

Zonación sísmica de Cuba

Leonardo Alvarez¹, Julio García¹, Ramón Pico², Dario Slejko³



¹Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Cuba

²Instituto de Cibernética Matemática y Física, Cuba

³Osservatorio Geofisico Sperimentale, Italia

Resumen

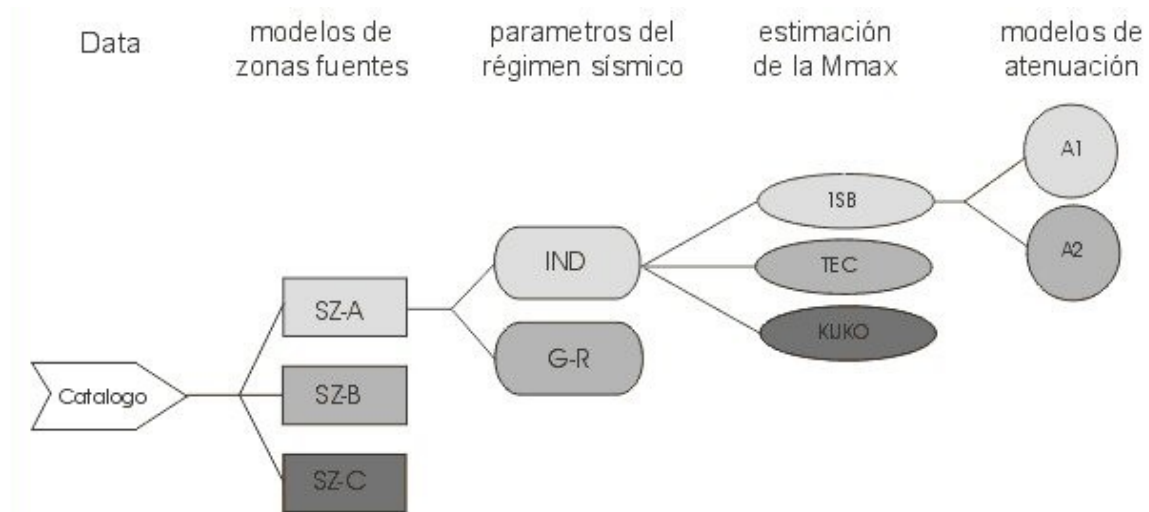
Se presentan una zonación sísmica de Cuba, realizada sobre la base de un estudio de peligrosidad sísmica probabilística utilizando técnicas de árbol lógico de decisión. En este caso se consideró la variabilidad en la selección de fuente (3 modelos diferentes), en los métodos de estimación de los parámetros de la relación magnitud frecuencia (2) y magnitud máxima (2), y en la fórmula de atenuación (2), para un total de 36 ramas del árbol. Las fórmulas de atenuación de la aceleración pico se emplearon en dos casos: suelo y roca. Los cálculos de aceleración pico esperada se hicieron 2 veces en cada caso utilizando el programa SEISRISK, una considerando el error en la fórmula de atenuación (incertidumbre aleatoria) y otra sin considerarlo. La media y la dispersión estándar (incertidumbre epistémica) de todos los estimados en cada caso fueron calculadas para diferentes valores del período de retorno, por lo que para cada punto de una red regular se obtuvieron 3 curvas de peligrosidad sísmica (límite inferior, valor central, límite superior). Las curvas de períodos de retorno para diferentes valores de aceleración pico ($TvsPGA$, $T=50, 75, 100, 200, 475, 750, 1000, 5000$ y 10000 años), obtenidas para cada punto de una red regular con celdas de aproximadamente $10\text{ Km} \times 10\text{ Km}$ fueron objeto de un proceso de clasificación con algoritmos lógico-combinatorios con vistas a obtener comportamientos típicos. Siete tipos diferentes de curva fueron individualizados tanto en roca como en suelo. La zonación sísmica entonces está formada por dos mapas donde se refleja el tipo de comportamiento $TvsPGA$ en suelo y roca, y cada uno de los tipos individuados tiene asociado un gráfico donde aparece la curva $TvsPGA$ correspondiente con su error asociado.

Introducción

Los estudios de peligrosidad sísmica de Cuba datan desde finales de los 60 del siglo pasado. Un análisis de esos trabajos pioneros aparece en (Alvarez et al., 1991). Con posterioridad a esa fecha se han realizado otros trabajos, destacándose por primera vez el uso de técnicas de árbol lógico por parte de García et al., (2003). La necesidad de considerar para una zonación sísmica mucha más información que la que habitualmente se usa [un mapa con representación de un parámetro que caracterice el peligro sísmico para un período de retorno dado (lo más común 475 años)] fue planteada por Alvarez et al. (1991). Estos autores proponían presentar no un mapa de zonación sísmica, sino un conjunto de ellos con diferentes períodos de retorno. Más adelante, considerando que la peligrosidad sísmica en un punto está definida no por un valor, sino por una función, esto es, un parámetro que caracterice el peligro sísmico, como función del período de retorno (curvas de peligro sísmico), Alvarez et al. (1995) clasificaron las curvas de peligrosidad sísmica mediante técnicas lógico - combinatorias, con vistas a obtener una zonación sísmica. En el presente trabajo se aplican esas técnicas con los mismos objetivos, esta vez usando los estimados de peligro sísmico obtenidos mediante un procesamiento complejo usando un árbol lógico de decisión.

