

PELIGROSIDAD SÍSMICA DE LA REGIÓN DE SANTIAGO DE CUBA

SEISMIC HAZARD OF SANTIAGO DE CUBA REGION

TOMÁS J. CHUY RODRÍGUEZ
GRISELDA DESPAIGNE LONGCHAMP
LAUDIBER GONZÁLEZ SIMÓN

E-mail: chuy@cenais.ciges.inf.cu
Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas

RESUMEN: Se caracteriza la peligrosidad sísmica de la provincia y ciudad de Santiago de Cuba, en términos de intensidad, aceleración, velocidad y desplazamiento. Los parámetros de peligrosidad sísmica se presentan en forma de mapas independientes utilizando períodos de recurrencia para cada valor de los parámetros de la amenaza; a tiempo que, de forma probabilística para diferentes tiempos de vida útil y probabilidad de ocurrencia para una red de cuadrículas de 1 km² en toda la cuenca de Santiago de Cuba, se definen para cada una de ellas, las correspondientes curvas de nivel de amenaza.

Los parámetros de peligrosidad sísmica están preparados como Bases de Datos Digitales, para su implementación en Sistemas de Información Geográfica (SIG) con fines de prevención y manejo de desastres sismológicos, por ser imprescindibles para la planificación, proyección y diseño del desarrollo socioeconómico de estos territorios, ya que permiten la valoración del nivel de riesgo que se quiera asumir en áreas de interés. En la actualidad son la base de referencia y consulta para el establecimiento de definiciones de planeamiento urbano y de uso de suelos, así como para proyectos ubicados en estos territorios. Constituyen, igualmente, un elemento de consulta por la Defensa Civil en los planes de medidas para caso de terremotos.

Palabras clave: terremotos, sismicidad, peligro sísmico, intensidad sísmica, aceleración horizontal.

ABSTRACT: The characterization of seismic hazard of province and Santiago de Cuba city in terms of intensity, acceleration, velocity and displacement is presented. Seismic hazard's parameters are show in maps using recurrence periods for each value of these ones and in probabilistic form for different times of useful life and probability of occurrence for a grid of 1 km² in Santiago de Cuba basin, including different hazard's levels. All the seismic hazard's parameters were prepared like a Digital Data Base for their implementation in GIS with the aim to prevention and seismological disaster management, which are important for planning, projection and design of development of these territories. Actually these parameters are the basis for city and land planning, also for others projects in this territory. In this way these ones are taking as a reference element in the preparedness plan by the Civil Defense in case of large earthquakes.

Key words: earthquakes, seismicity, seismic hazard, seismic intensity, horizontal acceleration.

INTRODUCCIÓN

La sismicidad en la región oriental de Cuba presenta una característica significativa que, al mismo tiempo, hace compleja su evaluación en algunas áreas; ello está dado en el hecho de que se manifiestan dos tipos de sismos: de entre placas y de interior de placa. Esto significa que en todas partes de la región no existe el mismo nivel de potencialidad sísmica, y se destaca en el primer tipo de sismicidad la parte sudoriental, por la frecuencia de ocurrencia de terremotos y por los altos valores de magnitud e intensidad alcanzados históricamente. Esto hace que el territorio sea considerado el de mayor peligrosidad sísmica del país, lo que corresponde con la estructura de Bartlett-Caimán en la cual se

han reportado 22 terremotos fuertes (Chuy, 1999), de ellos 20 en el sector Chivirico-Baconao de la provincia de Santiago de Cuba y 2 en el sector Pílon - Cabo Cruz, provincia Granma.

