

REVISTA



GEOFISICA

Peligrosidad Sísmica de Cuba. Una aproximación a la regionalización sísmica del Territorio Nacional

Leonardo Alvarez*
Tomás Chuy*
Mario Cotilla*



Abstract

A set of seismic hazard estimations of Cuban territory, consisting of maps, tables and graphics is presented. They are recommended for use as normative documents for building activity. Calculations were performed with computer program SACUDIDA, which is characterized by a deterministic approach for obtaining recurrence periods and a poissonian model of seismic shaking occurrence for posterior calculation of probabilistic estimates. Elliptical isoseismal's model with adjustable parameters for every source zone was used. A method for magnitude-frequency graphics' parameters determination from intensity-frequency ones is proposed.

Resumen

Se presenta un conjunto de estimados de la peligrosidad sísmica del territorio nacional en forma de mapas, tablas y gráficos que se recomienda utilizar en calidad de documentos normativos de la actividad constructiva. Los cálculos se realizaron con el programa SACUDIDA, que parte de un modelo determinístico de obtención de los periodos medios de recurrencia, y un modelo poissoniano de ocurrencia de sacudidas sísmicas para la obtención a posteriori de estimados probabilísticos. Se usa un modelo de isosistas elípticas con parámetros ajustables para cada zona de origen de terremotos. Se propone un método de determinación de los parámetros de los gráficos magnitud-frecuencia a partir de los de intensidad-frecuencia.

Introducción

Por mapa de regionalización sísmica se entiende aquel en el cual se encuentren recogidos los criterios fundamentales de la peligrosidad sísmica de un territorio, y pueda

INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFIA E HISTORIA

NUMERO 35

JULIO-DICIEMBRE 1991

* Instituto de Meteorología de Cuba.

ser empleado como documento normativo de las construcciones. Estos mapas han tenido un gran desarrollo en la Unión Soviética; en el último confeccionado (Bune y Gorshkov, ed., 1980) se representan, tanto las intensidades máximas a esperar, como el periodo de recurrencia de las mismas, lo que puede considerarse como inclusión de información probabilística (Bune y Katrick, 1977). Por otra parte, en los países occidentales se prefiere utilizar mapas con estimados probabilísticos de la peligrosidad sísmica en calidad de base para la preparación de documentos normativos para las construcciones (Algermissen y Perkins, 1973; Algermissen *et al.* 1976).

En Cuba, desde los años 70, se comenzó a trabajar en la confección de las normas para las construcciones en zonas sísmicas, y se decidió preparar un mapa de regionalización sísmica sin consideraciones probabilísticas. La primera norma que tomaba en consideración estos criterios fue publicada finalmente en 1985 (Norma Cubana, 1985). Sin embargo, el desarrollo de los estudios de sismicidad y estimación de la peligrosidad sísmica del país en los últimos años, hacen necesaria una revisión de los criterios empleados en la confección de la anterior norma y de la propia concepción de un mapa de regionalización sísmica como documento único normativo.

Sismicidad del territorio nacional

La sismicidad de Cuba ha sido estudiada por diferentes autores, en algunos casos, desde el punto de vista de la sismicidad regional (Alvarez y Menéndez, 1969; Alvarez y Bune, 1977), en otros, desde el punto de vista del análisis de la actividad sísmica histórica (Alvarez *et al.* 1973; Chuy y Rodríguez, 1980; Chuy *et al.* 1983; Chuy *et al.* 1988), y en otros, considerando ambos factores (Alvarez *et al.* 1983; Alvarez y Bune, 1985a).

En la Figura 1 se presenta un mapa con los epicentros de los terremotos más fuertes ocurridos en Cuba (selección de los más fuertes en cada zona) que incluye tanto datos instrumentales como macrosísmicos, y otro con los epicentros por datos instrumentales ($M_s \geq 4$) para Cuba oriental y regiones aledañas. Por otra parte, la afectación por terremotos de que se tiene noticia en el país ha sido muy variada y los mapas de isosistas de los mismos han sido publicados en diferentes trabajos (Chuy *et al.* 1980, 1983, 1984b, 1989). En la Figura 2 se muestra un mapa resumen de intensidades máximas reportadas, donde las isolíneas se han formado superponiendo los diversos mapas de isosistas, seleccionando siempre el mayor valor para cada área pleistostística.

Antecedentes

Obtener un mapa de regionalización sísmica de Cuba ha sido uno de los objetivos básicos de las investigaciones sismológicas en nuestro país. Los primeros intentos, en

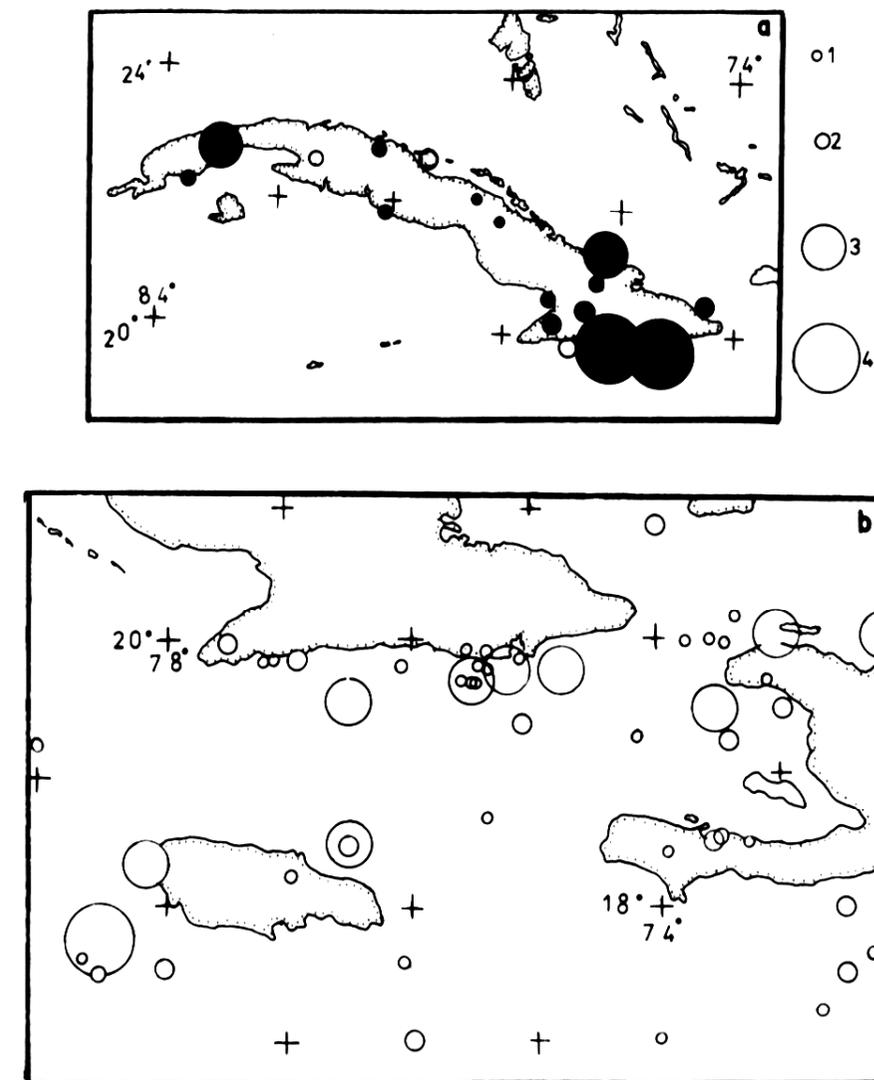


Figura 1 Mapas de epicentros.

- Terremotos ocurridos en Cuba (1528-1990), selección de los más fuertes por zonas (círculos vacíos - epicentros instrumentales, círculos llenos - epicentros macrosísmicos);
- Terremotos fuertes ($M_s \geq 4$) por datos instrumentales (1904-1981) para Cuba Oriental y regiones aledañas. 1:4 $\text{EM} < 5$, 2:5 $\text{EM} \text{ } 6$, 3:6 $\text{EM} < 7$, 4:7 $\text{EM} < 8$.

