayuda de los métodos de Analogías Ingeniero-Geológicas y Rigidez Sísmica.

El Método de Analogías Ingeniero-Geológicas (Popov V.U.1954, es un método cualitativo basado en la hipótesis de que conociendo el comportamiento o la respuesta de un perfil ingeniero-geológico característico a las acciones sísmicas (por las observaciones macrosísmicas de los efectos de los terremotos), dichos resultados podrán ser extrapolados a otras zonas donde existan perfiles ingeniero-geológicos análogos. Esto permite obtener, en una primera aproximación, el pronóstico de las variaciones de la intensidad sísmica de base.

El Método de la Rigidez Sísmica (Medvedev 1973,1974) se basa en la comparación de la rigidez sísmica de los suelos que componen el área investigada, con la de un suelo considerado como patrón. Esta comparación permite estimar las variaciones de la intensidad sísmica de forma cuantitativa con ayuda de la fórmula:

$$I = 1.67 \log(p_o V_o) / (p_i V_i)^{2-0.04 h} + B_e$$

donde:

V_o, V_i son las velocidades de propagación de las ondas sísmicas longitudinales en los suelos patrón e investigado respectivamente.

ρ, ρ_i las densidades correspondientes a dichos suelos,

h la profundidad del manto freático,

B_e es una constante cuyo valor depende del tipo de suelo, (rocoso, semi-rocoso). En el caso en que se utilice la velocidad de propagación de las ondas transversales V_s , se elimina el término de la ecuación correspondiente al manto freático.

Desde el punto de vista geológico-litológico, el área de construcción

de la refinería de Cienfuegos es bastante homogénea, aunque existen diferencias en cuanto al grado de fracturación, el desarrollo de los procesos cárnicos y la profundidad de yacencia del manto freático. Estos factores fueron los determinantes en la delimitación de las zonas con diferente riesgo.

2- Complejo Minero Metalúrgico de Levisa. Cuba Oriental.

En la microzonación sísmica del área del Complejo Minero Metalúrgico de Levisa (Chuy T., Zapata J.A. y González B.E., 1982), se utilizó una combinación de métodos: Analogías Ingeniero-Geológicas, Rigidez Sísmica y Microsismos.

La variante del método de los Microsismos utilizada en este trabajo fue propuesto por Ershov, 1974, que consiste en comparar el nivel máximo promedio de las amplitudes de los microsismos relativas al período predominante de los suelos patrón e investigado respectivamente. Entonces, las variaciones de la intensidad sísmica pueden ser estimadas con la ayuda de la fórmula:

$$\Delta I = 2 \log (A_{\max i} / A_{\max o})$$

En la zona de estudio, que se caracteriza desde el punto de vista geólogo-litológico por la presencia de calizas, arcillas y conglomerados polimícticos con diferente grado de alteración, producto de la fracturación y la meteorización, se realizaron registros del nivel de los microsismos en tres componentes. Para la determinación de los períodos predominantes se utilizó la ecuación:

$$n = n_i T_i / \Delta t * 100\%$$

donde:

n_i es el número de veces que se repite el período T_i dentro del intervalo $\Delta t = 30$ seg.

Como resultado de la aplicación de los métodos antes mencionados, se obtuvo una división del territorio investigado en cuatro zonas geográficas, obteniéndose variaciones de la intensidad sísmica que oscilan entre 0 y 1. Los períodos predominantes de las vibraciones varían dentro del territorio entre 0.24 y 1.02 seg.

3- Central Electronuclear de Holguín. Cuba Norte Oriental.

Este trabajo se caracterizó por una gran complejidad y rigor, dado que se trataba de la selección del sitio de emplazamiento de un objetivo nuclear de primera categoría. Para su realización, se llevaron a cabo investigaciones ingeniero-geológicas detalladas en dos áreas en cada una de las cuales se distribuyeron más de 100 calas, cuyas profundidades oscilaban entre 30-100 m. Complementariamente se realizó un gran número de perfiles sísmicos, obteniéndose las velocidades de propagación de las ondas sísmicas longitudinales V_p para todos los elementos ingeniero-geológicos.

Desde el punto de vista geólogo-litológico, las áreas de estudio están compuestas por rocas basálticas y serpentiniticas con una potente

corteza de intemperismo constituida por suelos formados por cascajo y arena suelta, arcillas arenosas, y arenas arcillosas. También aparecen representadas, aunque en menor proporción, las calizas y las calcarenitas.

Para la microzonación sísmica se utilizaron diversos métodos: Analogías ingeniero-geológicas, Rigidez Sísmica, Microsismos (variante que utiliza para el registro de la señal estaciones selectoras por frecuencias) y Terremotos Débiles. Con ayuda de dichos métodos por separado, se confeccionaron los mapas correspondientes de las variaciones de la intensidad sísmica I . El análisis conjunto de los resultados, haciendo énfasis en la confiabilidad, representatividad, etc., permitió confeccionar el Mapa Unificado de Microzonación Sísmica para las dos variantes de construcción propuestas (González B.E. et al, 1990). Para la determinación de las características de frecuencia del subsuelo se utilizó, además de los métodos instrumentales de Microsismos y Terremotos Débiles, un método numérico de Modelaje Unidimensional de la respuesta sísmica basado en la fórmula de la matriz recurrente de Thompson, para el caso de incidencia de una onda plana de tipo SH.

