



CENAIIS

Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas

Programa Nacional Especial de la Defensa Civil

Proyecto No. 03301011

***Nueva generación de estimados de peligrosidad
sísmica con el error asociado para Cuba y
cálculo de pérdidas para la ciudad de Santiago
de Cuba usando técnicas SIG***

Informe Final

La Habana, agosto de 2005

Identificación del Proyecto:

Programa: Programa Nacional Especial de la Defensa Civil

Código: Proyecto No: 03301011

Título: Nueva generación de estimados de Peligrosidad Sísmica con el error asociado para Cuba, y cálculo de pérdidas para la ciudad de Santiago de Cuba usando técnicas SIG.

Institución Ejecutora: Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS).

Instituciones Coejecutoras:

- Instituto de Cibernética, Matemática y Física (ICIMAF).
- Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS).

Colectivo de autores:

José Leonardo Álvarez Gómez (CENAIIS): Jefe del Proyecto, 50% del tiempo

Julio Antonio García Peláez (CENAIIS): Ejecutor Principal, 100 % del tiempo

Ramón Pico Peña (ICIMAF): 10% del tiempo

Pedro Iván Márquez Mercerón (CENAIIS): 25% del tiempo

Grisel Morejón Blanco (CENAIIS): 10% del tiempo

Julio César Vázquez Batista (CENAIIS): 10% del tiempo

Yelena Berenguer Heredia (CENAIIS): 10% del tiempo

Enrique Diego Arango Arias (CENAIIS): 10% del tiempo

Dario Slejko (OGS, Italia): 20% del tiempo

Laura Peruzza (OGS, Italia): 5% del tiempo

Alessandro Rebez (OGS, Italia): 5% del tiempo

Marco Santulin (OGS, Italia): 2% del tiempo

Cumplimiento de los plazos:

Durante el primer año de ejecución los plazos se cumplieron estrictamente, pero ya comenzaba a perfilarse la necesidad de ejecutar otras tareas no planificadas inicialmente. En general, fueron dos los aspectos que contribuyeron a la necesidad de modificar el plan de trabajo del proyecto:

- ampliación de objetivos para incluir otras técnicas no previstas inicialmente y mejorar la calidad de los estimados de peligrosidad sísmica a obtener
- imposibilidad de obtener la información del Censo del 2002 lo que impedía realizar los estimados de pérdidas para la ciudad de Santiago de Cuba de la manera prevista
- imposibilidad de utilizar el programa HAZUS-99

En el primer caso fue nuestra decisión la inclusión de los primeros trabajos de estimación de la peligrosidad sísmica por el método no zonificado (epígrafe I.1 y anexo 1 del informe técnico), para el cual recientemente se habían hecho accesibles los programas de cómputo necesarios. Por otra parte, los resultados obtenidos en el primer año con las pruebas realizadas con el programa P4 (ver informe del proyecto del año 2003) nos decidieron a incluir otro algoritmo en dicho programa (ver epígrafe I.4 del informe técnico). Ambas cuestiones fueron la base de la decisión tomada a fines del 2004 de solicitar una prórroga de 3 meses para la entrega del informe.

En el segundo caso la situación era completamente diferente y nos encontramos ante dos alternativas: eliminar del proyecto lo que dependía de la información del Censo, lo cual estaría “técnicamente justificado” (pero implicaba una reducción de objetivos), o tratar de mejorar los resultados del proyecto (que el CENAIIS entregó en el 2002)

“Riesgo sísmico de Santiago de Cuba”, utilizando la base de conocimiento adquirida en este proyecto. Se tomó esta última decisión, aunque no teníamos idea del tiempo que nos llevaría llevarlo a cabo, y no solicitamos prórrogas adicionales.

Un tercer problema no previsto fue la imposibilidad de utilizar una versión del programa HAZUS-99 para la estimación de los daños y las pérdidas a partir de las funciones de vulnerabilidad obtenidas para un grupo importante de sistemas constructivos presentes en la ciudad. El módulo encargado de generar los datos de partida no funcionaba correctamente y a pesar de contar con la ayuda de personal calificado (laboratorio de informática del OGS) no pudimos hacerlo funcionar.

Al vencerse el plazo de entrega del informe, la parte correspondiente a la tarea de “estimación de la peligrosidad sísmica” fue discutida y aprobada en el Consejo Científico del CENAIIS (ver Capítulo I del informe técnico), pero la tarea correspondiente al cálculo de pérdidas para la ciudad de Santiago de Cuba sólo pudo ser analizada parcialmente (epígrafes II.1 – II.4 del informe técnico), por lo que no pudo ser entregado en fecha el mismo. Se puso a disposición del oponente la parte del informe técnico concluido y se realizó una entrega parcial al cliente de un programa de cómputo para calcular pérdidas materiales y humanas en caso de terremotos. Finalmente esta tarea pudo ser concluida (epígrafes II.5 – II.6 del informe técnico), y se presenta el informe final con casi 5 meses de retraso.

Correspondencia entre los objetivos planteados en el proyecto y los resultados alcanzados:

Los objetivos planteados fueron sobrecumplidos en el caso de la estimación de la peligrosidad sísmica para Cuba. En el caso del cálculo de pérdidas para la ciudad de Santiago de Cuba, los objetivos que no dependían del Censo del 2002 fueron alcanzados (en algunos casos sobrecumplidos) y los que dependían de dichos datos fueron adecuadamente sustituidos por otros que aprovechaban los datos recopilados en ocasión del proyecto antes mencionado “Riesgo sísmico de Santiago de Cuba” (CENAIIS, 2002).

Nivel de ejecución y análisis del presupuesto de gastos asignado y otros recursos utilizados, no otorgados por el financista, especificando por quien.

Se ejecutó todo el presupuesto asignado por el financista, las posibles fuentes de inejecución (dietas y salario) fueron compensadas con la compra de bases de datos en formato digital necesarias para cumplir los nuevos objetivos propuestos.

El CENAIIS asumió una buena parte del costo de la base geológica digital comprada al IGP.

Es necesario adicionar el financiamiento otorgado por el Centro Internacional de Física Teórica (ICTP) y el OGS, mediante bolsas de estudio, uso de medios de cómputo de última generación, software especializado y el pago de las publicaciones en revistas indexadas de alto nivel científico.

Correspondencia entre la relación costo - beneficio alcanzada y la prevista (económico, ambiental, social, etc.)

Evaluar la relación costo - beneficio en una investigación sismológica es difícil. Nuestro objetivo es, en primer lugar, evitar las pérdidas de vidas humanas, y en segundo lugar la

preservación del patrimonio en caso de ocurrencia de terremotos fuertes. Esto lo logramos en este proyecto en dos niveles:

NORMAS DE CONSTRUCCIÓN: El CENAIS participa activamente en el proceso de preparación, revisión y actualización de la norma para construcciones en zonas sísmicas. Los resultados de la primera tarea de este proyecto deben ser incluidos en la próxima edición de dicho documento. Además la base de datos obtenida servirá para cualquier trabajo aplicado a la construcción de objetos de obra específicos en cualquier lugar del país

DEFENSA CIVIL: El CENAIS trabaja estrechamente vinculado con la Defensa Civil en la preparación de planes de emergencia para caso de terremotos. Los resultados de la segunda tarea serán de gran utilidad para la DC ya que permitirán realiza estimados más cercanos a la realidad de las pérdidas de diversa índole que pueden ocurrir en caso de terremotos fuertes, y en consecuencia preparar sus planes de intervención con mucha mayor calidad.

Valoración cualitativa de:

Rigor científico del trabajo realizado

El trabajo fue realizado con un gran rigor científico. No se dio por concluida ninguna etapa hasta tanto no se estuviese seguro de la calidad de los resultados obtenidos.

Se utilizaron procedimientos y metodologías de las más actualizadas en estos momentos para la estimación del peligro, los daños y las perdidas por la ocurrencias de terremotos. Se utilizaron además medios de computo y software de alto nivel científico. Lográndose un intercambio directo y continuo con científicos de otros países e las Instituciones a que ellos pertenecen. Este rigor se demuestra en que hasta el momento se ha publicado un artículo (y otro ha sido ya aceptado para publicar) en una de las más prestigiosas revistas de sismología del mundo (Bulletin of the Seismological Society of America). Otros artículos están en preparación, que por falta de tiempo no se ha podido concluir.

Nivel de actualización de los resultados

Se utilizó una extensa y variada bibliografía sobre la temática, tanto de autores nacionales como extranjeros, predominando artículos, informes y reportes de investigación de los últimos 10 años.

Los resultados obtenidos tienen un nivel de actualización mundial. Se usaron los datos más actualizados disponibles, las últimas técnicas en uso en la especialidad tratada, y donde se requería, se realizaron aportes modestos, pero de calidad.

Magnitud y características del aporte alcanzado: repercusión nacional o internacional, patente, doctorado, eventos, publicaciones, etc.

La repercusión mayor de este trabajo es nacional, aunque sus resultados y experiencias pueden ser generalizados en países del área con los mismos problemas y características similares.

Por primera vez en Cuba se realizan estimados de peligrosidad sísmica con su error asociado y se obtiene un mapa de zonación sísmica basado en el comportamiento integral del fenómeno, y no de una realización particular del mismo.

Por otra parte se mejora sensiblemente la capacidad de estimar las pérdidas en caso de terremotos. Los resultados presentes forman parte de la tesis de doctorado del Ing. Julio Antonio García Peláez, que debe ser defendida a finales del año próximo.

Artículos publicados:

Julio García, Dario Slejko, Leonardo Alvarez, Laura Peruzza, and Alessandro Rebez (2003): Seismic Hazard Maps for Cuba and Surrounding Areas. Bul. Seism. Soc. of Am., Vol. 93, No. 6, pp. 2563–2590.

Julio García, Dario Slejko, Leonardo Alvarez, Alessandro Rebez and Marco Santulin. Seismic Hazard Map for the Cuban Region Using the Spatially Smoothed Seismicity Approach(aceptado para publicar en Bul. Seism. Soc. of Am.)

Ponencias presentadas a eventos:

Los resultados del proyecto fueron presentados por los participantes en eventos nacionales como:

- VI Congreso Internacional sobre desastres (2003).
- I Evento Nacional: Prevención y Mitigación de desastres (2004).
- Taller Nacional de la DCN para caso de sismo (2004).

e internacional como:

- 32 Congreso Internacional de Geología, Italia (2004).

Nivel de Generalización: propuesta, alcanzada y posible.

Los estimados de Peligrosidad Sísmica obtenidos forman parte de la propuesta del CENAIIS al CONSE para la actualización de la Norma sismorresistente de nuestro país. La base de datos resultante de este estudio en forma de tablas, curvas y mapas serán por lo tanto de uso inmediato de los ministerios y Instituciones que se relacionan a continuación:

- **Ministerio de la Construcción:** En el diseño sismorresistente de las futuras construcciones y el reforzamiento y rehabilitación de las ya existentes.
- **Direcciones Provinciales de Planificación Física:** Para el planeamiento territorial y la toma de decisiones para el uso del suelo.
- **Empresas Aseguradoras.** Para el cálculo de las primas.
- **MINFAR :** En el diseño y construcción de obras fortificadas y protectoras.
- **Estado Mayor Nacional de la DC y Órgano de la DC de Santiago de Cuba.** Utilizará sus resultados en la confección de los planes de medidas contra desastres sísmicos y el cálculo de las potenciales pérdidas humanas y materiales, así como en la compatibilización de nuevas inversiones en el territorio.

Por otra parte, las técnicas y métodos de calculo utilizadas para obtener los resultados pueden ser generalizadas a otras áreas de nuestro país y el área de Centroamérica y el caribe donde existan condiciones similares. De hecho ya hemos recibido propuestas de colaboración en ese sentido de países del área como Perú.

Grado de satisfacción de las necesidades del cliente.

Esto será comunicado por el cliente en documento aparte.

Vínculo con instituciones extranjeras o internacionales.

El vínculo principal con instituciones extranjeras fue con el Centro Internacional de Física Teórica de Trieste (ICTP), Italia, el cual financió diversos viajes de L. Alvarez y J. García en el transcurso del proyecto, y, mediante su programa para entrenamiento e

investigación en laboratorios italianos (TRIL), garantizó la participación del Observatorio Geofísico Experimental (OGS), de Trieste en estas investigaciones. Como se puede ver en diversos epígrafes del informe, varios científicos de dicha institución tomaron parte activa en la misma, y en particular el Dr. Dario Slejko, es co-tutor del trabajo de doctorado del Ing. J. García.

Resumen

En el proyecto se trataron dos aspectos diferentes, pero que están relacionados entre sí: la estimación de la peligrosidad sísmica con su error asociado y el cálculo de pérdidas para el caso de terremotos fuertes. El primer aspecto parte de una hipótesis que actualmente es aceptada universalmente, de que es imposible obtener una estimación de peligrosidad sísmica robusta si la selección de datos de partida y de los métodos de procesamiento es unívoca. Las características de ambos hacen que cualquier combinación posible de ellos sea igualmente confiable, por lo que una estimación robusta debe considerar una multiplicidad de variantes. Esto es conocido como técnica de árbol lógico de decisión. En nuestro caso se consideró la variabilidad de selección de fuente (3 modelos diferentes), métodos de estimación de los parámetros de la relación magnitud frecuencia (2) y magnitud máxima (2), y de fórmula de atenuación (2), para un total de 36 ramas del árbol en el caso del método zonificado (se hicieron pruebas con el método noo zonificado con 24 ramas). Los cálculos de aceleración pico esperada se hicieron 2 veces utilizando el programa SEISRISK, una considerando el error en la fórmula de atenuación (error epistémico) y otra sin considerarlo. La media y la dispersión estándar (error aleatorio) fueron calculadas para diferentes valores del período de retorno, por lo que para cada punto de una red regular se obtuvieron 3 curvas que representan la peligrosidad sísmica con su error asociado. Numerosos mapas fueron preparados representando diversas facetas de la peligrosidad sísmica de Cuba. Las curvas mencionadas fueron objeto de un proceso de clasificación con algoritmos lógico-combinatorios con vistas a obtener comportamientos típicos. Como resultado se obtuvo un esquema de zonación sísmica, cualitativamente diferente de los usados hasta la fecha.

En el segundo aspecto se trabajó en dos líneas diferentes. La primera de ellas iba orientada al cálculo de pérdidas sobre la base de considerar los efectos de los terremotos en términos de aceleración pico (resultado fundamental de la parte anterior) usando el programa HAZUS-99. Esto requería información de dos tipos: curvas de capacidad y fragilidad de las construcciones típicas y creación de un nuevo inventario de construcciones existentes en la ciudad. Lo primero se realizó por dos técnicas, una de ellas de análisis comparativo de las construcciones típicas de la ciudad con relación a aquellas que ya tenían determinadas curvas de capacidad en la literatura, y otra de obtención de esas curvas de capacidad mediante el método de “pushover”, para el caso de disponer de la información de proyecto necesaria. La creación del inventario y la clasificación de las construcciones según los requerimientos de la metodología empleada se realizó en 2 etapas: 1- información recogida en el catastro, 2- verificación de los datos y adquisición de nuevos parámetros mediante técnica de campo. La primera etapa se concluyó de manera satisfactoria para toda el área de estudio, mientras que debido a problemas de financiamiento (en divisas, transporte principalmente) solo se pudo ejecutar la segunda etapa para un distrito de la ciudad (de 4).

Al no tener acceso a la información del Censo del 2002, esta línea tuvo que ser concluida a este nivel y los esfuerzos se trasladaron al mejoramiento de la estimación de los daños y el cálculo de pérdidas sobre la base de considerar los efectos en término de intensidades sísmicas. No obstante, a partir de los nuevos estimados de peligrosidad sísmica obtenidos y la información recogida en el inventario a nivel de edificación, se pudo mejorar el escenario de riesgo propuesto en el proyecto: “Riesgo sísmico de Santiago de Cuba” (CENAI, 2002). Se estimaron los daños utilizando dos matrices de probabilidad de daños [(Oliva (2000) y SES (2002)], la primera se basa en la definición

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

de los daños de la escala MSK y la segunda en la escala EMS de reciente introducción en nuestro país. Las pérdidas humanas (muertos y heridos) y personas sin hogar fueron obtenidas utilizando la base de cálculo propuesta en este mismo trabajo. Toda esta información forma parte de un proyecto SIG.

Capítulo 1

Evaluación de la peligrosidad sísmica (con su error asociado) a partir del uso de árboles lógicos de decisión

1.1 Diseño del árbol lógico. Primeros resultados

Julio García¹, Leonardo Alvarez¹, Dario Slejko², Laura Peruzza², Alessandro Rebez², Marco Santulin²

¹Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS)

²Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Italia (OGS)

Introducción

El análisis de la peligrosidad sísmica o peligro sísmico (PS) a la que esta expuesto un sitio o área involucra varios factores: un modelo de ocurrencia de las sacudidas sísmicas, un catálogo de terremotos, un mapa de zonas o fallas sismogeneradoras y un modelo de atenuación de las sacudidas sísmicas, con el fin de dar respuesta a tres incógnitas fundamentales:

- Donde ocurren los terremotos?
- Con que frecuencia?
- Cual será la intensidad de las sacudidas esperadas?

Este tipo de estimación normalmente se hace a partir de dos enfoques o metodologías:

1. **Enfoque no - paramétrico o no-zonificado:** Esta metodología es frecuentemente usada en áreas con una sismicidad moderada, pero que cuentan con una amplia información macrosísmica – histórica (> 500 años). Terremotos históricos de gran intensidad en el período no-instrumental, un conocimiento insuficiente sobre la actividad sísmica (no ocurrencia de eventos de gran intensidad en el período instrumental) y sobre el comportamiento geodinámico de las zonas sismogeneradoras.
2. **Enfoque paramétrico o zonificado:** Esta metodología es ampliamente usada en áreas con (o sin) una larga y bien documentada historia sísmica. Un conocimiento adecuado de la actividad sísmica y de la tectónica garantizan un buen resultado final.

Ambas metodologías tienen sus ventajas y desventajas:

El **enfoque no- zonificado** nos permite reproducir de un modo rápido y fácil, la sismicidad futura, en base a lo que hasta ese momento ha ocurrido en el pasado, siempre y cuando la información contenida en el catálogo sea lo suficientemente amplia y completa. La falta de homogeneidad, representatividad y completamiento del catálogo introducen una notable incertidumbre en el proceso de cálculo y de ello dependerá la robustez de los estimados. Otra desventaja es que sólo se tiene en cuenta la información contenida (o compilada) en el catálogo, por lo tanto, no es posible considerar la ocurrencia de eventos con un período de recurrencia mayor que el período que recoge el catálogo de terremotos usado.

El **enfoque paramétrico o zonificado**, por otra parte, nos permite caracterizar zonas o fallas, las cuales de alguna manera son responsables de eventos con un período de retorno mayor al recogido (compilado) por el catálogo de terremotos. Sin embargo, en la mayoría del casos, la delimitación y la caracterización paramétrica de estas zonas sismogeneradoras introduce un número grande de incertidumbres en la evaluación de la peligrosidad sísmica. La asociación de los eventos a estas zonas sismogeneradoras (sean instrumentales o macrosísmicos históricos), la estimación de la magnitudes máximas (M_{max}) de las mismas, y la determinación del patrón de atenuación de las sacudidas sísmicas, parámetros necesarios en el proceso de cálculo, se basan en ocasiones en interpretaciones de datos limitados y juicios subjetivos.

Los modelos empleados para obtener el peligro sísmico reflejan estas inevitables incertidumbres. En ambas metodologías o enfoques están presentes cierto número de incertidumbres, asociadas al conocimiento insuficiente de los parámetros de entrada y a que aún los

modelos estadísticos utilizados no logran representar con exactitud el fenómeno estudiado. En este sentido, y con el objetivo de estimar, conocer y controlar las diferentes incertidumbres asociadas al proceso de estimación de la peligrosidad sísmica, se propone el uso de un árbol lógico de decisión (McGuire and Shedlock, 1981; Coppersmith and Youngs, 1986,1990), a partir del cual obtener, para cada una de sus “ramas”, un valor de peligrosidad sísmica (aceleración, velocidad, desplazamiento, intensidad macrosísmica, etc.) con un cierto nivel o grado de incertidumbre, reflejado numéricamente por el error asociado a su estimación.

Este estudio se desarrolla en dos partes. La primera involucra la creación del árbol lógico de decisión a partir del cual se definirán los diferentes métodos de cálculo y los parámetros involucrados en el proceso de estimación de la peligrosidad sísmica, de acuerdo al estado del conocimiento que sobre esta temática se cuenta en el país hasta el momento.

Posteriormente, se lleva a cabo la estimación de las curvas de peligro sísmico para una red de aproximadamente 10 km. x 10 km., a partir de la información contenida en cada una de las ramas del árbol lógico propuesto, con la finalidad de poder proporcionar el valor (o los valores) mas representativos de la estimación de la peligrosidad sísmica y evaluar su incertidumbre. Este proceso nos permitirá identificar la influencia de la variación de los parámetros de entrada en los resultados finales, a partir del estudio del error asociado al resultado obtenido en cada una de las celdas de la región de estudio.

La misma está comprendida entre los 16°N-24°N y los 67°W-85°W (ver figura 1.1), incluye las islas de Cuba, Jamaica y la Española. Esta región tiene una historia sísmica conocida de aproximadamente 500 años, una actividad sísmica moderada y el comportamiento de las diferentes estructuras tectónicas presentes en el área es bastante complejo, por lo que se propone dividir el árbol lógico en dos grandes ramas asociadas a las dos metodologías descritas en la introducción. El procedimiento de estimación de la peligrosidad sísmica aquí propuesto considera una síntesis entre el enfoque no-zonificado [método propuesto por Riznichenko (1965) y modificado por Frankel (1995)] y el zonificado (método de Cornell, 1968). La variabilidad (incertidumbre) inherente en ambas metodologías será introducida en el proceso de evaluación de la peligrosidad sísmica a partir del árbol lógico propuesto, pudiendo estudiarse estas incertidumbres de una manera más amplia.

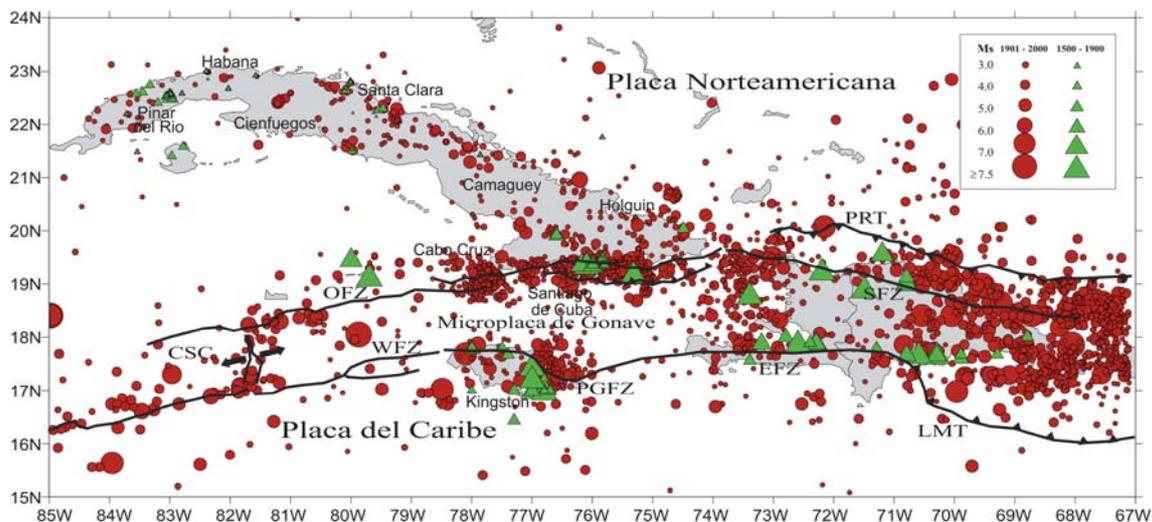


Figura 1.1 - Terremotos independientes del área de estudio (1502–2000, $M_s \geq 3$): los triángulos representan los eventos históricos (pre-1900), los círculos muestran los eventos del siglo XX. Los principales sistemas de fallas del límite de placa se indican a partir de las siguientes abreviaturas: CSC, “Cayman spreading center”(centro de generación de corteza oceánica de Caimán); WFZ, “Walton fault zone”(zona de fallas Walton); OFZ, “Oriente fault zone”(zona de fallas Oriente); PGFZ, “Plantain Garden fault zone”(zona de fallas Plantain Garden); EFZ, “Enriquillo fault zone”(zona de fallas Enriquillo); SFZ, “Septentrional fault zone”(zona de fallas Septentrional); PRT, “Puerto Rico trench”(depresión de Puerto Rico); LMT, “Los (Muertos trench”(depresión de

Los Muertos); CCB, “Cabo Cruz basin”(cuenca de Cabo Cruz); SDB, “Santiago deformed belt”(cinturón deformado de Santiago). Las abreviaturas corresponden a su denominación en inglés.

Antecedentes

El primer esfuerzo por obtener un mapa de peligro sísmico de Cuba estuvo basado en los datos macrosísmicos – históricos (Alvarez, 1970), que se habían estado compilando sistemáticamente desde los primeros años de la década del 60. Posteriormente, un análisis más exhaustivo (tratamiento estadístico de los datos), condujo a la obtención de el “*Mapa de Intensidad Sísmica de Cuba*” (Chuy y Rodríguez, 1980), para períodos de recurrencia de 100 años. Una versión revisada de este mapa (Chuy et al., 1983) se tomó como base para la Norma Cubana para Construcciones Sismo-Resistentes.(Norma Cubana, 1985). Estos estudios adolecían de un análisis detallado de la sismicidad y su posible relación con las zonas sismogeneradoras, además de no tener en cuenta la atenuación de las intensidades sísmicas.

Otras estimaciones del peligro sísmico a escala nacional, fueron obtenidas por Rubio (1985) usando el método de Cornell (1968) en la formulación propuesta por McGuire (1976), mientras que Alvarez y Bune (1985a, 1985b) evaluaron el peligro sísmico para Cuba oriental usando un algoritmo especialmente preparado por ellos sobre la base del método de Riznichenko (1965, 1979).

Chuy y Alvarez (1995) y Rodríguez et al. (1997) utilizaron este mismo algoritmo, Alvarez (1995) para obtener estimados probabilísticos de la peligrosidad sísmica a escala nacional en términos de intensidad sísmica (escala MSK) y la aceleración horizontal pico (% de g), siguiendo un modelo Poissoniano de ocurrencia de sacudidas sísmicas. La atenuación fue analizada a partir de un modelo de isosistas elípticas propuesto por Alvarez y Chuy (1985). La aceleración horizontal pico fue calculada a partir de la intensidad sísmica usando las relaciones lineales de Trifunac and Brady (1975).

El mapa propuesto por Chuy y Alvarez (1995), es el resultado de la unión de mapas anteriores :Orbera et al. (1990), González et al. (1993), y Chuy et al. (1992). Esta decisión, en nuestra opinión, causó un tratamiento no- uniforme de la información, debido a que en estos trabajos no se usó exactamente la misma metodología, ni los mismos criterios de cálculo. Este mapa fue tomado como base para el código sismo-resistente actualmente en uso.

En Rodríguez et al. (1997), se usó un nuevo catálogo paramétrico, unificando todos los datos de terremotos disponibles hasta ese momento. Además, posteriormente fue filtrado para excluir premonitores y réplicas, usando una ventana del tipo Gardner - Knopoff (1973), ajustada por los autores a las condiciones del régimen sísmico regional.