Es de especial interés significar que de estos sismos fuertes ocurridos en Santiago de Cuba, 2 de ellos produjeron intensidad máxima $I = 9,0$ MSK en áreas de la provincia en 1766 (Magnitud Richter $M_s = 7,6$) y en 1852 ($M_s = 7,3$), y se reportaron en ambos considerables daños en toda la región oriental. Así también, los más recientes que han afectado a la región oriental en su conjunto se reportan en 1932 ($M_s = 6,75$; $I = 8,0$) y 1947 ($M_s = 6,75$; $I = 7,0$) para la ciudad de Santiago de Cuba, y 1976 ($M_s = 5,7$; $I = 8,0$) y 1992 ($M_s = 7,0$; $I = 7,0$) para el sur de la provincia Granma.

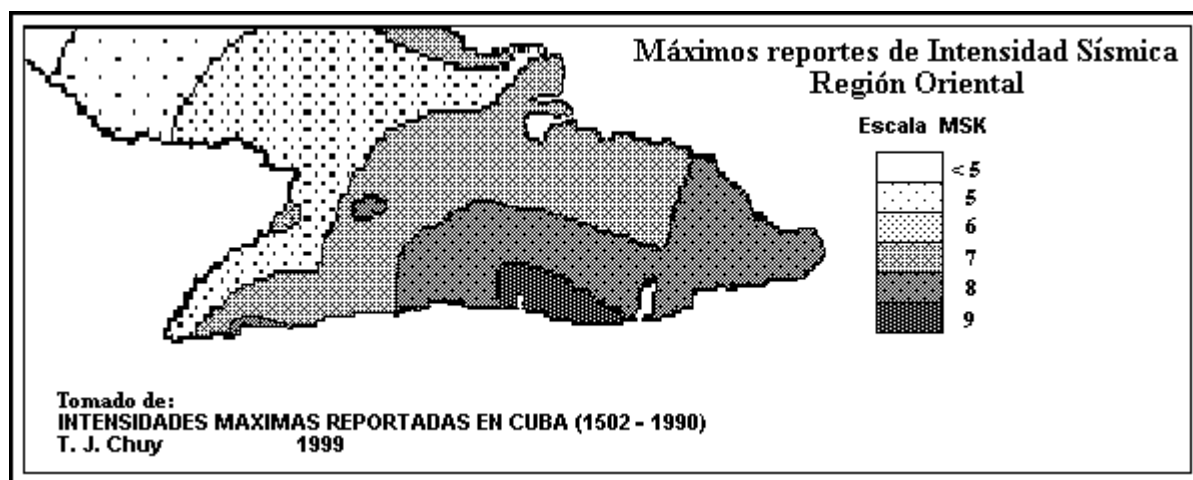


Figura 1. Mapa de Intensidades máximas reportadas en la región oriental.

Sin embargo, la sismicidad de interior de placa también se manifiesta en las zonas sismogénicas de baja actividad, distribuidas en la región sudoriental. A pesar de ser menos frecuentes los terremotos en ellas, su ubicación en el interior del territorio, así como la poca profundidad de los hipocentros de los sismos, hacen que en ocasiones los efectos de sismos de poca magnitud reporten afectaciones significativas. En la provincia de Santiago de Cuba (Chuy, 1999) pueden considerarse los terremotos del 21 de octubre de 1905 con $M_s = 4,0$ y profundidad $h = 20$ km, que produjo una intensidad de $I = 5,0$ MSK en la zona de Alto Songó; del 27 de enero de 1922 con $M_s = 2,6$ y $h = 10$ km, con $I = 3,5$ MSK en Dos Ríos, y del 5 de marzo de 1927, $M_s = 5,3$ con $h = 20$ km e intensidad $I = 6,0$ MSK en las ciudades de Guantánamo y Santiago de Cuba.