Se debe señalar que con ayuda del método de la Rigidez Sísmica se obtuvieron las variaciones de la intensidad sísmica para diferentes niveles, hasta la profundidad de 30 m.

Los resultados de este trabajo permitieron, entre otras cuestiones, definir la variante más favorable para el emplazamiento de ese objetivo nuclear.

4- Centro de Investigaciones Nucleares. Cuba Occidental.

Otro trabajo importante de Microzonación Sísmica fue el realizado en el área propuesta para la construcción del Centro de Investigaciones Nucleares en la Provincia de la Habana (González B.E. y Pérez L.D., 1990).

Desde el punto de vista litológico, dicha área se compone de tobas, tufitas, areniscas, arcillas, margas y calizas, con el nivel del manto freático a profundidades superiores a los seis metros.

Las investigaciones ingeniero-geológicas fueron detalladas, contándose con mas de 100 calas con profundidades de 30 m y dos calas de profundidad superior a los 150 m.

Con ayuda de diez perfiles sísmicos, se determinaron las velocidades de propagación de las ondas sísmicas longitudinales V_p y transversales V_s .

Para la determinación de las variaciones de la intensidad sísmica se utilizaron los métodos de Analogías Ingeniero-Geológicas y Rigidez Sísmica. Con el objetivo de determinar las características de amplitud-frecuencia (funciones de transferencia) del subsuelo se empleó el método numérico de modelaje unidimensional, para el caso de incidencia de una onda plana de tipo SH.

- En áreas urbanas

En la microzonación sísmica de la ciudad de Santiago de Cuba, que se asienta en las proximidades de la zona de mayor peligro sísmico del país, se utilizó una novedosa variante metodológica del método de los microsismos (González B.E. et al, 1990). La misma se basa en el registro de las señales sísmicas con ayuda de estaciones selectoras de frecuencias de 8 bandas comprendidas en el intervalo 0,1 - 30 Hz y consiste en lo siguiente:

* Sobre la base de los datos de la constitución litológica de los suelos y los niveles de yacencia de las aguas subterráneas, se confeccionó el mapa de regionalización ingeniero-geológica del territorio (mapa de los tipos básicos de suelo).

* Tomando como base dicho mapa (dividido en zonas con suelos friables, rocosos y semirrocosos) y el mapa de los niveles de yacencia de las aguas subterráneas, se confeccionó el mapa de Microzonación Sísmica por el método de las Analogías Ingeniero-Geológicas.

* Con ayuda de una estación selectora por frecuencias portátil, se realizaron mediciones de los microsismos en los diferentes tipos de suelos de acuerdo con la regionalización ingeniero-geológica del territorio, en paralelo con el registro de microsismos por otra estación (patrón) ubicada en un terreno rocoso.

* Se analizó tanto la variación en la composición espectral como el nivel de amplitud de los microsismos en relación con la estación patrón. Se delimitaron zonas con espectros análogos (Fig. 1), en diferentes condiciones ingeniero-geológicas, así como funciones de transferencia suelo/estación de referencia promedio para cada zona y puntuales.

* Se confeccionaron mapas de las frecuencias predominantes y de los factores de amplificación experimentales del subsuelo.

* Se analizó la modificación de los parámetros del efecto sísmico (amplitud, duración y composición espectral) en los suelos con respecto a los determinados para un basamento rocoso, para lo cual se generaron acelerogramas sintéticos sobre la base del método teórico-experimental propuesto por Rautián T. (1975). Como resultado de la aplicación de este método, se obtuvo una división del territorio en zonas de 4 categorías (tomando en consideración que el grado sísmico de base es $I = 8$ en la escala MSK).

- | | | |
|--|----------------------|---------|
| a) Regiones con condiciones de suelo desfavorables | $h < 1 \text{ m}$ | $I > 9$ |
| b) Regiones con suelo patrón | $h < 4 \text{ m}$ | $I = 9$ |
| c) Regiones con suelo patrón | $h = 4-10 \text{ m}$ | $I = 8$ |
| d) Regiones compuestas por terrenos rocosos | $h > 10 \text{ m}$ | $I = 7$ |

La distribución de estas zonas se muestra en la Fig. 2

Para la validación de la zonación propuesta en este trabajo, se

realizó un análisis detallado de la información macrosísmica de varios terremotos fuertes que afectaron a la ciudad de Santiago de Cuba (Chuy, 1988). Dicho análisis permitió concluir que existe una correspondencia aceptable entre las intensidades sísmicas pronosticadas y observadas. Las discrepancias observadas se encuentran por lo general en las zonas de contacto entre dos formaciones ingeniero-geológicas y se deben a los problemas intrínsecos de la generalización de la información de base al realizar el trazado de las fronteras de las zonas del mapa de Microzonación Sísmica.