En el ámbito internacional, Shepherd et al. (1997) presentaron un mapa para la región del Caribe insular (incluyendo a Cuba), en términos de aceleración horizontal pico para un período de retorno de 475 años. El método aplicado fue el “paramétrico histórico” (Veneziano et al., 1984), modificado por Mc Queen (1997), el cual no usa un mapa de zonas fuente, dándole un peso fundamental al catálogo de terremotos. La atenuación fue modelada a partir de la relación de Joyner y Boore (1993) para los eventos con profundidad menor de 15 km, y la de Woodward-Clyde (1982) para los eventos con profundidades mayores a esta distancia.

Definición del árbol lógico de decisión

Un árbol lógico es útil a la hora de ilustrar las diferencias entre los modelos alternativos proporcionados por las metodologías anteriormente descritas y las posibles variaciones de los parámetros involucrados en cada una de ellas. Normalmente, cada vez que se realiza una nueva investigación los resultados obtenidos niegan total o parcialmente los anteriores, sin tener en cuenta la posible validez de los mismos, ni evaluar la incertidumbre o posibles errores de éstos y de la nueva propuesta. Estas diferencias están asociadas muchas veces a variaciones en los parámetros

iniciales de cálculo, fruto de diferencias de criterios de expertos y no porque haya mejorado el estado del conocimiento sobre la temática.

Las distintas alternativas o posibles valores de partida de cada parámetro se definirán entonces en las distintas ramas del árbol, asignándose (o no) en cada nodo (conjunto de ramas que parten de un mismo punto) un peso relacionado con la incertidumbre conocida a priori. El resultado final se obtendrá como un valor ponderado por las distintos pesos asociados a cada rama. Si lo que se quiere es identificar el comportamiento de los resultados finales de acuerdo a los distintos parámetros de entrada escogidos no es conveniente asignar los pesos a priori, obteniéndose finalmente, no el valor ponderado de la PS para el punto en cuestión, sino todas las soluciones obtenidas en cada una de las ramas. Estos resultados pueden combinarse y ajustarse a una distribución estadística normal (u otra) que nos permita evaluar el valor más representativo y la incertidumbre del mismo para cada celda en que se dividió la región de estudio.

Los problemas encontrados y las soluciones propuestas en el proceso de diseño y generación del árbol lógico se presentan y discuten a continuación. En la figura 1.2 se presenta el árbol lógico diseñado y en la tabla 1.1 la descripción de los códigos utilizados.

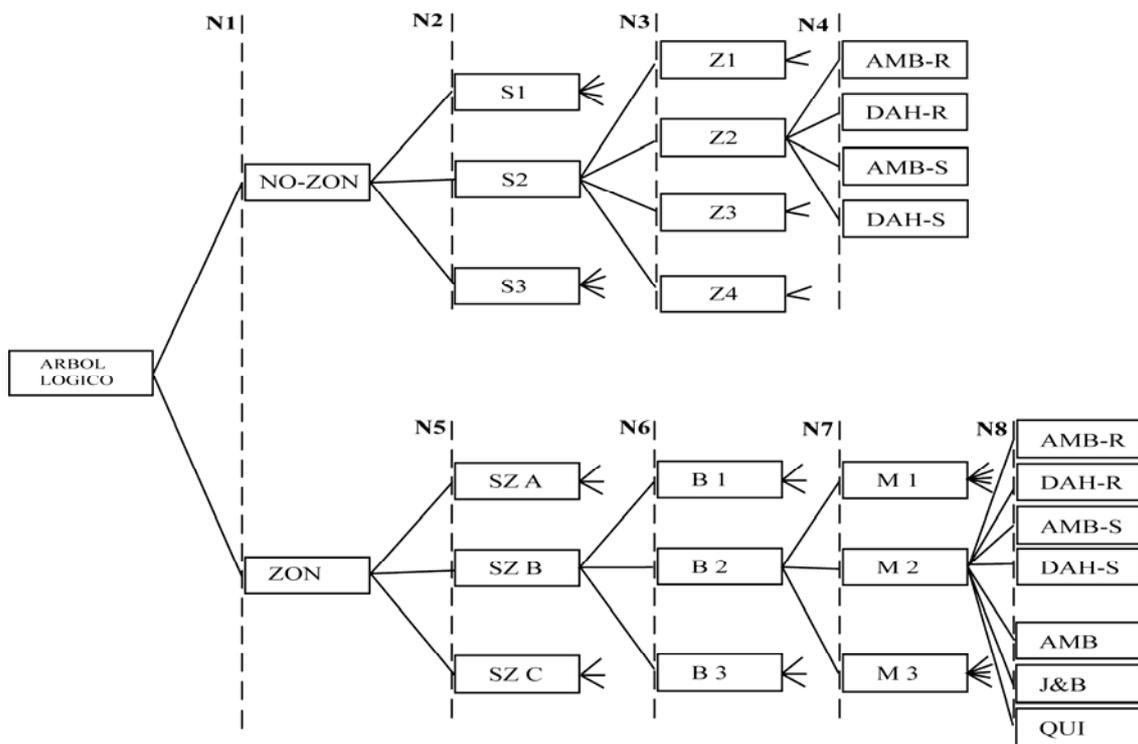


Fig. 1.2 – Arbol lógico de decisión, usado para obtener los resultados, en la tabla 1.1 se explican los códigos utilizados.

Tabla 1.1- Descripción del árbol lógico, más detalles en el texto y en las figuras 1.3 y 1.13.

Nodo	NO ZONIFICADA			ZONIFICADA			
	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8
Descripción	Modelos de sismicidad.	Parámetros de la sismicidad.	Relaciones de atenuación (PGA)	Modelos de zonas sismogeneradoras	Estimación de los parámetros del régimen sísmico (a y b)	Estimación de M_{max}	Relaciones de atenuación
No. Ramas	3	4	4	3	3	3	7
Descripción de la rama	S1: modelo 1 S2: modelo 2 S3: modelo 3	Z1: modelo 1 Z2: modelo2 Z3: modelo 3 Z4: modelo 4	AMB-R AMB-S Ambraseys (1996), R= roca. S= suelo blando. DAH-R DAH-S Dahle (1995), R= roca. S= suelo blando.	ZS-A: Chuy y Alvarez (1995) ZS-B: García et al., (2001) ZS-C: Este trabajo	B1: Mínimos cuadrados. B2: Máxima verosimilitud B3: Kijko y Sellevol, 1989	M1: Slejko et al., 1998 M2: Geológica M3: Kijko y Graham (1998)	AMB-R AMB-S Ambraseys (1996), R= roca. S= suelo blando. DAH-R DAH-S Dahle (1995), R= roca. S= suelo blando. AMB: Ambraseys et al., 1995, para suelo medio. J&B: Joyner y Boore, 1981, para suelo medio. QUI: Quijada et al. ,1993, para suelo medio.

En la tabla anterior aparecen dos bloques de datos que representan la alternativa de utilizar un enfoque paramétrico – zonificado, o no paramétrico - no zonificado. Estos corresponden al primer nodo (N1) de la figura 1.2. Veamos ahora por separado ambas ramas, comenzando por el método no zonificado.

Método no zonificado.

A pesar de ser métodos conocidos, nunca nos habíamos propuesto estimar la peligrosidad sísmica a partir de un método no zonificado; una de las causas puede haber sido considerarlo un método “inferior” o poco resolutivo. La motivación mayor de usar esta metodología, es evadir los juicios involucrados en la definición del mapa de zonas sismogeneradoras y los parámetros que la caracterizan, en una región donde el conocimiento de las estructuras potencialmente sismogeneradoras es aun insuficiente. Los resultados obtenidos a partir de esta metodología serán comparados con los obtenidos hasta el momento por otros métodos, con el fin de identificar las regiones donde la sismicidad por si sola no puede apoyar la definición de zonas potencialmente sismogeneradoras, mejorando y corrigiendo los mapas propuestos con este fin.

Este método fue propuesto inicialmente por Riznichenko (1965), y nosotros seleccionados la modificación realizada por Frankel (1995), donde la peligrosidad sísmica es modelada a partir de la sismicidad contenida en el catálogo, la que es posteriormente “suavizada” o generalizada espacialmente a diferentes escalas de magnitud. Ejemplos de la aplicación de este tipo de método pueden verse en los trabajos (Riznichenko 1967; Zakharova, 1986; Veneziano y Pais, 1996 y Jacob et al., 1994). La variante de Frankel (1995) desarrolla las ideas propuestas por Riznichenko (1965, 1966) al incluir en el proceso de cálculo una función de distribución probabilística, en vez de una simple promediación de la actividad sísmica, como usualmente se hacia en estos trabajos.

En la figura 1.3 se presenta de manera más detallada el árbol lógico diseñado para la ejecución del proceso de calculo de la peligrosidad sísmica usando el método no zonificado.

N2 - El segundo nodo tiene en cuenta las características propias del método escogido. El método propuesto por Frankel(1995) asume que los futuros terremotos (moderados y fuertes) ocurrirán en las áreas (o cerca de ellas) donde han ocurrido terremotos más pequeños en el pasado. A partir de esta hipótesis inicial, se definieron tres modelos de sismicidad (S1, S2 y S3 en el árbol lógico, figura 1.3) con diferentes niveles de magnitud y períodos de completamiento del catálogo (ver tablas 1.2 y 1.3). Los dos primeros modelos siguen fielmente las ideas de Riznichenko (1960, 1996) y Frankel (1995), al calcular la actividad sísmica en dos niveles diferentes de magnitud ($M \geq 3$ y $M \geq 5$), y para un período (T) donde la magnitud mínima escogida sea representativa. Por ejemplo, en el primer caso para $M \geq 3$ el período del catálogo utilizado es como promedio 30 años (ver tabla 1.2), por ser este el período donde la magnitud M3 es representativa para nuestra región de estudio. Lo mismo sucede con el modelo 2 ($M \geq 5$). Esto conlleva a que solo se pueda utilizar, en uno u otro modelo, una parte de los datos, ya sea la correspondiente a las magnitudes bajas ($M \geq 3$, cortos intervalos de tiempo) o las magnitudes altas ($M \geq 5$, largos intervalos de tiempo). Esto trae aparejada una dificultad para el cálculo de la peligrosidad sísmica a partir de este método, pues suponer que uno u otro modelo pueda caracterizar el modelo real de generación de terremotos en el área de estudio es arriesgado, pues dependerá en gran medida de la calidad del catálogo y de que éste refleje fielmente las características del régimen sísmico. Sin embargo, esta dificultad tratará de ser subsanada usando un tercer modelo ($M \geq 3$), basado en una modificación al método de cálculo de la actividad sísmica [método de suma, Riznichenko, (1964)] propuesta por Alvarez et al., (1985). En este caso, al calcular la actividad sísmica, se seleccionan los eventos por intervalo de magnitud, normalizándolos de forma independiente en el período representativo de cada clase de magnitud antes de ser sumados, lo que sustituye a la normalización temporal única para el período representativo de la clase mínima utilizada. Esto permite utilizar todos los eventos representativos incluidos en el catálogo. Decidimos no considerar el modelo para $M \geq 4$, por no

encontrar diferencias significativas entre este modelo y el de $M \geq 3$. No creemos necesario incluir el modelo 4 propuesto por Frankel (1995) que usa el concepto de “terremoto característico” (Coppersmith y Youngs, 1984), ya que a pesar de haber ocurrido en la región terremotos con magnitudes $M \geq 7$ (por ejemplo: $M= 7.2$ en 1562, $M=7.3$ en 1852, $M= 8.1$ en 1946, y $M= 6.9$ en 1992), no existen evidencias suficientes de que sea éste un caso de terremoto característico para lo cual se necesitarían evidencias paleosísmicas o datos dinámicos de la actividad de las estructuras responsables en el último período geológico. Igualmente, se excluye el modelo llamado por Frankel (1995) “zona de fondo uniforme”, pues la finalidad del mismo, en nuestra opinión, en esencia es obtener un valor mínimo de peligrosidad sísmica uniformemente espaciado, donde “volcar” los resultados obtenidos en los otros modelos y que no existan “agujeros negros” en los mapas finales.

- N3** - El tercer nodo se relaciona con una hipótesis inicial del método que presupone la invariabilidad del parámetro (b) a lo largo del área o en la mayoría de ella. Nosotros para verificar este aspecto, hemos considerado y proponemos cuatro modelos diferentes ($Z1$, $Z2$, $Z3$ y $Z4$ en la figuras 1.3 y 1.4). En ellos el parámetro “ b ” se calcula de forma independiente para diversas variantes de macrozonas, Los parámetros necesarios para el cálculo se presentan en la tablas 1.2 y 1.3. El primer modelo (figura 1.4a) considera una única zona, que abarca toda el área de estudio. En el segundo modelo (figura 1.4b) la región fue dividida en dos partes, teniendo en consideración, los dos ambientes tectónicos presentes en el área: zona de interior de placa y zona límite de placa. En el tercer modelo (figura 1.4c) se quiso enfatizar el aporte de la zona límite de placa, dividiendo esta en su porción norte y sur. El cuarto modelo (figura 1.4d) pretende diferenciar en la zona límite de placa el área perteneciente a Cuba del resto.
- N4** - En ausencia de relaciones de atenuación de parámetros dinámicos válidas para la región de Cuba. Decidimos considerar dos en términos de aceleración horizontal pico (PGA). La primera (Ambraseys et al., 1996) fue calibrada a partir de una amplia base de terremotos europeos, la segunda (Dahle et al., 1995), fue calibrada usando terremotos de Centroamérica. En ambas formulaciones es posible diferenciar el comportamiento de las sacudidas sísmicas según el tipo de suelo.

Método zonificado

- N5** – Teniendo en cuenta la complejidad del ambiente tectónico del área de estudio (Iturralde -Vinent, 1996), el insuficiente conocimiento acerca de la evolución cinemática de los principales sistemas de fallas cubanos y la incertidumbre asociada a la localización de los terremotos históricos; es necesario asociar la sismicidad presente en la región a zonas sismogeneradoras y no a fallas individuales. Esta situación conlleva a una nueva problemática, pues diferentes autores, podrían considerar, bajo las mismas condiciones diferentes modelos de zonas sismogeneradoras. En nuestro caso hemos decidido utilizar tres modelos de zonas sismogeneradoras ($ZS-A$, $ZS-B$ y $ZS-C$ en la figura 1.11); el primero, utilizado en Chuy y Alvarez (1995), tiene una diversidad de criterios en su definición, no uniforme en todo el territorio; el segundo (García et al., 2003) trata de buscar un compromiso entre la contribución de los criterios geólogo – tectónicos en la definición de las zonas sismogeneradoras y la evidencia real de su aporte a partir de la información contenida en el catálogo de terremotos. El tercer modelo, mucho más simplificado consiste en una generalización de las zonas sismogeneradoras del segundo modelo, agrupando algunas que no cuentan con muchos terremotos, en un acercamiento a la filosofía del método de amplio uso en los E.E.U.U., China y otros países, de la llamadas “provincias sismotectónicas”. De esta manera, la incertidumbre asociada a la definición del modelo de zonas sismogeneradoras será incluida en el proceso de cálculo.

- N6 y N7** – El sexto y el séptimo nodo están relacionados con la manera de determinar los parámetros que definen el régimen sísmico en cada una de las zonas sismogeneradoras. Mas concretamente con el ajuste de los gráficos magnitud - frecuencia, para la obtención de los valores de **a** y **b** y la M_{max} asociada a cada zona.
- N8** – Este nodo tiene que ver con la atenuación de las ondas sísmicas, usaremos en este caso las mismas relaciones propuestas en el nodo **N4** y adicionalmente relaciones referidas a suelo medio (Joyner y Boore ,1981, Quijada et al.,1993 y Ambraseys ,1995). Es necesario aclarar que en el árbol lógico no pueden “mezclarse” resultados referidos a tipos de suelos diferentes y por lo tanto obtendremos tres grandes grupos de curvas: (a)- referidas a roca, (b)- referidas a suelo medio, (c) referidas a suelo blando.

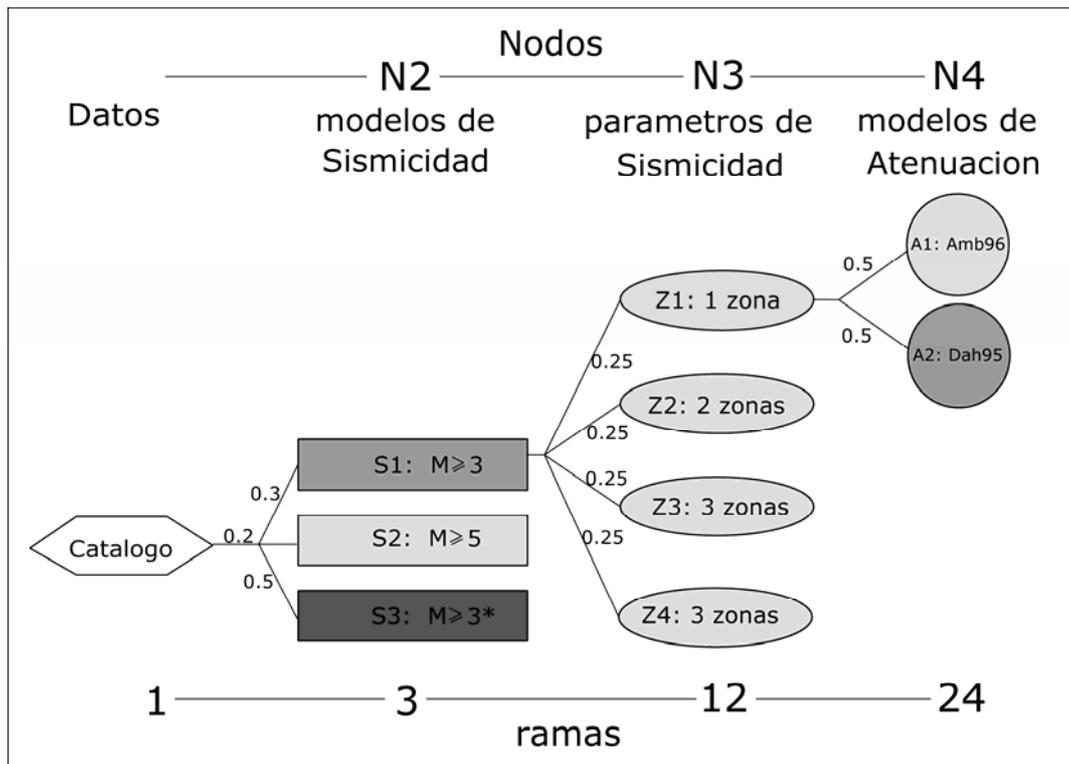


Fig.1.3 – Arbol lógico de decisión utilizado para obtener los resultados usando el método no zonificado.

Estimación de la peligrosidad sísmica. Primeros resultados

Método no - zonificado

Metodología

El concepto de actividad sísmica fue introducido en la década del 60 por Riznichenko (1960): la actividad sísmica A es el número de terremotos en un intervalo de magnitud dado ($M_0 - \delta, M_0 + \delta$).

$$A = N(M) \Big|_{M_0} = 10^a \quad (1.1)$$

donde a es el parámetro de la relación magnitud – frecuencia (Gutenberg – Richter, 1954).

$$N(M) = 10^{a-b(M-M_0)} \quad (1.2)$$

La actividad sísmica es calculada para una magnitud de referencia: las conocidas A_{10} o A_{15} en la literatura Rusa sobre la temática, las cuales indican la actividad sísmica asociada a la clase energética (Rautian, 1964) $K=10$ y $K=15$ respectivamente.

Uno de los métodos empleados para el cálculo de la actividad sísmica es el “método suma” (Riznichenko, 1964), el mismo consiste en el cómputo de el número total de terremotos que exceden un umbral de magnitud dado M_0 . La actividad sísmica se obtiene entonces como:

$$A = \frac{\bar{N}_\Sigma(M_{\min}) \cdot (10^{b\delta} - 10^{-b\delta}) \cdot 10^{b(M_{\min}-M_0)}}{(1 - 10^{-b(M_{\max}-M_{\min}+\delta)})} \quad (1.3)$$

donde δ es la mitad del intervalo de magnitud usado en la confección del gráfico magnitud-frecuencia, M_{\min} es la magnitud mínima en el catálogo, M_{\max} la magnitud máxima posible y $\bar{N}_\Sigma(M_{\min})$ el número de terremotos in el intervalo (M_{\min}, M_{\max}) dentro del área que rodea el punto (la celda) donde la actividad sísmica es calculada, normalizada temporal y espacialmente.

Frankel (1995) recuperó el concepto de actividad sísmica, introduciendo algunas modificaciones al método. Este nuevo enfoque, llamado por Frankel “spatially smoothed seismicity approach” (sismicidad suavizada espacialmente), asume que los terremotos futuros deberán ocurrir en las mismas zonas (o cerca de ellas) donde ya existen evidencias que ocurrieron en el pasado. Mas tarde, Lapajne et al. (1997) llevaron este algoritmo de cálculo al código OHAZ (Lapajne et al., 1997, Lapajne, 2000, Šket Motnikar et al., 2000, Poljak et al., 2000), el cual fue utilizado por nosotros.

Para la obtención de los resultados se sigue el siguiente procedimiento: en cada i celda de la red que cubre el área de estudio, se calcula el número n_i de eventos iguales o mayores que el umbral mínimo de magnitud (M_0), luego la actividad sísmica (n_i) es suavizada espacialmente usando la fórmula propuesta por Frankel (1995):

$$\tilde{n}_i = \frac{\sum_j n_j e^{-\Delta_{ij}^2/c^2}}{\sum_j e^{-\Delta_{ij}^2/c^2}} \quad (1.4)$$

donde c es la distancia de correlación y Δ_{ij} es la distancia entre la i -ésima y la j -ésima celda. Los valores de n_i son convertidos de acumulativos a incrementativos usando la fórmula de Herrman(1997).

La tasa anual de eventos $\lambda(u>u_0)$ que exceden un valor dado de peligrosidad sísmica u_0 en un sitio determinado es calculada usando una integral en vez de la suma de todas las clases de magnitud, a partir de la fórmula propuesta por Lapajne et al., 1997:

$$\lambda(u > u_0) = \frac{1}{T} \sum_i \tilde{n}_i \int_{m_{\min}}^{m_u} P[u > u_0 | d_i, m_j] p_m(m) dm \quad (1.5)$$

donde T es el número de años para el cual se calcula la actividad sísmica \tilde{n}_i . La función densidad de probabilidad $p_m(m)$ esta definida por la ecuación:

$$p_m(m) = \frac{b \ln 10 \cdot 10^{-b(m-m_0)}}{1 - 10^{-b(m_u-m_0)}} \quad (1.6)$$

La expresión $P[u > u_0 | d_i, m_j]$ presentada en (1.5) puede ser calculada por:

$$P[u > u_0 | d_i, m_j] = \frac{1}{2} \Phi^* \left(\frac{\ln u_0 - \ln u(d_i, m_j)}{\sigma \sqrt{2}} \right) \quad (1.7)$$

donde $\ln u$ es la función de atenuación usada y depende de d_i y m_j , σ es la desviación estándar y Φ^* representa la función complementaria de errores. Los valores del movimiento del terreno para una probabilidad de excedencia (o no excedencia) dada son obtenidos interpolando los valores de λ . La ocurrencia de eventos se asume sea Poissoniana.

En el presente trabajo, hemos introducido una variante mas, modificando la manera en que se obtiene la actividad sísmica. Como se explicó anteriormente, en el método original (Riznichenko, 1960; Frankel, 1995) se necesita fijar el período del catálogo donde los terremotos son mayores, o iguales a M_0 y por lo tanto solo es posible usar una parte del catálogo en los cálculos. Nosotros, por el contrario proponemos considerar los diferentes períodos de completamiento que tienen cada una de las clases de magnitud utilizadas. De esta manera, es posible trabajar con casi todo el período de tiempo que abarca el catálogo, lo cual es posible simplemente introduciendo un nuevo criterio de normalización:

$$\bar{N}_\Sigma(M_{\min}) = \frac{1}{nc} \cdot \sum_{i=1}^{i(M_{\max})} \frac{N(M_i)}{T_i} \quad (1.8)$$

donde $N(M_i)$ es el número de terremotos en el intervalo “i”, T_i es el período de completamiento correspondiente y “nc” (criterio de normalización espacial), es el número de celdas usadas para contar los terremotos.

Parámetros de cálculo

El área de estudio (16° N y 67°W hasta 24° N y 85° W) fue dividida en celdas de aproximadamente 10 km x 10 km y una versión actualizada hasta el año 2000 del catálogo paramétrico presentado por Alvarez et al., (1999) fue usado para hacer los cálculos. Este catálogo cubre un período de casi 500 años (1502-2000). Igualmente fueron obtenidos los períodos de completamiento de cada una de las clases de magnitud (M 2.5-M 8.5) a partir de la variación temporal de los terremotos (gráficos del número acumulativo de eventos vs. tiempo, Stepp, 1972). La magnitud máxima, parámetro requerido por el método, fue asignada en cada una de las zonas que serán descritas a continuación, incrementando una clase (0.5 M) el valor del terremoto máximo observado dentro de cada una de las zonas (Slejko et al.,1998). El parámetro (b) fue obtenido para cada una de las zonas, ajustando el número acumulativo de terremotos en intervalos de magnitud $\Delta M = 0.5$ por el método de máxima verosimilitud (Weichert, 1980).

Modelos de sismicidad

Como dijimos anteriormente, tuvimos en cuenta tres modelos de sismicidad (ver nodo 2 en la figura 1.3); estos modelos consisten en la definición de una magnitud mínima umbral (M_0) con su período de completamiento y la distancia de correlación adecuada para el rango de magnitud considerado. En los modelos S1 y S3, $M_0=3$, mientras que para el modelo S2, $M_0=5$. Se hicieron varias pruebas para determinar cual era el valor apropiado de “c” (distancia de correlación) en cada uno de estos modelos, comparando los resultados obtenidos después de darle valores de 10, 25, 30, 50 y 100 km a “c”, encontramos que un valor de $c=30$ km era apropiado para los modelos 1 y 3, mientras un valor de $c=50$ km era mucho mas aconsejable para el modelo S2.

El modelo S1 considera los terremotos con magnitud mayor o igual a 3.0. El período de completamiento puede variar de acuerdo a las regiones modeladas en el próximo nodo (N3). De forma general toma valores entre 30 y 60 años. La distancia de correlación $c=30$ km.

El modelo S2 considera eventos con magnitudes mayores o iguales a 5.0, los períodos en los cuales esta magnitud es representativa en el catálogo de acuerdo a cada una de las regiones modeladas en el nodo N3 se presentan en la tabla 1.2. La actividad sísmica fue calculada con una distancia de correlación de 50 km y como la tasa de eventos con magnitud mayor e igual a 5 a partir de 1500 es menor que desde 1940, fue necesario normalizar el número total de eventos hasta alcanzar el que describe el modelo S1, usando un factor de completamiento (Frankel, 1995, Lapajne et al., 1997) de 1.58.

En el modelo S3 la actividad sísmica fue obtenida usando todo el período que describe el catálogo (ver tabla 1.3), en vez del período de tiempo de la M_0 escogida, como se hizo en los dos modelos anteriores. Los períodos de completamiento fueron calculados, entonces, para todas las clases de magnitud mayores e iguales a 3.0 y la actividad sísmica fue calculada usando el criterio de normalización propuesto por la ecuación (6). La distancia de correlación utilizada fue de 30 km.