Con independencia de los terremotos reportados en el archipiélago cubano, en cualquier estimado que se realice del peligro sísmico de la región sudoriental, es imprescindible considerar los sismos históricos reportados en las vecinas islas de Jamaica, Haití y República Dominicana (Tomblin y Robson, 1977; Chuy y otros, 1988; Chuy y Álvarez, 1988; Chuy y otros, 1992), ya que por la cercanía de sus focos los efectos de terremotos fuertes en las mismas han sido perceptibles en Cuba y viceversa, además de la relación que existe entre las zonas sismogénicas presentes en ellas y en las localizadas en Cuba. Durante mucho tiempo el sismo del 23 de septiembre de 1887 ($I = 7,0$ MSK) fue considerado un sismo con epicentro en las cercanías de Santiago de Cuba y sólo pudo ser precisado su origen después de analizar la sismicidad histórica de La Española (Chuy y Álvarez, 1988), en la que se puntualiza que aunque con estos efectos, fue un terremoto fuerte de esa vecina isla.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de los sismos de Santiago de Cuba incluidos en el Catálogo de Sismos Perceptibles propuesto por Chuy (1999), divididos por

intensidades, en el que obviamente aparece en los siglos XIX y XX la mayor cantidad de los 537 terremotos reportados, y se destaca la potencialidad sísmica que siempre se ha manifestado en esta provincia si se toman en cuenta los 961 que este autor señala hasta 1990 en todo el país. Se debe señalar que si se extiende hasta el 31 de diciembre de 1999 se incrementarían en 89 sismos adicionales. Es evidente que en los primeros años no se reporta una cantidad bastante grande de sismos de baja intensidad, lo cual en principio puede ser debido a que por su propio valor pueden no haberse considerado por los cronistas de cada época.

Todo esto incide, prácticamente, en que en la región oriental se presentan los valores máximos de intensidad reportados históricamente, lo que se refleja en el Mapa de Intensidades Sísmicas Máximas reportadas en la región oriental en el período 1502- 1990 (Fig. 1). En este mapa se conjugan las áreas pleistosísticas conocidas de los terremotos que tienen mapa de isosistas confeccionado y los datos de los epicentros más significativos de este territorio, para dar el valor máximo reportado de intensidad y precisar con ello el nivel de amenaza ya conocido (Chuy, 1999).

Si se analiza la cantidad de terremotos por rango de magnitudes registrados anualmente por el Servicio Sismológico Nacional en la zona de Santiago de Cuba, se evidencia el nivel alto de sismicidad que se presenta en el sector de la ciudad de Santiago de Cuba, lo cual reafirma la potencialidad sísmica de esta zona del territorio nacional.

Consecuentemente, el nivel de peligro sísmico en la región de Santiago de Cuba está condicionado, entre otros factores, por la actividad manifestada por las estructuras sismogénicas que se localizan en esta región. Por estas razones, estimar este elemento de riesgo en ella se erige en una prioridad que se evidencia a través de nuestra historia sísmica, y la utilización de estos resultados será imprescindible para proyectar, planificar y preservar el patrimonio socioeconómico.

TABLA 1. CANTIDAD DE REPORTES DE SISMOS PERCEPTIBLES EN LA PROVINCIA SANTIAGO DE CUBA (TOMADO DE CHUY, 1999)

No.	FECHAS	INTENSIDAD (MSK)							Total
		3	4	5	6	7	8	9	
1	1571-1690	1				3	2		6
2	1691-1840	6	2	1	4	3	1	1	18
3	1841-1990	237	176	67	23	7	2	1	513
TOTALES		244	178	68	27	13	5	2	537

Nota: En Intensidad I = 3 (MSK) se incluyen los de I = ? y 3,5, en los de I = 4 los de I = 4,5, en los de I = 5 los de I = 5,5 y así sucesivamente.

PELIGROSIDAD SÍSMICA

Aspectos metodológicos

Para estimar la peligrosidad sísmica de la región Santiago de Cuba se tomaron en cuenta tres aspectos fundamentales: el modelo estadístico de la ocurrencia de terremotos y sus efectos, la definición de las Zonas Sismogénicas (ZS) con sus correspondientes parámetros del régimen sísmico y la ley de atenuación del parámetro que se va a utilizar, para cuantificar los efectos de los terremotos con sus características regionales.