Estimación de la peligrosidad sísmica

La estimación de la peligrosidad sísmica se realizó en términos de aceleración pico del terreno (PGA), con su error asociado. Se utilizó un árbol lógico de 36 ramas que contiene todas las variantes de decisiones sobre los datos iniciales [variabilidad en la selección de fuente (3 modelos diferentes), métodos de estimación de los parámetros de la relación magnitud frecuencia (2) y magnitud máxima (2), y fórmula de atenuación (2)]. En la figura 1 se presenta dicho árbol. El programa de cómputo utilizado fue el SEISRISK III (Bender y Perkins, 1997).



Modelos de zonas fuente	Parámetros del régimen sísmico	Estimación de la M_{max}	Relaciones de atenuación
ZS-A: Chuy y Álvarez, 1995 ZS-B: García et al., 2003 ZS-C: Este trabajo	IND: Frecuencias individuales G-R: Ajuste según la ley Gutenberg – Richter	1SB: Slejko et al., 1998 TEC: Criterios Tectónicos M3: Kijko y Graham (1998)	A1-: Ambraseys et al., 1996. A2-: Dhale et al., 1995. (roca y suelo blando)

Fig. 1. Árbol lógico de decisión usado en los estimados de peligrosidad sísmica

Este árbol lógico, de 36 ramas se calculó 4 veces, para roca y suelo blando, sin considerar la dispersión estándar de la fórmula de atenuación (incertidumbre aleatoria), y tomando ésta en consideración. En ambos casos, para cada punto de la malla se obtuvieron 36 curvas de peligro sísmico (correspondientes a las ramas del árbol lógico). El peligro sísmico no se determina seleccionando una de esas ramas, sino mediante el proceso estadístico de las mismas, que en nuestro caso fue media y dispersión estándar (incertidumbre epistémica). Finalmente se prepararon 6 conjuntos de datos:

- aceleraciones pico promedio en roca para diferentes períodos de retorno sin considerar ningún tipo de incertidumbre
- aceleraciones pico promedio en suelos friables para diferentes períodos de retorno sin considerar ningún tipo de incertidumbre

- aceleraciones pico promedio + 1 desviación estándar de las fórmulas de atenuación (incertidumbre aleatoria) en roca para diferentes periodos de retorno
- aceleraciones pico promedio + 1 desviación estándar de las fórmulas de atenuación (incertidumbre aleatoria) en suelos friables para diferentes periodos de retorno
- aceleraciones pico promedio + 1 desviación estándar de las fórmulas de atenuación (incertidumbre aleatoria) + 1 desviación estándar del procesamiento del árbol lógico (incertidumbre epistémica) en roca para diferentes periodos de retorno
- aceleraciones pico promedio + 1 desviación estándar de las fórmulas de atenuación (incertidumbre aleatoria) + 1 desviación estándar del procesamiento del árbol lógico (incertidumbre epistémica) en suelos friables para diferentes periodos de retorno

De tal forma, la estimación de la peligrosidad sísmica con su error asociado viene dada, tanto para roca como para suelos friables por 3 curvas:

límite inferior - aceleraciones pico promedio

valor central - aceleraciones pico promedio + 1 desviación estándar de las fórmulas de atenuación (incertidumbre aleatoria – SDT)

límite superior - aceleraciones pico promedio + 1 desviación estándar de las fórmulas de atenuación (incertidumbre aleatoria - SDT) + 1 desviación estándar del procesamiento del árbol lógico (incertidumbre epistémica -SD)

Por simplicidad, en lo adelante usaremos el convenio:

SDT - desviación estándar de las fórmulas de atenuación (incertidumbre aleatoria)

SD - desviación estándar del procesamiento del árbol lógico (incertidumbre epistémica)

La región de estudio engloba toda Cuba y parte de sus acuatorias, y los datos están muestreados en celdas de aproximadamente 10 Km x 10Km, para un total de 1623 puntos. Corresponden a las aceleraciones pico para los periodos de retorno de 10, 35, 50, 75, 100, 200, 475, 750, 1000, 5000, 10000, 100000 años. Con estos materiales fueron confeccionados numerosos mapas y gráficos típicos de los trabajos de estimación de la peligrosidad sísmica, que no se presentan aquí por limitaciones de espacio

Procesamiento de datos para la zonación

De los 15 valores de periodos de retorno presentes en los datos iniciales se tomaron sólo 9 que permitían dar una caracterización completa de las curvas de peligro sísmico. Estos están en el rango 50-100000 años. No obstante, las representaciones gráficas de las mismas que se presentan se reducen al rango 50-10000 años que es el que más sentido tiene para las aplicaciones normales de los estudios de peligrosidad sísmica. En la figura 2a se presenta el gráfico para la muestra completa de aceleraciones en roca para el caso de valor medio + SDT, mientras que en la 2b se presenta el gráfico correspondiente para caso de suelos friables.

Estos materiales fueron sometidos a un proceso de agrupamiento mediante técnicas lógico - combinatorias. La descripción de los algoritmos y de los programas de cómputo utilizados se sale de los objetivos del presente trabajo. Los algoritmos están descritos en los trabajos (ICIMAF, 1992; Ruiz et al. 1992; Pico 1995, 1999; Pico et al. 1997; Alvarez et al. 2005).