Parámetros de la sismicidad para cada una de las zonas.

El método utilizado (Frankel, 1995), asume que el valor de b y M_{max} (dos parámetros que describen la sismicidad), son invariables a todo lo largo y ancho de la región de estudio. Nosotros hemos investigado esta problemática y proponemos aquí 4 posibles macro-zonaciones (figura 1.4) que pretenden describir zonas que son completamente diferentes en su régimen sísmico y potencialidad de generar terremotos fuertes. Nótese que esto no constituye un paso a los métodos zonificados, ya que las macrozonas que se presentan incluyen muchas de las zonas fuentes del método zonificado.

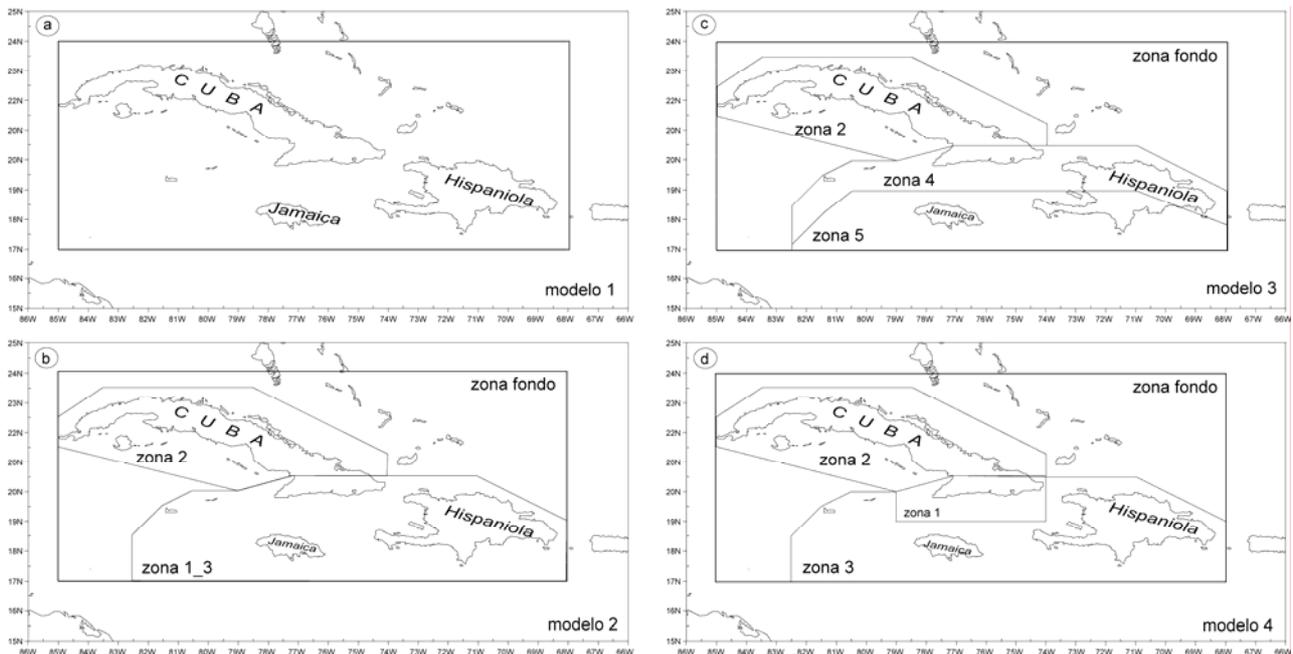


Fig.1.4 – Modelos propuestos para la estimación de los parámetros que determinan el régimen sísmico, (a)- Z1, (b)- Z2, (c)- Z3 y (d)- Z4.

La magnitud máxima (M_{max}) en cada una de las zonas es asignada incrementando en 0.5 (intervalo de clase escogido) el valor de la magnitud máxima observada. El valor de b para cada zona fue obtenido ajustando el número acumulativo de eventos en cada clase de magnitud por el método de máxima verosimilitud (Weichert, 1980). Los parámetros obtenidos para cada una de las diferentes zonas que incluyen estos 4 modelos se presentan en la tablas 1.2 y 1.3.

Relaciones de atenuación.

El parámetro escogido para describir las sacudidas sísmicas fue la aceleración horizontal pico. En estos momentos no contamos con relaciones de atenuación propias que describan el comportamiento de este parámetro, por lo tanto decidimos utilizar relaciones de validez regional (Ambraseys et al., 1996; Dahle et al., 1995), una europea, la otra centroamericana, las cuales pudieran validarse posteriormente, usando los datos reales registrados por la red de acelerógrafos instalada en nuestro país desde el año 1998. La primera es de uso común en Europa, y está definida para edificaciones de hasta 4 niveles (típicamente la altura de las edificaciones que existen en nuestro país). Su selección para este caso se basa en el análisis efectuado por García et al. (2003) sobre los resultados que se obtenían para nuestra región con diferentes relaciones de atenuación. La relación de Dahle et al. (1995) fue obtenida usando terremotos de la región de Centroamérica y ya fue aplicada con buenos resultados por Rivera et al. (2004) para la región de Cuba oriental.

Tabla 1.2 – Períodos de completamiento y parámetros de la sismicidad para las diferentes zonas en los modelos de sismicidad S1 y S2.

N2	N3	Zonas	período	años	<i>b</i>	Mmax
modelo S1 $m \geq 3.0$	modelo Z1	toda la región	1970-2000	30	0.71	8.5
	modelo Z2	zona 2	1940-2000	60	0.90	6.5
		zona 1 3	1970-2000	30	0.71	8.5
		fondo	1970-2000	30	0.75	6.5
	modelo Z3	zona 2	1940-2000	60	0.90	6.5
		zona 4	1970-2000	30	0.76	8.5
		zona 5	1970-2000	30	0.70	8.5
		fondo	1970-2000	30	0.75	6.5
	modelo Z4	zona 1	1940-2000	60	0.80	8.0
		zona 2	1940-2000	60	0.90	6.5
		zona 3	1970-2000	30	0.66	8.5
		fondo	1970-2000	30	0.75	6.5
modelo S2 $m \geq 5.0$	modelo Z1	toda la región	1970-2000	150	0.71	8.5
	modelo Z2	zona 2	1940-2000	150	0.90	6.5
		zona 1 3	1970-2000	150	0.71	8.5
		fondo	1970-2000	100	0.75	6.5
	modelo Z3	zona 2	1940-2000	150	0.90	6.5
		zona 4	1970-2000	150	0.76	8.5
		zona 5	1970-2000	150	0.70	8.5
		fondo	1970-2000	100	0.75	6.5
	modelo Z4	zona 1	1940-2000	150	0.80	8.0
		zona 2	1940-2000	150	0.90	6.5
		zona 3	1970-2000	200	0.66	8.5
		fondo	1970-2000	100	0.75	6.5

Tabla 1.3 – Períodos de completamiento y parámetros de la sismicidad para las diferentes zonas en el modelo de sismicidad S3.

N2	N3	Periodo de completamiento en años							b	Mmax
		Zonas	M=3	M=4	M=5	M=6	M=7	M=8		
modelo S3 m≥3.0	modelo Z1	toda la región	20	35	100	250	350	500	0.71	8.5
	modelo Z2	zona 2	50	60	150	500	-	-	0.90	6.5
		zona 1_3	20	40	150	250	400	500	0.71	8.5
		fondo	20	40	128	300	-	-	0.75	6.5
	modelo Z3	zona 2	50	60	150	500	-	-	0.90	6.5
		zona 4	20	40	100	200	350	500	0.76	8.5
		zona 5	20	35	100	250	350	500	0.70	8.5
		fondo	20	40	128	300	-	-	0.75	6.5
	modelo Z4	zona 1	60	90	150	240	500	-	0.80	8.0
		zona 2	50	60	150	500	-	-	0.90	6.5
		zona 3	20	35	100	250	350	500	0.66	8.5
		fondo	20	40	128	300	-	-	0.75	6.5

Resultados

A partir de la metodología propuesta y usando los parámetros de cálculo descritos anteriormente, fueron obtenidos 24 juegos de curvas diferentes para cada celda de la red que abarca el área de estudio (3 modelos de sismicidad, 4 esquemas de macrozonas diversos y 2 relaciones de atenuación en términos de aceleración horizontal pico). Los resultados presentados aquí en forma de mapas son referidos a roca para un período de retorno de 475 años.

Los mapas obtenidos considerando la relación de atenuación propuesta por Ambraseys et al.(1996) y Dahle et al. (1995), para cada uno de los modelos de sismicidad descritos en el nodo N2 se presentan en la figuras 1.5 (Ambraseys et al.,1996) y 1.6 (Dahle et al., 1995).

Los resultados del primer modelo de sismicidad (S1) y el tercer modelo (S3) son similares en ambos casos, observándose de manera general valores ligeramente más bajos para toda el área en el modelo S1. Los resultados obtenidos a partir del modelo S2, son más bajos y menos detallados, este comportamiento es debido a que la sismicidad asociada a este modelo (terremotos con magnitud mayor o igual a 5.0), no es capaz de ser evidenciada por este método, debido a: (a)- insuficiente numero de eventos con este rango en la zona de interior de placa (zona 2 en figura 1.4) y (b)- el efecto del “suavizado” de la sismicidad que comporta inevitablemente a una disminución de la peligrosidad al “compartir” la actividad sísmica con las celdas vecinas, usando la distancia de correlación. La influencia de la zonación (nodo N3) parece tener una influencia más limitada. Un problema a resolver en el futuro es la “promediación” de los resultados en las frontera de las zonas; para este propósito pensamos cambiar el programa de computo, utilizando el código original de Frankel (1995), modificado posteriormente por el propio autor en el 1996.

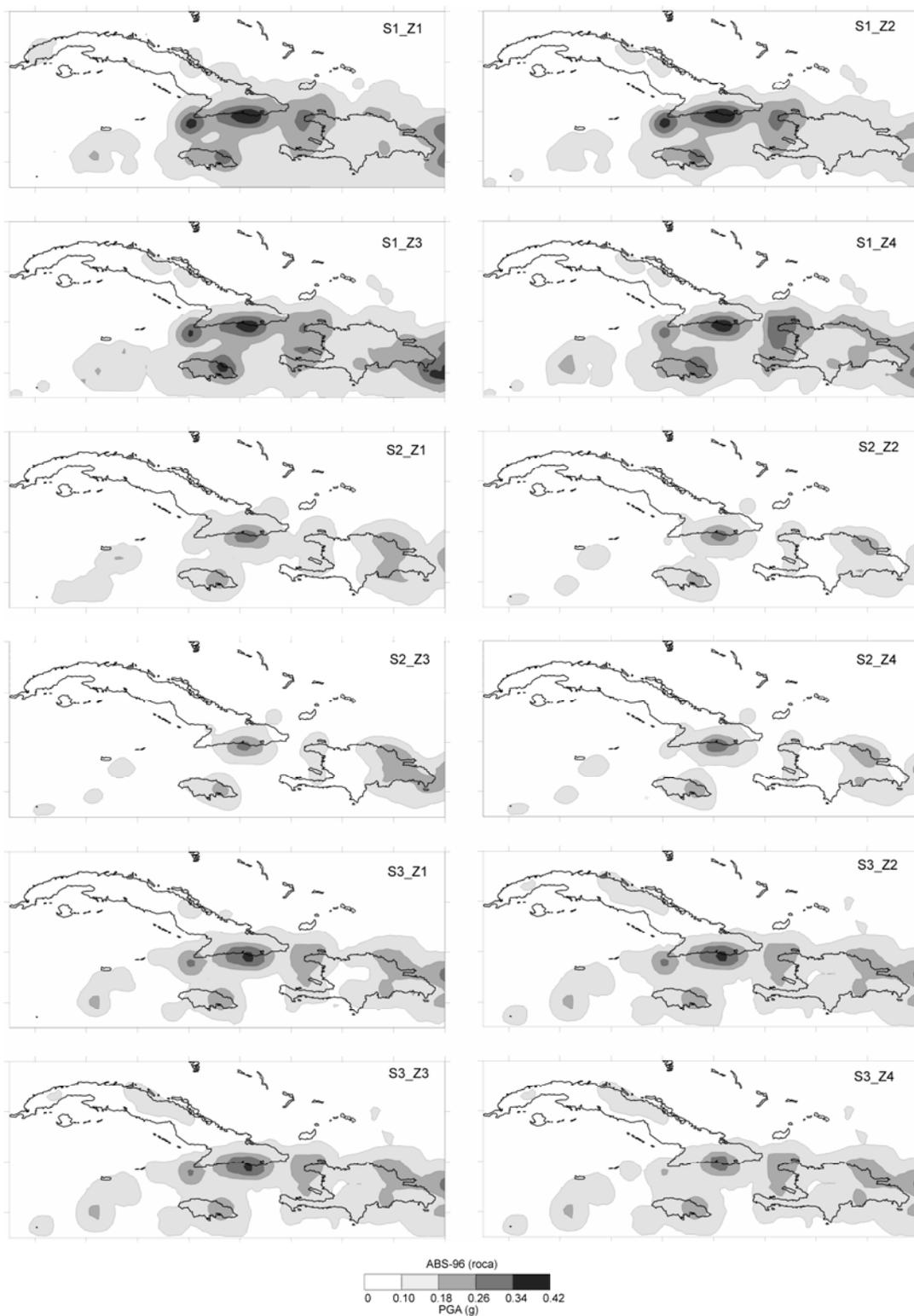


Fig.1.5 – Aceleración horizontal pico (PGA) para un período de retorno de 475 años (en g), usando la relación de atenuación de Ambraseys et al. (1996).

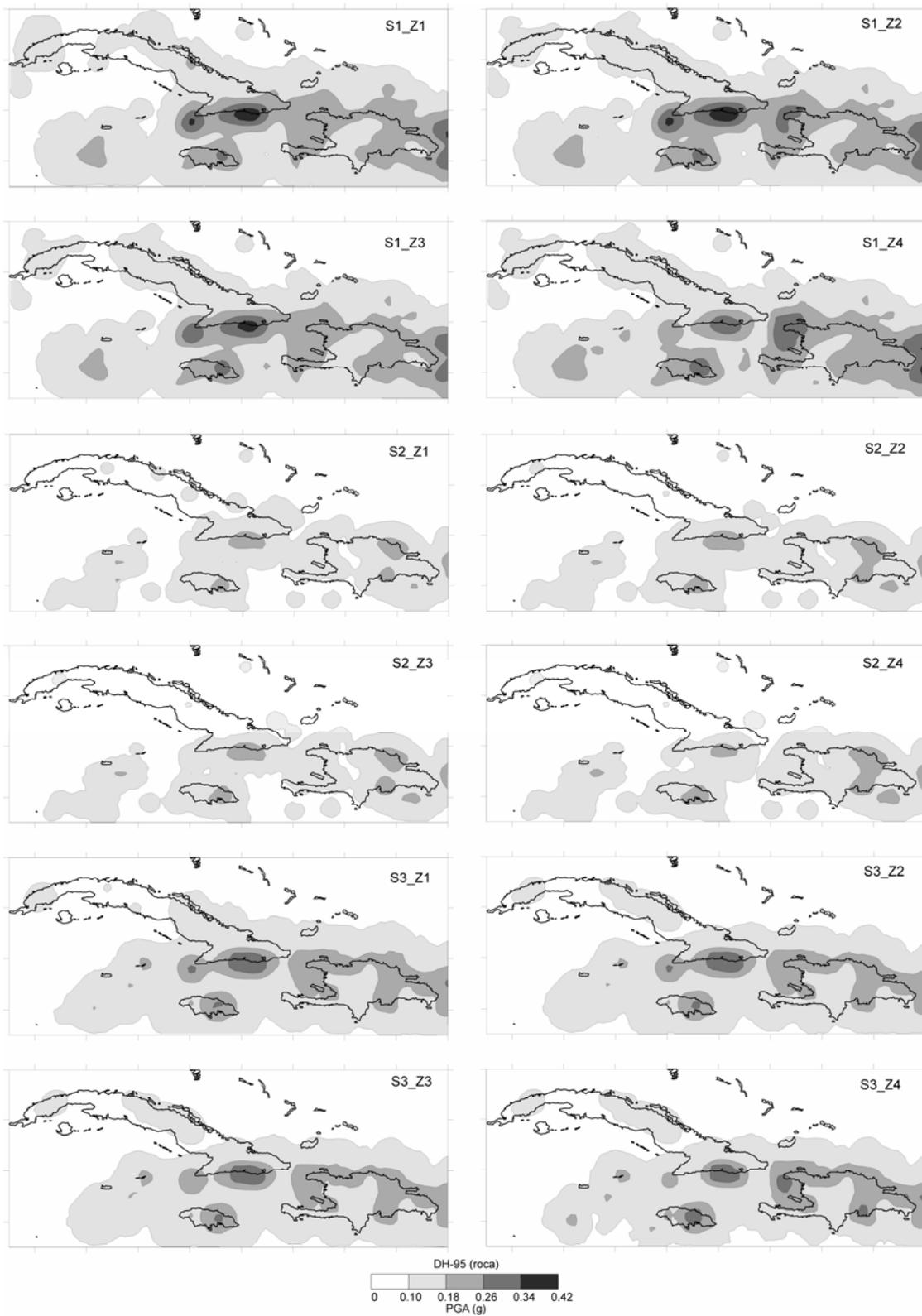


Fig.1.6 – Aceleración horizontal pico (PGA) para un período de retorno de 475 años (en g), usando la relación de atenuación de Dahle et al., (1995).

Por las características del método, no se pueden ver de forma independiente los resultados de los modelos de sismicidad S1 y S2, debido a que describen (o capturan) solo una parte de la sismicidad presente en el área. Por esta razón, tanto Frankel (1995) como Lapajne et al. (1997), proponen como resultado final un mapa ponderado que integre los distintos niveles de sismicidad con diferentes pesos. En la figura 1.7, se muestra el resultado de una ponderación de este tipo para el caso de Cuba, pesando cada rama como se muestra en la figura 1.3, considerando que el modelo S3 representa mejor la sismicidad de la región de estudio.

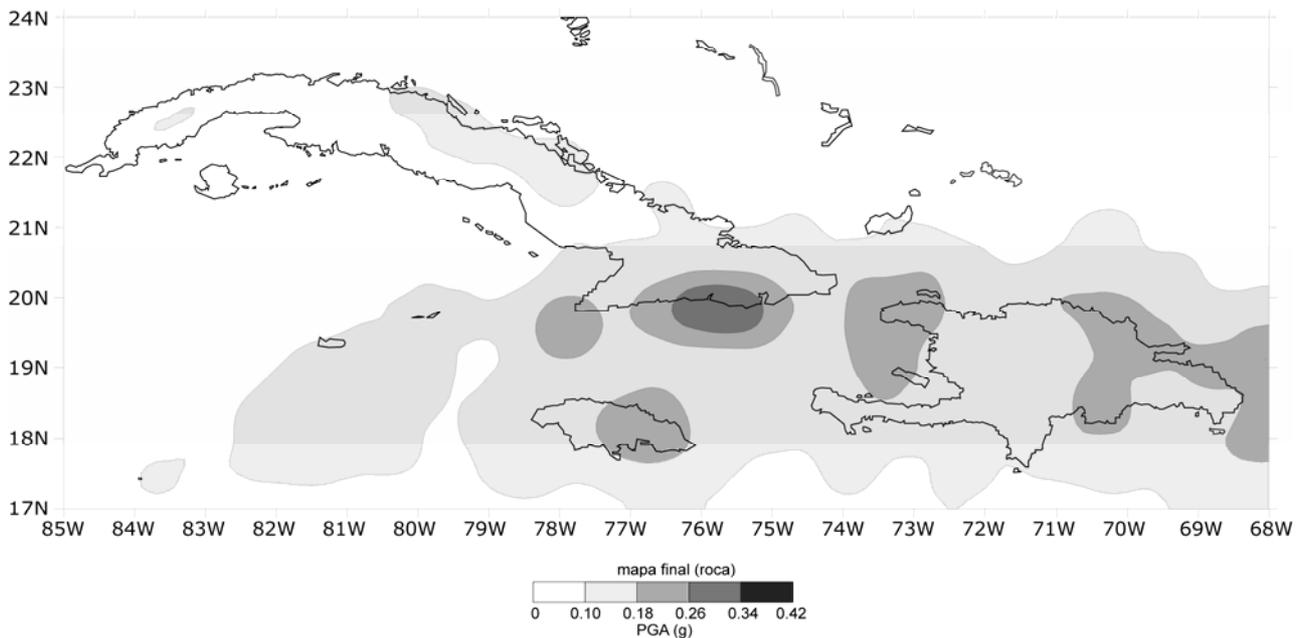


Fig. 1.7 – Aceleración horizontal pico (PGA) para un período de retorno de 475 años (en g), obtenida ponderando los resultados del árbol lógico como se muestra en la figura 1.3.

Los resultados obtenidos con este método fueron enviados para publicar en la revista Bulletin of the Seismological Society of America (ver Anexo 1).

Método zonificado, resultados referidos a un suelo medio.

Para este caso se publicó un artículo (Anexo 2). Por tanto no repetiremos aquí el contenido del mismo. Nos limitaremos a aclarar cómo los distintos métodos y variantes presentadas se corresponden con las denominaciones que usamos en el árbol lógico presentado en la figura 1.2

El área de estudio (16° N y 67°W hasta 24° N y 85° W) es la misma que en el caso anterior, esta fue dividida en celdas de aproximadamente 10 km x 10 km y una versión actualizada hasta el año 2000 del catálogo paramétrico presentado por Alvarez et al., (1999) fue usado para hacer los cálculos. Igualmente fueron obtenidos los períodos de completamiento de cada una de las clases de magnitud (M=2.5-8.5) a partir de la variación temporal de la ocurrencia de los terremotos [gráficos del número acumulativo de eventos vs. tiempo (Stepp, 1972)]. La magnitud máxima fue asignada en cada una de las zonas simogeneradoras (modelo ZS 2, posteriormente se tendrán en cuenta los otros dos modelos).

El algoritmo de cálculo utilizado fue el de Cornell (1968), en la formulación propuesta por Bender y Perkins (1987), a partir del programa de cálculo SEISRISK III.

En el artículo mencionado se presentan los estimados de peligrosidad sísmica en términos de aceleración horizontal pico e intensidad sísmica, referidos a un suelo medio, que forman solo una parte del árbol lógico propuesto.

Comparación de los resultados obtenidos por ambos métodos

La comparación de los resultados obtenidos por ambas metodologías es bastante interesante, si lo que se quiere es evidenciar donde el modelo de zonas sismogeneradoras esta bien “justificado” por la sismicidad reportada por el catálogo y viceversa, donde la sismicidad indica la posibilidad de existencia de zonas potencialmente sismogeneradoras, que no han sido incluidas en el modelo de zonas sismogeneradoras con que se hicieron los cálculos.

Con el fin de comparar los resultados obtenidos por ambos métodos, utilizamos los mismos parámetros de entrada que en el citado anexo, considerando las fórmulas de atenuación de Ambraseys et al. (1996) y Dalhe et al., (1995) referidas a roca. Los resultados obtenidos para un período de retorno de 475 años se presentan en las figuras 1.8 (b) y 1.9 (b)

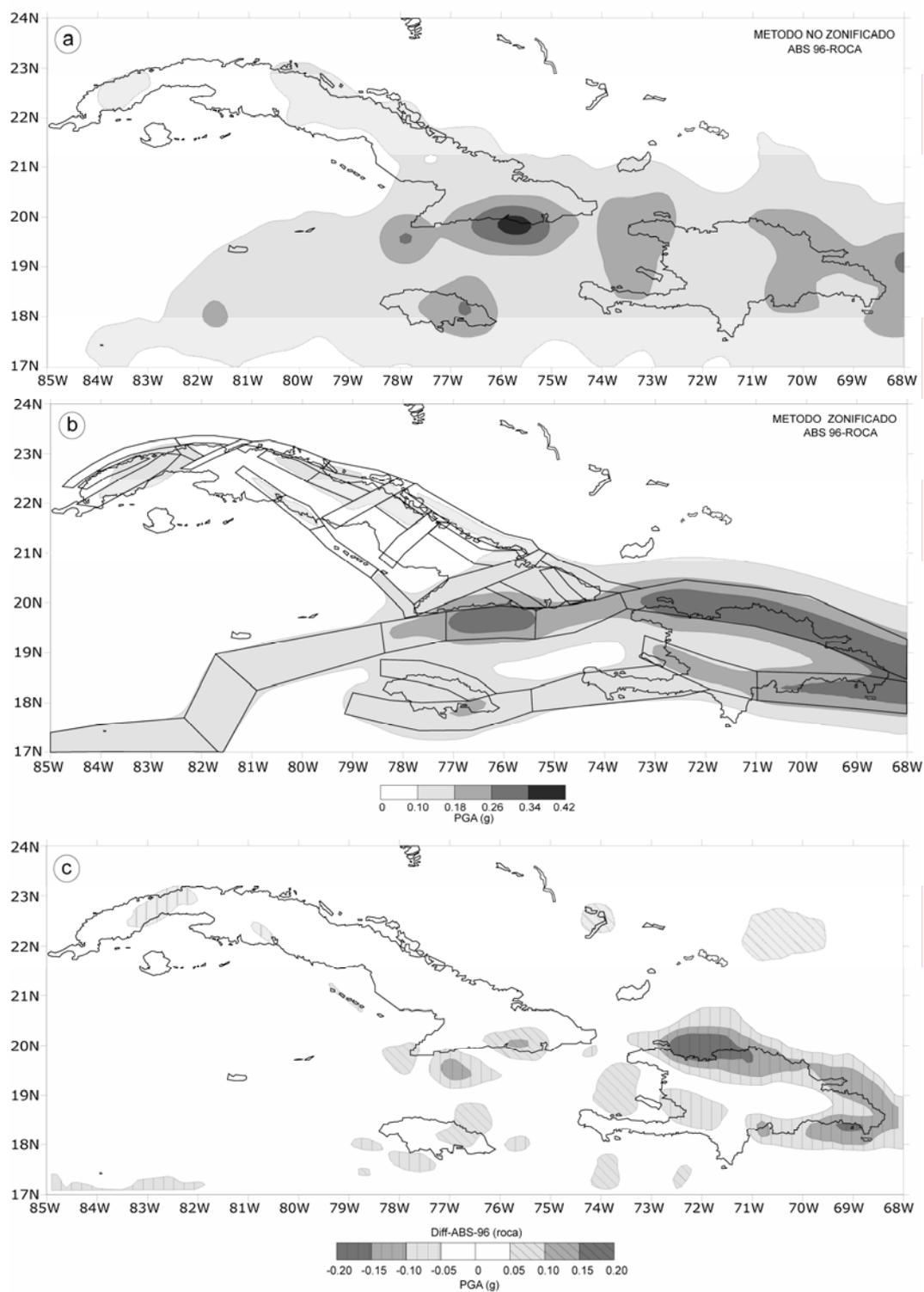


Fig. 1.8 – Comparación entre los resultados obtenidos con los métodos no zonificado y zonificado usando la relación de atenuación de Ambraseys et al. (1996), referida a roca: (a)- valor medio de PGA para un período de retorno de 475 años (en g), (b)- PGA para un período de retorno de 475 años (en g), usando el modelo SZ-B de la figura 1.2 y (c)- diferencia entre los resultados del método paramétrico y el no paramétrico.