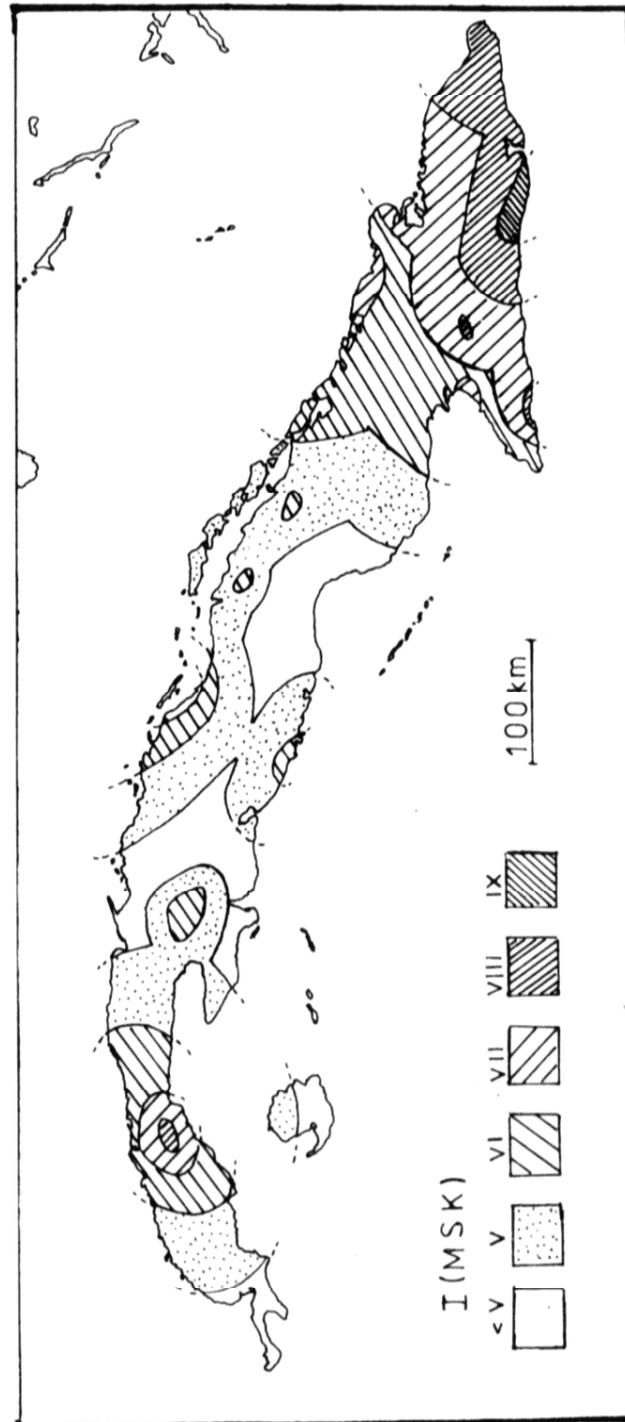


Figura 2 Zonas de intensidad máxima reportada ($I \geq V$) de terremotos sentidos en Cuba y regiones aledañas.

la década del 60, tuvieron como colofón el Mapa de Sismicidad de Cuba (Figura 5a) incluido en el Atlas Nacional (Alvarez 1970). Este mapa se basaba en datos macrosísmicos históricos, que se comenzaban a estudiar sistemáticamente en aquellos momentos. Un estudio más exhaustivo de este material, y la consideración de algunos aspectos cuantitativos de la sismicidad condujeron a la confección del mapa de Intensidades Sísmicas de Cuba para periodos de recurrencia de 100 años (Chuy y Rodríguez, 1980). Sin embargo, en este último mapa quedaban zonas para las cuales existían dudas en cuanto al valor de la intensidad a esperar y se señalaban como de intensidad desconocida. La ocurrencia de eventos sísmicos en las referidas zonas en los años 1981 y 1982 permitió llenar esta laguna, y consecuentemente se confeccionó la variante final (Figura 3b) del Mapa de Intensidades Sísmicas de Cuba por datos macrosísmicos (Chuy *et al.* 1983). Este mapa y algunos materiales adicionales fueron los que se incluyeron en los documentos normativos cubanos para construcciones en zonas sísmicas (Norma Cubana, 1988).

El paso a estimados cuantitativos de la peligrosidad sísmica para todo el territorio nacional no se realizó hasta 1985, con los trabajos de Alvarez y Bune (1985a) de sacudibilidad sísmica de Cuba oriental, y de Rubio (1985) de peligrosidad sísmica para todo el territorio. El primero consiste en el procesamiento, con el programa SACUDIDA (Alvarez y Bune, 1985b), de los datos de sismicidad de entreplacas (obviando las zonas de baja actividad de interior de placas) de la región comprendida entre los 16° - 24° Lat.N y los 71° - 81° de Long.O, mientras que el segundo consiste en un procesamiento de la información sismológica existente mediante el programa EQRISK (McGuire 1976), con la utilización adicional de datos geólogo-tectónicos-geofísicos para la delimitación de las fuentes generadoras de terremotos. Dicho trabajo tiene la limitante de haber considerado la atenuación de las intensidades en forma de isosistas circulares en lugar de elípticas por requerimientos del programa.

Otro intento de obtener un mapa de regionalización sísmica de Cuba (Alvarez *et al.* 1985) se realizó a partir de los materiales usados en este trabajo, pero con un procesamiento formal de la información sismológica para las zonas de interior de placa que impedía obtener estimados cuantitativos uniformes para todo el territorio. En él se reflejan en un mapa (Figura 4) las intensidades a esperar en 100-300 años para todas las zonas de baja actividad, que fue empalmado con el mapa de intensidades a esperar en 100 años para la región oriental, presentado en (Alvarez y Bune, 1985a). El tratamiento desigual de la información para las diferentes zonas de origen de terremotos (OT) le restaba validez al mapa en cuestión, por lo que se hacía necesario un nuevo procesamiento de la información.

De tal forma, en este trabajo se presentan los resultados obtenidos del procesamiento de la información sismológica existente, con el programa SACUDIDA (Alvarez y Bune, 1985b), tomado en consideración las variaciones regionales del modelo de isosistas para las Antillas Mayores (Alvarez y Chuy, 1985).

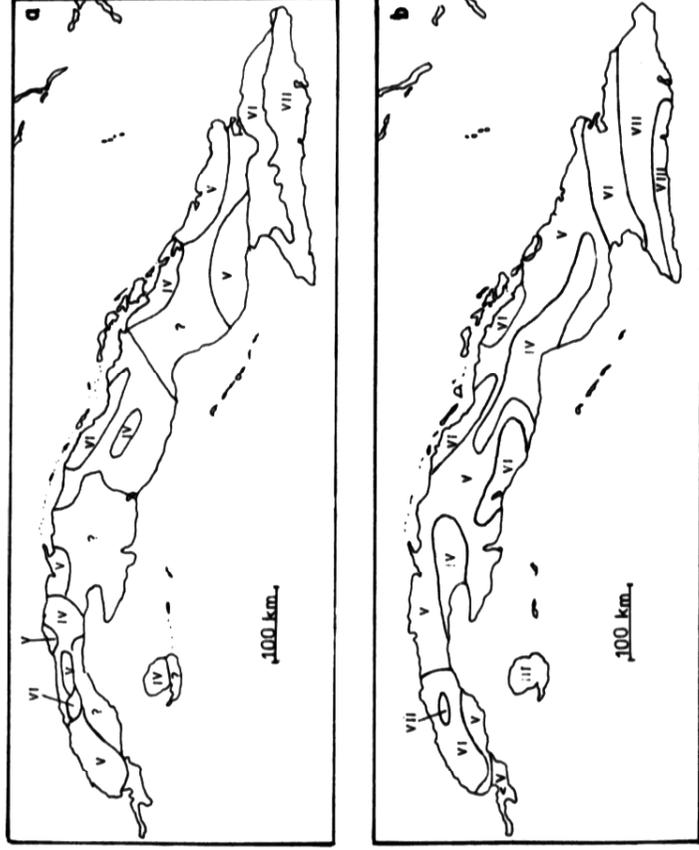


Figura 3 Zonaciones por datos macrosísmicos.
 a) Mapa de sismicidad de Cuba, tomado de Alvarez (1970);
 b) Mapa de intensidades sísmicas de Cuba por datos macrosísmicos, tomado de Chuy *et al.*, (1983).

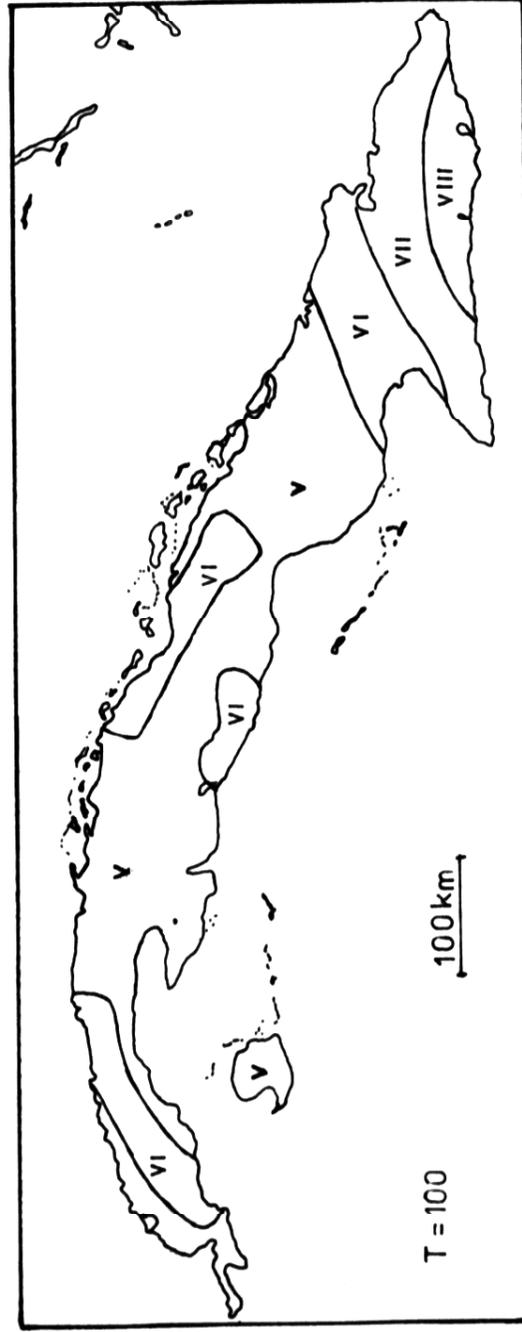


Figura 4 Zonación con tratamiento desigual de la información en la región suroriental (sismicidad de entre-placas) con respecto al resto (sismicidad de interior de placa) del territorio nacional, tomado de Alvarez *et al.*, (1985).