Con respecto al modelo estadístico, se utilizó como base el concepto de Sacudibilidad Sísmica, que fue introducido por Riznichenko (1965) en la práctica sismológica, como la frecuencia promedio BI de ocurrencia de sacudidas sísmicas en un punto dado de intensidades mayores e iguales que I, la cual se calcula por la fórmula

$$BI = \int_V N \sum (MI) * dx dy dz$$

donde MI es la magnitud mínima de un terremoto capaz de producir sacudidas en un punto dado (x,y,z) con intensidad mayor o igual que I en el punto sometido a cálculo, $N \sum (MI)$ es la frecuencia acumulativa de los terremotos y V es la región del espacio donde están situadas todas las Zonas Sismogénicas ZS que influyen sobre cada punto del territorio investigado. El período de recurrencia TI de las sacudidas con intensidad mayor o igual a I se calcula mediante el inverso de la Sacudibilidad.

Sin embargo, la consideración de que el período de recurrencia de las sacudidas TI es la esperanza matemática de la distribución de los intervalos temporales entre eventos sucesivos de intensidad mayor o igual que I (Riznichenko, 1979) permite, a partir de la Sacudibilidad, calcular la probabilidad de que en un tiempo de espera t (tiempo de vida útil) no ocurra una sacudida con intensidad mayor o igual que I.

Debemos señalar que un aspecto importante en la realización de estimados probabilísticos, es el modelo estadístico del proceso de generación de los terremotos.

El modelo más simple de flujo de sucesos es el Poissoniano, que es el más frecuentemente utilizado en Sismología. En correspondencia con este modelo, la probabilidad de que ocurra un evento con intensidad mayor o igual que I en el tiempo t será:

$$P(I,t) = 1 - \exp(-t/TI)$$

La evaluación de la integral BI se realiza mediante su transformación en la sumatoria

$$BI = \sum_i \sum_j \sum_k N \sum (MI)_{ijk} * F_{ijk}$$

donde los índices i, j corresponden a las coordenadas horizontales y k a la coordenada vertical; mientras que el término F_{ijk} representa al factor de normalización espacial de los gráficos de magnitud-frecuencia. En los factores F_{ijk} se consideran los niveles de cubrimiento de cada ZS en las cuadrículas ($\Delta x, \Delta y$) obtenidas del cociente del grado de cubrimiento de una cuadrícula entre el número equivalente de cuadrículas cubierto por ella.

Debemos señalar que en los últimos tiempos se ha planteado la existencia de otros procesos de generación de terremotos, cuyas características energético-temporales difieren de las concepciones clásicas. En específico, en este trabajo para algunas Zonas Sismogénicas se consideró la validez del modelo del terremoto característico (Schwartz y Coppersmith, 1984), que considera que cada falla o Zona Sismogénica es capaz de generar un terremoto fuerte con magnitud M_c determinada por sus características propias y con una frecuencia independiente de la que le correspondería por el gráfico de magnitud - frecuencia, mientras que los sismos más débiles que se originan en ella, sí obedecen a tales gráficos.

Por otra parte, el valor de MI estaría condicionado por la relación determinada por Fedotov y Shumilina (1971) para Kamchatka

$$I = 1,5 M - 2,63 \log r - 0,0087 r + 2,5$$

donde r es la distancia hipocentral, I el valor de intensidad producido por un sismo de magnitud M a una distancia Δe del epicentro. Este valor Δe es llamado radio