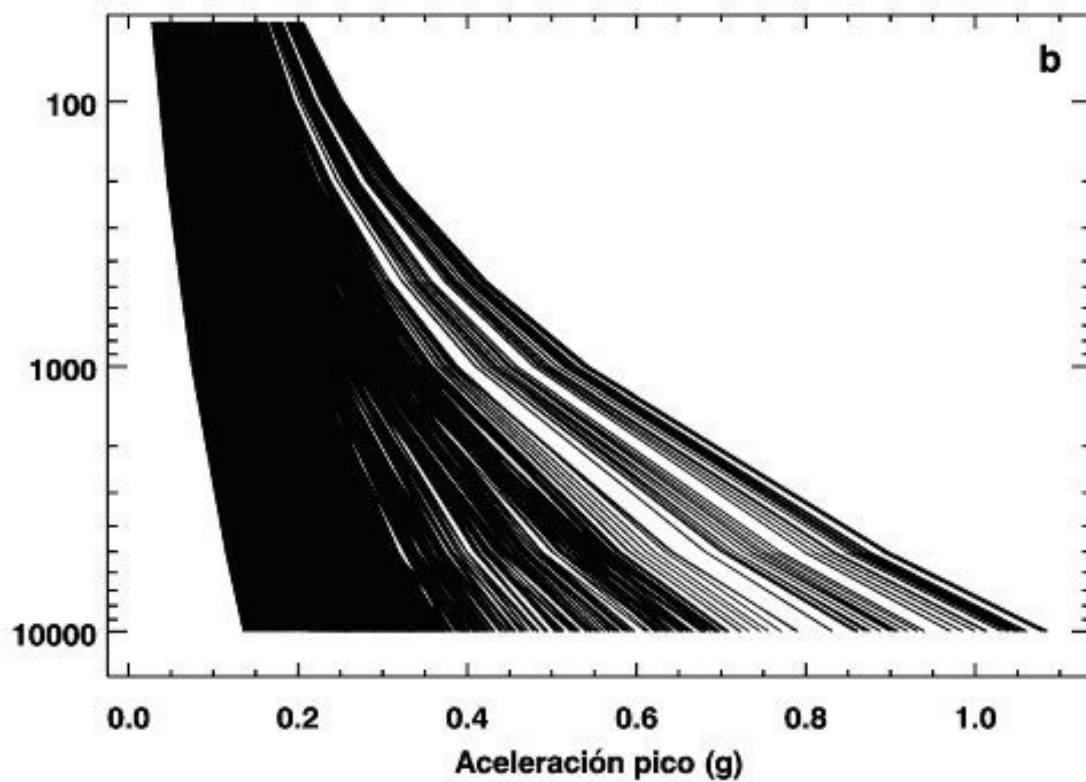
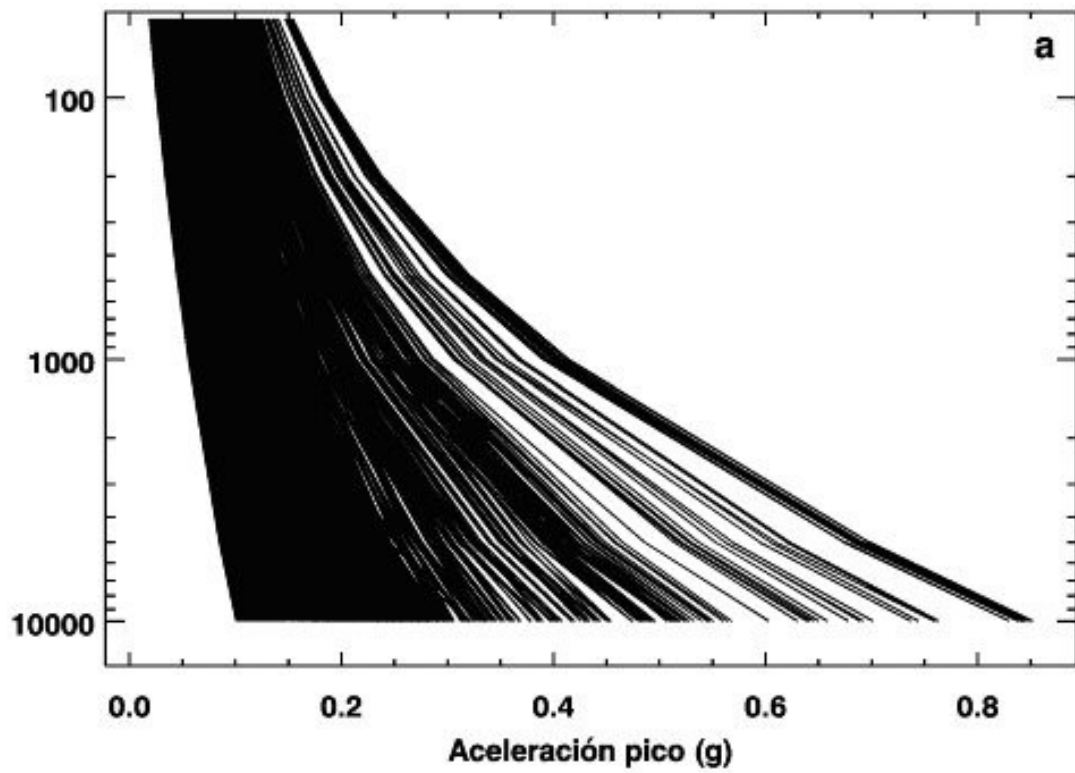