Método de estimación de la peligrosidad sísmica

La estimación de la peligrosidad sísmica, cualquiera que sea el método que se utilice, siempre consta de los pasos siguientes:

- Confección de un mapa de zonas de origen de terremotos (OT)
- Cálculo de los parámetros del régimen sísmico para cada una de las zonas OT (profundidad, magnitud máxima y parámetros a y b de los gráficos magnitud-frecuencia)
- Determinación de la ley de atenuación del parámetro en términos del cual se realizan los cálculos
- Selección del modelo de cálculo
- Obtención de los estimados

Cada uno de estos pasos puede ser enfocado de diferentes formas.

A continuación se presenta un resumen de los aspectos teóricos considerados en la variante de solución seleccionada.

Gráficos magnitud-frecuencia

Si se considera que el proceso de ocurrencia de terremotos obedece a una ley del tipo:

$$n(M) = 10^{a-b(M-M_0)} \quad M_{\min} \leq M \leq M_{\max} + \Delta M_{\max} \quad (1)$$

$$n(M) = 0 \quad \text{Cualquier otro valor de } M$$

los gráficos magnitud-frecuencia se describen por las fórmulas (Alvarez, 1983; Alvarez y Bunc, 1985a, b):

- distributivo \rightarrow terremotos en intervalos $[M_i - \Delta M_i/2, M_i + \Delta M_i/2]$

$$\lg[N(M_i)/F(b, \Delta M_i)] = a - b(M_i - M_0) \quad (2)$$

$$F(b, \Delta M_i) = [10^{b \cdot \Delta M_i/2} - 10^{-b \cdot \Delta M_i/2}] / b \cdot \ln(10) \quad (3)$$

- acumulativo \rightarrow terremotos en intervalo $[M_i - \Delta M_i/2, M_{\max} + \Delta M_{\max}]$

$$N_s(M_i) = 10^{a-b(M_i-M_0)} 10^{b \cdot M_i/2} [1 - 10^{-b(M_{\max}-M_i + \Delta M_{\max} + \Delta M_i/2)}] b \cdot \ln(10) \quad (4)$$

la parte lineal izquierda de este último gráfico se aproxima por

$$\lg[N_x(M_i)] = a' - b(M_i - M_0) \quad (5)$$

$$a' = a + \lg[10^{b \cdot \Delta M_i/2} / b \cdot \ln(10)]$$

Modelo de isosistas

De todos los parámetros que se utilizan para expresar la peligrosidad sísmica, las intensidades son los mejor documentados, lo que permite modelar el campo macrosísmico. El modelo más simple lo constituyen las isosistas circulares, donde la atenuación es sólo función de la distancia, sin direcciones preferenciales. Las isosistas elípticas son un paso posterior en la descripción del campo macrosísmico, y se encuentran en la práctica con mucha más frecuencia.

Un modelo de isosistas elípticas, de fácil manejo en programas de computación, es el que se describe por las fórmulas:

$$D = A \frac{\cos \theta}{\cos \alpha} = B \frac{\sin \theta}{\sin \alpha} \quad (6)$$

$$\theta = \arctan(A/B \tan \alpha)$$

$$I = b^* \cdot M - k \cdot \lg(r_e) - p \cdot r_e + d \quad (7)$$

$$r_e = (\Delta^2 c + h^2)^{1/2}$$

donde A , B son los semiejes mayor y menor de la elipse, Δ y μ son las coordenadas polares del punto, θ es un parámetro auxiliar, mientras que $\Delta^2 c$ es la distancia del contorno de la elipse a su centro en la dirección en que es válida la fórmula (7). El modelo, de gran versatilidad (ya que admite la variación de cada uno de sus parámetros de zona a zona), es discutido en detalle en Alvarez y Chuy (1985), mientras que, para facilitar su ajuste a isosistas experimentales fue confeccionado un programa de computación para microcomputadoras IBM-compatibles (Pico y Chuy, 1989).

Modelo de cálculo

Este método se basa en las ideas desarrolladas por Riznichenko (1965, 1979, ed). Parte de un enfoque determinístico calculando la integral de sacudibilidad

$$B_i = \iiint N_x(M_i) dV \quad (8)$$

y el periodo de recurrencia de las sacudidas $T_i = 1/B_i$; donde $N_x(M_i)$ es la frecuencia acumulativa de los terremotos con magnitud $\geq M_i$, que se determina unívocamente

por 3 parámetros: a , b y M_{\max} . La magnitud M_1 es la que puede provocar en el punto de interés intensidades $\geq I$. Si se considera que el periodo de recurrencia de las sacudidas con intensidad $\geq I$ es la esperanza matemática de los intervalos temporales entre ellas (Riznichenko, ed. 1979) se pueden realizar estimados probabilísticos de la peligrosidad sísmica. Usando el modelo poissoniano de ocurrencia de sacudidas sísmicas se obtiene que la probabilidad de que en un tiempo t no ocurra ni un solo evento será

$$p(t) = \exp(-t/T_I) \quad (9)$$

El programa SACUDIDA

Este programa (Alvarez, 1985), en lenguaje FORTRAN IV, fue confeccionado para la obtención de estimados de peligrosidad sísmica mediante el modelo de cálculo aquí esbozado, y fue probado con resultados satisfactorios en diversos lugares del mundo (Alvarez y Bune, 1985b). En la Figura 5 se presentan algunos ejemplos de estas aplicaciones.

Los cálculos se realizan de la forma siguiente: utilizando las fórmulas (4, 6-8) se determina el valor de T_p , y utilizando la fórmula (9) se determinan los valores $p(t)$ para diferentes valores del tiempo de espera t . Como resultado pueden ser confeccionadas 5 variantes de mapas de peligrosidad sísmica:

a) Conteniendo valores medios

- Periodos medios de recurrencia (T) de sacudidas con valores de intensidad mayores o iguales que 5, 6, 7, 8, 9 y 10 (los llamados mapas de sacudibilidad sísmica)
- Intensidades mayores o iguales que un valor dado que pueden ocurrir con periodos de recurrencia (T) de 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000 y 10000 años.

b) Conteniendo estimados probabilísticos

- Probabilidad (p) de no igualar o exceder un valor dado de intensidad (5-10) en tiempos de espera (t) de 10, 20, 50, 100, 500, 1000 y 10000 años.
- Intensidades que no pueden ser igualadas o excedidas en diferentes tiempos de espera ($t = 10, 20, 50, 100, 500, 1000, 10000$ años) para niveles de probabilidad (p) fijados a priori: 0.5, 0.7, 0.9, etc.
- Tiempos de espera (t) en que no serán igualados o excedidos valores dados de intensidad (5-10) para niveles de probabilidad (p) fijados a priori: 0.5, 0.7, 0.9, etc.

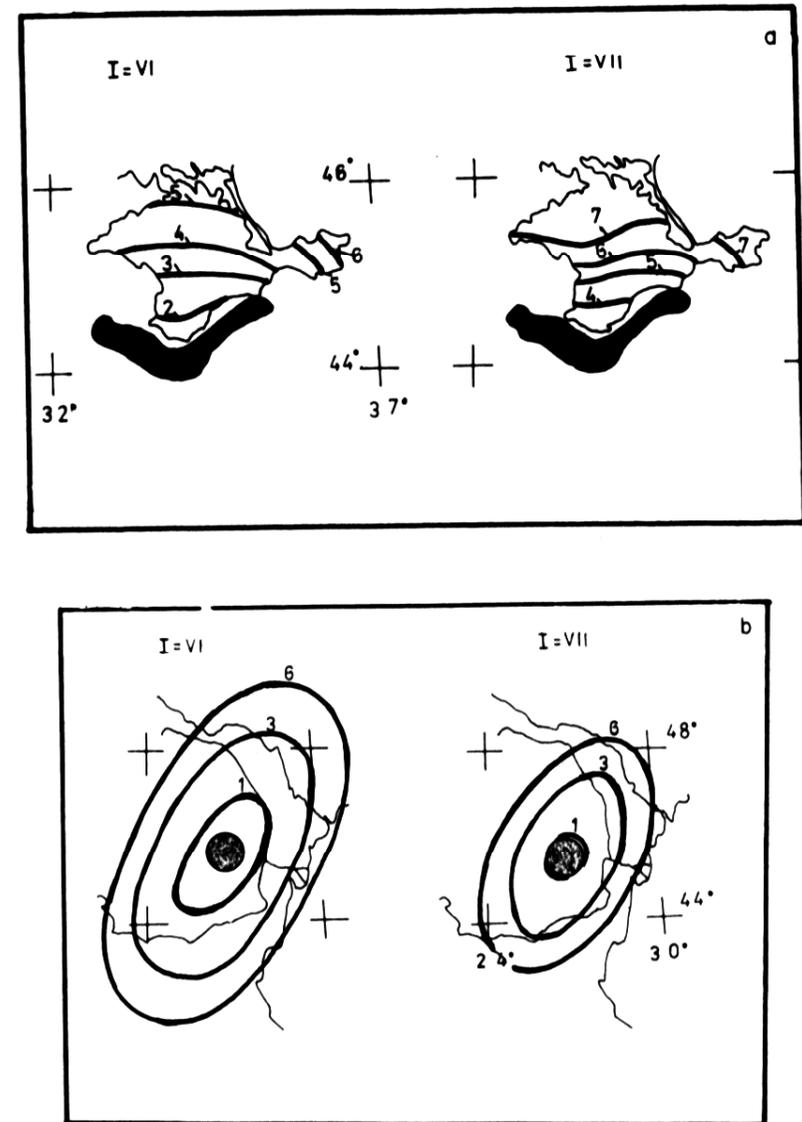


Figura 5 Ejemplos de aplicaciones del programa SACUDIDA.