TABLA 2. CAPAS INFORMATIVAS OBTENIDAS PARA LA ZONA DE SANTIAGO DE CUBA

I (MSK)	Ah (% g)	Av (% g)	Vh (cm/s)	Vv (cm/s)	Dh (cm)	Dv (cm)
3	4	2	2,5	2,5	3	1,5
4	10	4	5	5	5	3
5	20	10	10	10	7	5
6	30	20	15	15	10	7
7	40	30	25	20	13	10
8	60	40	40	30	16	13
9	80	60	60	40	20	16
10	100	80	90	60	25	20

efectivo de una isosista elíptica que pasa por el punto. Dicha isosista es obtenida a base del modelo propuesto por Álvarez y Chuy (1985) para las Antillas Mayores y que utiliza como elementos de cálculo la razón de los ejes mayor y menor de la elipse A/B, y la dirección prefe-

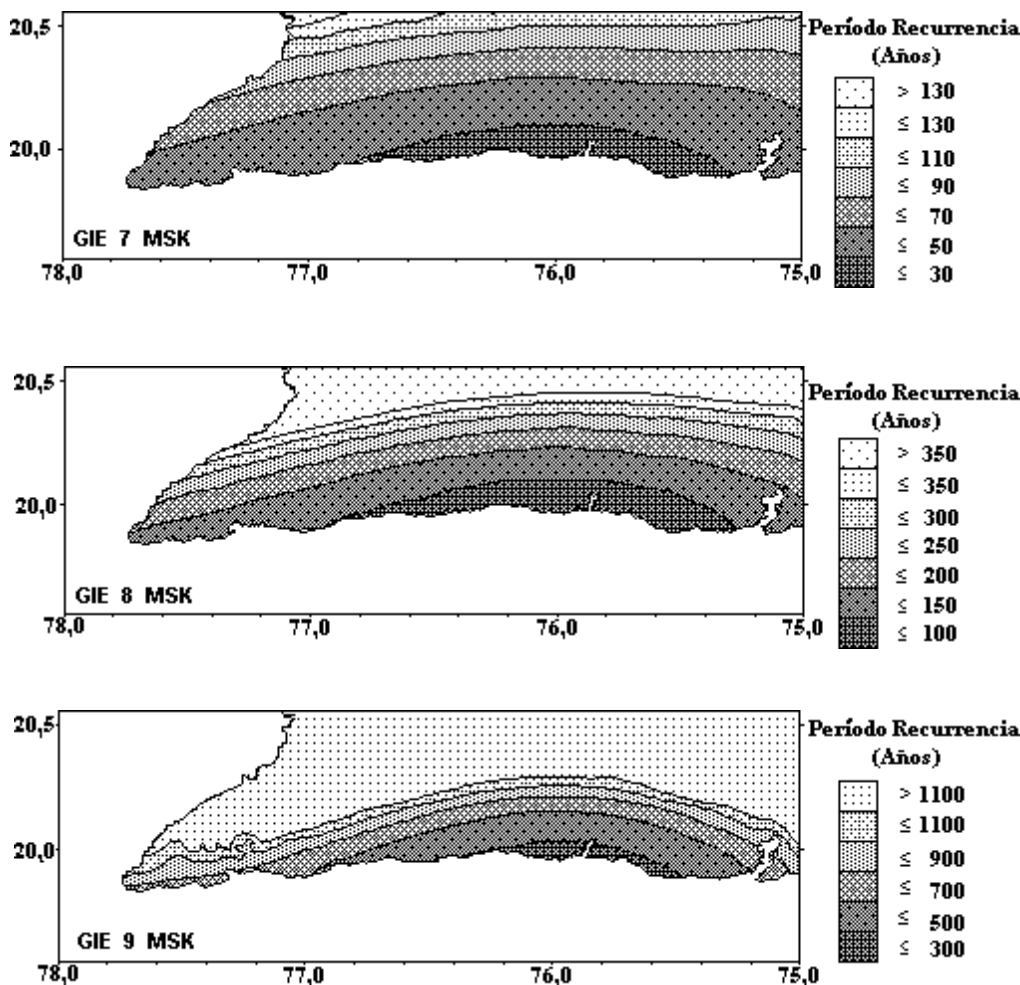
rencial de atenuación DP en la cual se cumple la ecuación de Fedotov – Shumilina.