Fig 2. Curvas de período de retorno vs. aceleración pico calculadas para todos los puntos de la red, a) roca, b) suelo.blando

Se procesaron por separado las curvas correspondientes a roca y suelos blandos. Como resultado en cada caso se obtuvieron 9 grupos de curvas de peligrosidad sísmica bien diferenciados entre si que fueron representados en mapas para un análisis preliminar, donde estos grupos de puntos delineaban zonas cuasihomogéneas en cuanto a las manifestaciones de la peligrosidad sísmica. Se detectó que había algunas zonas que prácticamente sólo tenían representación en las acuatorias de la región suroriental de Cuba, lo que dificultaba el procesamiento ulterior de las mismas. Esto motivó la decisión de unir algunas de estas zonas, por lo que el número total de grupos pasó de 9 a 7. Los mapas finales se presentan en las figuras 3 y 4.

Para cada una de las 7 zonas que están presentes en ambos mapas se prepararon los gráficos de peligro sísmico asociado. Estos, como se discutió al inicio, contienen 3 curvas, un límite inferior (valor medio de PGA) un valor central (valor medio de $PGA+SDT$) y un límite superior (valor medio de $PGA+SDT+SD$). Cada curva fue obtenida promediando las ordenadas de las curvas correspondientes a los puntos pertenecientes a cada zona (Fig. 5 y 6). Para lograr que este proceso arrojase resultados lo mas fidedignos posibles, la promediación no se hizo sobre toda el área de las zonas representadas en los mapas de las figuras 3 y 4, sino que se eliminaron al máximo los puntos ubicados en las acuatorias.

Discusión

La hipótesis fundamental de este trabajo es que una zonación sísmica no debe realizarse sobre la base de un mapa de algún parámetro del movimiento del terreno o intensidad sísmica para un período de retorno seleccionado, pues se obvia mucha información que está disponible, o es muy fácil de obtener. Por el contrario, es necesario realizar los cálculos para una gama de períodos de retorno desde muy bajos hasta muy altos y asociar, a cada punto de un mapa, en lugar de un valor, la curva completa de peligrosidad sísmica. El uso de técnicas de agrupamiento y reconocimiento de patrones permite obtener comportamientos típicos de dichas curvas, los cuales serán la base de un nuevo tipo de zonación sísmica.

Tanto para roca como para suelos friables fueron obtenidos 7 tipos medios diferentes de comportamiento de las curvas de peligrosidad sísmica. Las curvas correspondientes reflejan no sólo una variación paulatina del nivel de peligro, sino también otras particularidades características del comportamiento no lineal del fenómeno estudiado que demuestran la inconsistencia de hacer extrapolaciones sobre la base de un mapa construido usando un solo punto de cada curva. Los mapas para roca y suelos friables aunque muestran la misma tendencia, reflejan diferencias menores que pueden ser explicada por el uso de expresiones no lineales diferentes para el cálculo de la atenuación en función de la distancia

Los mapas obtenidos, a diferencia de los que habitualmente se presentan en un estudio de peligrosidad sísmica, no presentan un valor por cada punto, el cual pudiera no satisfacer los requerimientos del que lo debe utilizar, sino, para cada zona, 3 curvas que representan el período de retorno en ese punto de los diferentes niveles de aceleración posibles con su error asociado (límite inferior, valor central y límite superior). Esto es, un comportamiento integral de la peligrosidad sísmica, por lo que dichos mapas constituyen verdaderas zonaciones sísmicas.