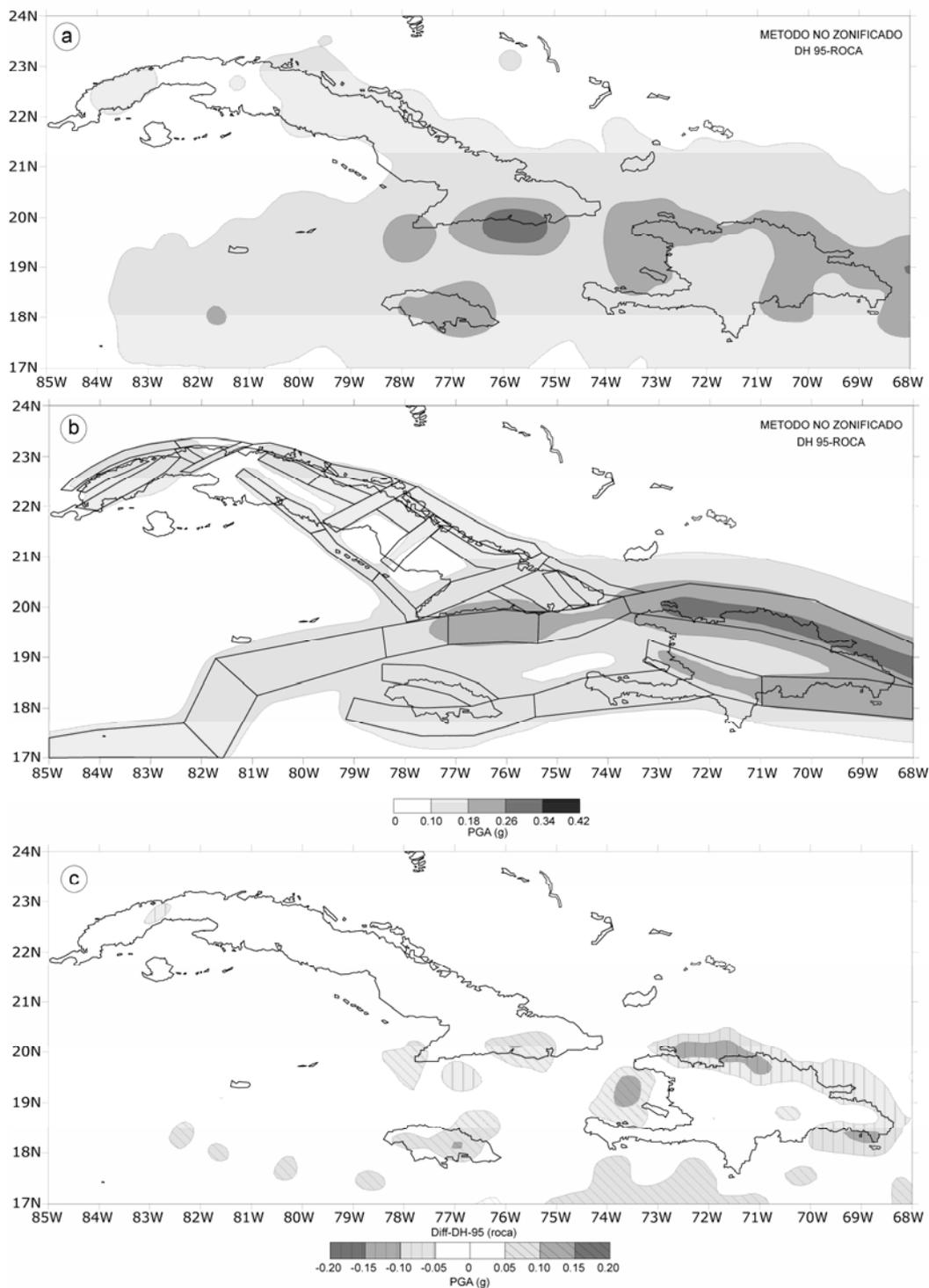


Fig. 1.9 – Comparación entre los resultados obtenidos con el método no zonificado y el zonificado usando la relación de atenuación de Dahle et al. (1995), referida a roca: (a)- valor medio de PGA para un período de retorno de 475 años (en g), (b)- PGA para un período de retorno de 475 años (en g), usando el modelo SZ-B de la figura 1.2 y (c)- diferencia entre los resultados del método paramétrico y del no paramétrico.

La diferencia entre los estimados obtenidos con el método no paramétrico y el paramétrico se presenta en la figuras 1.8 y 1.9; en ambos casos los resultados son más altos al utilizar el método zonificado en la mayoría del área de estudio, con un máximo de alrededor de 0.25 en el norte de la Española. La misma tendencia puede ser observada en menor grado a lo largo de la costa sur de la Española. Existen dos factores que pueden justificar este comportamiento, el primero tiene que ver con el completamiento de la magnitud mínima utilizada en el caso del método no zonificado y una posiblemente errónea asociación de eventos del área de Puerto Rico (pasaje de la Mona) a las zonas sismogeneradoras del norte y el sur de la Española.

Si consideramos el área de Cuba, las diferencias alcanzan valores absolutos de 0.15 g en la costa sur de la zona oriental, y valores entre 0.05 y 0.1 g en las zonas de Pinar del Río, Cienfuegos, la cayería al sur de Camagüey y la costa cercana a Cabo Cruz. En el resto de la isla los valores están por debajo de 0.05 g.

Discusión

En este epígrafe se presenta el diseño de la metodología para el cumplimiento de los objetivos propuestos y además se muestran los primeros resultados obtenidos a partir de la aplicación de la misma.

Por primera vez en nuestro país, se utiliza un método no zonificado [(Riznichenko (1965,1966), Frankel (1995))], para la estimación de la peligrosidad sísmica, lográndose resultados comparables a los obtenidos hasta el momento por otros métodos, a partir de un profundo análisis de los parámetros necesarios y la adecuación del método a nuestro contexto.

Se propone modificar la metodología propuesta por [(Riznichenko (1965,1966), Frankel (1995))], a partir de la introducción de un nuevo modelo de sismicidad (S3) que describe más eficazmente el proceso de ocurrencia de sacudidas sísmicas y por ende mejora los resultados finales.

De la misma manera se proponen nuevos estimados de la peligrosidad sísmica en términos de aceleración horizontal pico e intensidad macrosísmica referidos a suelo medio y roca, utilizando el método probabilista zonificado de Cornell (1968), los cuales forman parte del árbol lógico propuesto y se presentan en forma de artículo, publicado en el BSSA (ver Anexo 2).

La comparación de los resultados parciales obtenidos hasta el momento por ambas metodologías, sirven de retroalimentación en el proceso de diseño y planificación de la investigación. Los mapas presentados en las figuras 1.8 y 1.9, por ejemplo, evidencian la existencia de zonas donde la sismicidad y los criterios sismotectónicos, están en desacuerdo, reafirmandose que aún existen problemas en la toma de decisiones iniciales de uno u otro método, que podrían ser resueltos con un simple análisis de sensibilidad (Rebez A., y D. Slejko ,2000) de los parámetros usados en el procedimiento de calculo.

Los resultados finales obtenidos con el método no zonificado fueron objeto de una publicación (Anexo 1) y aún se continúa trabajando sobre el mismo. Se prueban nuevos programas de cómputo, pero hasta el presente los resultados que estamos obteniendo no tienen la robustez que los que se obtienen con el método zonificado. Es por ello que los mapas finales de peligro sísmico para Cuba no incluirán dicho método y en su defecto sus resultados serán usados como una calibración de la justeza de algunas decisiones a tomar en la preparación de datos para el método zonificado.

Un tema importante, tratado en el artículo presentado en el Anexo 2 es el referido a la atenuación de las intensidades sísmicas y la obtención de mapas de peligro sísmico en términos de éstas. Por primera vez se estiman para Cuba por regresión los parámetros de la relación de atenuación de las intensidades y se analiza su error asociado. Los mapas de peligro obtenidos usando dichas relaciones de atenuación se utilizarán más adelante en el cálculo de pérdidas producto de un terremoto.

1.2 Resultados obtenidos a partir del enfoque zonificado

Julio García¹, Leonardo Alvarez¹, Dario Slejko², Laura Peruzza², Alessandro Rebez², Marco Santulin²

¹Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENSAIS)

²Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Italia (OGS)

Metodología empleada

Un árbol lógico es útil a la hora de ilustrar las diferencias entre los modelos alternativos proporcionados por las metodologías anteriormente descritas y las posibles variaciones de los parámetros involucrados en cada una de ellas. Normalmente, cada vez que se realiza una nueva investigación los resultados obtenidos niegan total o parcialmente los anteriores, sin tener en cuenta la posible validez de los mismos, ni evaluar la incertidumbre o posibles errores de éstos y de la nueva propuesta. Estas diferencias están asociadas muchas veces a variaciones en los parámetros iniciales de cálculo, fruto de diferencias de criterios de expertos y no porque haya mejorado el estado del conocimiento sobre la temática.

Las distintas alternativas o posibles valores de partida de cada parámetro se definirán entonces en las distintas ramas del árbol (ver figura. 1.10), asignándose (o no) en cada nodo (conjunto de ramas que parten de un mismo punto) un peso relacionado con la incertidumbre conocida a priori. El resultado final se obtendrá como un valor ponderado por los distintos pesos asociados a cada rama (Grünthal y Wahlström, 2001)

Si lo que se quiere es identificar el comportamiento de los resultados finales de acuerdo a los distintos parámetros de entrada escogidos no es conveniente asignar los pesos a priori, obteniéndose finalmente, no el valor ponderado de la PS para el punto en cuestión, sino todas las soluciones obtenidas en cada una de las ramas (Giner et al., 2002). Estos resultados pueden combinarse y ajustarse a una distribución estadística normal (u otra) que nos permita evaluar el valor más representativo y la incertidumbre del mismo (expresado por parámetros de dispersión) para cada una de las celdas en que se dividió la región de estudio.

Por lo tanto usaremos un algoritmo probabilista estándar (Cornell, 1968) n veces, con el fin de aplicar consecutivamente varias hipótesis o parámetros de entrada diversos, permitiendo la evaluación de todas las incertidumbres “epistémicas” que se derivan de la falta de información a la hora de seleccionar los modelos de partida.

Como se puede apreciar en la figura 1.10, el árbol lógico contiene 36 ramas, para cada punto del área de estudio se obtendrán 36 valores de peligrosidad sísmica que vendrán finalmente promediados para obtener un único valor (medio) y su error (incertidumbre aleatoria y epistémica). El método permite de esta forma atenuar las diferencias resultantes de escoger una u otra hipótesis de partida. Las distintas claves usadas en el gráfico se irán explicando a continuación.

Esta propuesta de árbol lógico, no contradice nuestra idea inicial (figura 1.2), sólo hemos tratado de mejorarla, a partir de los resultados preliminares que se han ido obteniendo (ver anexo 2) y que como se había previsto, nos han servido de retroalimentación para mejorar los distintos parámetros que conforman el árbol lógico.

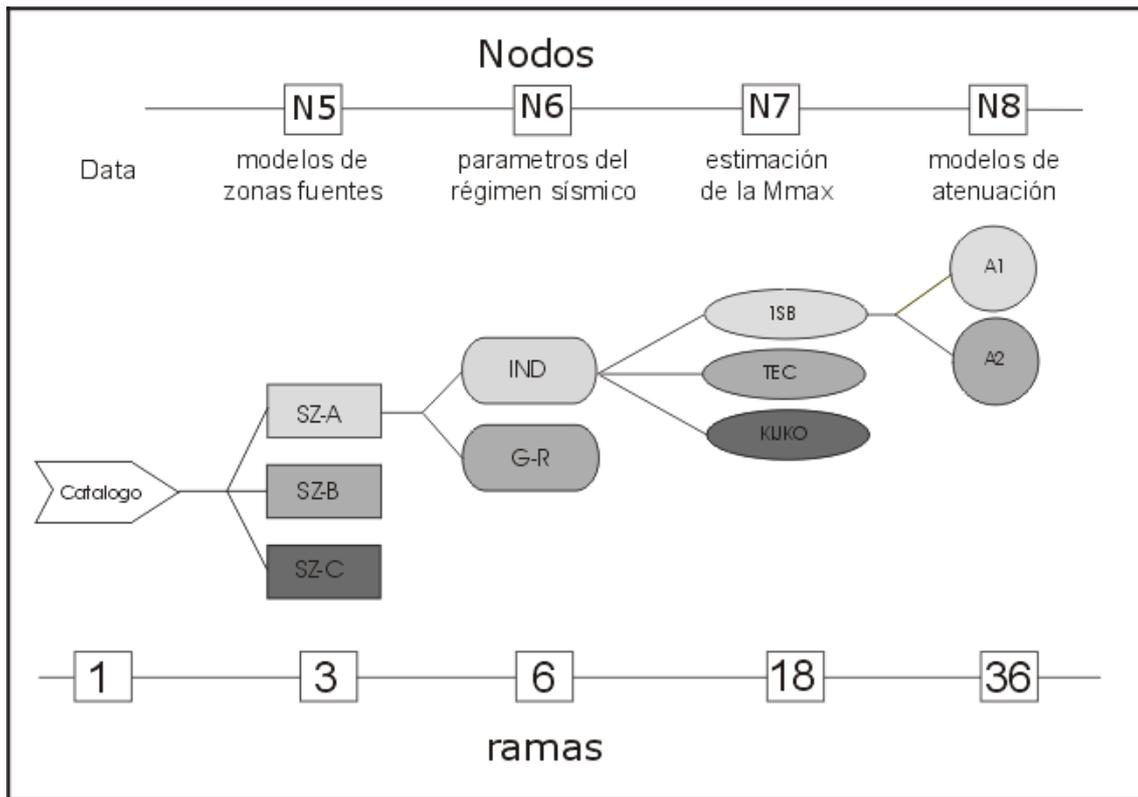


Fig. 1.10 – Árbol lógico de decisión utilizado para obtener los resultados, en la tabla 1.4 se describen los códigos utilizados.

Las incertidumbres principales al enfrentar un estudio de este tipo están relacionadas principalmente con el proceso de delimitación y caracterización de los parámetros que definen las zonas sismogeneradoras y la utilización de diferentes relaciones de atenuación del parámetro que describe las sacudidas sísmicas (McGuire y Shedlock, 1981; Bender y Perkins, 1993). No obstante, fueron analizadas otras fuentes de incertidumbre como la estimación de los parámetros del régimen sísmico (a y b) y la asignación de la Magnitud máxima (M_{max}) de las zonas sismogeneradoras. En la tabla 1.4 se presentan las distintas variantes utilizadas, y se explican los códigos utilizados en la figura 1.13.

Tabla 1.4- Descripción del árbol lógico, ver más detalles en el texto.

Nodos	N5	N6	N7	N8
Descripción	Modelos de zonas sismogeneradoras	Estimación de los parámetros del régimen sísmico	Estimación de la M_{max}	Relaciones de atenuación
No. ramas	3	2	3	2
Descripción de la rama	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. Ambas para roca y suelo “blando”.

Breve descripción del árbol lógico

Teniendo en cuenta la complejidad del ambiente tectónico del área de estudio (Iturralde - Vinent, 1996), el insuficiente conocimiento acerca de la evolución cinemática de los principales sistemas de fallas cubanos y la incertidumbre asociada a la localización de los terremotos históricos; sólo es posible asociar la sismicidad presente en la región (ver figura 1.1) a zonas sismogeneradoras y no a fallas individuales. Esta situación conlleva a una nueva problemática, pues diferentes autores podrían considerar, bajo las mismas condiciones, diferentes modelos de zonas sismogeneradoras.

Para incluir en el proceso de cálculo la incertidumbre asociada a la definición del modelo de zonas sismogeneradoras (nodo N5 en la figura 1.10) hemos decidido utilizar tres modelos diferentes. El primero, ZONA-A [modificado de Chuy y Alvarez (1995), ver figura 1.11], utilizado en (Chuy y Alvarez, 1995) y posteriormente con algunas modificaciones por Despaigne et al. (2002), tiene una gran diversidad de criterios (geológicos, tectónicos, sismológicos, geofísicos) en su definición, no uniforme en todo el territorio; no obstante, en este modelo, se le da un gran peso a la contribución del conocimiento geólogo - tectónico de los principales sistemas de fallas (o zonas de fallas) con que se contaba hasta ese momento. Las zonas sismogeneradoras y su potencialidad, en ocasiones no están respaldadas por la sismicidad presente en el catálogo.

En el segundo modelo, ZONA-B [modificado de García et al. (2003)], se trata de buscar un compromiso entre la contribución de los criterios geólogo – tectónicos en la definición de las zonas sismogeneradoras y la evidencia real de su aporte a partir de la información contenida en el catálogo de terremotos (ver figura 1.12.)

El tercer modelo, ZONA-C, presentado en la figura 1.13, mucho más simplificado, consiste en una generalización de las zonas sismogeneradoras del segundo modelo, agrupando algunas que no cuentan con muchos terremotos, en un acercamiento a la filosofía del método de amplio uso en EE.UU., China, Rusia y otros países, de las llamadas “provincias o dominios sismotectónicos” (Muir-Wood, 1993; V.I. Ulomov et al.1999; P. Zhang et al. 1999).

Las zonas con sismicidad de fondo o “background” fueron definidas en un único modelo (ver figura 1.14) y fueron utilizadas en conjunto con los demás modelos descritos anteriormente.

Fig. 1.11- Modelo de zonas sismogeneradoras: ZONA-A [modificado de Chuy y Alvarez (1995)]

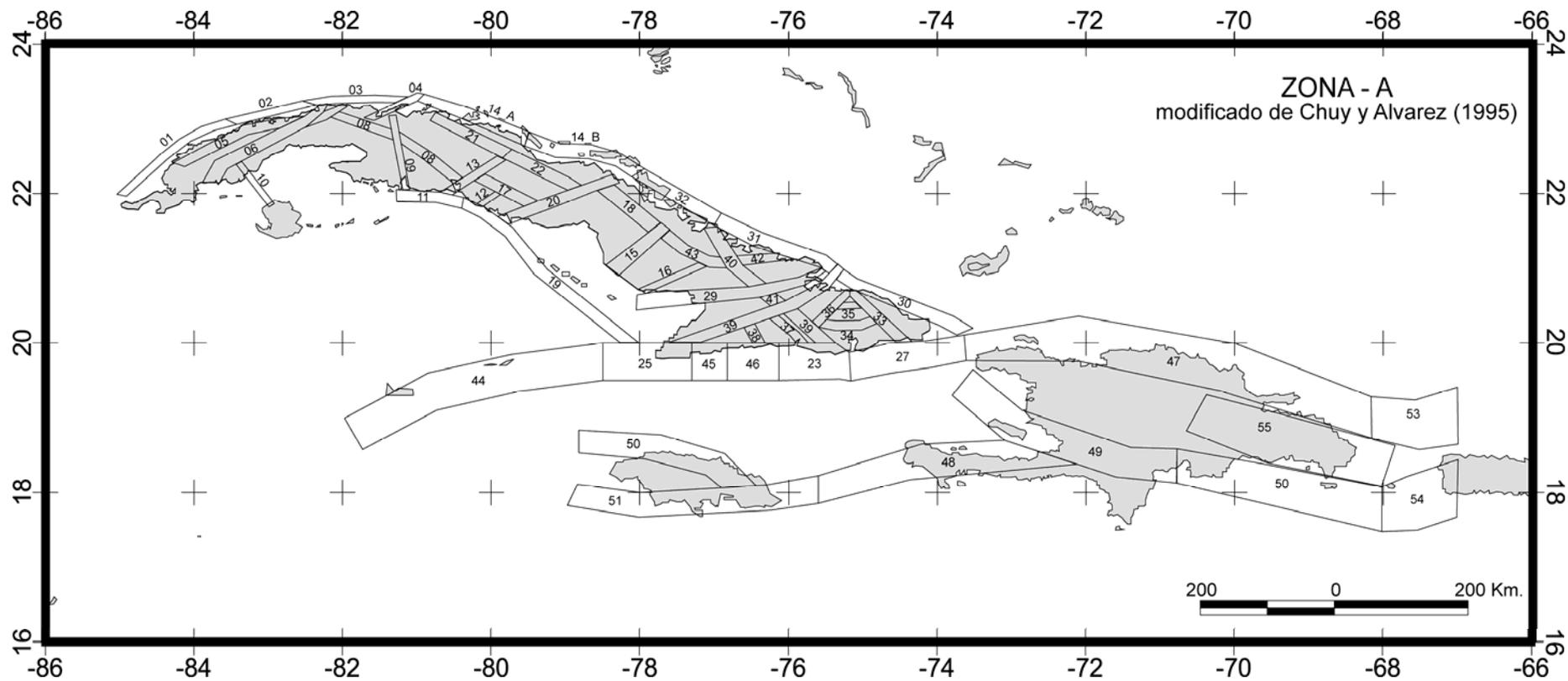


Fig. 1.12- Modelo de zonas sísmogeneradoras: ZONA-B [modificado de García et al. (2003)]

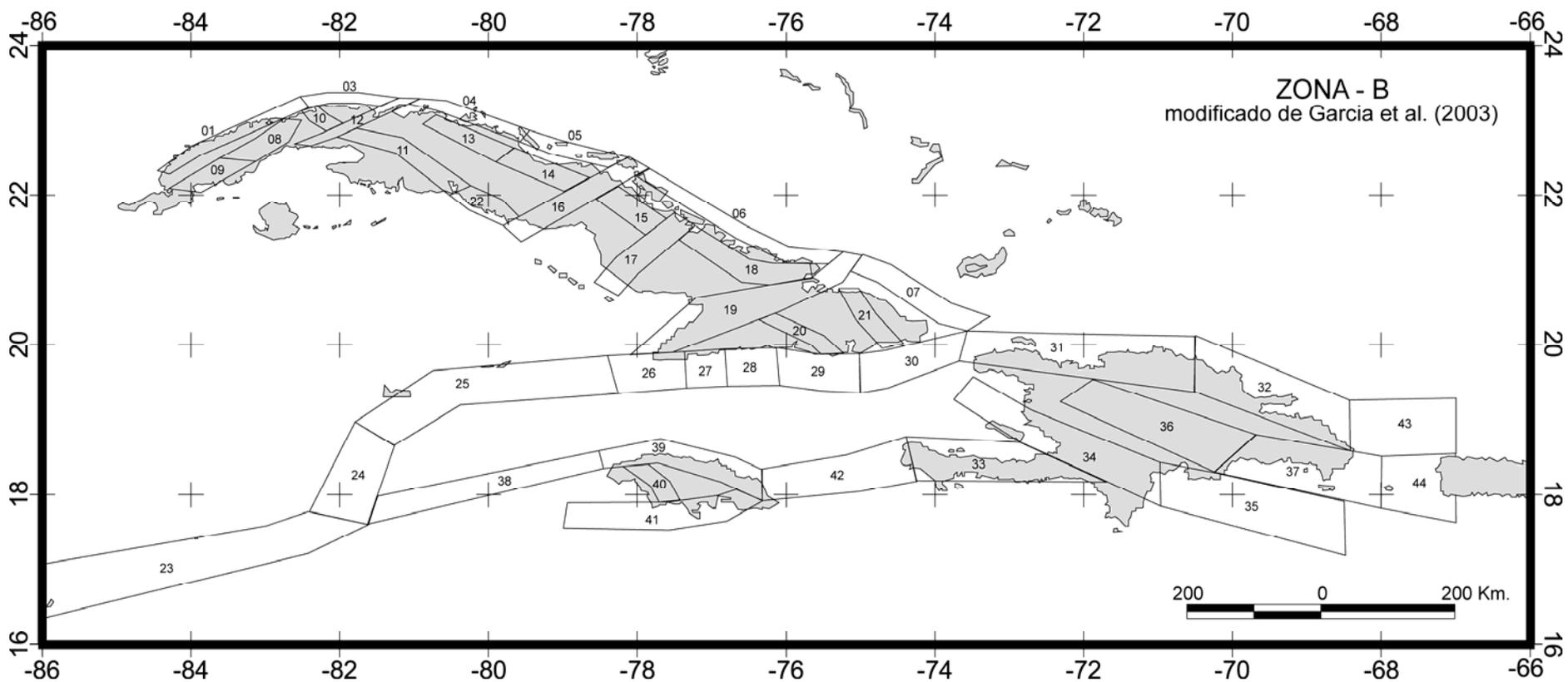


Fig. 1.13- Modelo de zonas sismogeneradoras: ZONA-C (este trabajo)