En el caso general de los parámetros del movimiento del terreno no existen estudios de variaciones de la atenuación y el campo de los mismos se representa por isolíneas circulares. Existe una tendencia bastante generalizada a describir estos campos por fórmulas del tipo de Kamchatka, donde en lugar de I se tiene el logaritmo de un parámetro X. En la versión más reciente del programa SACUDIDA (Álvarez, 1995), con la que se realizaron los cálculos de peligrosidad sísmica de este trabajo, están incluidas varias de estas variantes, aunque las utilizadas para estimar los parámetros dinámicos: aceleración horizontal Ah, aceleración vertical Av, velocidad horizontal Vh, velocidad vertical Vv, desplazamiento horizontal Dh y desplazamiento vertical Dv, fueron las propuestas por Trifunac y Brady (1975):

$$\log Ah = 0,30 I + 0,014$$

$$\log Av = 0,30 I - 0,18$$

Figura 2. Mapas de peligrosidad sísmica de la provincia Santiago de Cuba para diferentes valores de Intensidad Sísmica (MSK), utilizando como indicador los Períodos de Recurrencia en años. Se tomaron perfiles de suelos medios S2.



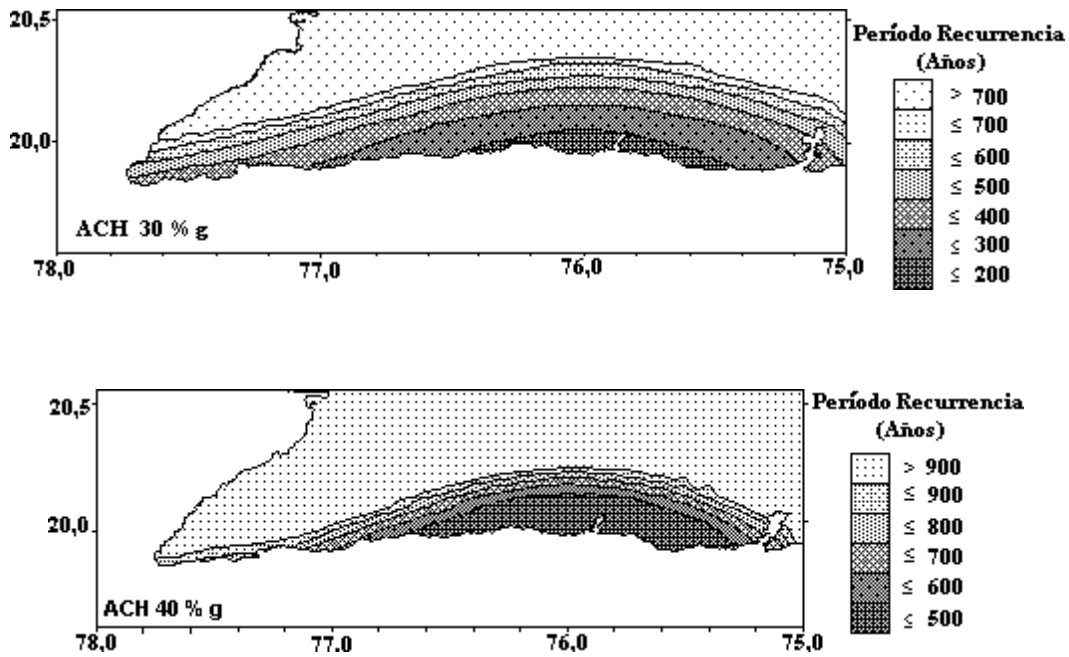


Figura 3. Mapas de Peligrosidad Sísmica de la provincia Santiago de Cuba para diferentes valores de Aceleración horizontal máxima (% g), utilizando como indicador los Períodos de Recurrencia en años. Se tomaron Perfiles de Suelos medios S2. ACH - Aceleración horizontal máxima. GIE - Grado de Intensidad en valores enteros.