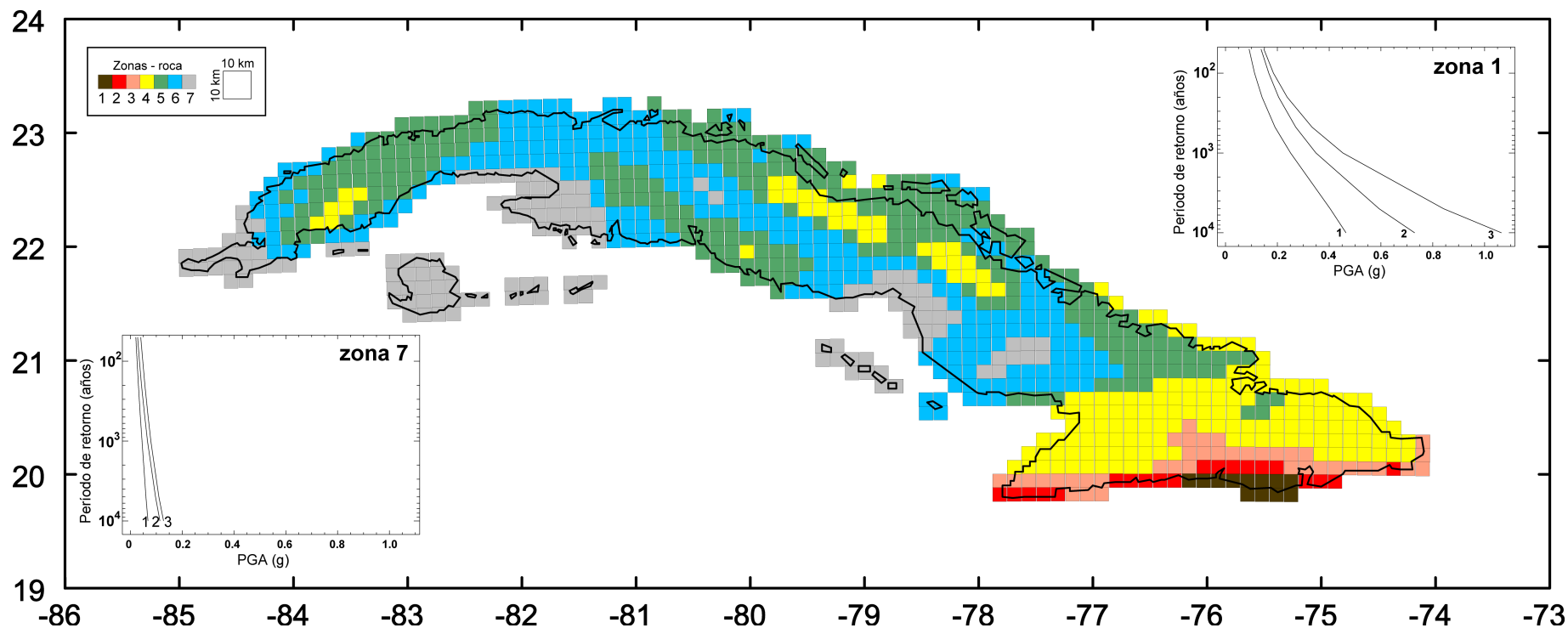


Fig 3. Mapa de zonación sísmica para roca. Los números en la leyenda corresponden a la numeración seleccionada en orden descendente del nivel de peligro sísmico. La peligrosidad sísmica asociada a cada una de las zonas se presenta en la figura 5, como ejemplo se incluyen en esta figura los gráficos sísmicos de las zonas 1 y 7, ver el texto o el pie de figura 5 para conocer el significado de los numeración de las curvas.

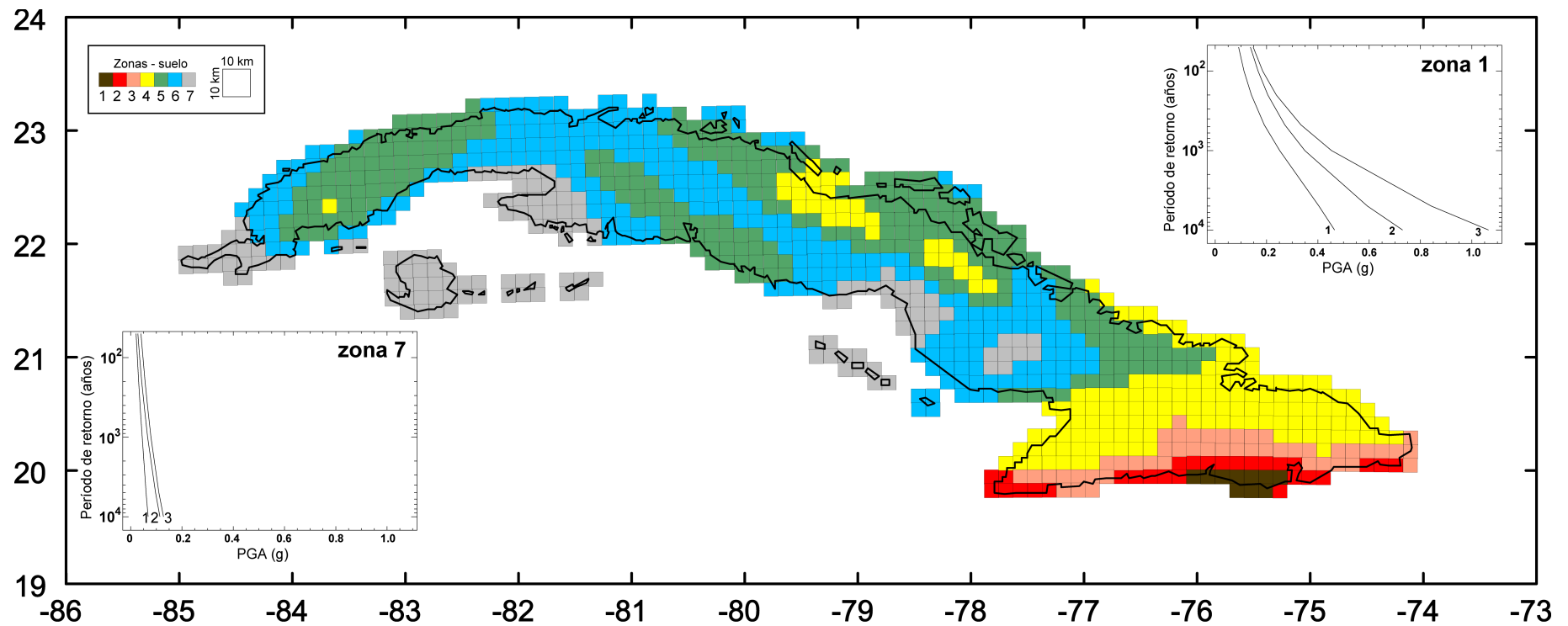


Fig 4. Mapa de zonación sísmica para suelo blando. Los números en la leyenda corresponden a la numeración seleccionada en orden descendente del nivel de peligro sísmico. La peligrosidad sísmica asociada a cada una de las zonas se presenta en la figura 6, como ejemplo se incluyen en esta figura los gráficos sísmicos de las zonas 1 y 7, ver el texto o el pie de figura 6 para conocer el significado de los numeración de las curvas.2,00