- a) Región de Crimea (URSS), mapas de periodos de sacudibilidad para intensidades de VI y VII grados, modelo de isosistas circulares.
- b) Región de Vrancea (Rumania), *idem*, modelo de isosistas elípticas con un fuerte alargamiento en la dirección SW-NE. En ambos casos la zona de origen de terremotos se representa sombreada, y los periodos de recurrencia T (en años) se simbolizan por: 1:10, 2:50, 3:100, 4:200, 5:500, 6:1000, 7:10,000.

De estos tipos de mapa, el más usado es el segundo, que es la base de los llamados mapas de regionalización sísmica, y el cuarto, que corresponde a los comúnmente llamados (aunque de forma incorrecta) de riesgo sísmico. Además de éstos, para puntos específicos pueden ser construídos diferentes tipos de gráficos que combinen estos parámetros (I, T, t, p).

La versión más reciente de este programa (Alvarez 1989) tiene diversas opciones adicionales, entre las que se pueden mencionar:

- Usar el modelo probabilístico de cálculo de McGuire (1976)
- Usar otros parámetros diferentes de la intensidad como base para los cálculos
- Usar el modelo del terremoto característico de Schwartz y Coppersmith (1984)

Utilización de los gráficos intensidad-frecuencia para estimar los parámetros de los gráficos magnitud-frecuencia

Para las regiones de alta actividad sísmica, los parámetros a y b de los gráficos magnitud-frecuencia se calculan a partir de los catálogos de terremotos; pero para las zonas de baja actividad sísmica, a veces no es posible confeccionar dichos catálogos y todo el procesamiento debe realizarse a partir de un catálogo de datos macrosísmicos, que no siempre puede ser transformado en un catálogo de terremotos con todos los parámetros necesarios para realizar un análisis del régimen sísmico. En tal caso, los datos de intensidad de terremotos sentidos se procesan en forma de gráficos intensidad-frecuencia, los cuales se aproximan habitualmente por las fórmulas:

$$\text{distributivo} \quad \lg[N(I)] = C - D \cdot I \quad (10)$$

$$\text{acumulativo} \quad \lg[N_s(I)] = E - G \cdot I \quad (11)$$

Una forma bastante extendida de proceder en estos casos es emplear directamente los gráficos intensidad-frecuencia, para lo cual se calcula la I_0 máxima para cada zona OT y se expresa la atenuación de la forma $I = f(I_0, r)$, variándose totalmente el proceso de cálculo de la integral (1). En lugar de esa vía, nosotros preferimos emplear un método indirecto (Alvarez *et al.* 1989) para lograr estimar los parámetros de los gráficos magnitud-frecuencia, el cual se basa en dos hipótesis:

- 1) Las intensidades máximas que se emplean al construir los gráficos intensidad-frecuencia corresponden a su valor a una distancia dada r_0 del hipocentro (I_{r_0}), que puede ser, o bien en el epicentro ($I_0, r_0 = h$) o en otro punto cualquiera previamente seleccionado (una distancia epicentral Δ_0).
- 2) Existe una dependencia lineal entre ambos tipos de gráfico. Para el caso de los gráficos distributivos es en toda su extensión, mientras que para el caso de los acumulativos es sólo para su parte lineal izquierda.

Considerando que las intensidades máximas sentidas se relacionan con la magnitud por la fórmula

$$I_{r_0} = b^* \cdot M - k \cdot \lg(r_0) - p \cdot r_0 + d \quad (7a)$$

y que los gráficos intensidad-frecuencia se construyen con un intervalo de agrupamiento $\Delta I = 1$ (lo que equivale a intervalos de agrupamiento en magnitud $\Delta M = 1/b^*$) se obtienen las siguientes fórmulas:

- Caso de los gráficos distributivos

$$b = b^* \cdot D \quad (12)$$

$$a = C + b^* \cdot D \cdot M_{1.0} - \lg[F(b, 1/b^*)] \quad (13)$$

- Caso de los gráficos acumulativos

$$b = b^* \cdot G \quad (14)$$

$$a = E + b^* \cdot G \cdot M_{1.0} - \lg[10^{b(2b^*)}/b \cdot \ln(10)] \quad (15)$$

donde $F(b, x)$ viene dado por la fórmula (8) y

$$M_{1.0} = [k \cdot \lg(r_0) + p \cdot r_0 - d] / b^* \quad (16)$$

En el caso particular de que la intensidad máxima reportada corresponda a la intensidad en el epicentro, la variable r_0 en las fórmulas (7a, 12-16) debe ser sustituida por h , así como I_{r_0} debe ser sustituida por I_0 .

Parámetros del régimen sísmico y del modelo de isosistas de las diferentes zonas de origen de terremotos (OT)

Se preparó un mapa de zonas de origen de terremotos compuesto de dos tipos cualitativamente diferentes de dichas zonas. En primer lugar, para la región de entreplacas ubicada al sur del territorio de Cuba, se delimitaron 6 zonas a partir del análisis combinado de los mapas de epicentros y mapas batimétricos y gravimétricos (Alvarez y Bune, 1985a); en segundo lugar, para la región de interior de placas, a la cual corresponde todo el territorio insular de Cuba, se consideró que los terremotos fuertes ocurrirían en los nudos de alineamientos tectónicos (41 en total, agrupados en tres categorías diferentes), delimitados mediante el desciframiento de imágenes cósmicas (Cotilla *et al.* 1989). Debido a que la sismicidad de la zona suroriental es mucho mayor que la del resto del territorio, es muy difícil identificar la actividad correspondiente a los nudos cercanos a esta zona límite de placas, y se optó por la

variante de considerar que la primera se enmascara por la segunda, por lo que la contribución de dichos nudos no se consideró en los cálculos. En la Figura 6 se muestra el esquema obtenido, consistente en 32 nudos (zonas puntuales) y 6 zonas espaciales de geometría variable.

Los parámetros a y b fueron obtenidos de la forma siguiente:

Para las 6 zonas de la región de entreplacas se procesaron los datos de un catálogo de terremotos preparado a partir de la información reportada por las agencias internacionales de determinación de epicentros y los catálogos de datos macrosísmicos. Para los 32 nudos de alineamientos, se confeccionó un solo gráfico intensidad-frecuencia distributivo para todo el territorio con intensidades a partir de IV grados, tomando como base el catálogo de datos macrosísmicos de Cuba (Chuy, inédito). Los parámetros estimados por el método de los mínimos cuadrados fueron: $C = 2.31 \pm 0.38$ y $D = 0.60 \pm 0.06$. Considerando el parámetro D como constante característica para toda la sismicidad de interior de placa, se realizó la normalización del parámetro C utilizando las fórmulas:

$$C_{\text{zona}} = C_{\text{total}} + \lg[N_s^{\text{zona}}(I)/N_s^{\text{total}}(I)] \quad (17)$$

$$C_{\text{nudo}} = C_{\text{zona}} + \lg(p_i/S_i) \quad (18)$$

donde $N_s^{\text{zona}}(I)$ es el número acumulativo de terremotos con intensidad $\geq IV$ en una "zona", $N_s^{\text{total}}(I)$ es el número total de eventos para toda la región, p_i es el peso relativo de un nudo dentro de una "zona", mientras que la sumatoria se extiende por todos los nudos pertenecientes a dicha "zona". En Cotilla *et al.* (1988) se detallan los pasos seguidos por esta vía para llegar a los valores del parámetro C para cada nudo a partir del valor hallado para la región. Los parámetros a y b se obtuvieron a partir de éstos, usando las fórmulas (12, 13, 16) considerando un valor de r_0 de 30 km.

La profundidad en el caso de las zonas de entreplacas se determinó sobre la base del análisis de las profundidades de ocurrencia de los terremotos más fuertes dentro de cada zona, y para la región de interior de placa se consideró una profundidad única de 20 km sobre la base del análisis de la profundidad media de la corteza en Cuba, y de las escasas determinaciones de este parámetro para terremotos ocurridos en la misma.