$$\begin{aligned} \log V_h &= 0,25 I - 0,63 \\ \log V_v &= 0,28 I - 1,10 \\ \log D_h &= 0,19 I - 0,53 \\ \log D_v &= 0,24 I - 1,13 \end{aligned}$$

donde A_h y A_v se dan en cm/s^2 , V_h y V_v en cm/seg , y D_h y D_v en cm . La conversión se realiza reduciendo a estos parámetros la intensidad I , lo cual permite el tratamiento de la aceleración, velocidad y desplazamientos con el Modelo de Isosistas de la región.

RESULTADOS

Sobre la base de los aspectos metodológicos planteados y utilizando el programa SACUDIDA (Álvarez, 1995) se obtuvieron los tiempos de recurrencia (años) de diferentes valores de intensidad sísmica y demás variantes de los parámetros dinámicos para la provincia Santiago de Cuba y áreas aledañas, los cuales están preparados como Bases de Datos para Surfer y pueden ser implementadas como Capas Informativas (Tabla 2) de un Sistema de Información Geográfica (SIG), para un total de 56 capas de tiempos de recurrencia, considerando cada uno de los parámetros señalados, los que pueden ser combinados aleatoriamente o en dependencia de la necesidad, tanto para la confección de mapas de peligrosidad sísmica específica, como para la correlación con otros parámetros geológico-geofísicos en estimaciones de riesgo sísmico.

A manera de ejemplo, en la figura 2 se presentan varios de estos mapas en los que se prefijaron intervalos de tiempo para una mejor comprensión de los valores

obtenidos de peligrosidad sísmica en términos de Intensidad MSK. En la figura 3 se presentan de esta misma manera, pero en términos de aceleración horizontal en % g.

Estos resultados pueden multiplicarse utilizando otras interpretaciones, ya que están referenciados a perfiles de suelos medios tipo S2 y pueden ser obtenidos sus respectivos equivalentes para otras condiciones de suelos; también se utilizan otros tipos de particiones de tiempo o bien se realizan conversiones correlacionando otros parámetros, esto es, mapas de corte probabilístico en diferentes niveles de riesgo (probabilidad de ocurrencia – tiempo de vida útil). Otra forma de interpretación puede ser la integración de todos los elementos de cada parámetro dinámico en mapas únicos para cada uno, todo lo cual da una cantidad amplia de variantes para utilizar.

En relación directa con la cuenca de Santiago de Cuba, se obtuvieron las curvas probabilísticas de peligrosidad sísmica para que los parámetros indicados no sean igualados o excedidos, de una red cuadriculada de áreas de un km^2 , que incluye toda la zona urbana y sus alrededores, para tiempos de vida útil de 1;10; 20; 50; 70; 100 y 200 años.

De esta forma, pueden estimarse para cualquier punto de la ciudad de Santiago de Cuba y sus alrededores diferentes niveles de peligro sísmico máximo con fines de riesgo, en función de cada actividad específica y utilizados como capas informativas de un Sistema de Información Geográfica, para establecer las necesidades prioritarias de cada área en particular de desarrollo socioeconómico.

Es imprescindible señalar que los valores de las distintas Bases de Datos Digitales de peligrosidad sísmica obtenidas, se refieren a los valores máximos, aunque en situaciones necesarias sólo se realizaría su conversión caso a caso, en dependencia de la distribución de diferentes tipos de suelo sobre los que se encuentren las edificaciones que se analicen. Todos estos aspectos son de una necesaria comprensión, pues es de todos conocido que en casos de sismos fuertes, el grado de destrucción no ha sido uniforme dentro del territorio de la ciudad, y se nota que en algunas zonas los efectos producidos por la acción de sismos han sido más importantes que en otras, y los resultados obtenidos con este trabajo facilitan la evaluación previa de los potenciales efectos que producirían estos terremotos.