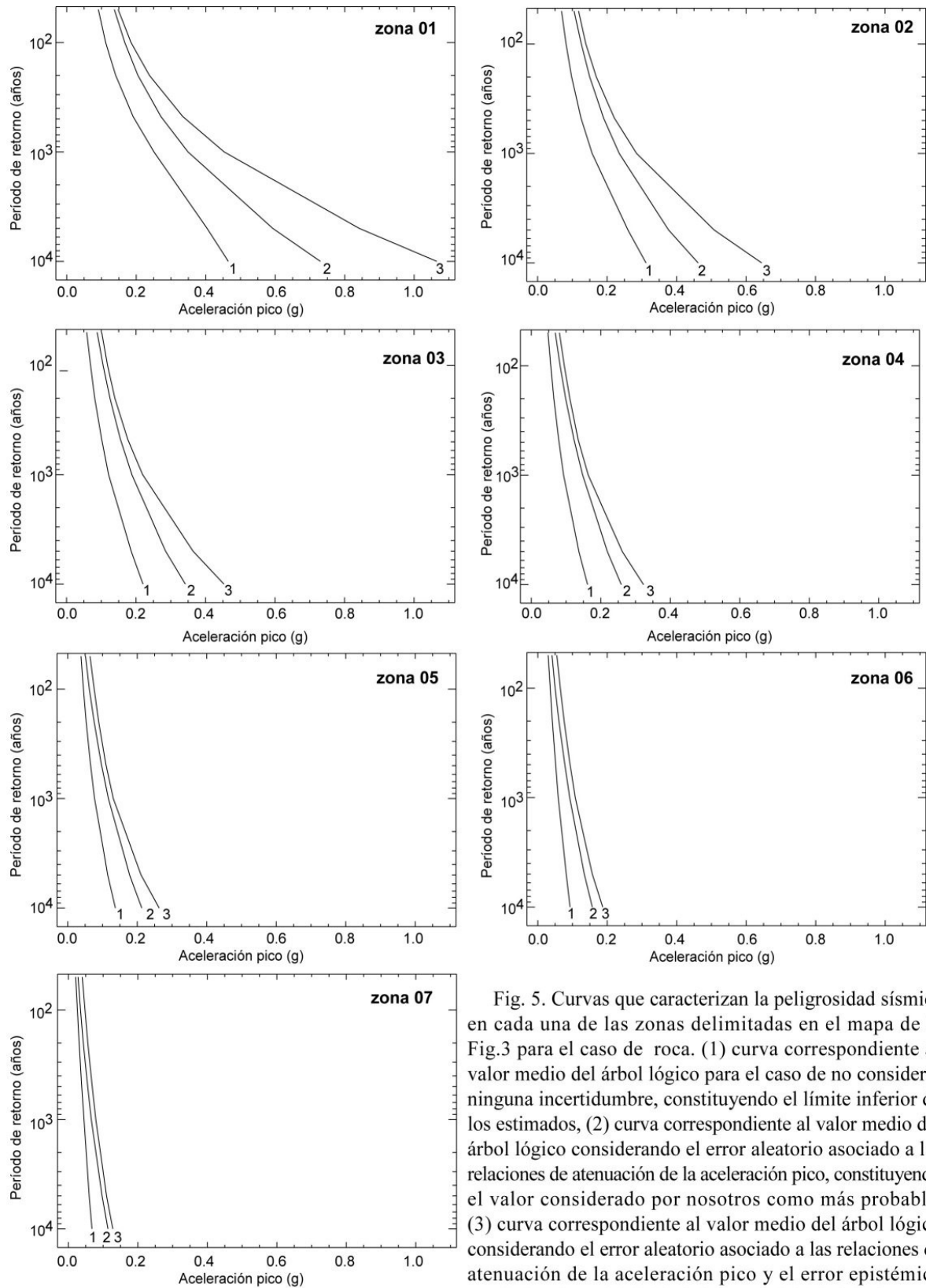


Fig. 5. Curvas que caracterizan la peligrosidad sísmica en cada una de las zonas delimitadas en el mapa de la Fig.3 para el caso de roca. (1) curva correspondiente al valor medio del árbol lógico para el caso de no considerar ninguna incertidumbre, constituyendo el límite inferior de los estimados, (2) curva correspondiente al valor medio del árbol lógico considerando el error aleatorio asociado a las relaciones de atenuación de la aceleración pico, constituyendo el valor considerado por nosotros como más probable, (3) curva correspondiente al valor medio del árbol lógico considerando el error aleatorio asociado a las relaciones de atenuación de la aceleración pico y el error epistémico asociado a la multiplicidad de ramas del árbol lógico para las que se realizaron los cálculos.