Las magnitudes máximas se estimaron con el criterio de que fuesen de hasta 0.25 unidades por encima del máximo valor reportado, que en el caso de los nudos de alineamientos se hizo, no individualmente, sino para cada categoría: primera (6.0 ± 0.25); segunda (5.5 ± 0.25) y tercera (5.0 ± 0.25); para los no asociados a alineamientos fundamentales se tomó $M_{\text{máx}} = 4.5 \pm 0.25$. La clasificación de los nudos en categorías se discute en Cotilla *et al.*, (1988).

Los parámetros del modelo de isosistas se obtuvieron, para el caso de las zonas de interior de placa, mediante una generalización de los valores obtenidos para las isosistas

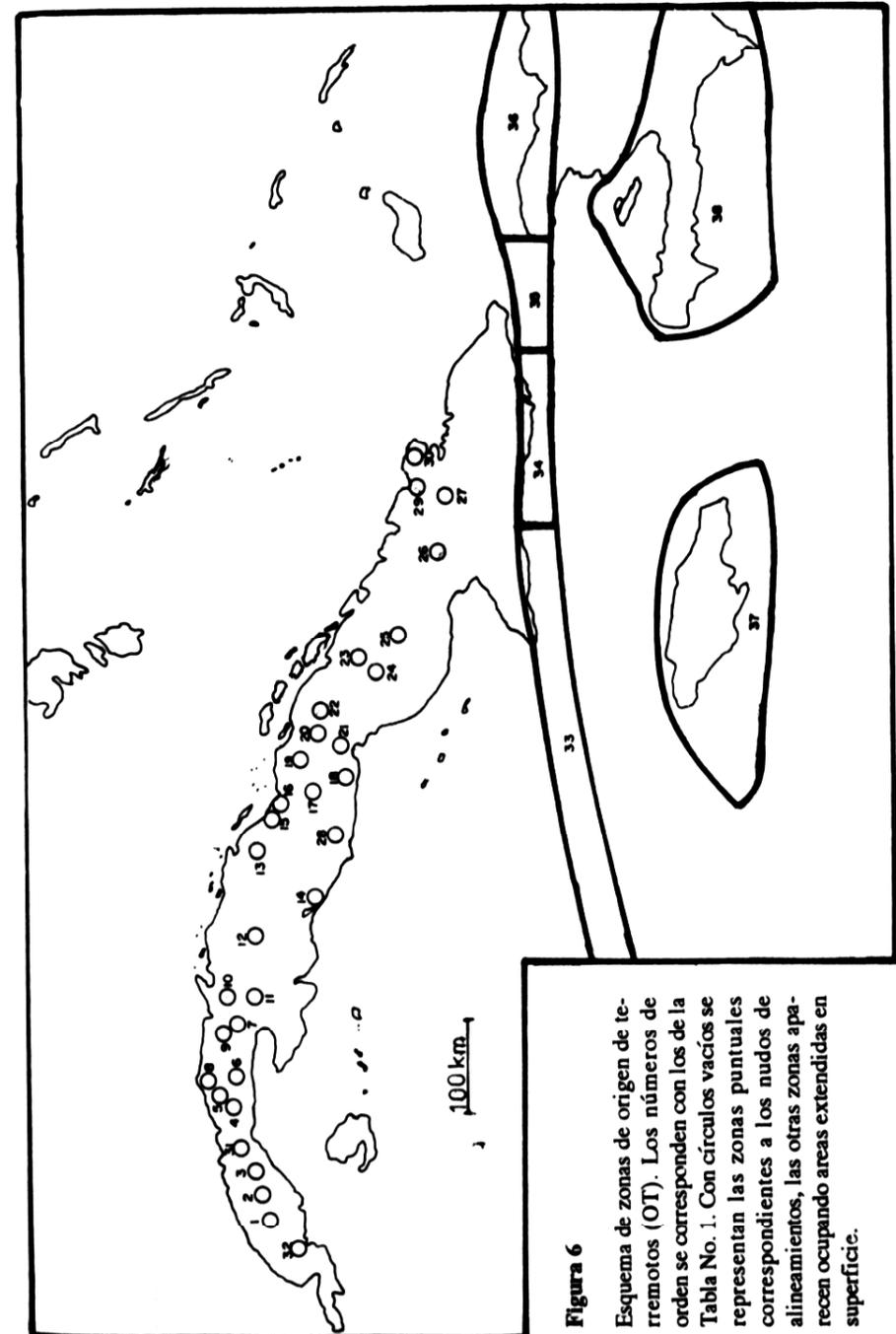


Figura 6

Esquema de zonas de origen de terremotos (OT). Los números de orden se corresponden con los de la Tabla No. 1. Con círculos vacíos se representan las zonas puntuales correspondientes a los nudos de alineamientos, las otras zonas aparecen ocupando áreas extendidas en superficie.

disponibles Alvarez y Chuy (1985) en dependencia de las estructuras asociadas a cada nudo de alineamientos en particular; para las zonas de entreplacas se usaron los valores obtenidos mediante el estudio de terremotos específicos, los cuales aparecen en Alvarez y Chuy (1985); Chuy *et al.* (1988). Como parámetros de la fórmula (7) se utilizaron los valores: $b^*=1.5$, $k=2.63$, $p=0.0087$, $d=2.5$, obtenidos por Fedotov y Shumilina (1971) para isosistas circulares en Kamchatka, que describen con bastante buena aproximación el campo macrosísmico de los terremotos en la región del Caribe (Alvarez y Bune, 1977; Alvarez y Chuy, 1985).

En la Tabla 1 se presenta el bloque de datos utilizados para la obtención de los estimados de la peligrosidad sísmica.

Tabla 1
Parámetros de las zonas de origen de terremotos (OT) usados en los cálculos

No.	A/B	d_e	γ	h	a	b	M _{máx}
1	1.6	A	25	20	1.667	0.892	6.0 ± 0.25
2	1.6	A	25	20	1.667	0.892	6.0 ± 0.25
3	1.6	A	25	20	1.767	0.892	6.0 ± 0.25
4	1.0	-	-	20	1.426	0.892	4.5 ± 0.25
5	1.0	-	-	20	1.426	0.892	4.5 ± 0.25
6	1.6	A	20	20	1.827	0.892	5.5 ± 0.25
7	1.0	-	-	20	1.174	0.892	5.0 ± 0.25
8	1.8	A	-40	20	1.827	0.892	6.0 ± 0.25
9	1.6	A	20	20	1.475	0.892	5.5 ± 0.25
10	1.6	A	37	20	1.475	0.892	5.5 ± 0.25
11	1.8	A	-16	20	1.475	0.892	5.0 ± 0.25
12	1.6	A	41	20	1.475	0.892	5.5 ± 0.25
13	1.8	A	-28	20	2.315	0.892	6.0 ± 0.25
14	1.8	A	-41	20	1.866	0.892	5.5 ± 0.25
15	1.6	A	-28	20	2.315	0.892	6.0 ± 0.25
16	1.6	A	-28	20	2.315	0.892	6.0 ± 0.25
17	1.6	A	-5	20	1.754	0.892	5.5 ± 0.25
18	1.6	A	-72	20	2.104	0.892	5.0 ± 0.25
19	1.8	A	-28	20	2.104	0.892	5.5 ± 0.25
20	1.8	A	-28	20	2.104	0.892	5.5 ± 0.25
21	1.6	A	-25	20	2.104	0.892	5.5 ± 0.25
22	2.0	A	-40	20	2.104	0.892	6.0 ± 0.25
23	2.0	A	-40	20	1.389	0.892	6.0 ± 0.25
24	2.0	A	-25	20	1.389	0.892	5.5 ± 0.25
25	1.6	A	-50	20	1.733	0.892	5.0 ± 0.25
26	1.4	A	-37	20	1.587	0.892	5.0 ± 0.25
27	1.4	A	-35	20	1.587	0.892	5.0 ± 0.25

Tabla 1 (continúa)

No.	A/B	d_e	γ	h	a	b	M _{máx}
28	1.6	A	-10	20	1.866	0.892	5.5 ± 0.25
29	1.4	A	5	20	1.587	0.892	6.0 ± 0.25
30	1.4	A	5	20	1.587	0.892	5.5 ± 0.25
31	1.6	A	25	20	1.727	0.892	6.0 ± 0.25
32	1.6	A	63	20	1.667	0.892	5.0 ± 0.25
33	1.6	A	8	30	1.480	0.450	7.75 ± 0.25
34	1.1	A	2	30	1.880	0.520	7.5 ± 0.25
35	1.6	A	0	40	1.480	0.450	7.75 ± 0.25
36	2.4		0	50	1.320	0.480	8.0 ± 0.25
37	1.8	A	0	30	2.250	0.620	7.5 ± 0.25
38	2.1		-16	40	2.660	0.690	7.5 ± 0.25

Por d_e se entiende la dirección en que es válida la fórmula de atenuación, y por γ el ángulo entre la orientación del eje mayor de las isosistas elípticas con relación a la dirección E-W. Los números de la primera columna corresponden a la ubicación de la zona OT en el mapa de la Figura 6. En los casos en que no fue posible considerar un modelo de isosistas elípticas, se consideraron como circulares con los mismos parámetros de la fórmula de campo macrosísmico, por lo que en las columnas correspondientes a los valores de d_e y γ aparecen guiones (-).