CONCLUSIONES

Se obtuvieron los estimados de peligrosidad sísmica máximos regional y local, para la provincia y ciudad de Santiago de Cuba y sus alrededores. En el primer caso en forma de mapas para diferentes tiempos de recurrencia de cada nivel de amenaza.

Para la ciudad de Santiago de Cuba y sus alrededores, se obtuvieron los parámetros tabulados de peligro sísmico efectivo en correspondencia con la nueva norma sismorresistente cubana NC 53-114: 99, de forma que puedan ser utilizados directamente para la toma de decisiones de proyectos y planificación de uso de suelos para el desarrollo socioeconómico del territorio.

Los resultados obtenidos conforman un Sistema de Bases de Datos Digitales para PC que puede ser empleado en Sistemas de Información Geográfica con fines

de desarrollo socioeconómico y manejo de desastres naturales.

BIBLIOGRAFÍA

- ÁLVAREZ, J. L.: *Sacudida. Versión 2.0. Un Programa para la estimación de la Peligrosidad Sísmica*, 59 pp., Ed. Academia, La Habana, 1995.
- ÁLVAREZ, J. L. Y T. J. CHUY: *Isoseismal Model for Greater Antilles*. Proceedings of the 3rd International Symposium on the Analysis of Seismicity and Seismic Risk, Liblice Castle, Czechoslovakia, pp. 134 – 141, 1985.
- CHUY, T. J.: "Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de Peligrosidad y Microzonación Sísmica", 273 pp. Tesis doctoral, ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1999.
- CHUY, T. J. Y J. L. ÁLVAREZ: "Sismicidad histórica de La Española", en *Comunicaciones Científicas sobre Geofísica y Astronomía*, 12 pp., no. 16, La Habana, 1988.
- CHUY, T. J., J. L. ÁLVAREZ, J. A. ZAPATA Y B. E. GONZÁLEZ: "Investigaciones sismológicas complejas para el Complejo Hidroenergético Toa-Duaba", Reporte de Investigación, Fondos del CENAI y ENERGO-PROYECTO, 1992.
- CHUY, T. J., R. V. DZHURAEV, J. L. ÁLVAREZ, K. M. MIRZOEV Y H. ÁLVAREZ: "Informe de las investigaciones macrosísmicas en el territorio de Cuba Oriental y en la región de emplazamiento de las variantes nos. 2 y 10 de la CEN de Holguín", Reporte de Investigación, Fondos del CENAI y del Instituto de Geofísica y Astronomía, 1988.
- FEDOTOV, S. A. Y L. S. SHUMILINA: "Sacudibilidad sísmica de Kamchatka" [en ruso], *Fizika Zemli* (Moscú), 9:3-15, 1971.
- RIZNICHENKO, YU.V.: "De la actividad de los focos de terremotos a la sacudibilidad de la superficie terrestre" [en ruso], *Fizika Zemli* (Moscú) 11: 19-32, 1965.
- RIZNICHENKO, YU.V., ed.: *Sacudibilidad sísmica del territorio de la URSS*. 192 pp. [en ruso], Nauka, Moscú, 1979.
- SCHWARTZ, D. P. Y K. J. COPPERSMITH: "Fault behavior and characteristic earthquakes. Examples from the Wasatch and San Andreas fault zones", *J. Geophys. Res* 8 (B7):5681 – 5698, 1984.
- TOMBLIN, J. M. Y G. R. ROBSON: "A Catalogue of Felt Earthquakes for Jamaica with references to others islands in the Greater Antilles 1524-1971", en *Mines Geol. Division, Special Publ.*, Jamaica, 1977.
- TRIFUNAC, M.D. Y A. G. BRADY: "On the correlation of Seismic Intensity scales with the peaks of ground motion records", *Bull. Seism. Soc. Am.* 65 (1):139-162, 1975.