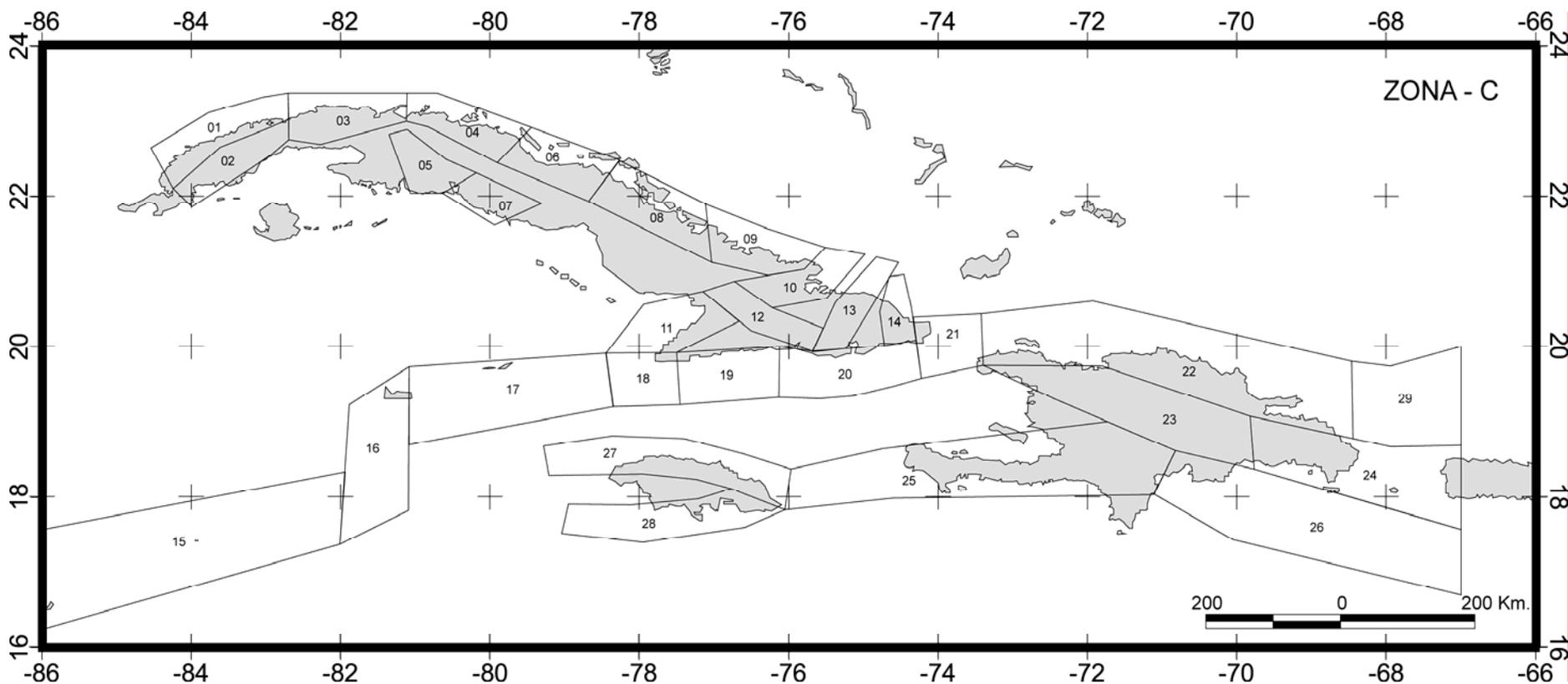
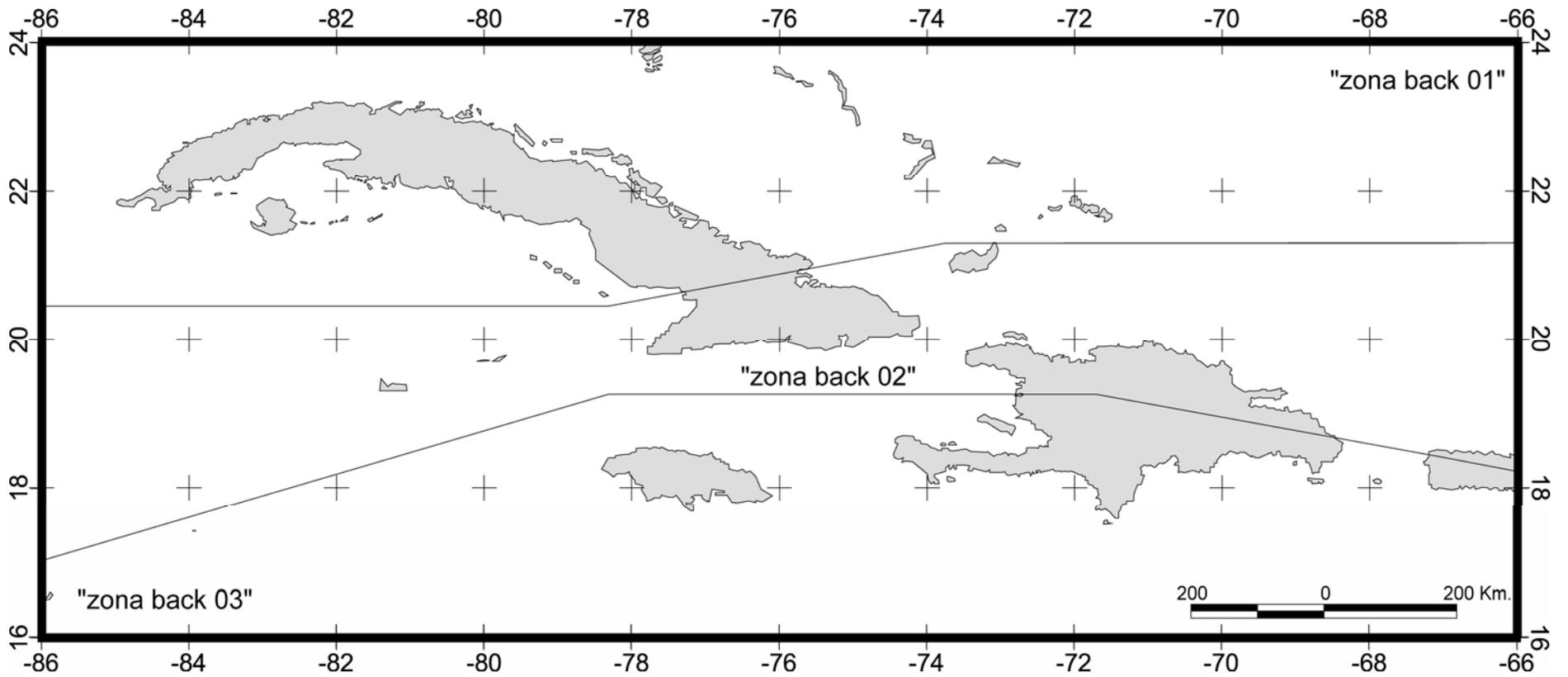


Fig. 1.14- Modelo de zonas sismogeneradoras: zonas con sismicidad de fondo ("background")



El nodo N6, en una primera versión de nuestro árbol lógico, estaba relacionado con la manera de determinar los parámetros que definen el régimen sísmico en cada una de las zonas sismogeneradoras. Más concretamente con el método de ajuste de los gráficos magnitud - frecuencia, para la obtención de los valores de **a** y **b**. Nos proponíamos obtener el ajuste de los gráficos usando tres métodos diversos: (a) - mínimos cuadrados, (b) - máxima verosimilitud y (c) - el propuesto por Kijko y Sellevol (1989).

En un análisis posterior, luego de hacer varias pruebas en zonas sismogeneradoras con características sismotectónicas e historia sísmica diversas, nos percatamos que usando uno u otro método de ajuste, las variaciones en los resultados eran significativas solo en el caso de que existieran diferencias apreciables entre el aporte de la sismicidad histórica y la instrumental. Por esta razón, creímos que era mas interesante sustituir en el árbol esta variante, por la correspondiente al uso de la frecuencia mas elevada del número de eventos para cada clase de magnitud, teniendo en cuenta que esta frecuencia fuese compatible con el período de completamiento del catálogo para esta clase de magnitud [(método descrito en (Slejko et al., 1998) y utilizado en (García et al, 2003)] o la interpolación de los valores de cada clase usando una relación exponencial truncada negativa.

El nodo N7 está relacionado con la determinación de la magnitud máxima (M_{max}) asociada a cada zona. Para la determinación de este parámetro, nos propusimos tres metodologías: (a) - “*One step beyond*”, método propuesto por Slejko et al. (1998) y utilizado anteriormente en (García et al., 2003), el cual relaciona la información contenida en el subcatálogo de cada zona sismogeneradora y el período de recurrencia del terremoto máximo observado para la obtención de la M_{max} . La traducción del nombre de este método, “un salto adelante”, no es muy explicativa, y continuaremos en lo que sigue usando el término en inglés; (b) - La asignación de la M_{max} a partir de la información geólogo - tectónica - estructural, utilizando la relaciones empíricas propuestas por Well y Coppersmith (1994) o tomando (aceptando) directamente los valores propuestos por los autores del mapa de zonas sismogeneradoras, siempre y cuando la M_{max} fuera fruto de una valoración sismotectónica y (c) - el método “*paramétrico - histórico*” para la estimación de la peligrosidad sísmica propuesto por Kijko y Graham (1998), del cual utilizaremos el procedimiento de cálculo para la obtención de la M_{max} .

El nodo N8 tiene que ver con la atenuación de las ondas sísmicas; usaremos en este caso las relaciones de Ambraseys et al. (1996) y Dahle et al. (1995), como en el método no zonificado, ambas definidas para roca y suelo blando.

Parámetros de cálculo y su incertidumbre

Catálogo paramétrico.

Una versión actualizada del catálogo paramétrico (Alvarez et al.,1999), fue preparada por García et al. (2003) a partir de los reportes de las agencias internacionales (NOOA, ISC, MPR, NEIC, JSN) y del Servicio Sismológico Nacional (SSSN) cubano, hasta el año 2000. Este catálogo cubre un período de casi 500 años (1502-2000). El número total de eventos fue de 16525, el parámetro energético de trabajo fue la magnitud obtenida a partir de las ondas superficiales (M_s), por lo que todos los eventos presentes en el catalogo se les calculó su magnitud M_s de forma directa o indirecta usando el mismo procedimiento que en (García et al., 2003).

Como dentro del proceso de calculo usamos la relación de atenuación propuesta por Dahle et al., (1995) definida en términos de la magnitud de momento sísmico (M_w), se utilizaron las formulas empíricas (con validez global) propuestas por Ekström y Dziewonski (1988) para la transformación de la magnitud M_s a M_w . Es necesario aclarar que esta transformación se realizó dentro del programa de cálculo [SEISRISK III, Bender y Perkins (1987), versión modificada por los autores], específicamente en la tabla de atenuación que se debe introducir como dato de partida, por lo que la magnitud de los eventos del catálogo no fue alterada:

$$\begin{aligned}
 M_w &= 2.1 + 0.667M_s && \text{para } M_s \leq 5.3 \\
 M_w &= 9.4 - 0.667[92.45 - 11.40M_s]^{0.5} && \text{para } 5.3 < M_s \leq 6.8 \quad (1.9) \\
 M_w &= M_s && \text{para } M_s > 6.8
 \end{aligned}$$

Debido a que una de las premisas fundamentales al enfrentar un estudio probabilístico de peligro sísmico es que el proceso de ocurrencia de terremotos responda a una distribución poissoniana (es decir, un proceso estacionario en el tiempo de eventos independientes y no múltiples), las réplicas fueron eliminadas del catálogo, usando una ventana espacio - temporal (Gardner y Knopoff, 1974), obtenida empleando datos de la región de estudio (García et al., 2003).

Una última modificación al catálogo de trabajo fue necesaria, con el fin de no excluir de los cálculos a los eventos profundos de La Española. Es bien conocido que las relaciones de atenuación se obtienen generalmente para terremotos someros, y tal es el caso de las seleccionadas por nosotros. Fue necesario aplicar un procedimiento para convertir la magnitud (M_{sr}) real de los eventos de esta región con profundidades ≥ 35 Km. a una magnitud (M_{se}) equivalente que “convirtiera” a cada evento (modificando su magnitud) en un terremoto superficial que generara un campo de aceleraciones pico semejante al del terremoto profundo. Este procedimiento garantiza la validez del uso de las relaciones de atenuación escogidas.

La relación de Bommer et al. (1996) para la región del Salvador y Nicaragua fue utilizada para este propósito, debido a que la misma incluye en el análisis la profundidad focal:

$$\ln(PGA) = c_1 + c_2 M_s + c_3 \ln(R) + c_4 h \quad (1.10)$$

donde: PGA= aceleración pico del terreno; R es la distancia epicentral, h la profundidad focal, $c_1 = -1.47$, $c_2 = 0.608$, $c_3 = -1.181$ y $c_4 = 0.0089$. Esta relación está definida en los intervalos: M_s : (3.7 – 7.0) y h : (62 – 260) Km. Para la obtención de la magnitud equivalente M_{se} a partir de la real M_{sr} evaluamos esta función en dos profundidades diferentes, la real h_r y la equivalente h_e y las igualamos,

$$c_1 + c_2 M_{sr} + c_3 \ln(R) + c_4 h_r = c_1 + c_2 M_{se} + c_3 \ln(R) + c_4 h_e \quad (1.11)$$

obteniendo un ΔM_{sh} que depende únicamente de la profundidad de los eventos.

$$\Delta M_{sh} = (M_e - M_r) = \frac{-c_4(h_r - h_e)}{c_2} \quad (1.12)$$

Usando (1.12) para tres niveles de profundidad diferentes se obtienen los siguientes factores de corrección empíricos:

$$\Delta M_{sh55} = -0.75 \quad \text{para } 35 \text{ Km.} \leq h < 75 \text{ Km.} \quad (1.13)$$

$$\Delta M_{sh100} = -1.63 \quad \text{para } 75 \text{ Km.} \leq h < 150 \text{ Km.} \quad (1.14)$$

$$\Delta M_{sh185} = -2.60 \quad \text{para } 150 \text{ Km.} \leq h < 220 \text{ Km.} \quad (1.15)$$

Modelos de zonas sismogeneradoras.

- **Modelo de zonas sismogeneradoras ZONA-A.**

Modelo utilizado a escala nacional en (Chuy y Alvarez, 1995). Se obtuvo a partir de la unión de los modelos propuestos en tres trabajos de regionalización sísmica detallada (RSD), asociados a proyectos de interés económico realizados en la década de los 90 del pasado siglo en la regiones oriental (Chuy et al., 1992), centro - oriental (González et al., 1993) y occidental (Orbera et al., 1990). En anteriores trabajos (Rodríguez et. al, 1997; García et al. 2003) se han expuesto las limitaciones de este modelo en cuanto a la no uniformidad en el tratamiento de la información de partida y su posterior procesamiento. No es objetivo de este trabajo reevaluar el modelo propuesto por Chuy y Alvarez (1995), por lo que únicamente modificamos las fronteras de las zonas de la región sur - oriental (falla Oriente), en correspondencia con los nuevos criterios geodinámicos propuestos para esta zona por Arango (2000) y utilizados en (Despaigne et al., 2002) y las fronteras de la zona profunda de La Española (zona 55 en la figura 1.11) debido a que el programa de cálculo no admite superposiciones en las fronteras de las zonas. Igualmente se mantuvo la clasificación

sismotectónica propuesta por los autores del modelo. El modelo de zonas sismogeneradoras resultante consta de 55 zonas sismogeneradoras + 3 zonas de sismicidad de fondo o “background”.

En lo que sigue lo llamaremos ZONA-A [modificado de Chuy y Alvarez (1995)].

- **Modelo de zonas sismogeneradoras ZONA-B.**

Modelo utilizado en (García et al., 2003) con algunas modificaciones, principalmente en la zona de fallas Oriente y las zonas de Jamaica y la Española. En este modelo, que tiene como antecedentes los trabajos de Cotilla et al. (1996) y Rodríguez et al. (1997), los autores tratan de buscar un compromiso entre la contribución de los criterios geólogo – tectónicos en la definición de las zonas sismogeneradoras y la evidencia real de su aporte a partir de la información contenida en el catálogo de terremotos. En el mismo cada zona sismogeneradora contiene un número suficiente de terremotos como para construir un gráfico de magnitud- frecuencia “propio”, evitando la unión de zonas con un comportamiento sismotectónico “similar” para este propósito. Las zonas que no cumplieran con esta premisa no fueron consideradas como tal y los terremotos que se pudieran asociar a ellas pasaron a la zona “background” o de sismicidad de fondo.

Debido a recientes aportes en el conocimiento geodinámico de la zona de fallas Oriente (Arango, 2000), las zonas sismogeneradoras de Jamaica (The Caribbean Disaster Mitigation Project, 1999) y la Española (Williams et al., 1999), decidimos incluir en este modelo las modificaciones pertinentes a la luz de las recomendaciones propuestas por los autores citados anteriormente.

- Las zonas sismogeneradoras pertenecientes a la zona de fallas Oriente fueron modificadas siguiendo los criterios geodinámicos propuestos por Arango (2000).
- Las zonas sismogeneradoras de La Española han sido modificadas a partir del modelo propuesto por Williams et al. (1999).
- Las zonas sismogeneradoras de Jamaica han sido modificadas siguiendo los criterios propuestos por: The Caribbean Disaster Mitigation Project (1999).
- Fueron incluidas además dos zonas sismogeneradoras en el área de Puerto Rico, en el pasaje de la Mona (Mueller et al. 2003)

El modelo de zonas sismogeneradoras resultante (figura 1.12) consta de 44 zonas sismogeneradoras + 3 zonas de sismicidad de fondo o “background”. En lo que sigue lo llamaremos ZONA-B [modificado de García et al. (2003)].

- **Modelo de zonas sismogeneradoras ZONA-C.**

El tercer modelo, mucho mas simplificado, puede considerarse como el primer nivel de zonación o delineación de las zonas potencialmente sismogeneradoras, las llamadas comúnmente como dominios o provincias sismotectónicas (Liu, 1987, Ulomov V.I., 1993). El tamaño de estas macro-zonas es por lo general suficientemente grande como para realizar un adecuado análisis estadístico de la sismicidad y pueden incluir igualmente más de una falla, zona de fallas o zonas sismogeneradoras, si éstas responden a un enfoque del tipo ZONA-A, con características sismotectónicas similares, pero no idénticas.

El régimen sísmico dentro de la macro-zona resultante representa la potencialidad promedio de las zonas, zonas de fallas o fallas que la componen.

Los resultados obtenidos usando una zonación de este tipo pueden considerarse como el umbral mínimo a considerar al enfrentar un estudio de PS utilizando la metodología propuesta en este trabajo.

El modelo de zonas sismogeneradoras resultante (figura 1.13) consta de 29 zonas sismogeneradoras y 3 zonas de sismicidad de fondo o “background”.

Parámetros del régimen sísmico y magnitudes máximas.

- **Representatividad de los datos.**

Para la definición de la representatividad de los datos en cada intervalo de magnitud se realizó el procedimiento de Stepp (1972). Este método consiste en la determinación del numero total

(acumulativo) de eventos en el tiempo para cada clase de magnitud, partiendo de la premisa de que la frecuencia de ocurrencia es lineal y que los cambios en la pendiente de este gráfico obedecen a cambios en el nivel de detección y por lo tanto al posible “completamiento” de esta clase en el catálogo.

A diferencia de García et al. (2003), decidimos considerar a la región de La Española de manera independiente, realizado el análisis para 4 macrozonas en vez de tres:

- Zona A: Comprende toda la región centro - occidental de la Isla de Cuba, hasta las inmediaciones de la falla Cauto - Nipe.
- Zona B: Comprende la región sur - oriental de la Isla de Cuba, incluyendo las zonas sismogeneradoras que se encuentran al sur - este de la falla anteriormente citada.
- Zona C: Comprende la Isla de Jamaica y las zonas que se encuentran al suroeste de Cabo Cruz.
- Zona D: Comprende la Isla de La Española y la región entre esta Isla y la de Puerto Rico.

En la tabla 1.4 se muestran los resultados obtenidos para estas cuatro zonas. En el caso del modelo ZONA-A [modificado de Chuy y Alvarez (1995)], los resultados de este análisis fueron confrontados con los obtenidos por estos autores, corrigiendo algunos períodos y añadiendo otros que no fueron considerados anteriormente. Este era un paso obligado debido a que en el árbol lógico usaremos un único catálogo.

Tabla 1.5- Representatividad de los datos. Para cada zona se muestra el año a partir del cual la clase de magnitud es “representativa”, es decir no existen omisiones de terremotos pertenecientes a esta clase de magnitud.

<i>Ms</i>	<i>Zona A</i>	<i>Zona B</i>	<i>Zona C</i>	<i>Zona D</i>
8.0	1500	1500	1500	1500
7.5	1500	1500	1500	1500
7.0	1500	1576	1500	1650
6.5	1690	1676	1650	1700
6.0	1760	1700	1750	1750
5.5	1800	1760	1850	1800
5.0	1850	1880	1876	1900
4.5	1900	1900	1910	1960
4.0	1940	1930	1960	1965
3.5	1950	1950	1970	1970
3.0	1970	1970	1970	1985
2.5	1980	1975	1980	1980
2.0	1998	1980	1990	1990
1.5	1998	1995	1995	1995

1.0	-	1998	1998	1998
-----	---	------	------	------

• **Estimación de los parámetros de los gráficos magnitud - frecuencia.**

En el primer método escogido no se requiere del ajuste de las frecuencias de terremotos por clase de magnitud a una relación exponencial (Gutenberg – Richter). Este método descrito en (Slekjo et al., 1998) y utilizado en (García et al., 2003), caracteriza la sismicidad de cada zona sismogeneradora a partir de las contribuciones individuales de cada clase de magnitud, respetando el período de completamiento de esta clase (período representativo), sin introducir la condición de que estas frecuencias se ajusten a una línea recta (Gutenberg – Richter).

A cada zona sismogeneradora, de los tres modelos descritos anteriormente (ZONA-A, ZONA-B y ZONA-C), se le calcularon el número de eventos por clase de magnitud para una serie de intervalos predefinidos a priori [ver García et al., (2003), anexo 2], y posteriormente normalizado para un período de 100 años.

Se seleccionaron las frecuencias más elevadas por clase de magnitud respetando el período de completamiento del catálogo para cada clase y estos valores fueron introducidos directamente al programa de cómputo (ver en las tablas 1-3 del anexo 3, columna IND_RATE).

Como explicamos anteriormente, para comprobar la variabilidad del parámetro *b* del gráfico magnitud - frecuencia a partir del método de ajuste utilizado, realizamos un análisis de sensibilidad tomando como base los resultados obtenidos para el modelo ZONA-B.

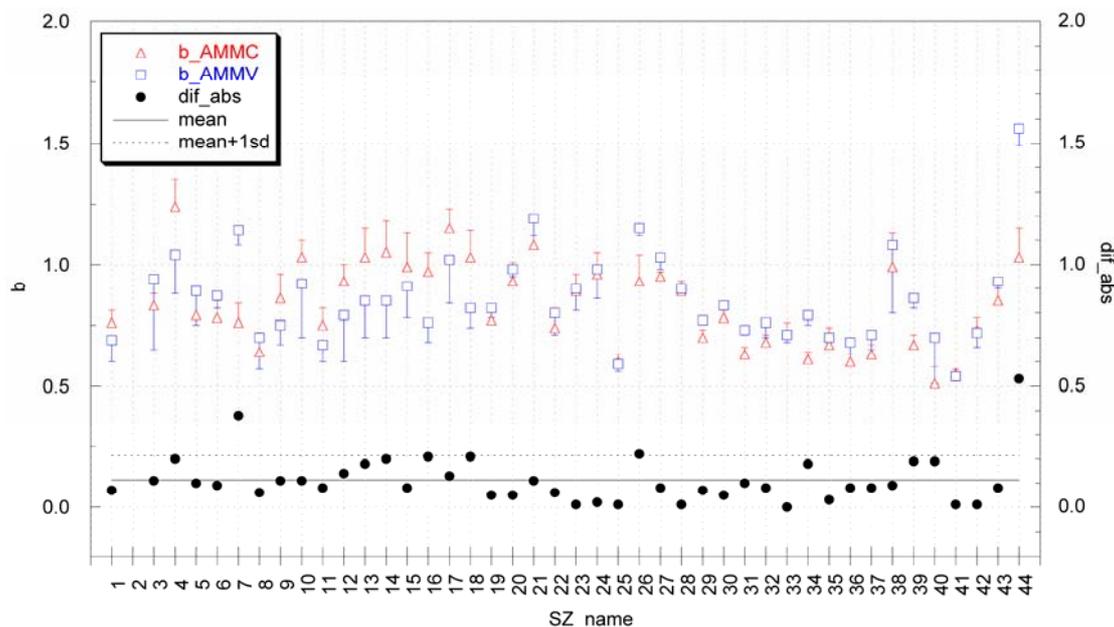


Fig. 1.15 – Valores del parámetro *b* del gráfico magnitud – frecuencia obtenidos para las zonas del modelo ZONA-B, utilizando dos métodos de ajuste diferentes: mínimos cuadrados (b_AMMC) y máxima verosimilitud (b_AMMV); las barras inferior o superior del símbolo representan la desviación estándar de la determinación de *b*. Se muestran además, el valor absoluto de la diferencia entre las dos estimaciones (dif_abs), así como la media de esta diferencia (mean) y este valor medio + 1sd (sd = desviación estándar de la diferencia).

Los resultados de este análisis se muestran en la figura 1.16, en el eje de las equis se representan las distintas zonas sismogeneradoras del modelo ZONA-B, a cada una de estas zonas se le calculó el parámetro *b* usando dos métodos de ajuste diferentes (*triángulo*: ajuste por el método mínimo cuadrado (b_AMMC); *cuadrado*: ajuste por el método de máxima verosimilitud

(b_AMMV)). Posteriormente se obtuvieron el valor absoluto de la diferencia entre los valores obtenidos por ambos métodos (circulo en la misma figura), la media de esta diferencia y su desviación estándar (sd). Como se puede apreciar, en la mayoría de las zonas la diferencia no supera el valor de 0.11 (media); solo en dos ocasiones (zonas 07 y 44) los resultados obtenidos por ambos métodos son lo suficientemente diferentes como para superar el valor medio +1sd. En todos los demás casos la diferencia es menor de 0.24 (media+1sd), aun cuando la sd del ajuste (barra inferior o superior del símbolo según sea el método) es apreciable.

Las zonas en que existe una marcada diferencia entre los dos ajustes son zonas donde el aporte de la sismicidad histórica y la instrumental contenida en el sub- catalogo tiende a no seguir la ley de Gutenberg - Richter; entonces, el ajuste favorece una u otra según el método que se utilice. Generalmente, el método de máxima verosimilitud tiende a favorecer las clases inferiores y por ende la sismicidad instrumental, mientras que el de mínimos cuadrados por el contrario favorece las clases de mayor magnitud (sismicidad histórica), como puede apreciarse de manera significativa en la figura 1.16a. En las zonas donde no se aprecia este fenómeno, ambos ajustes coinciden plenamente como en la zona 28 (ver figura 1.16b).

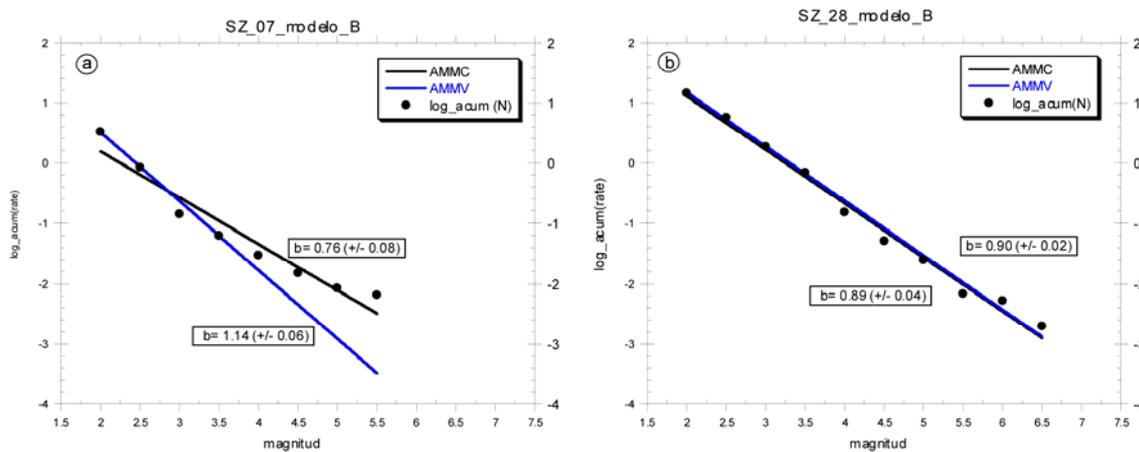


Fig. 1.16 - Gráficos magnitud – frecuencia obtenidos para las zonas 7 (a) y 28 (b) del modelo ZONA-B, utilizando dos métodos de ajustes diversos: mínimo cuadrados (AMMC) y máxima verosimilitud (AMMV). Se muestran además, las frecuencias acumulativas para cada clase de magnitud y el valor del parámetro b y la incertidumbre de su determinación.

Debemos hacer notar que la sd del ajuste por el método de máxima verosimilitud es menor que la obtenida por el método de mínimos cuadrados, aunque como se puede apreciar en la figura 1.17a, el ajuste obtenido por el segundo método es mas cercano a los datos experimentales y por lo tanto a la sismicidad documentada por el catalogo.

Sin embargo, debido a que la magnitud (variable independiente) y el número acumulativo de eventos por clase de magnitud no son “teóricamente” independientes y por lo tanto la función de distribución de los errores no se ajustaría a una distribución gaussiana, muchos autores aconsejan utilizar el método de máxima verosimilitud (Wiechert, 1980; Bender, 1983; EPRI/SOG, 1987; Bender y Perkins, 1993).

En nuestro caso, decidimos considerar como válido el ajuste obtenido utilizando el método de máxima verosimilitud, siempre y cuando NO existiera un “desajuste” desproporcionado entre el aporte de la sismicidad histórica y la instrumental; en tal caso, preferimos favorecer de manera conservadora el aporte de la sismicidad histórica y por lo tanto usar los resultados obtenidos por el método de mínimos cuadrados.

A cada zona sismogeneradora de los tres modelos descritos anteriormente (ZONA-A, ZONA-B y ZONA-C) se le calcularon los valores de frecuencia acumulativa por clase de magnitud (Ms), de la misma manera que en el método anterior (Slekjo et al., 1998), y posteriormente, estas

frecuencias fueron ajustadas utilizando los métodos descritos mas arriba. De la línea resultante se tomaron las frecuencias por clase de magnitud y no el valor de a y b porque es esta la manera de introducir los datos en el programa de cómputo (ver en las tablas 1-3 del anexo 3, columna GRI_RATE).