Resultados

El procesamiento de los datos de la Tabla 1 con el programa SACUDIDA permitió obtener un conjunto de mapas con estimados medios y probabilísticos de la peligrosidad sísmica. De ellos se muestran los siguientes: intensidades para periodos de recurrencia de 100 y 1000 años (Figura 7), intensidades que no pueden ser igualadas o excedidas en un tiempo de espera de 20 años con probabilidad de 0.7 y 0.9 (Figura 8), y los correspondientes para un tiempo de espera de 50 años (Figura 9). Por otra parte, para un grupo de ciudades del país se determinaron los periodos de recurrencia para diferentes intensidades (Tabla 2), así como para un grupo más reducido de ellas se confeccionaron los gráficos de probabilidad, de no ser igualados o excedidos los valores de intensidad en diferentes tiempos de espera (Figura 10). Se debe señalar, que por características del programa de computación empleado, todos los estimados se realizaron para cuadrículas cuyas dimensiones se seleccionaron de (0.2° lat. X 0.2° long.) y los valores corresponden al centro de las mismas. En consecuencia, los mapas presentados son el resultado de un suavizamiento manual, y los periodos de recurrencia y gráficos probabilísticos de las ciudades corresponden al centro de las cuadrículas donde se hallan ubicadas las mismas.

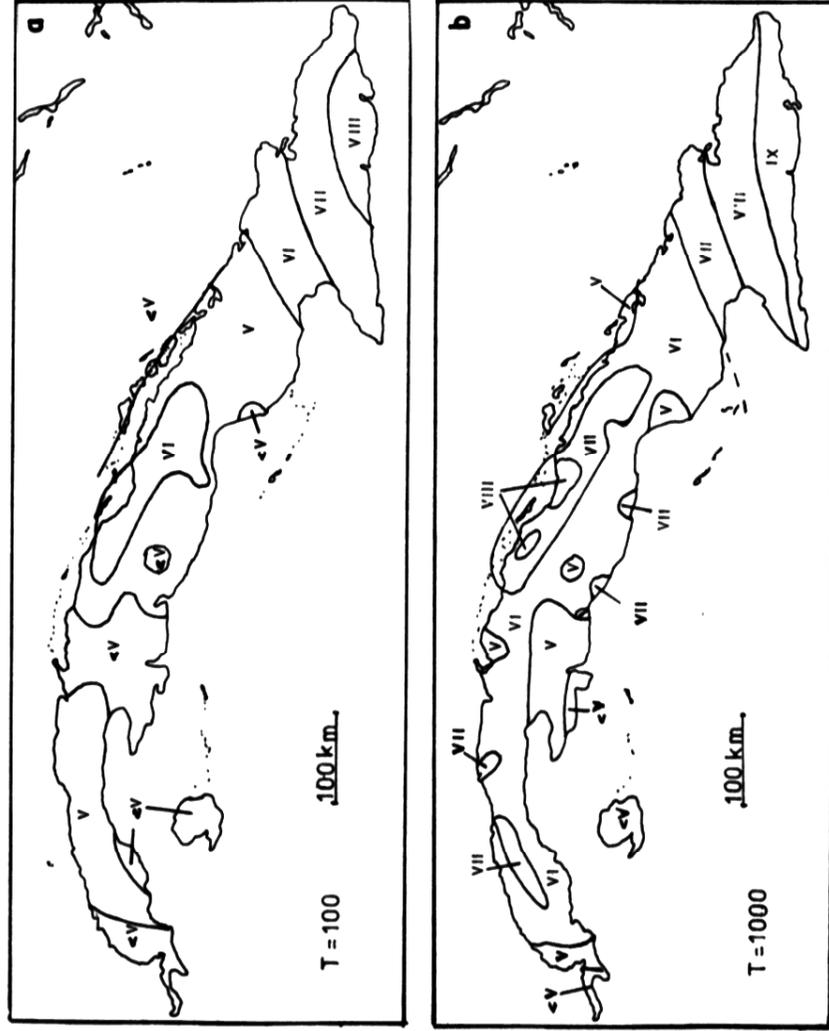


Figura 7 Mapas de intensidades para periodos de recurrencia de (a) 100 y (b) 1000 años.

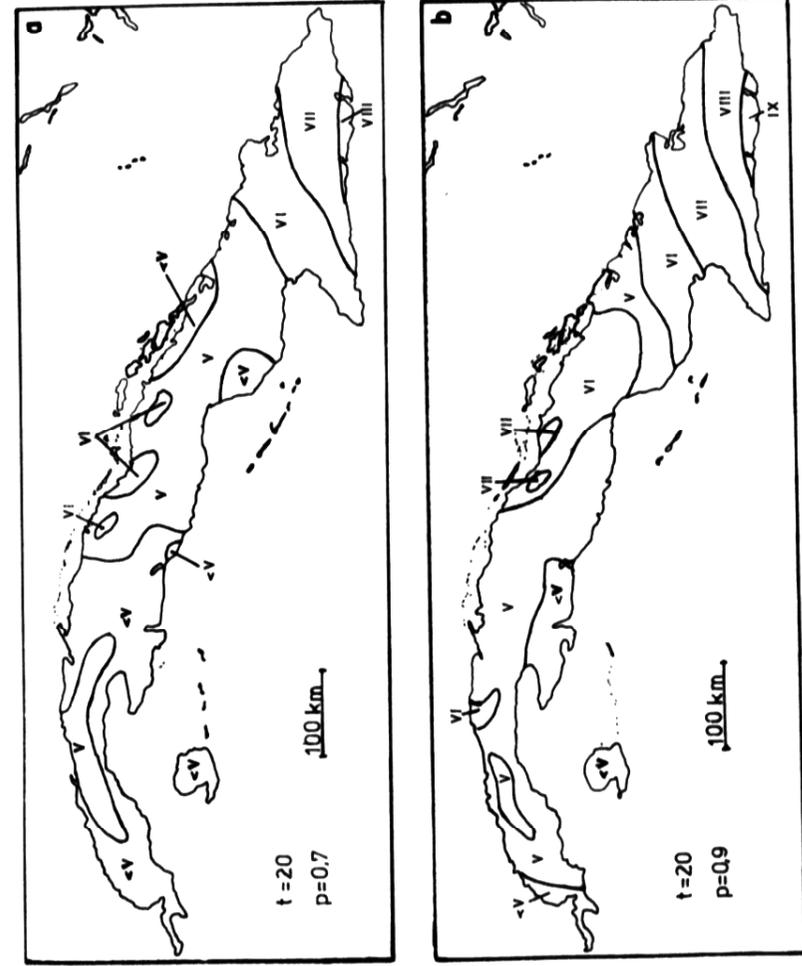


Figura 8 Intensidades que no pueden ser igualadas o excedidas en un tiempo de espera de 20 años para una probabilidad de (a) 0.7 y (b) 0.9.

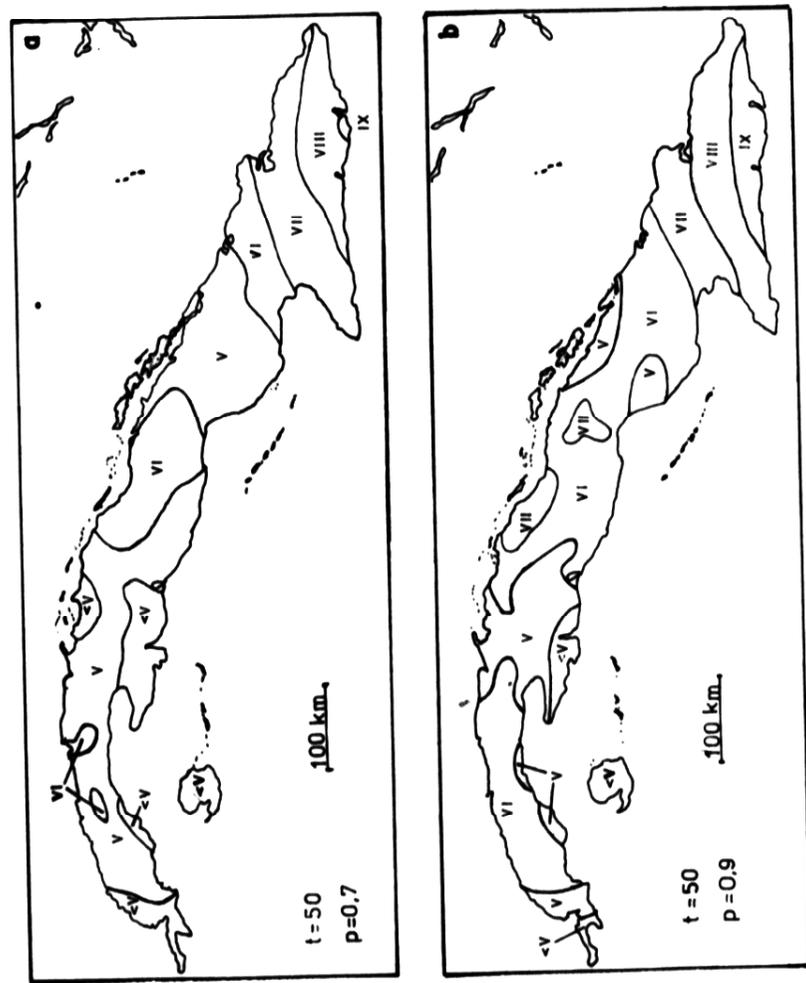


Figura 9 Intensidades que no pueden ser igualadas o excedidas en un tiempo de espera de 50 años para una probabilidad de (a) 0.7 y (b) 0.9.