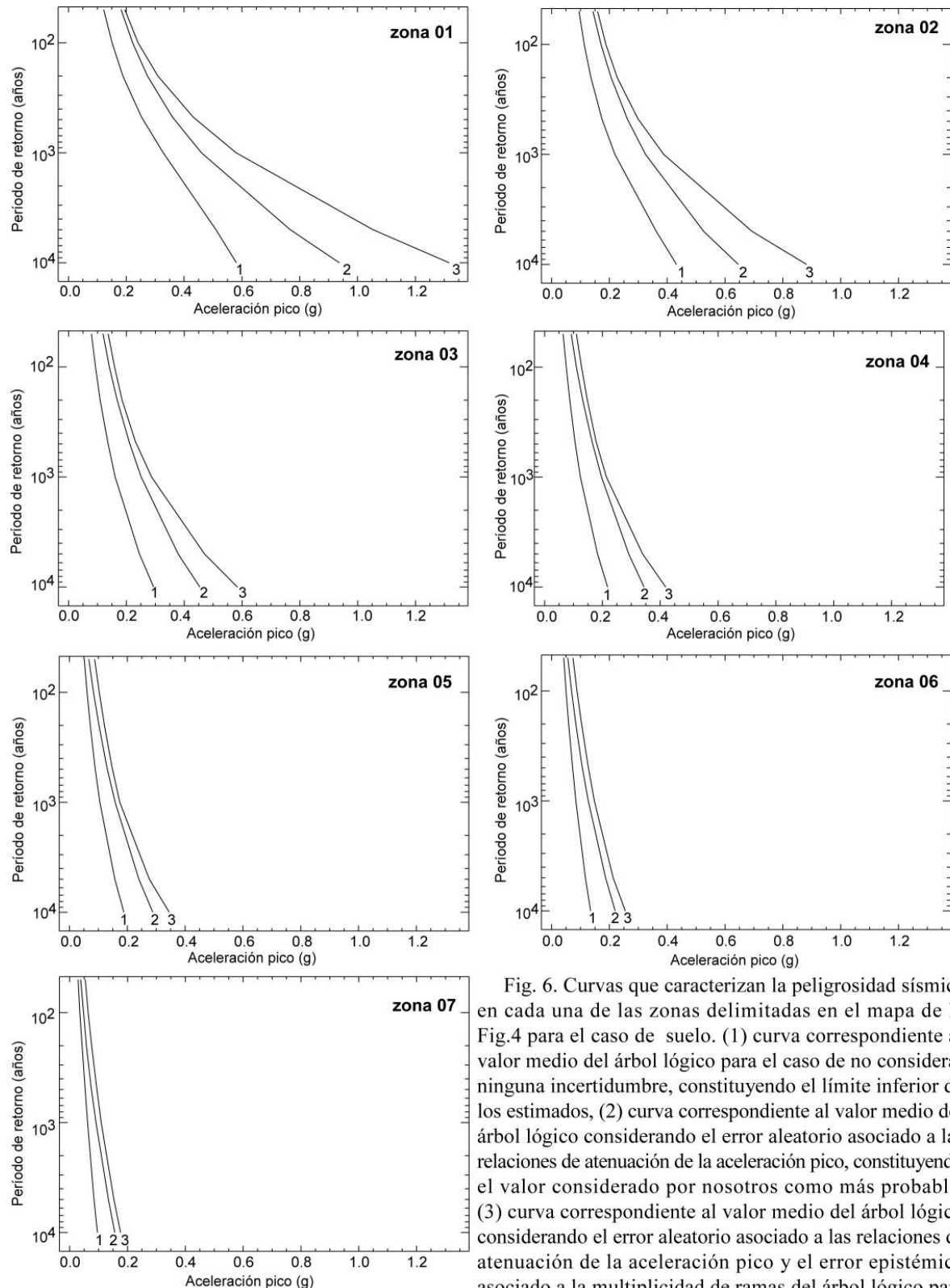


Fig. 6. Curvas que caracterizan la peligrosidad sísmica en cada una de las zonas delimitadas en el mapa de la Fig.4 para el caso de suelo. (1) curva correspondiente al valor medio del árbol lógico para el caso de no considerar ninguna incertidumbre, constituyendo el límite inferior de los estimados, (2) curva correspondiente al valor medio del árbol lógico considerando el error aleatorio asociado a las relaciones de atenuación de la aceleración pico, constituyendo el valor considerado por nosotros como más probable, (3) curva correspondiente al valor medio del árbol lógico considerando el error aleatorio asociado a las relaciones de atenuación de la aceleración pico y el error epistémico asociado a la multiplicidad de ramas del árbol lógico para las que se realizaron los cálculos.

Este es un nuevo tipo de zonación sísmica. Habitualmente, en el mapa con división en zonas sólo se da la información mínima: valor del parámetro en que se hizo (PGA, intensidad, etc.) y período de retorno correspondiente. Sin embargo nosotros

presentamos un mapa con la clásica división en zonas, y para cada zona un gráfico, donde la persona que utilizaría la zonación debe seleccionar el nivel de peligro que responda a sus objetivos específicos.