La incertidumbre aportada por el uso de un método u otro podría aportar a los resultados finales una variación en el rango de un 10 a un 30% [según Bender y Perkins (1993)].

- **Estimación de la magnitud máxima (Mmax).**

Partiendo de que los modelos de zonas sismogeneradoras tienen un origen diverso, nos propusimos obtener este parámetro a partir de tres metodologías que en su conjunto reflejaran esta problemática: **(a)** - “*One step beyond*”, **(b)** - La asignación de la Mmax a partir de la información geólogo – tectónica – estructural y **(c)** - el método “*paramétrico – histórico*” para la estimación de la peligrosidad sísmica (Kijko y Graham, 1998), del cual solo utilizamos el procedimiento para el cálculo de la Mmax.

- **Método “One step beyond”.**

Relaciona la información contenida en el subcatálogo de cada zona sismogeneradora y el período de recurrencia del terremoto máximo observado para la obtención de la Mmax. Este método utiliza implícitamente la información contenida en el catálogo y solo tiene en cuenta la información sismotectónica en la selección del período de recurrencia del terremoto máximo posible. Con este método se obtienen buenos resultados en las zonas donde la sismicidad esta bien documentada y es posible realizar un buen ajuste del gráfico magnitud – frecuencia, dependiendo de la calidad del mismo la magnitud máxima obtenida.

Como se explica en (García et al., 2003), el procedimiento de cálculo para la obtención de la Mmax consiste en la extrapolación del ajuste del gráfico magnitud – frecuencia un paso más, es decir 0.5 unidades de magnitud. La magnitud máxima obtenida será válida únicamente si su período de recurrencia medio esta comprendido en un intervalo de tiempo mayor que el periodo que cubre el catalogo, pero no tan grande como para obtener frecuencias de ocurrencia demasiado bajas; en nuestro caso escogimos un intervalo entre 500 y 2500 años.

En la figura 1.17a se presentan como ejemplo los resultados obtenidos para el modelo de zonas sismogeneradoras ZONA-B [modificado de García et al. (2003)]; en el eje de las equis se muestran las zonas sismogeneradoras (las tres ultimas zonas pertenecen al “background” o sismicidad de fondo, a las cuales no se les calculó la Mmax) y en el otro eje la magnitud del terremoto máximo observado en la zona y la magnitud máxima obtenida después del proceso de cálculo. Sobre cada símbolo se evidencia el período medio de retorno para la magnitud máxima obtenida, siendo este valor de color azul si es menor del límite inferior del intervalo y rojo en el caso contrario. Las zonas donde el período medio de retorno es menor de 500 años, son por lo general zonas poco documentadas (zonas 01, 09 y 13) donde la calidad del gráfico magnitud - frecuencia y su ajuste no son buenas; en el caso contrario (zonas 20, 21, 26, 31, 38 y 42), podría pensarse que la magnitud del terremoto máximo observado es muy cercana a la magnitud máxima potencial de esta zona y que por lo tanto el terremoto máximo posible ya ocurrió. En el caso que la Mmax obtenida tenga un período de retorno medio que no este comprendido dentro del intervalo escogido (500 y 2500 años), se presupone que la $M_{max} = M$ del terremoto máximo observado (M_{max_obs}).

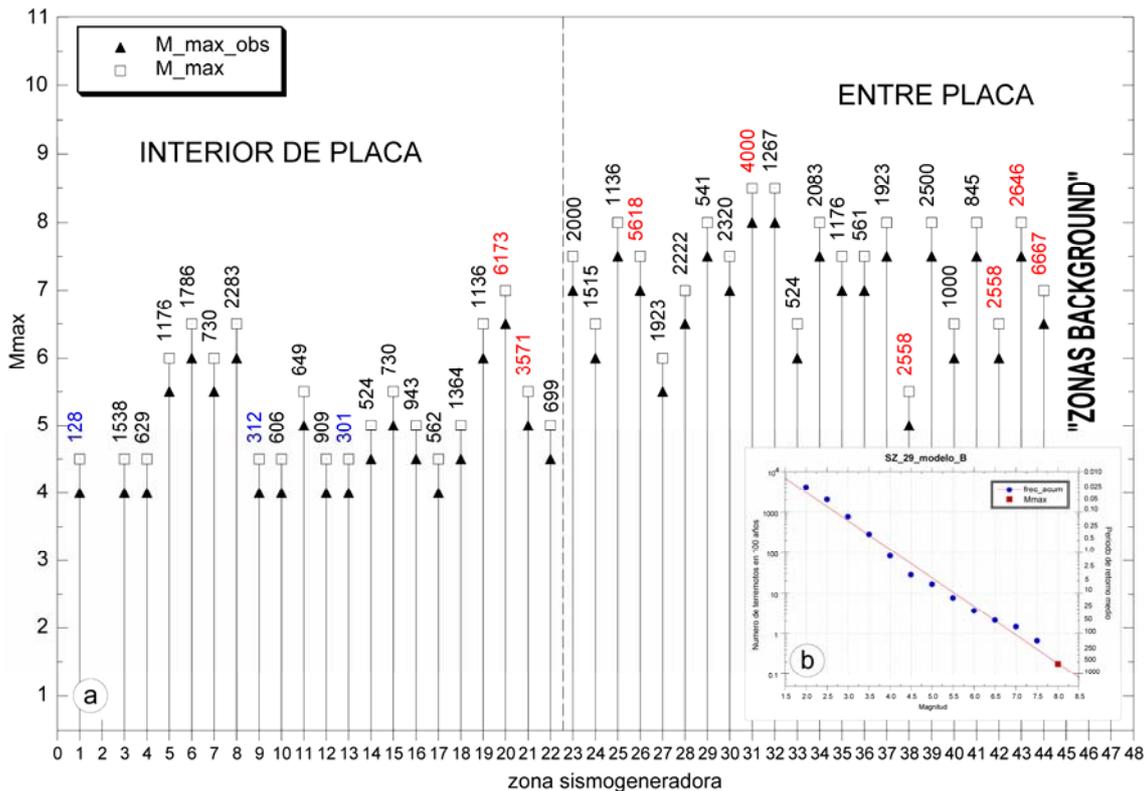


Fig. 1.17 - Resultado de la aplicación del método "One step beyond" (Slejko et al., 1998) en el modelo ZONA-B; (a) - valores de magnitud máxima obtenidas (M_max) por zona, valores de magnitud máxima observada por zona, (b) - ajuste de la zona 29.

En la figura 1.18b se muestran los resultados para una zona en particular, la 29; los círculos azules representan la frecuencia acumulativa de eventos para un periodo de 100 años, la línea roja es el ajuste de estos puntos utilizando el método de máxima verosimilitud y el cuadrado rojo el valor de magnitud máxima obtenida para la zona en cuestión.

- **Magnitud máxima a partir de criterios geólogo - tectónicos.**

En este caso utilizamos dos variantes o criterios diversos:

- (a) - utilizar la relaciones empíricas propuestas por Well y Coppersmith (1994) para obtener la Mmax a partir de la longitud (semi-longitud) de la falla (zonas de fallas),
- (b) - tomar directamente la clasificación (y por ende el valor de Mmax) propuesta por los autores del modelo de zonas sismogeneradoras.

En el caso del modelo ZONA-A se tomaron directamente los valores propuestos por los autores, debido a que la concepción de este modelo es basada en un método sismotectónico particular, en el que los valores de Mmax fueron estimados tomando en consideración también la longitud de zona de fallas (Shebalin, 1971). Para los modelos restantes, se utilizó una relación del tipo:

$$M = a + \log(K) \tag{1.16}$$

donde M (magnitud) es la variable independiente y K (variable dependiente), representa el parámetro que caracteriza la falla (longitud de ruptura superficial o área de ruptura). Comúnmente se utiliza como longitud de ruptura superficial no la longitud total de la falla (L), sino la mitad (0.5L) y hasta un tercio de esta (0.3L), en dependencia de la potencialidad de la misma y el conocimiento geólogo – tectónico – estructural que se tenga a disposición.

En primera instancia decidimos obtener la magnitud máxima usando los valores anteriormente mencionados: la semi-longitud total de la falla (0.5L) y un tercio de esta (0.3L). Tuvimos en cuenta además los valores de Mmax obtenidos por otros autores para las mismas zonas sismogeneradoras,

manteniendo la premisa de que partieran de un análisis similar (Cotilla et al., 1996; Final Report: Kingston Metropolitan Area Seismic The Caribbean Disaster Mitigation Project, 1999; Mueller et al., 2003). Utilizamos para este propósito la relación propuesta por Wells y Coppersmith (1994):

$$M = 5.08(0.10) + 1.16(0.07) * \log(SRL) \quad (1.17)$$

donde M= magnitud de momento, SRL= longitud de ruptura superficial (Km), 5.08 y 1.16 son los coeficientes de la regresión y entre paréntesis se presentan el error estándar del ajuste para cada coeficiente. La desviación estándar es $sd=0.28$, y la regresión es válida para: $M=\{5.2 - 8.1\}$ y $SRL=\{1.3 - 432\}$ Km.

En la figura 1.19 se muestran los resultados obtenidos para el modelo de zonas sismogeneradoras ZONA-B [modificado de García et al. (2003)]. En el eje de las X se presentan las zonas sismogeneradoras y en el eje de las Y: las determinaciones de la Mmax obtenidas usando la relación (1.17) con 0.5L y 0.3L (L= longitud de la falla), el valor máximo y mínimo de la Mmax a partir de la clasificación sismotectónica propuesta por Cotilla et al. (1996), la magnitud máxima observada (Mobs) para la zona y la Mmax obtenida por otros autores usando el mismo método.

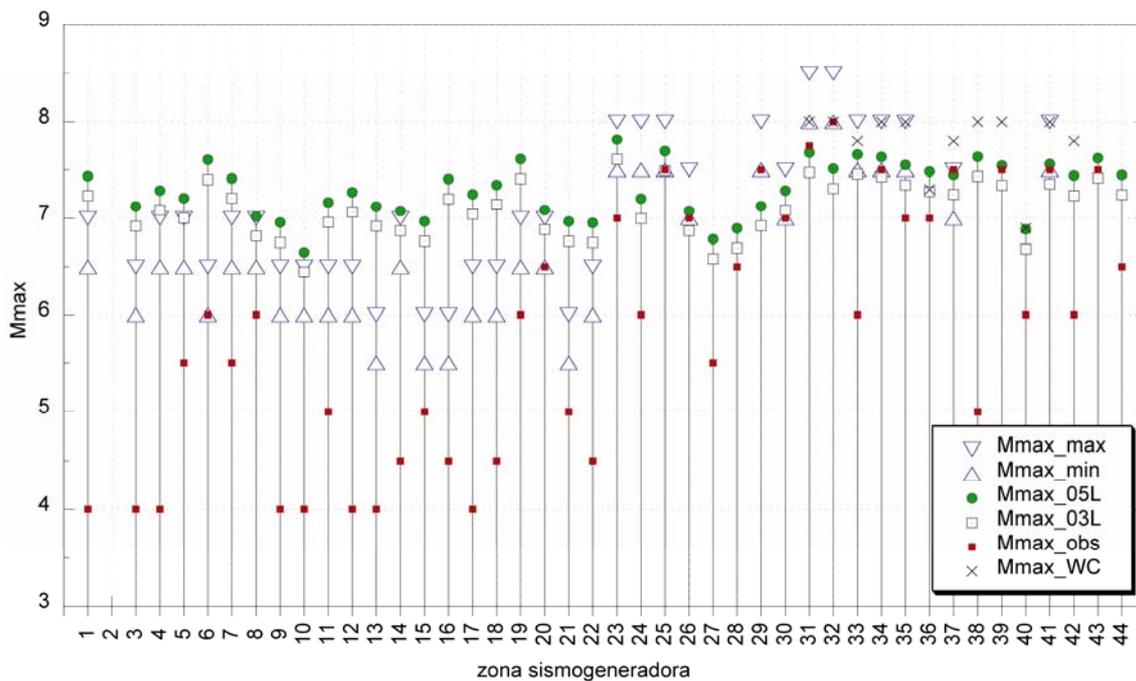


Fig. 1.18- Magnitudes máximas por zona sismogeneradora para el modelo ZONA-B: Mmax_max y Mmax_min: límite máximo y mínimo de la categorización sismotectónica propuesta por Cotilla et al. (1996), Mmax_05L y Mmax_03L: magnitudes obtenidas usando la fórmula (1.17), Mmax_obs: magnitud máxima observada y Mmax_WC: magnitud máxima obtenida por otros autores utilizando las relaciones de Wells y Coppersmith (1994).

Lo primero que queremos hacer notar es la existencia de un gran número de zonas sismogeneradoras en la zona de interior de placa (región centro - occidental de Cuba), donde la magnitud del terremoto máximo observado no supera los 4.5 grados de magnitud Ms. Sin embargo, tanto la magnitud máxima obtenida usando (1.17) como las ya existentes están por encima de 6.0Ms. Esta no es una problemática nueva y ha sido analizada por los autores en otro momento (García et al. 2003), solo queremos recalcar la necesidad de un estudio sismotectónico con carácter geodinámico en esta región donde hasta el momento, la información contenida en el catálogo, puede avalar la existencia de zonas sismogeneradoras, pero no su potencialidad. A juicio de los autores hemos estado sobrevalorando la magnitud máxima de estas zonas debido a los métodos que hasta el momento han sido utilizados [ver Arango (1996)].

A partir de la zona 19 las magnitudes máximas observadas se acercan un poco más a las obtenidas por métodos geólogo – tectónicos. Llegando incluso a superar las determinaciones obtenidas usando (1.17): zonas 29 y 32; en ambos casos decidimos utilizar la clasificación sismotectónica existente y otorgarle a la zona el valor medio del intervalo [Mmax_max – Mmax_min]; en los demás casos utilizamos la Mmax obtenida usando (1.17) con 0.5L.

• **Magnitud máxima a partir del método “paramétrico - histórico”.**

El procedimiento de cálculo pertenece a un método de estimación de la peligrosidad sísmica conocido con el nombre de método “paramétrico – histórico” (Kijko y Graham, 1998). En el mismo los autores combinan las bondades de un método “paramétrico -deductivo” (Cornell, 1968), con un método “no- paramétrico – histórico” (Veneziano et al., 1984), tomando lo mejor de ambos y al decir de sus autores, evadiendo sus desventajas.

El método consiste en la ejecución de dos pasos fundamentales:

1. Cálculo de los parámetros específicos del área (zona sismogeneradora, falla), tales como: la frecuencia media anual de eventos (λ), los parámetros a y b del gráfico magnitud - frecuencia y su incertidumbre, el período que cubre el catálogo (T) y la magnitud máxima (Mmax).
2. Estimación de los parámetros de la distribución de la variable que caracteriza el movimiento del terreno.

De este método, solo utilizamos el procedimiento de cálculo para la obtención de la magnitud máxima y por lo tanto es el que analizaremos en detalle a continuación.

• **Magnitud máxima m_{max} : fórmula genérica.**

Se asume que en el área en cuestión, dentro de un intervalo de tiempo específico T , existen n terremotos principales con magnitudes M_1, M_2, \dots, M_n . Cada magnitud $M_i \geq m_{min}$ ($i=1, \dots, n$), donde m_{min} no es mas que la magnitud para la cual son representativos todos los eventos mayores que ella en el intervalo de tiempo considerado. Además, se asume que las magnitudes de los eventos son independientes, idénticamente distribuidas y que existe la función de distribución acumulativa (CDF), $F_M(m | m_{max})$. El parámetro m_{max} es el límite superior del rango de magnitud y por lo tanto debe ser estimado. La función distribución acumulativa (CDF) puede ser definida a partir de:

$$F_M(m | m_{max}) = \begin{cases} 0, & \text{para } m < m_{min}, \\ \frac{1 - \exp[-\beta(m - m_{min})]}{1 - \exp[-\beta(m_{max} - m_{min})]} & \text{para } m_{min} \leq m \leq m_{max}, \\ 1, & \text{para } m > m_{max}, \end{cases} \quad (1.18)$$

donde $\beta = b \ln(10)$, siendo b la pendiente del gráfico magnitud – frecuencia (relación Gutenberg – Richter); obtenida como resultado del truncamiento de la función $F_M(m)$ en el punto m_{max} . Kijko y Graham (1998) proponen que m_n , la magnitud máxima observada (más adelante m_{max}^{obs}) incluida en el intervalo $[m_{min}, m_{max}]$ tiene una CDF:

$$F_{M_n}(m) = [F_M(m)]^n \quad (1.19)$$

después de integrar por partes, el valor esperado de M_n , $E(M_n)$ será:

$$E(M_n) = \int_{m_{min}}^{m_{max}} m dF_{M_n}(m) = m_{max} - \int_{m_{min}}^{m_{max}} F_{M_n}(m) dm \quad (1.20)$$

de aquí,

$$m_{max} = E(M_n) + \int_{m_{min}}^{m_{max}} [F_M(m)]^n dm \quad (1.21)$$

La expresión (1.21) después de reemplazar $E(M_n)$ por m_{max}^{obs} se convierte en:

$$m_{\max} = m_{\max}^{obs} + \int_{m_{\min}}^{m_{\max}} [F_M(m)]^n dm \quad (1.22)$$

en la cual la magnitud máxima buscada (m_{\max}), aparece en ambos lados de la formulación. No obstante, a partir de esta ecuación genérica, un valor estimado de m_{\max} (en lo adelante \hat{m}_{\max}), puede ser obtenido fácilmente por iteración. La primera aproximación de \hat{m}_{\max} puede ser obtenida reemplazando en (1.22) el límite superior (desconocido) de la integral (m_{\max}) por la magnitud máxima observada (m_{\max}^{obs}). La segunda aproximación se obtiene al reemplazar el límite superior de la integral por su propia solución previa. Algunos autores llaman a este procedimiento: “*el método iterativo*”, declarando que en la mayoría de los casos la convergencia es bastante rápida. El estimador (1.22) puede ser utilizado aún cuando el número exacto de eventos n se desconozca, pudiendo ser reemplazado por λT . Es necesario aclarar que como $\int_{m_{\min}}^{m_{\max}} [F_M(m)]^n dm \geq 0$, el valor de la magnitud máxima será siempre igual o mayor que la magnitud máxima observada.

- **Magnitud máxima m_{\max} : Estimación de \hat{m}_{\max}**

Su reescribimos (1.22) utilizando (1.18), podemos obtener el primer estimador de la magnitud máxima (\hat{m}_{\max}) como:

$$\hat{m}_{\max} = m_{\max}^{obs} + \frac{1}{n} \frac{1 - \exp\left[-\beta(m_{\max}^{obs} - m_{\min})\right]}{1 - \exp\left[-\beta(m_{\max}^{obs} - m_{\min})\right]} \quad (1.23)$$

si el número de eventos (n) no se conoce y la frecuencia media de eventos (λ) está disponible, es posible reemplazar n por λT . Esta fórmula se conoce como estimador Tate - Pisarenko, T-P (Tate, 1959; Pisarenko et al., 1996). La varianza aproximada del uso del estimador T-P usando la función de distribución acumulativa (CDF) puede ser estimada a partir de:

$$\text{var}(\hat{m}_{\max}) \cong \sigma_M^2 + \frac{n+1}{n^3} \frac{\left\{1 - \exp\left[-\beta(m_{\max}^{obs} - m_{\min})\right]\right\}^2}{\beta^2 \exp\left[-2\beta(m_{\max}^{obs} - m_{\min})\right]} \quad (1.24)$$

donde, si n se desconoce, puede ser reemplazado por λT .

En Kijko y Graham (1998), los autores obtienen un segundo estimador de la Mmax, resolviendo la integral:

$$\int_{m_{\min}}^{m_{\max}^{obs}} F_M(m | m_{\max}^{obs})^n dm$$

donde la CDF es descrita por la ecuación (1.18), y m pertenece al intervalo $[m_{\min}, m_{\max}]$. Utilizando la aproximación de Cramér (Cramér, 1948), obtenemos que:

$$\int_{m_{\min}}^{m_{\max}^{obs}} F_M(m | m_{\max}^{obs})^n dm = \frac{E_1(Tz_2) - E_1(Tz_1)}{\beta \exp(-Tz_2)} + m_{\min} \exp(-\lambda T) \quad (1.25)$$

donde $z_1 = \frac{-\lambda A_1}{(A_2 - A_1)}$, $z_2 = \frac{-\lambda A_2}{(A_2 - A_1)}$, $A_1 = \exp(-\beta m_{\min})$, $A_2 = \exp(-\beta m_{\max}^{obs})$ y $E_1(\cdot)$ denota una

función integral exponencial (Abramowitz y Stegun, 1970) del tipo:

$$E_1(z) = \int_z^{\infty} \frac{\exp(-\zeta)}{\zeta} d\zeta$$

la cual puede ser convenientemente aproximada a:

$$E_1(z) = \frac{1}{z} \exp(-z) \frac{z^2 + a_1 z + a_2}{z^2 + b_1 z + b_2} \quad (1.26)$$

donde $a_1=2.335733$, $a_2=0.250621$, $b_1=3.330657$, y $b_2=1.681534$. La fórmula anterior es una aproximación de la integral exponencial anterior, con un error máximo de $5 \cdot 10^{-5}$ en el intervalo $1 \leq z \leq \infty$.

A partir de aquí, el estimador de la Magnitud máxima quedara definido como (Kijko y Sellevoll, 1989):

$$\hat{m}_{\max} = m_{\max}^{obs} + \frac{E_1(Tz_2) - E_1(Tz_1)}{\beta \exp(-Tz_2)} + m_{\min} \exp(-\lambda T) \quad (1.27)$$

este estimador se conoce con el nombre de Kijko-Sellevoll (K-S) y es de amplio uso en la literatura en estos momentos. Al igual que en el caso anterior, existe la posibilidad de estimar la varianza del estimador a partir de:

$$\text{var}(\hat{m}_{\max}) = \sigma_M^2 + \left[\frac{E_1(Tz_2) - E_1(Tz_1)}{\beta \exp(-Tz_2)} + m_{\min} \exp(-\lambda T) \right]^2 \quad (1.28)$$

Los autores consideran menos eficiente el primer estimador en términos del error cuadrático medio y la dispersión alrededor del valor medio (σ), pero dejan entrever que el estimador K-S es mas sensible a períodos de observación cortos y zonas de baja actividad.

Para la obtención de las magnitudes máximas utilizamos el programa “scena” amablemente cedido por el autor (Kijko y Graham, 1999). Los datos de partida para cada zona fueron: la magnitud máxima observada, la magnitud mínima (tomada del gráfico magnitud – frecuencia), la desviación estándar (sd_M) del cálculo de la magnitud, los parámetros a y b del gráfico magnitud – frecuencia, la desviación estándar (sd_b) de la determinación del parámetro b y el período de observación del catalogo (T). Se tomó como válida la magnitud máxima con menor sd.

De forma general los resultados obtenidos utilizando este procedimiento son muy cercanos a la magnitud máxima observada, alejándose de ésta muy poco (alrededor de 0.03Ms como valor medio y menos de 0.1Ms como valor máximo). En el caso de que la magnitud máxima observada era $\leq 4.0M$ no fue posible obtener la magnitud máxima de la zona utilizando ambos estimadores, en este caso la magnitud del terremoto máximo observado se considera como magnitud máxima de la zona en cuestión.

En la figura 1.19 se muestran los resultados de usar todos los procedimientos anteriormente citados para el modelo ZONA-B.

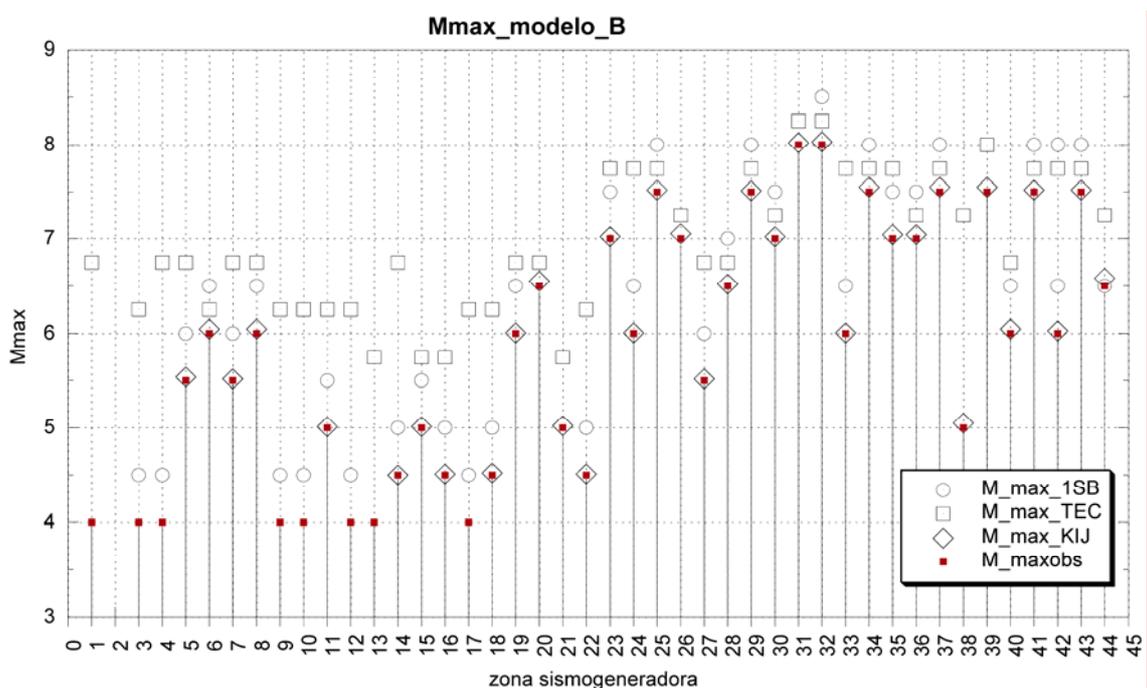


Fig. 1.19- Magnitudes máximas por zona sismogeneradora (ZONA-B).

Atenuación de las ondas sísmicas.