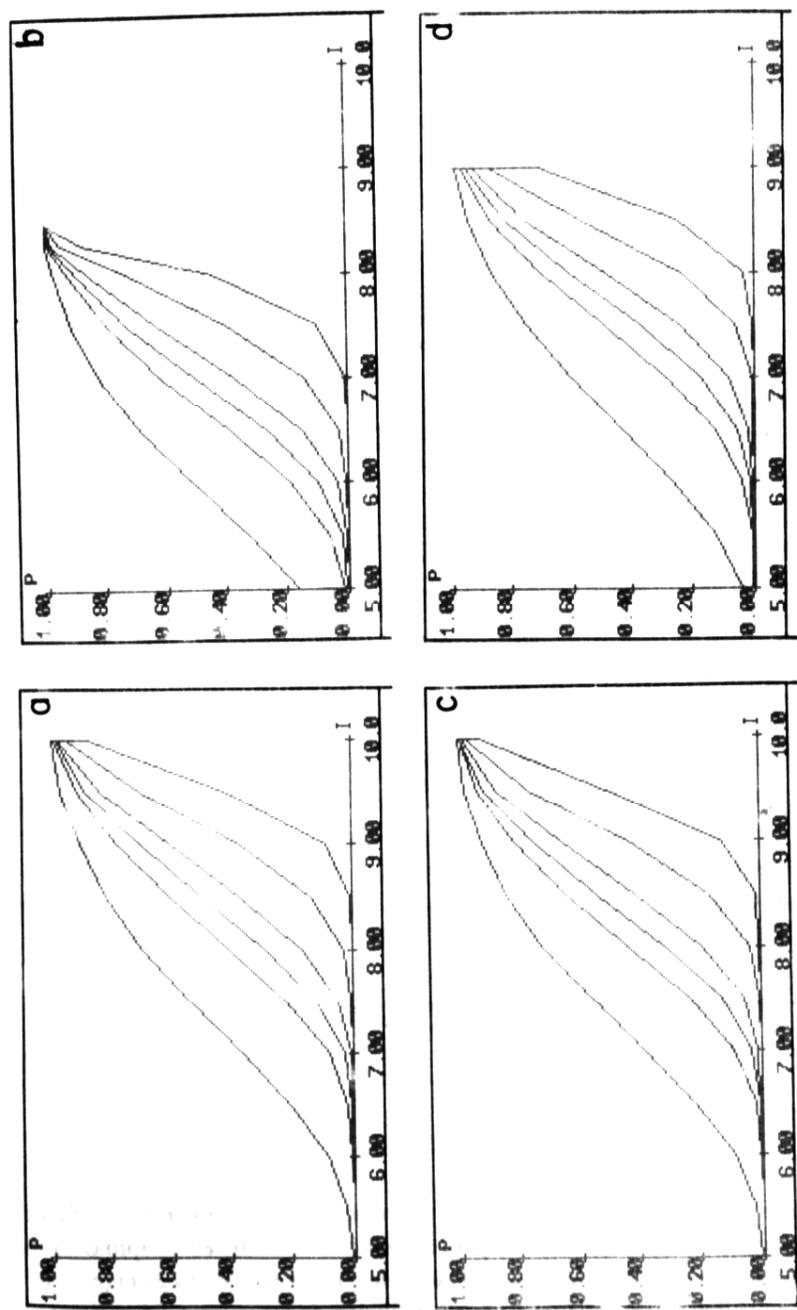


Figura 10 Probabilidad de que no sean igualados o excedidos valores dados de intensidad para diferentes tiempos de espera en las ciudades de: (a) Santiago de Cuba, (b) Bayamo, (c) Guantánamo y (d) Baracoa.

Tabla 2
Periodos de recurrencia (en años) de las sacudidas para un grupo de ciudades del territorio nacional

Ciudad	V	VI	VII	VIII	IX	X
Pinar del Río	72	363	1742	14276		
San Cristóbal	32	133	596	3752		
Mariel	31	138	643	3752		
Artemisa	31	138	643	3752		
Guines	22	98	537	5567		
La Habana	42	199	1591	16851		
Matanzas	88	484	10496			
Jagüey Grande	169	1454				
Santa Clara	34	148	816			
Cienfuegos	163	1908				
Trinidad	65	343	2813			
Caibarién	8	35	151	968		
Sancti Spiritus	25	138	1988			
Ciego de Avila	20	113	1062			
Morón	12	52	295	2942		
Camagüey	48	456	3508			
Nuevitas	127	2980				
Las Tunas	24	92	704			
Puerto Padre	36	148	4028			
Holguín	14	42	185	10360		
Gibara	14	48	251	5179		
Baracoa	6	15	40	141	1463	
Guantánamo	3	8	20	57	232	6132
Palma Soriano	5	12	33	108	837	
Santiago de Cuba	3	8	22	64	248	6132
Bayamo	11	29	100	608		
Manzanillo	5	13	36	123	986	

Los espacios en blanco corresponden al caso de no ser posibles sacudidas con tal valor de intensidad.

Discusión

El empleo de un valor de r_0 de 30 km en la fórmula (16) corresponde a considerar terremotos con profundidad de 20 km, pero reportados a una distancia aproximada de 22 km del epicentro. La utilización de valores de r_0 más cercanos a 20 km (caso de intensidad en el epicentro) conduce a una disminución de los valores del parámetro a , es decir, a una actividad sísmica menor. En este sentido fue necesario emplear una

una solución de compromiso, ya que no se disponía de epicentros instrumentales confiables, por lo que se prefirió elevar el nivel de actividad sísmica mediante un valor relativamente alto de r_0 , compensando en cierta medida la subestimación de ésta, que se realiza al calcular los valores del parámetro C de los gráficos intensidad-frecuencia considerando como representativas intensidades a partir de IV grados.

Con respecto a las zonas de alta actividad sísmica se debe señalar el caso de la ciudad de Guantánamo, que en los estimados realizados presenta un nivel de peligrosidad sísmica similar al de Santiago de Cuba, mientras que en la práctica, los datos reales de intensidades sentidas reflejan un nivel de peligrosidad mucho menor. Esto pudiera ser debido a particularidades del campo macrosísmico, a migración temporal de la actividad sísmica, o a características específicas de los terremotos en esa región. Lamentablemente, la información disponible es insuficiente para formarse un juicio definitivo, y el problema queda pendiente para estudios posteriores.

Como deficiencia general de estos estimados de peligrosidad sísmica está la pobreza de la información sismológica disponible, fundamentalmente en las regiones de baja actividad, lo que hizo necesario utilizar numerosas aproximaciones que limitan lógicamente la validez de los resultados finales.

Por otra parte, se empleó un modelo particular de zonas OT, al que los autores dieron preferencia, el cual es diferente al usado por Rubio (1985) en sus cálculos de peligrosidad sísmica para el territorio nacional, así como a los planteados por Chuy *et al.* (1984) para la región Occidental y por Orbera *et al.* (1986) para todo el país. Un análisis de la influencia del modelo de zonas OT sobre los estimados de peligrosidad sísmica con el esquema de cálculo aquí utilizado aparece en Alvarez *et al.* (1989). La no utilización de estudios de sismotectónica como datos para la delimitación de las zonas de origen de terremotos, y la aplicación de un método formal en su delimitación y consiguiente estimación de las magnitudes máximas posibles, limita la aplicación de los resultados para periodos de recurrencia muy grandes, por lo que se decidió no considerar el valor de 10,000 años en los cálculos.

Conclusiones y Recomendaciones

- 1) Fueron obtenidos diferentes estimados de la peligrosidad sísmica para el territorio nacional en forma de mapas, tablas y gráficos. Los mismos, son mejores sensiblemente que los utilizados hasta la fecha como documentos normativos de la actividad constructiva.
- 2) En lugar de un mapa de regionalización sísmica del territorio nacional, resultaría de mayor utilidad el conjunto de mapas presentados, así como las tablas de periodos de recurrencia y los gráficos probabilísticos. Esto permitiría tomar decisiones de proyecto más acordes con el tipo de obra a construir y su relación con el medio ambiente en que deben ser ejecutadas, libres del esquematismo a que

conduce la utilización de un mapa único, en el cual nunca puede verse toda la variedad informativa que lleva implícita una estimación de peligrosidad sísmica.

- 3) Se deben continuar los trabajos en dos direcciones fundamentales: el precisamiento de las zonas de origen de terremotos (OT), con la estimación de su potencialidad, y la obtención de nuevos datos sobre sismicidad, ya sean instrumentales o macrosísmicos, que permitan estimar con un mayor grado de confiabilidad, los parámetros del régimen sísmico y del modelo de isosistas para cada zona OT en particular.