Conclusiones

- 1) Las curvas de peligrosidad sísmica (aceleración pico vs. período de retorno) de 1623 puntos en Cuba y sus acuatorias (red de aproximadamente 10Km x 10Km) fueron obtenidas a partir del procesamiento estadístico de los resultados de un estudio de peligrosidad sísmica de Cuba del tipo de árbol lógico
- 2) Las curvas correspondientes a los casos de roca y suelo friable, fueron clasificadas utilizando algoritmos lógico combinatorios, obteniéndose 7 grupos en cada caso. Los resultados fueron representados en mapas donde las zonas reflejan el grupo a que se asocia cada punto. Para cada zona se confeccionó un gráfico de peligro sísmico integral: período de retorno vs. PGA en 3 curvas (límite inferior, valor central y límite superior)
- 3) La zonación sísmica se compone de ese mapa y de los gráficos con las curvas de aceleración pico vs. período de retorno (con su error asociado) para cada uno de los zonas. El uso del mismo es simple. Para la zona donde se encuentre el punto de interés se busca en el gráfico asociado el nivel de peligro que corresponde a los objetivos específicos del usuario.

Bibliografía

- ALVAREZ, L.; CHUY, T.; COTILLA, M. (1991): Peligrosidad sísmica de Cuba. Una aproximación a la regionalización sísmica del territorio nacional. Revista Geofísica del IPGH, No. 35, pp. 125-150.
- ALVAREZ, L.; PICO, R.; COTILLA, M. (1995): Clasificación no-supervisada por métodos lógico-combinatorios en problemas de zonación sísmica. Reporte de Investigación del Instituto de Cibernética, Matemática y Física, ICIMAF 95-09, 18 pp.
- ALVAREZ, L.; VACCARI, F.; PANZA, G.F.; PICO, R. (2005): [Seismic microzoning from synthetic ground motion parameters: case study, Santiago de Cuba](#). Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 25, No. 5, pp. 383-401.
- AMBRASEYS, N.N.; SIMPSON, K.A.; BOMMER, J.J. (1996): Prediction of horizontal response spectra in Europe. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 25(4), pp. 371-400.
- BENDER, B.; PERKINS, D.M. (1987): SEISRISK III: A computer program for seismic hazard estimation, U. S. Geological Survey Bulletin 1772, Denver, Colorado, 48 pp.
- CHUY, T.; ALVAREZ, L. (1995): Mapa de peligrosidad sísmica de Cuba para la nueva norma sísmica de la República de Cuba. CENAIIS, folleto, 21 pp.
- DAHLE, A.; CLIMENT, A.; TAYLOR, W.; BUNGUM, H.; SANTOS, P.; CIUDAD REAL, M.; LINHOLM, C.; STRAUCH, W.; SEGURA, F. (1995): New spectral strong motion attenuation models for Central America. En: Proceedings of the

- Fifth International Conference on Seismic Zonation, vol. II, pp. 1005-1012.
- GARCÍA, J.A; SLEJKO, D.; ALVAREZ, L.; PERUZZA, L.; REBEZ, A. (2003): Seismic hazard maps for Cuba and surrounding areas, Bull. Seism. Soc. Am., vol 93, No. 6, pp. 2563-2590.
- ICIMAF (1992): PROGNOSIS, versión 2.1. Software para las geociencias. Manual de usuario, 154 p.
- KIJKO, A.; GRAHAM, G. (1998): Parametric-historic procedure for probabilistic seismic hazard analysis. Part I: Estimation of maximum regional magnitude Mmax. Pure Appl. Geophys., vol 152, pp. 413-442.
- PICO, R. (1995): Determinación del parámetro β_0 para los algoritmos de agrupamiento lógico-combinatorios. Conferencia Internacional "Ciencia y tecnología para el desarrollo", CIMAF'95. I Taller Iberoamericano de reconocimiento de patrones, La Habana, 1995. Resúmenes, pp. 99-100.
- PICO, R. (1999): Determinación del umbral de semejanza β_0 para los algoritmos de agrupamiento lógico-combinatorios, mediante el dendrograma de un algoritmo jerárquico. SIARP'99, IV Simposio Iberoamericano de Reconocimiento de Patrones, La Habana, 1999, Memorias, pp. 259-265.
- PICO, R.; ALVAREZ, L.; COTILLA, M. (1997): Zonación sísmica de Cuba mediante algoritmos de clasificación lógico-combinatorios. En: II Taller Iberoamericano de Reconocimiento de Patrones, TIARP'97, La, Habana, Marzo 1997, Memorias, pp. 245-250.
- RUIZ, J.; PICO, R.; LÓPEZ, R.; ALAMINOS, C.; LAZO, M.; BAGGIANO, M.; BARRETO, E.; SANTANA, A.; ALVAREZ, L.; CHUY, T. (1992b): PROGNOSIS y sus aplicaciones a las geociencias. En: 3er Congreso Iberoamericano de Inteligencia Artificial, IBERAMIA- 92, La Habana, 17 al 22 de enero de 1992, Memorias, pp. 561-586. México, LIMUSA, 1992.
- RUIZ, J.; PICO, R.; ALAMINOS, C.; LAZO, M.; BAGGIANO, M.; BARRETO, E.; SANTANA, A.; ALVAREZ, L.; CHUY, T. (1993): Prognosis y sus Aplicaciones a las Geociencias. Revista Ciencias Matemáticas. Vol 14, No 2-3. pp. 124-144.