El parámetro escogido para describir las sacudidas sísmicas fue la aceleración horizontal pico. En estos momentos no contamos con relaciones de atenuación propias que describan el comportamiento de este parámetro, por lo tanto decidimos utilizar relaciones de validez regional (Ambraseys et al., 1996; Dahle et al., 1995), una europea y la otra centroamericana, las cuales pudieran validarse posteriormente, usando los datos reales registrados por la red de acelerógrafos instalada en nuestro país desde el año 1998. La relación de Ambraseys et al. (1996) es bien conocida en el ámbito europeo y fue calibrada a partir de una amplia base de datos de terremotos,

$$\log(PGA) = C_1 + C_2 * M + C_4 * \log(R) + C_A * S_A + C_S * S_S \quad (1.29)$$

$$\text{con } R = \sqrt{d^2 + h_0^2}$$

donde PGA es la aceleración pico del terreno en g (aceleración de la gravedad), M = magnitud M_s (4.0-7.9 M_s), $C_1 = -1.48$, $C_2 = 0.266$, $C_4 = -0.922$, $C_A = 0.117$, $C_S = 0.124$, $h_0 = 3.5$, d es la distancia epicentral (0-260 Km). Tiene una desviación estándar $sd = 0.25$. Para los eventos con $M_s > 6.0$ se utiliza una corrección de $(0.88845 d)$ propuesta por los autores posteriormente, para convertir la distancia epicentral en distancia a la falla. Esta fórmula permite diferenciar el comportamiento del parámetro según el tipo de suelo de la siguiente manera:

Para roca: $V_s > 750$ m/s, $S_A = 0$, $S_S = 0$

Para suelo duro: 360 m/s $< V_s \leq 750$ m/s, $S_A = 1$, $S_S = 0.226$

Para suelo blando: 180 m/s $< V_s \leq 360$ m/s, $S_A = 0$, $S_S = 1.81$

La relación de Dahle et al. (1995) fue calibrada usando terremotos del área centroamericana y a pesar de incluir eventos de la zona de subducción del Pacífico mexicano, éstos son una parte marginal de los datos usados en el ajuste y no afectaron el mismo. Usa una relación del tipo:

$$\ln(PGA) = C_1 + C_2 * M + C_3 * \log(R) + C_4 * R + C_5 * S \quad (1.30)$$

$$\text{con } R = \sqrt{d^2 + h_0^2}$$

donde PGA es la aceleración pico del terreno (en ms^{-2}), M = magnitud M_w (3.0 – 8.0 M_w), $C_1 = -1.579$, $C_2 = 0.554$, $C_3 = -0.560$, $C_4 = -0.00302$, $C_5 = 0.326$, $h_0 = 6.0$, d es la distancia hipocentral (6-490 Km) y tiene una desviación estándar $sd=0.35$. También diferencia la aceleración en dos categorías según el tipo de suelo:

Para roca: $S = 0$

Para suelo: $S = 1$

Debido a que esta relación está definida en una escala de magnitud diferente a la definida en nuestro catálogo de trabajo, se utilizaron las fórmulas empíricas (con validez global) propuestas por Ekström y Dzierwonski (1988) para la transformación de la magnitud M_s a M_w (y viceversa), esta transformación se realizó dentro del programa de cálculo [SEISRISK III, (Bender y Perkins, 1987), versión modificada por los autores], específicamente en la tabla de atenuación que se debe introducir como dato de partida, manteniendo de esta manera invariable la escala energética utilizada, sin aportar nuevas incertidumbres por este concepto.

Resultados

El área de estudio (16° N y 67°W hasta 24° N y 85° W) fue dividida en celdas de aproximadamente 10 km. x 10 km., obteniéndose para cada celda, una población de 72 valores de aceleración horizontal pico (PGA), 36 sin el aporte de la incertidumbre aleatoria (desviación estándar de las leyes de atenuación, sd_T) y los restantes 36 con la inclusión de la sd_T , la cual es

introducida como dato de partida en el procesamiento de cálculo y por ende se obtienen como resultado directo en cada celda. En el anexo 4 se presentan los mapas con los valores de PGA, para un período de retorno de 475 años, obtenidos para todos los casos.

El uso de fórmulas de atenuación de las aceleraciones pico (o de cualquier otro parámetro del movimiento del terreno) trae aparejado un error implícito grande. En primer lugar, estos parámetros presentan una gran dispersión con relación a las expresiones matemáticas a las que se aproxima su comportamiento, y en segundo lugar, casi nunca (y es nuestro caso) dichas expresiones son obtenidas usando datos locales. El uso del valor medio + su dispersión estándar sd_T es una garantía de que la probabilidad de subestimar el peligro es baja.

La incertidumbre epistémica, que como ya se ha comentado mide nuestro desconocimiento general de todos los factores que inciden en la formación del peligro (lo que nos impide tomar una decisión unívoca sobre la selección de los datos de entrada y del método de cálculo), se obtiene a partir del procesamiento estadístico de los resultados en términos de PGA para todas las ramas (y es igual a su desviación estándar) para cada una de las celdas del área de estudio.

Los resultados se dividieron en dos poblaciones (con y sin sd_T), ajustando cada población a una distribución normal ($N(\mu, \sigma)$). Por lo tanto, tomaremos como el valor mas representativo, el valor medio ponderado (μ) y como medida de dispersión, la desviación estándar (σ); (ver McGuire y Shedlock, 1981; Kulkarni et al., 1984).

El valor medio (μ), se obtuvo como la media ponderada $\langle \mu \rangle$ de un número discreto de valores de PGA ($\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ con $n=36$) con pesos $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$:

$$\langle \mu \rangle = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (1.31)$$

donde cada peso (w_i) es un número real no negativo y $\sum_{i=1}^n w_i = 1$.

La desviación estándar (σ) se obtiene a partir de:

$$\sigma = \sqrt{v_w^2} \quad (1.32)$$

$$\text{con } v_w^2 = \frac{\sum_{i=1}^n w_i (x_i - \mu)^2}{\sum_{i=1}^n w_i - 1} \quad (1.33)$$

siendo v_w^2 la varianza ponderada de los resultados en PGA y σ el estimador de la incertidumbre epistémica.

De tal forma, para ambas poblaciones, el resultado para cada celda del área de estudio será el valor medio obtenido μ de todas las ramas con una incertidumbre dada por la dispersión estándar σ

En la figura 1.20, se muestran las poblaciones resultantes en un punto cualquiera de la red ("grid") para un período de retorno de 100 y 475 años respectivamente, sin considerar la dispersión de las leyes de atenuación (sd_T).

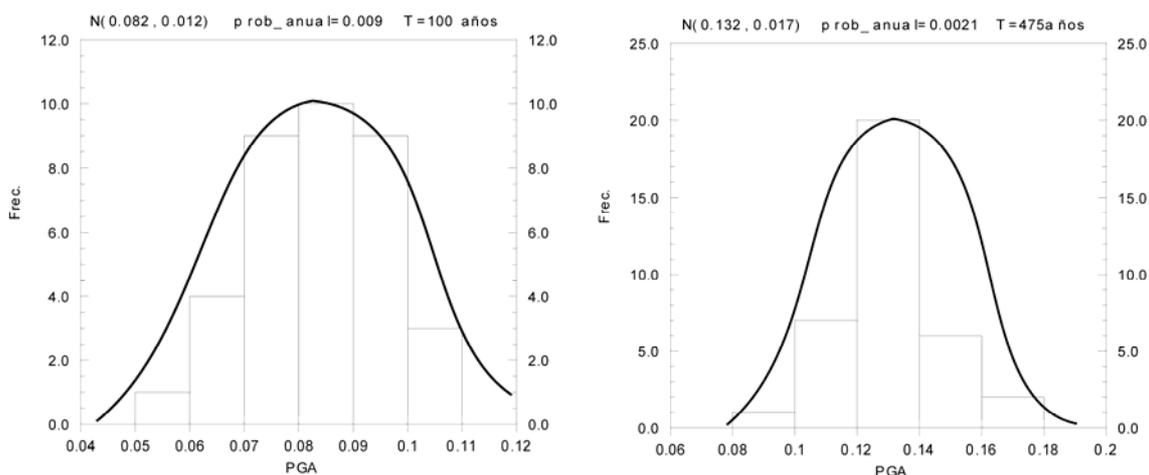


Fig. 1.20- Distribución de los resultados obtenidos en términos de aceleración pico del terreno (PGA) en roca, para una probabilidad anual de excedencia de 0.009 (a) y 0.0021(b). La población fue ajustada a una función de distribución normal con $N(\mu, \sigma)$.

Con el fin de estudiar el comportamiento de la peligrosidad sísmica utilizando la metodología aquí propuesta, seleccionamos 10 localidades, tratando de abarcar todo el espectro nacional. En la tabla 1.6 se presentan las coordenadas de estas localidades y las de la celda mas cercana. No obstante, en el anexo 4 se presentan los resultados en forma de mapas para un período de retorno de 475 años (roca y suelo friable).

Tabla 1.6- Localidades escogidas y su localización geográfica.

Localidad	Localidad		Celda	
	Longitud (W)	Latitud (N)	Longitud (W)	Latitud (N)
1. Candelaria	82.96	22.73	82.905	22.717
2. C. Habana	82.40	23.13	82.399	23.094
3. Santa Clara	79.96	22.40	79.909	22.435
4. Trinidad	80.00	21.80	80.026	21.832
5. Moa	74.72	20.65	74.999	20.654
6. Bayamo	76.65	20.38	76.666	20.422
7. Cabo Cruz	77.73	19.83	77.687	19.820
8. Pílon	77.35	19.90	77.305	19.942
9. Santiago de Cuba	75.83	20.04	75.901	19.940
10. Guantánamo	75.21	20.13	75.260	20.176

En la figura 1.21 se presentan los resultados obtenidos en términos de aceleración horizontal pico (PGA), rama por rama, para 6 localidades incluidas en la tabla 1.6; en esta figura las ramas están representadas por un número. En la tabla 1.7 se muestra una codificación que caracteriza el proceso usado para calcular cada rama del árbol. Dicha codificación es usada también para identificar los mapas presentados en el anexo 4. En estos códigos las primeras tres letras corresponden al modelo de zonas sismogeneradoras (SZA: ZONA-A, SZB: ZONA-B y SZC: ZONA-C), las tres que le siguen tienen que ver con el modelo de sismicidad y el ajuste de sus parámetros [IND: frecuencias individuales, GRI: ajuste utilizando la relación Gutenberg – Richter, el próximo trío con la determinación de la magnitud máxima [ISB: “one step beyond”, TEC: origen tectónico, KIJ: (Kijko y Graham, 1998)] y las tres últimas con la ley de atenuación y el tipo de terreno a que están referidos los resultados [AMR: (Ambraseis, 1996) y DHR: (Dhale, 1995)], para roca y [AMS: (Ambraseis, 1996) y DHS: (Dhale, 1995)], para suelo friable.

Concretamente, en la figura 1.21 se presenta la PGA para un período de retorno medio de 475 años sin sd_T (pga_{475}) y con sd_T (pga_{475sd}) para cada una de las 36 ramas del árbol lógico. Además, se muestra el valor medio de ambos parámetros (símbolo verde y azul respectivamente), el valor medio de PGA con el aporte de la incertidumbre epistémica ($pga_{475_mean+epi}$) y finalmente el valor medio más el aporte de las incertidumbres aleatoria y epistémica ($pga_{475_mean+sd+epi}$) que sería el resultado final de nuestro procesamiento.

Tabla 1.7- Códigos utilizados para caracterizar cada rama del árbol lógico y sus parámetros. Las zonas sismogeneradoras [SZA - ZONA-A (Chuy y Alvarez, 1995), SZB – ZONA-B (García et al., 2003) y SZC – ZONA-C (este trabajo)], parámetros del modelo de sismicidad [IND - frecuencias individuales, GRI - ajuste utilizando la relación Gutenberg – Richter], magnitud máxima [1SB - “one step beyond”, TEC - origen tectónico, KIJ – (Kijko y Graham, 1999)] y ley de atenuación y tipo de terreno [AMR – (Ambraseis, 1996) y DHR – (Dhale, 1995), para roca] y [AMS: (Ambraseis, 1996) y DHS: (Dhale, 1995)], para suelo friable.

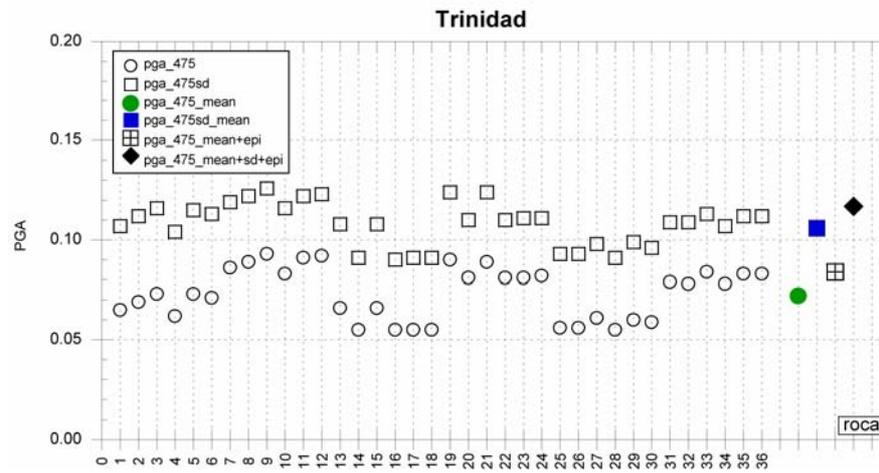
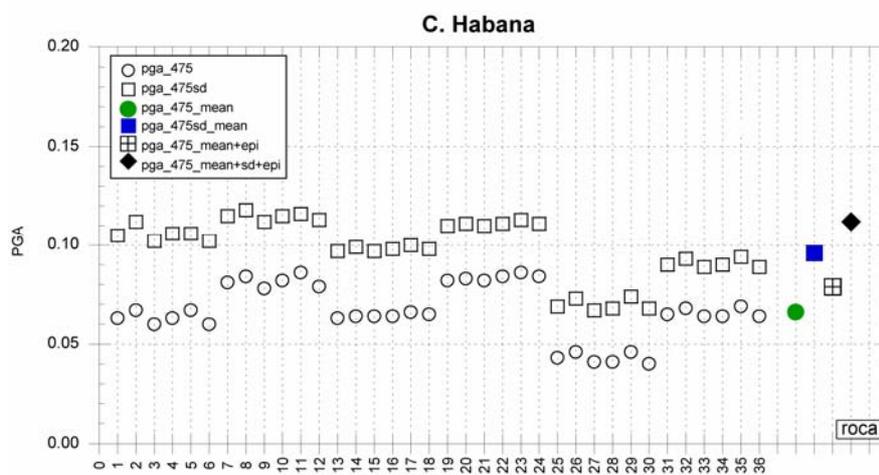
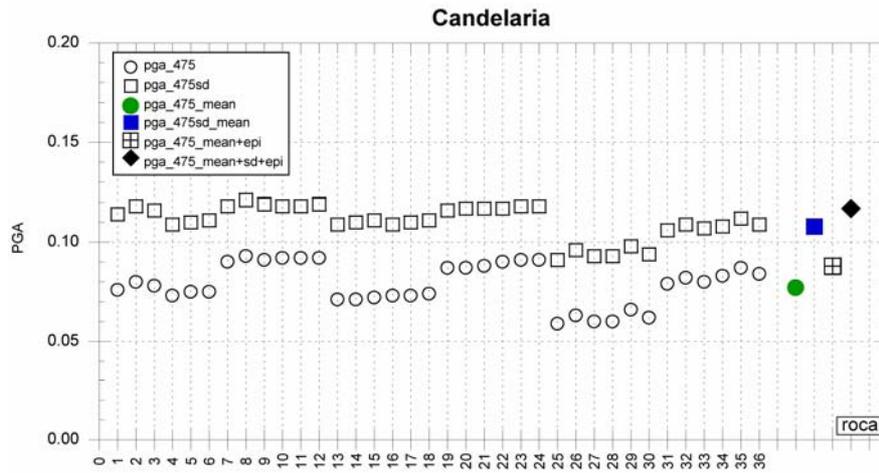
No.	Código	No.	Código
1	SZB IND 1SB AMR	19	SZA IND 1SB DHR
2	SZB IND TEC AMR	20	SZA IND TEC DHR
3	SZB IND KIJ AMR	21	SZA IND KIJ DHR
4	SZB GRI 1SB AMR	22	SZA GRI 1SB DHR
5	SZB GRI TEC AMR	23	SZA GRI TEC DHR
6	SZB GRI KIJ AMR	24	SZA GRI KIJ DHR
7	SZB IND 1SB DHR	25	SZC IND 1SB AMR
8	SZB IND TEC DHR	26	SZC IND TEC AMR
9	SZB IND KIJ DHR	27	SZC IND KIJ AMR
10	SZB GRI 1SB DHR	28	SZC GRI 1SB AMR
11	SZB GRI TEC DHR	29	SZC GRI TEC AMR
12	SZB GRI KIJ DHR	30	SZC GRI KIJ AMR
13	SZA IND 1SB AMR	31	SZC IND 1SB DHR
14	SZA IND TEC AMR	32	SZC IND TEC DHR
15	SZA IND KIJ AMR	33	SZC IND KIJ DHR
16	SZA GRI 1SB AMR	34	SZC GRI 1SB DHR
17	SZA GRI TEC AMR	35	SZC GRI TEC DHR
18	SZA GRI KIJ AMR	36	SZC GRI KIJ DHR

De forma general, la dispersión de las leyes de atenuación, expresada en la desviación estándar del ajuste para obtener la curva (sd_T), influye decisivamente en los resultados finales, siendo en todos los casos de mayor envergadura que el aporte de la incertidumbre epistémica (σ). Como ya era conocido, los valores de PGA obtenidos usando Ambraseis et al. (1996) son mayores que los obtenidos usando Dalhe et al. (1995) para las zonas de alta sismicidad, mientras que las zonas de media o baja actividad ocurre lo contrario.

La influencia del cambio de zonas sismogeneradoras (modelo) en los resultados finales es apreciable si se comparan los resultados de las 24 primeras ramas (modelos ZONA-B y ZONA-A), con las 12 restantes (ZONA-C), más esto era previsible dadas las dimensiones de las zonas sismogeneradoras que conforman este modelo.

Debido a que las magnitudes máximas obtenidas utilizando el método de Kijko y Graham (1999) son muy cercanas al valor de la magnitud máxima observada, de forma general los resultados obtenidos en estas ramas son inferiores (ramas 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33 y 36).

En la figuras 1.22 y 1.23 se muestran los resultados en forma de curvas para las 10 localidades anteriormente descritas. En el eje de las X se representa el parámetro de cálculo escogido para representar las sacudidas sísmicas en cada punto: la aceleración pico del terreno (PGA) en unidades de g (aceleración de la gravedad); en el eje de las Y se muestran, en la parte izquierda, la probabilidad anual de excedencia del valor medio de la aceleración pico del terreno (F1) y en la parte derecha, su correspondiente período de retorno (medio). Las curvas muestran el comportamiento de: el valor medio de la aceleración pico (pga), este valor más la incertidumbre aleatoria (pga_sd, con $sd = sd_T$), y el valor medio de la aceleración pico teniendo en cuenta además el aporte de la incertidumbre epistémica (pga_sd+s, con $sd = sd_T$ y $s = \sigma$), relativa a los distintos modelos escogidos a priori.



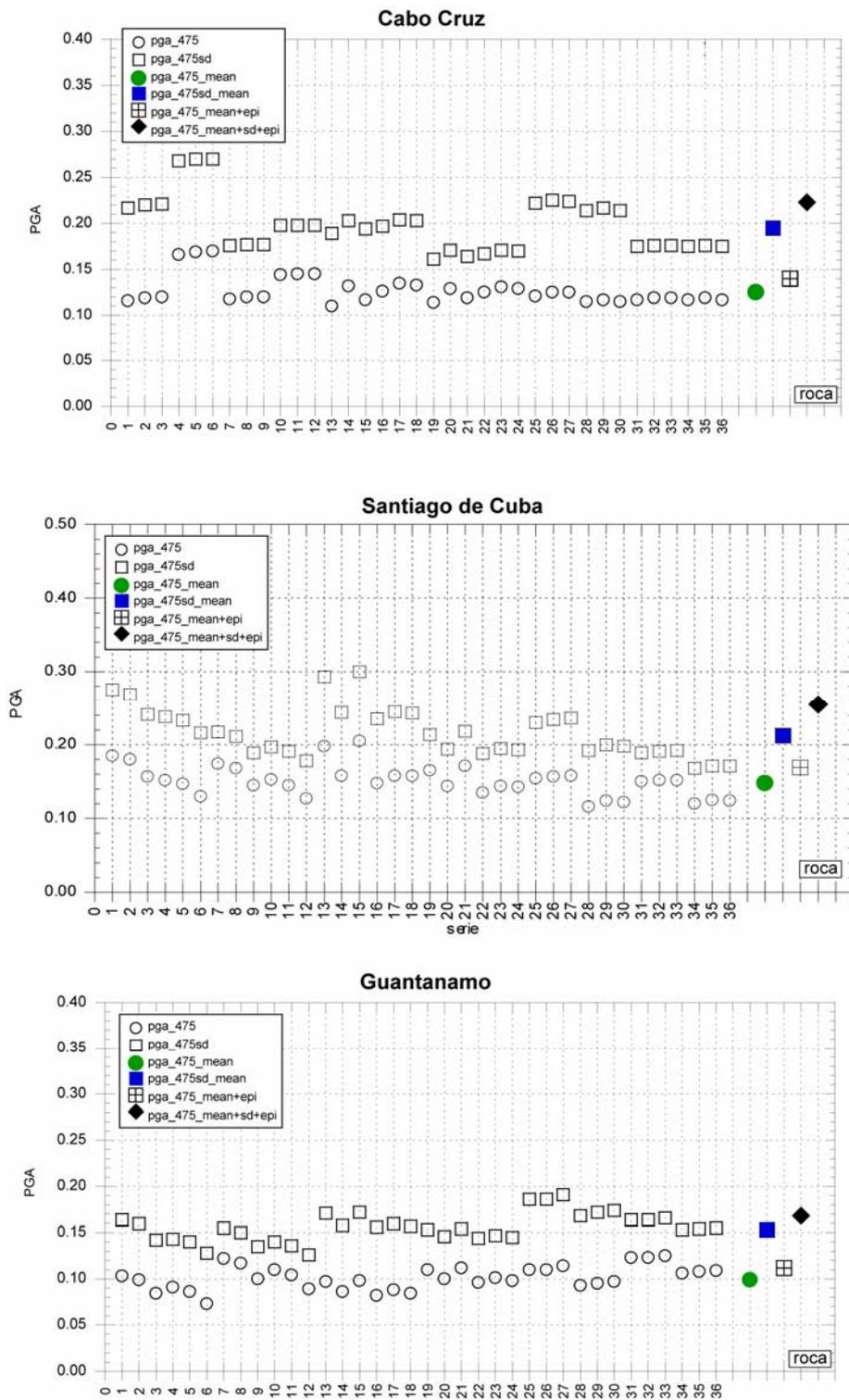


Fig. 1.21- Aceleración pico del terreno (PGA) para un período de retorno de 475 años, referida a roca, para cada una de las 36 ramas del árbol lógico. El círculo verde representa el valor medio de los resultados obtenidos en cada rama sin tener en cuenta la sd_T (pga_{475}), el cuadrado azul el valor medio de PGA teniendo en cuenta la sd_T (pga_{574sd} , con $sd = sd_T$), el otro cuadrado representa el valor medio de PGA sin sd_T pero teniendo en cuenta la incertidumbre epistémica (σ), el último símbolo (rombo) representa el valor final de PGA (valor medio + $sd_T + \sigma$), conteniendo el aporte de la incertidumbre aleatoria y la epistémica.

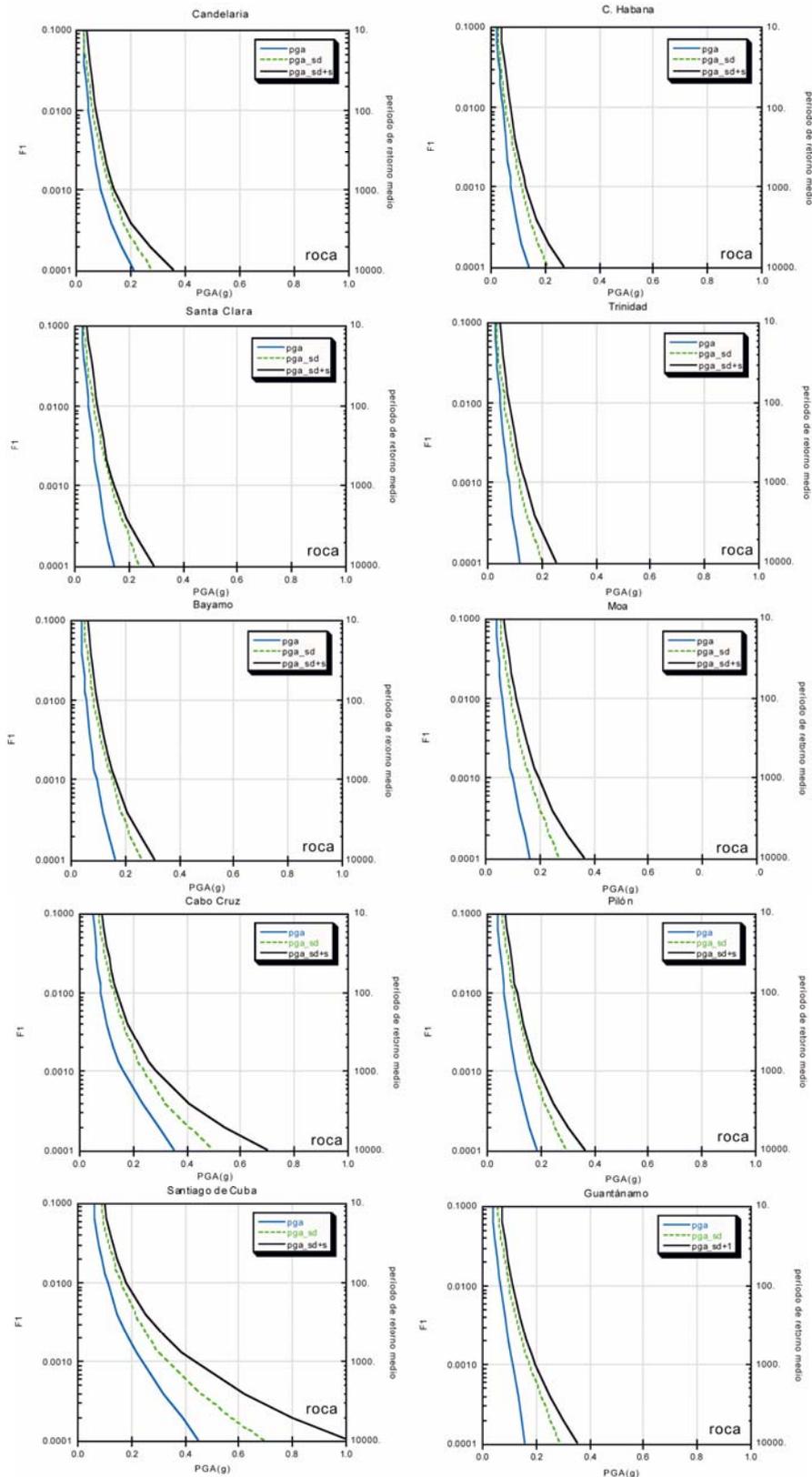


Fig. 1.22- Curvas de peligrosidad sísmica en roca. El parámetro que caracteriza las sacudidas sísmicas es la aceleración pico del terreno (PGA) en g (aceleración de la gravedad); F1 representa la probabilidad anual de excedencia relativa al valor medio de PGA (pga), al valor medio teniendo en cuenta la incertidumbre aleatoria (pga_sd, con $sd = sd_T$) y al valor medio teniendo en cuenta las incertidumbres aleatoria y epistémica (pga_sd+s, con $sd = sd_T$ y $s = \sigma$).