Referencias

- Algermissen, S.T. and Perkins, D.M. "A technique for seismic zoning: general considerations and parameters", in Harding, S.T., ed., *Contributions to seismic zoning, NOAA Technical Report ERL 267-ESL 30*, pp. 1-15. Boulder, Col., 1973.
- Algermissen, S.T., Perkins, D.M., Isherwood, W., Gordon, D., Reagor, G. and Howard, C. "Seismic risk evaluation of the Balkan region. UNESCO, Survey of the Seismicity of the Balkan Region", in *Proceedings of the Seminar on Seismic Zoning Maps*; Skopje, 27 October - 4 November, 1975, vol. II, pp. 171-240. UNESCO, Skopje, 1976.
- Alvarez, H. "Intensidad sísmica de Cuba", en: *Atlas Nacional de Cuba*, p. 20. La Habana, 1970.
- Alvarez, H. y Menéndez, L. "Sismicidad de Cuba" (en ruso), *Fizika Zemli*, No. 1, pp. 74-78. 1969.
- Alvarez, H., Shteinberg, V.V., Blanco, P. et al. "Condiciones sísmicas de la ciudad de Santiago de Cuba" (en ruso), *Fizika Zemli*, No. 5, pp. 81-86. 1973.
- Alvarez, L. "Estimación de la peligrosidad sísmica para la ciudad de Santiago de Cuba", *Investigaciones Sismológicas en Cuba*, No. 4, pp. 87-123. 1983.
- Alvarez, L. *Sismicidad de Cuba oriental* (en ruso). Tesis para optar por el grado de Candidato a Doctor en Ciencias Físico-Matemáticas. Moscú, Instituto de Física de La Tierra, 181 pp. Academia de Ciencias de la URSS, 1985.
- Alvarez, L. "Peligrosidad sísmica de Cuba (1). Sacudibilidad sísmica de Santiago de Cuba". *Comunicaciones Científicas sobre Geofísica y Astronomía*, No. 3, 16 pp. 1988.
- Alvarez, L. "Estimaciones de peligrosidad sísmica con una versión modificada del programa SACUDIDA", *Resúmenes V Jornada Científica del IGA*, p. 77. 1989.
- Alvarez, L. y Bune, V.I. "Estimación de la peligrosidad sísmica para la región suroriental de Cuba" (en ruso), *Fizika Zemli*, No. 10, pp. 54-67. 1977.
- Alvarez, L. y Bune, V.I. "Sacudibilidad sísmica de Cuba oriental" (en ruso), *Fizika Zemli*, No. 10, pp. 3-12. 1985a.
- Alvarez, L. and Bune, V.I. "A computer program for seismic hazard estimation". *Proceedings of the 3rd International Symposium on the Analysis of Seismicity and on Seismic Risk*, June 17-22, pp. 432-439. Liblice Castle, Czechoslovakia, 1985b.
- Alvarez, L. and Chuy, T. "Isoseismal model for Greater Antilles", *Proceedings of the 3rd International Symposium on the Analysis of Seismicity and on Seismic Risk*, June 17-22, pp. 134-141. Liblice Castle, Czechoslovakia, 1985.
- Alvarez, L., Chuy, T. and Cotilla, M. "Seismic hazard of low seismic activity zones. The case of western Cuba". *Proceedings of the 4th International Symposium on the Analysis of Seismicity and on Seismic Risk*, September 4-9, 1989, pp. 517-524. Bechyne Castle, Czechoslovakia, 1989.
- Alvarez, L., Godzikovskaya, A.A. y Rautian, T.G. "Sismicidad y riesgo sísmico de Cuba y las acuatorias adyacentes" (en ruso), en *Investigación de la sismicidad de las zonas de baja actividad sísmica (Cuba Central)* pp. 57-80. Moscú, Nauka, 1983.
- Alvarez, L., Rubio, M., Chuy, T. y Cotilla, M. Informe final del tema 31001 *Estudio de la sismicidad de la región del Caribe y estimación preliminar de la peligrosidad sísmica en Cuba*. Archivo Depto. Sismología. IGA, ACC, 1985.
- Bune, V.I. y Gorshkov, G.P., ed. "Regionalización sísmica de la URSS", *Cuestiones metodológicas y descripción del mapa de 1978* (en ruso), 308 pp. Moscú, Nauka, 1980.
- Bune, V.I. and Katrick, I.R. "Data on probability of earthquakes in the map of seismic zoning", in *Proceedings of the 3rd International Symposium on the Analysis of Seismicity and on Seismic Risk*; 17-22 October, 1977. Prague, Academia, pp. 279-294. Liblice Castle, Czechoslovakia, 1977.
- Cotilla, M., Alvarez, L., Chuy, T. y Portuondo, O. "Peligrosidad sísmica de Cuba (2). Algunos criterios sobre la peligrosidad sísmica en zonas de baja actividad del territorio de Cuba", *Comunicaciones Científicas sobre Geofísica y Astronomía*, No. 5, 19 pp. 1988.
- Chuy, T. (inédito). *Catálogo de datos macrosísmicos de Cuba: 1528-1988*, Instituto de Geofísica y Astronomía, ACC.
- Chuy, T. y Rodríguez, M. "La actividad sísmica en Cuba por datos históricos", *Investigaciones Sismológicas en Cuba*, No. 1, pp. 5-17. 1980.
- Chuy, T., Dzshuraev, R.U., Alvarez, L., Alvarez, H. y Mirzoev, K.M. *Informe técnico de las investigaciones macrosísmicas en el territorio de Cuba oriental y en la región de emplazamiento de las variantes No. 2 y 10 de la CEN de Holguín*. Archivo Depto. Sismología. IGA, 1988.
- Chuy, T., González, B.E. y Alvarez, L. "Sobre la peligrosidad sísmica en Cuba", *Investigaciones Sismológicas en Cuba*, No. 4, pp. 37-52. 1983.
- Chuy, T., González, B.E. y Escalona, S. "Información macrosísmica de las provincias de Villa Clara, Cienfuegos y Sancti Spiritus", *Investigaciones Sismológicas en Cuba*, No. 1, pp. 33-57. 1980.

- Chuy, T., González B. y Polo, B. "Estimación preliminar de la peligrosidad sísmica de la región occidental de Cuba", en *Resúmenes IV Jornada Científica, IGA, ACC*, pp. 79-80. 1984a.
- Chuy, T., González, B.E. y Vorobiova, E.O. "Sismicidad del territorio de las provincias de Camagüey y Ciego de Avila", *Investigaciones Sismológicas en Cuba*, No. 5, pp. 61-94. 1984b.
- Chuy, T., Vorobiova, E.O., González, B.E., Alvarez, L., Pérez, E.R., Cotilla, M.O. y Portuondo, O. "El sismo del 16 de diciembre de 1982. Torriente-Jagüey Grande", *Investigaciones Sismológicas en Cuba*. No. 3, 44 pp. 1983.
- Chuy, T. et al. "Isosistas de terremotos", en: *Nuevo Atlas Nacional de Cuba*, p. II.3.2. Madrid, 1989.
- Fedotov, S.A. y Shumilina, L.S. "Sacudibilidad sísmica de Kamchatka" (en ruso), *Fizika Zemli*, No. 9, pp. 3-15. 1971.
- McGuire, R.K. "Fortran computer program for seismic risk analysis". *Open File report*, No. 76-67. U.S. Department of the Interior Geological Survey. 1976.
- Norma Cubana, "Elaboración de Proyectos de Construcción. Construcciones Sismo-Resistentes", *Especificaciones de proyecto y métodos de cálculo*, NC 53-114, 60 pp. La Habana, CEN, 1985.
- Orbera, L., Ramírez, R., López, M., Arias, A., Marqueti, M. y Crespo, R. "Las investigaciones sismotectónicas y la estabilidad de las construcciones energéticas en Cuba", en: *Primer Congreso Internacional sobre Desastres Naturales*, 27-30 enero 1987, Resúmenes, Comisión de Sismología, p. 45. Habana, 1987.
- Pico, R. y Chuy, T. "MACRO: Sistema para el procesamiento de datos macrosísmicos de las Antillas Mayores", *Resúmenes V Jornada Científica del IGA*, p. 68. 1989.
- Riznichenko, Yu. V. "De la actividad de los focos de los terremotos a la sacudibilidad de la superficie terrestre" (en ruso), *Fizika Zemli*, No. 11, pp. 1-12. 1965.
- Riznichenko, Yu. V., ed. *Sacudibilidad sísmica del territorio de la URSS* (en ruso), 192 pp. Moscú, Nauka, 1979.
- Rubio, M. "The assesment of seismic hazard for the Republic of Cuba". *Proceedings of the 3rd International Symposium on the Analysis of Seismicity and on Seismic risk*, June 17-22, pp. 424-431. Liblice Castle, Czechoslovaqia, 1985.
- Schwartz, D.P. and Coppersmith, K.J. "Fault behavior and characteristic earthquakes. Examples from the Wasatch and San Andreas fault zones", *J. Geophys. Res.*, vol. 89, No. B7, pp. 5681-5698. 1984.