Se debe señalar que estudios de este tipo se han realizado, a partir del año 1987, en numerosas ciudades y poblados importantes, ubicados en regiones de alto riesgo ($I=7$ grados MSK) de acuerdo con los intereses socio-económicos del país. Es así como están concluidos los mapas de Microzonación Sísmica de la ciudad de Guantánamo (Zapata et al, 1991) y de los poblados de Palma Soriano, Contramaestre y San Luis en la provincia de Santiago de Cuba.

Últimas Tendencias:

Dada la necesidad de introducir a la mayor brevedad los resultados de los estudios de Microzonación Sísmica en la práctica social, de modo que constituyan uno de los pilares para la nueva Norma Sísmica Cubana, se trabaja en la implementación de métodos modernos para el procesamiento de la información, nuevas variantes metodológicas de los métodos instrumentales clásicos, que permitan aumentar la productividad reduciendo el tiempo de las investigaciones de campo, etc. Se planifica además la creación de un polígono experimental de Microzonificación Sísmica en la ciudad de Santiago de Cuba, con el objetivo de realizar valoraciones prácticas del comportamiento del terreno bajo la acción sísmica en este importante territorio y validar los métodos numéricos de Modelaje Unidimensional y Bidimensional de la respuesta sísmica del subsuelo para su uso extensivo en la microzonificación sísmica de áreas de asentamientos humanos.

Conclusiones y Recomendaciones

- Los mapas de Microzonación Sísmica de las áreas de asentamientos humanos de la región oriental de Cuba, sirven de base a la planificación urbana y permiten un adecuado y racional uso de la tierra. Además, proporcionan información básica para la confección de los mapas de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de dichos territorios.
- Se recomienda en un futuro realizar la validación de los mapas-pronóstico obtenidos mediante la instalación de redes de acelerógrafos y las observaciones macrosísmicas de los efectos de los sismos fuertes.

Referencias Bibliográficas

- Chuy T. y González B.E. (1982): Estimación de la Peligrosidad Sísmica del Área de Ubicación de la Refinería de Cienfuegos. Investigaciones Sismológicas en Cuba No. 2.
- Chuy T.; Zapata J.A. y González B.E. (1982): Microzonificación Sísmica de la zona Levisa. Investigaciones Sismológicas en Cuba No. 2.
- Chuy T. (1988): Influencia de las Condiciones Geológicas en la Intensidad Sísmica en la ciudad de Santiago de Cuba. Revista Movimientos Tectónicos Recientes de Cuba No. 2.
- González B.E.; Giller V.G.; Chuy T.; Golubiatnikov V.L.; Pérez L.D. y Lyzkov L.M. (1990): Mapas Unificados de Microzonificación Sísmica de las Áreas de las Variantes 1 y 2 de Ubicación de la Central Electronuclear de Holguín. Informe de las Investigaciones UPI CEN -, MINBAS. Holguín, Cuba.
- González B.E. y Pérez L.D. (1990): Microzonificación Sísmica del área de construcción del Centro de Investigaciones Nucleares. Informe "Caracterización Sismológica del área de la variante de emplazamiento del Centro de Investigaciones Nucleares". Archivo Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Santiago de Cuba.
- González B.E.; Mirzoev K.M.; Chuy T.; Golubiatnikov V.L.; Lyzkov L.M.; Zapata J.A. y Alvarez H. (1984): Informe Final del Tema de Investigación "Estudio del Riesgo Sísmico y de las Variaciones de la Intensidad de los Terremotos en el Territorio de la ciudad de Santiago de Cuba". Archivo del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Santiago de Cuba.
- González B.E.; Mirzoev K.M.; Chuy T.; Golubiatnikov V.L.; Lyzkov L.M.; Zapata J.A. y Alvarez H. (1990): Microzonificación Sísmica de la ciudad de Santiago de Cuba. Comunicaciones Científicas Sobre Geofísica y Astronomía No. 15. La Habana.
- Pavlov O.V. (1984): Microzonación Sísmica. Ed. Nauka, Moscú.
- Zapata J.A.; González B.E.; Pérez L.D.; Fernández I. y Fernández B. (1991): Determinación de las Variaciones de la Intensidad Sísmica de Base en los territorios urbanos. Resúmenes II Encuentro Nacional de Ingenieros Geofísicos, La Habana.

Pie de Figuras

Fig. 1 Mapa de los Espectros Característicos de la ciudad de Santiago de Cuba.

- 1- Espectros de baja frecuencia.
- 2- Espectros de banda ancha y alta frecuencia.
- 3- Espectros con el máximo en 2,5 Hz.
- 4- Espectros con el máximo en 5,0 Hz.
- 5- Espectros planos con el mínimo en 2,5 Hz.
- 6- Embalses.

Fig. 2 Mapa complejo de Microzonación Sísmica de la ciudad de Santiago de Cuba.

- 1- Regiones con condiciones de suelo no favorables $h < 1 \text{ m}$ $I > 9$.
- 2- Regiones con el suelo patrón $h < 4$ $I = 9$.
- 3- Regiones con el suelo patrón $h = 4 - 10 \text{ m}$ $I = 8$.
- 4- Regiones compuestas por terrenos rocosos y semirrocosos $h > 10 \text{ m}$ $I = 7$.