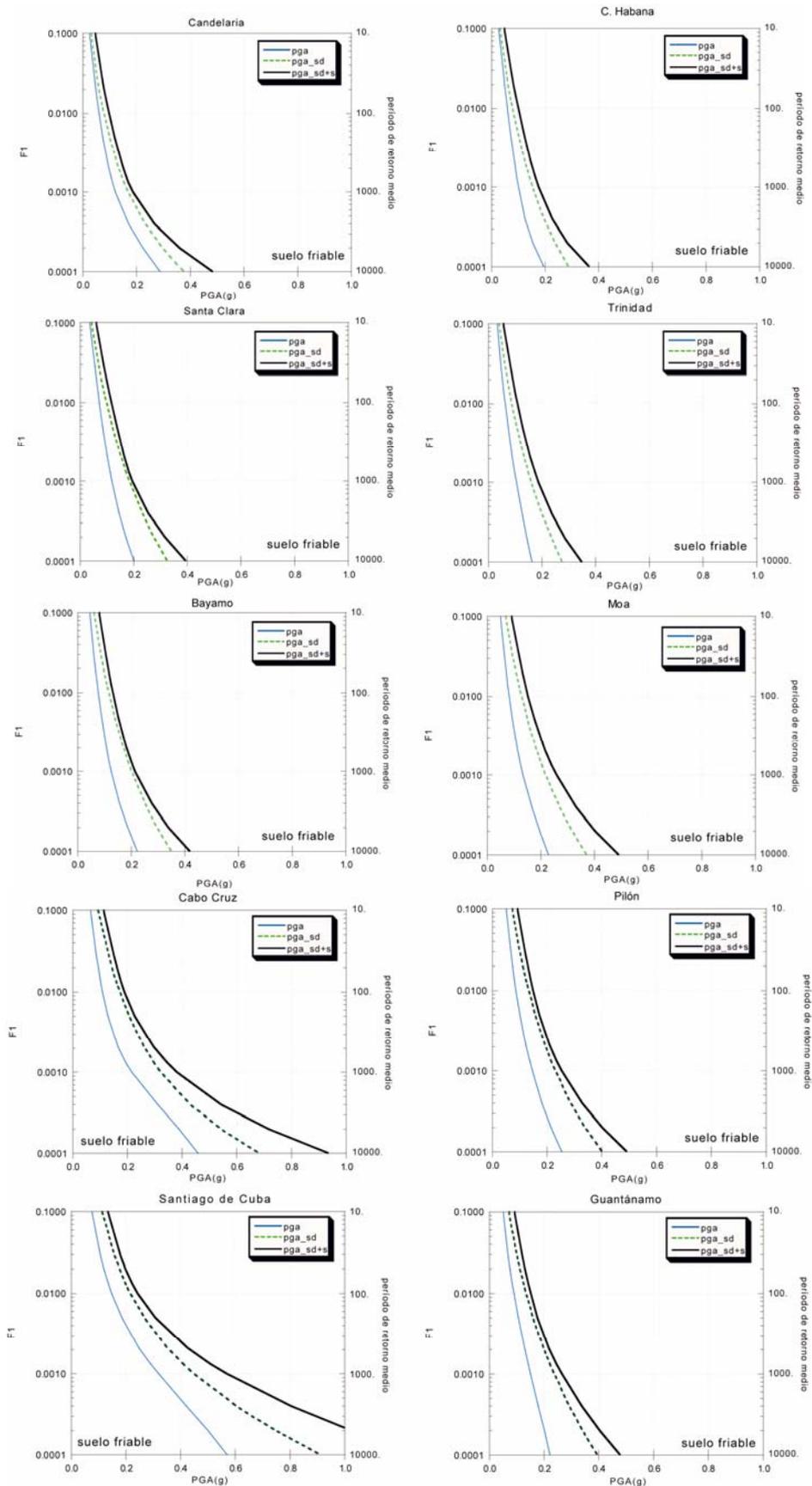


Fig. 1.23 - Curvas de peligrosidad sísmica en suelo friable. El parámetro que caracteriza las sacudidas sísmicas es la aceleración pico del terreno (PGA) en unidades de g (aceleración de la gravedad); F1 representa la probabilidad anual de excedencia relativa al valor medio de PGA (pga),

al valor medio teniendo en cuenta la incertidumbre aleatoria (pga_{sd} , con $sd = sd_T$) y al valor medio teniendo en cuenta las incertidumbres aleatoria y epistémica (pga_{sd+s} , con $sd = sd_T$ y $s = \sigma$).

Del análisis de las curvas obtenidas se puede fácilmente confirmar la importancia de la incertidumbre aleatoria, aportada por la dispersión de las leyes de atenuación utilizadas; en cambio, la incertidumbre epistémica varía de gráfico a gráfico, según se diferencien los parámetros de los distintos modelos utilizados, siendo determinante en los períodos medios de recurrencia mayores de 1000 años, donde empiezan a tener peso las distintas determinaciones de la magnitud máxima.

Como resultado final para toda el área de estudio se presentan tres mapas (figuras 1.24 y 1.25), todos para un periodo de retorno de 475 años, referidos a roca y suelo medio. En el primero (figuras 1.24a y 1.25a), se presentan el valor medio de PGA (media de los estimados medios) sin tener en consideración ningún tipo de incertidumbre, el segundo (figuras 1.24b y 1.25b), considera el aporte de la incertidumbre aleatoria (sd_T), y el tercero toma en consideración ambas incertidumbres (figuras 1.24c y 1.25c), la aleatoria anteriormente citada (sd_T) y la epistémica (σ), fruto de las distintas combinaciones escogidas a priori.

De forma general, los máximos regionales en los tres mapas son los mismos, variando por supuesto el valor de PGA alcanzado en cada caso. En la zona occidental, encontramos valores entre 0.06 y 0.08 g (aceleración de la gravedad) en casi toda el área (figura 1.24a), llegando a 0.10g en la zona de Pinar del Río, el litoral norte desde Villa Clara hasta Holguín y al sur en la región de Cienfuegos y Trinidad. En la zona oriental, en las inmediaciones de Bayamo, la provincia de Holguín y Baracoa se alcanzan valores entre 0.10 y 0.12g; mientras que en la costa sur de Cabo Cruz a Punta de Maisí, los valores de PGA varían desde 0.16g hasta 0.12g llegando a tomar valores máximos (0.24 g) en Santiago de Cuba.

La influencia de la incertidumbre aleatoria (sd_T) en los resultados (figura 1.24b), comporta un aumento apreciable de la PGA: 0.14 g en la zona de Pinar del Río, Norte de Villa Clara, Camagüey y Trinidad. En toda la región oriental sobrepasa los 0.14g, con valores máximos de 0.32g cercanos a la bahía de Santiago de Cuba. Al incluir el aporte de la incertidumbre epistémica (figura 1.24c), como media, el valor de PGA aumenta 0.02 g en la zona centro – occidental y 0.04 g en la oriental.

Una situación análoga se aprecia en la figura 1.25, los máximos regionales se mantienen invariables, solo aumenta de valor la PGA de al menos una clase (0.02 g en la zona centro - occidental y 0.04g en la oriental) con respecto a la roca.

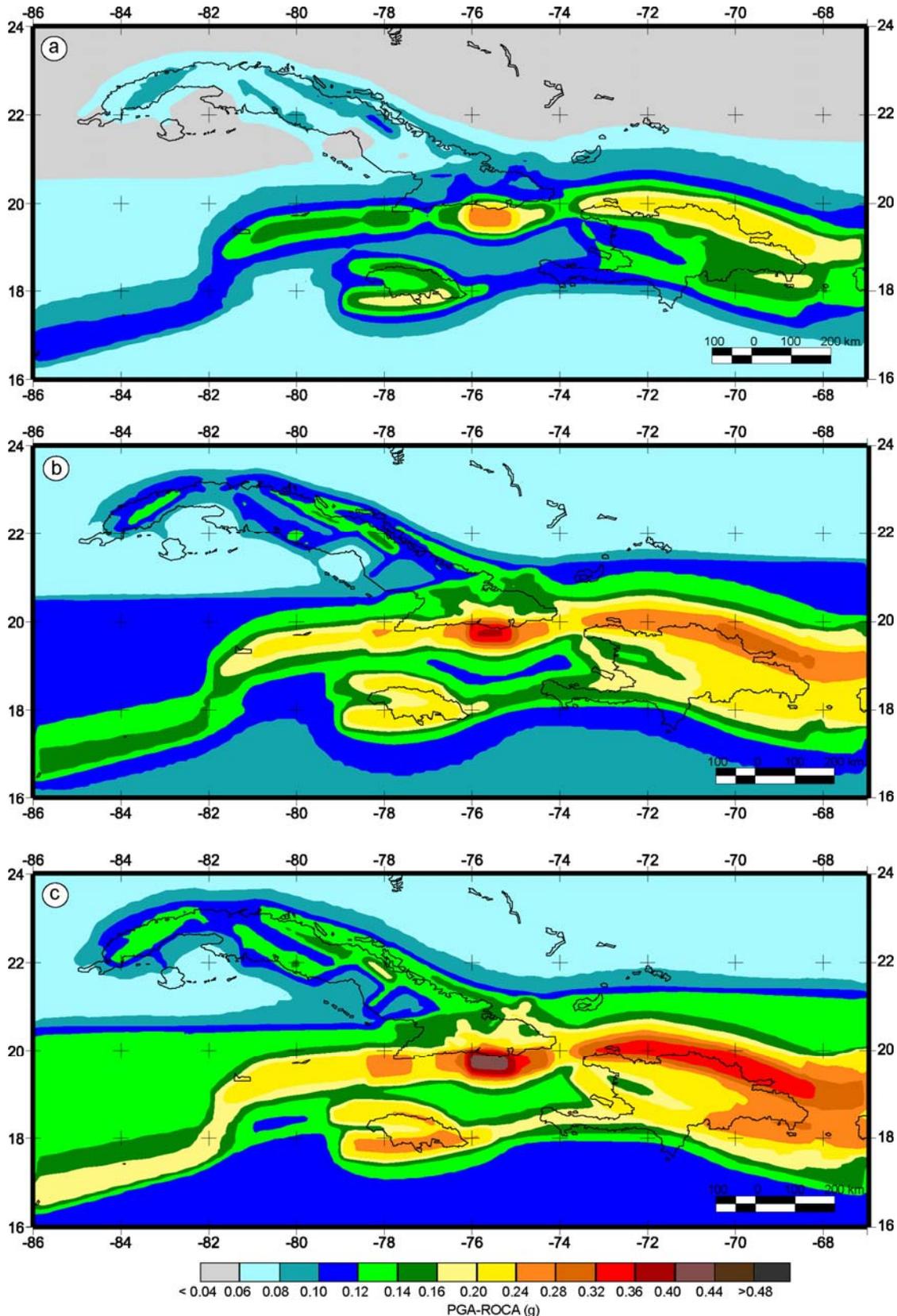


Fig. 1.24- Mapas de peligrosidad sísmica en roca para un periodo de retorno de 475 años. El parámetro que caracteriza las sacudidas sísmicas es la aceleración pico del terreno (PGA) en unidades de g (aceleración de la gravedad): (a) - valor medio de PGA, (b) - valor medio teniendo en cuenta la incertidumbre aleatoria (sd_T) y (c) - valor medio teniendo en cuenta las incertidumbres aleatoria y la epistémica ($sd_T + \sigma$).

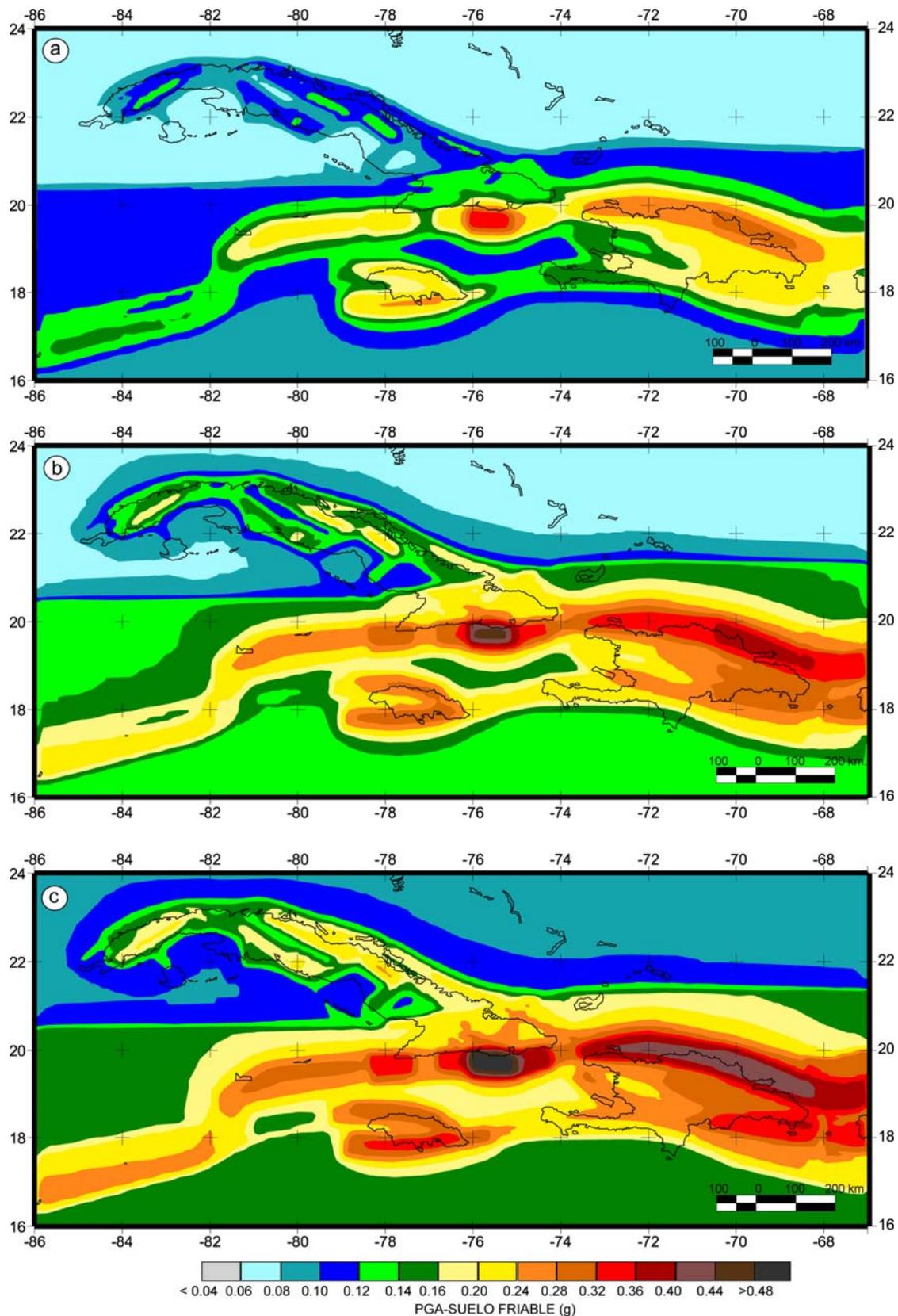


Fig. 1.25- Mapas de peligrosidad sísmica en suelos friables para un período de retorno de 475 años. El parámetro que caracteriza las sacudidas sísmicas es la aceleración pico del terreno (PGA) en unidades de g (aceleración de la gravedad): (a) - valor medio de PGA, (b) - valor medio teniendo en

cuenta la incertidumbre aleatoria (sd_T) y (c) - valor medio teniendo en cuenta las incertidumbres aleatoria y epistémica ($sd_T + \sigma$).

Discusión

Los resultados presentados en la figura 1.24c, son comparables con los de Chuy y Alvarez, 1995 (aceleración horizontal para perfiles de suelo S2 y una probabilidad de excedencia del 15% y 50 años de vida útil de las edificaciones), dado que las relaciones de atenuación usadas en este trabajo están definidas para un “soft soil” (suelo friable) o terreno tipo S2-S3 si tenemos en cuenta la velocidad de propagación de las ondas de cizalla (entre 180 – 360 m/seg.). Los valores máximos que alcanza la PGA en la zona occidental en (Chuy y Alvarez, 1995) son de 0.1 g en Pinar del Río y Ciudad de la Habana, e inferiores en el resto del área, con mínimos de 0.02 en la porción sur de la Ciénaga de Zapata y buena parte de la Isla de la Juventud. En nuestro caso se alcanzan valores de 0.2 g en la zona de Pinar del Río, entre 0.12 y 0.14g en Ciudad de la Habana y valores entre 0.07 y 0.1g en el resto del área.

En la región central nuestros valores como media son mayores que los obtenidos por Chuy y Alvarez (1995) - 0.08 -, con excepción de Trinidad (0.2 g) y una pequeña área de Camagüey (0.24g). Valores máximos de 0.4g en las cercanías de Santiago de Cuba muestra el mapa de Chuy y Alvarez (1995), mientras en el nuestro aumenta este valor hasta 0.46g en el mismo sitio. Una disminución gradual de la PGA con rumbo Norte es apreciable en el mapa de Chuy y Alvarez (1995), mientras que máximos regionales en la zona de Holguín, el Norte de Guantánamo y las acuatorias de cabo Cruz sobresalen en el nuestro. De manera general los resultados obtenidos por Chuy y Alvarez (1995) son del orden de los presentados en la figura 1.25a, donde no se tienen en cuenta ni la influencia de la incertidumbre aleatoria, ni la epistémica.

Otro trabajo con el cual podríamos confrontar nuestros resultados es el de Rodríguez et al. (1997), donde los autores presentan como resultado final un mapa de aceleraciones horizontales máximas para un período de retorno de 475 años, para un suelo medio o tipo S2, usando el algoritmo de Cornell (1968) como en nuestro caso. Los valores máximos de PGA en el mapa anteriormente citado son por lo general menores que los obtenidos por Chuy y Alvarez (1995) y en este trabajo: del orden de 0.3g en la región sur - oriental, con el máximo cercano a las costas de Guantánamo y no de la bahía de Santiago de Cuba, solo comparable con los resultados presentados por Rubio (1985). En la zona occidental los valores máximos se encuentran en la región de ciudad de la Habana (0.1g) y en la región central (provincias de Ciego de Avila y Camagüey) con el mismo valor. Rodríguez et al. (1997) justifican este comportamiento debido a la eliminación de las réplicas del catalogo paramétrico usado (valores inferiores de PGA) y a la influencia de la zona sismogeneradora Española Norte (parámetros de atenuación).

Nosotros no creemos que la eliminación de las réplicas del catalogo utilizado sea la causa de este comportamiento, pues en trabajos posteriores hemos obtenido, como media, valores de PGA superiores utilizando el mismo catalogo y el mismo procedimiento para la eliminación de las replicas (García et al. 2003, este trabajo). Creemos más plausible que la causa de la disminución de la PGA sea debido a los valores escogidos para tener en cuenta la dispersión de las leyes de atenuación (en términos de intensidad macrosísmica). El análisis no es simple; tanto en (Rodríguez et al., 1997) como en (Chuy y Alvarez, 1995) se obtienen los valores de PGA de forma indirecta, a partir de una transformación lineal [usando las relaciones de Trifunac y Brady (1975)] de los resultados en intensidades (escala MSK), mientras que en este trabajo usamos fórmulas de atenuación para PGA. Los autores citados consideraban que se cometía un error menor trabajando de esa forma indirecta que usando relaciones de atenuación de PGA no calibradas para Cuba, dando un gran peso al estudio detallado del campo macrosísmico (y su modelación) que tenían disponible. Según su hipótesis de trabajo, el tratamiento del problema de la atenuación de las intensidades y su modelación, en base a isosistas elípticas, debía tender a disminuir el error intrínseco del método,

haciéndolo comparable con el del uso de fórmulas de atenuación de PGA, ya que las existentes no eran de validez local. Lamentablemente esta ventaja se perdía al no calcular numéricamente los errores del ajuste de los parámetros de los modelos de isosistas y al carecer de relaciones de atenuación locales de la intensidad. Se debe señalar que estudios posteriores de la atenuación de intensidades en Cuba, realizados en el marco de este proyecto (anexo 2, García et al., 2003) muestran una gran diversidad de comportamiento de zona a zona, y ponen en duda las ventajas de la modelación del campo macrosísmico en forma de isosistas elípticas basadas en una fórmula de atenuación foránea (Fedotov y Shumilina, 1971). Este método incluía además el cálculo de la PGA utilizando relaciones empíricas lineales [del tipo $\log(\text{PGA}) = c_1 + c_2 I$ (Trifunac y Brady, 1975)].

En estos momentos, diferentes autores proponen abandonar este enfoque (Reiter, 1990; Boore y Ambraseys, 1993 y McGuire, 1993) debido a las incertidumbres aportadas por el uso de la intensidad macrosísmica como parámetro de cálculo y su naturaleza discreta y cualitativa, a los problemas de dispersión de las relaciones entre la PGA y la Intensidad macrosísmica, y debido también a la saturación de los valores de PGA a intensidades mayores o iguales a X y al aporte de las condiciones locales del terreno, poco valorado por Trifunac y Brady (1975), pero concluyente en trabajos posteriores (Murphy y O'Brien, 1977; Wald et al. 1999). Es preferible, si se usa este enfoque, obtener los valores de magnitud (M) usando cualquier relación entre este parámetro y la intensidad macrosísmica y posteriormente utilizar M para obtener la PGA utilizando una relación foránea que se ajuste mas o menos a las condiciones geólogo - tectónicas del área de estudio como proponen Boore y Ambraseys (1993) y McGuire (1993).

Es por ello que en el presente trabajo abandonamos ese enfoque y usamos el que internacionalmente se acepta como mucho más preciso (Boore y Ambraseys, 1993; McGuire, 1993): el del uso de relaciones de atenuación de PGA, aunque no sean obtenidas para la región de estudio y sea necesaria su validación futura a partir de datos experimentales.

Sin embargo, consideramos que la definición de los parámetros de la zona sismogeneradora Española Norte si puede influenciar de manera decisiva los valores de PGA en el sur de Oriente, sobrestimando la PS. Este comportamiento ya fue analizado por García et al. (2003), cuando transformando los resultados obtenidos en términos de intensidad macrosísmica en PGA usando las relaciones de Trifunac y Brady, 1975, obtuvieron un comportamiento similar. Por esta razón, consideramos inapropiada la utilización de estas relaciones para la obtención de los valores de PGA.

El mapa mundial de peligro sísmico (conocido como GSHAP, por sus siglas en inglés), referido a roca, para un periodo de retorno de 475 años; en la región del Caribe (Shedlock, 1999) muestra valores por encima de los 0.32g en el área cercana a Santiago de Cuba, con valores menores a 0.3g al sur- oeste hasta Cabo Cruz y entre 0.24 y 0.16g en Guantánamo y Holguín. En la región central encontramos valores entre 0.16 y 0.08g y en la zona occidental aun menores, con un mínimo de 0.04g en Pinar de Río. En nuestro caso (figura 1.24c) encontramos valores de PGA comparables en la región sur-oriental, no así en la región central y occidental donde los valores obtenidos son sustancialmente diversos. Como ya fue discutido en (García et al., 2003) estas diferencias ocurren debido a que el catalogo utilizado por Shedlock (1999) no cuenta con la información macrosísmica utilizada por nosotros, elemento crucial en los resultados, ya que los autores utilizan un enfoque no zonificado en el procedimiento de cálculo (Veneziano et al. 1984), donde el catalogo y su completamiento constituyen una cuestión vital.

Generalmente en Cuba hemos usado un enfoque de cálculo de la peligrosidad sísmica equivalente a lo que aquí hemos denominado "con inclusión del error aleatorio" para una selección particular de datos de entrada, lo que viniera a ser el uso de una sola de las ramas del árbol lógico correspondiente a ese caso. Al considerar como resultado el caso "valor medio + incertidumbre aleatoria + incertidumbre epistémica", estamos realizando una estimación mucho más robusta, ya que evitamos la subestimación aleatoria, siempre posible cuando se usa una sola variante de cálculo. En eso radica la superioridad del método de árbol lógico sobre los tradicionales.

Conclusiones

Un estudio probabilístico de la peligrosidad sísmica fue realizado partiendo de un enfoque paramétrico zonificado que considera, a partir de un árbol lógico diseñado a priori, los posibles modelos de ocurrencia de terremotos fuertes.

El árbol lógico consta de 36 ramas formadas como resultado de: tres modelos de zonas sismogeneradoras, dos métodos para la estimación de los parámetros del régimen sísmico, tres métodos para la obtención de la magnitud máxima (M_{max}) y dos relaciones de atenuación en términos de aceleración pico (PGA); las cuales reflejan la incertidumbre epistémica de los parámetros de partida. La incertidumbre aleatoria de las relaciones de atenuación fue considerada, y los cálculos se realizaron dos veces, una tomando el valor medio dada por las expresiones de atenuación, y la otra tomando el valor medio + la dispersión estándar.

Los resultados individuales muestran que la mayor influencia en los estimados finales esta dada por la incertidumbre aleatoria (dispersión de las relaciones de atenuación) y por los modelos de zonas sismogeneradoras.

En los mapas finales (figuras 1.24c y 1.25c), para un período de retorno de 475 años se alcanzan máximos superiores a 0.38g y 0.42g para roca y suelo friable respectivamente, en la costa sur de Cuba, cercano a la bahía de Santiago de Cuba, cuando se tiene en cuenta el aporte de las incertidumbres aleatoria y epistémica; en el caso contrario (figuras 1.24a y 1.25a) estos valores decrecen a 0.24g y 0.28g respectivamente.

Se compararon los resultados con los obtenidos hasta el momento en el ámbito nacional e internacional y se analizaron y discutieron las diferencias y sus causas.

Se propone el uso como estimado básico robusto de peligrosidad sísmica del caso “valor medio + incertidumbre aleatoria + incertidumbre epistémica”, que garantiza se evite la subestimación aleatoria, siempre posible cuando se usa una única variante de cálculo.

1.3 Creación de un sistema para el análisis de datos de la peligrosidad sísmica puntual mediante técnicas de clasificación lógico-combinatorias no supervisada

Ramón Pico¹, Leonardo Alvarez²

¹Instituto de Cibernética, Matemática y Física (ICIMAF)

²Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS)

Introducción

El sistema PROGNOSIS de reconocimiento de patrones utilizando métodos lógico-combinatorios comenzó a elaborarse desde la mitad de los años 80 en el Instituto de Cibernética, Matemática y Física del ICIMAF [en sus versiones iniciales, este programa fue aplicado por nosotros a la estimación de magnitudes máximas de terremotos mediante reconocimiento de patrones (Ruiz et al., 1992a)]. En esa época se incorporaron al trabajo diversas instituciones, lo que redundó en la preparación de la versión 1.2 para MS-DOS, en la que incluso tuvimos una pequeña participación nosotros (Ruiz et al., 1992b, 1993). A partir de ese momento el ICIMAF continuó desarrollándolo, dándole énfasis, entre otras cosas a la clasificación no supervisada por algoritmos lógico-combinatorios. Dichos métodos fueron aplicados por nosotros con éxito a mediados de los 90 a la clasificación de curvas de períodos de recurrencia de intensidades sísmicas (Alvarez et al., 1995), lo que motivó que se decidiera profundizar en ese tipo de estudio en el presente proyecto.

A partir del sistema PROGNOSIS, en su versión 2.1 para MS-DOS, el ICIMAF realizó una actualización para plataforma MS-Windows donde se le incorporaron mejoras de los algoritmos originalmente concebidos y se le incorporaron otros, necesarios para la realización de las tareas a cumplir en el presente proyecto. Dentro de los algoritmos o procedimientos incorporados se encuentra el módulo de clasificación sin aprendizaje (no supervisada) utilizando modelos jerárquicos de los métodos de clasificación basados en la búsqueda de componentes conexas y de conjuntos compactos dentro de la muestra de objetos (Pico,1999).

Como resultado del trabajo realizado por el ICIMAF, recibimos una versión “personalizada” del PROGNOSIS, que llamamos “P4”, la cual contiene sólo aquellas aplicaciones que fueron contratadas. La misma fue realizada en Borland C++ y funciona solamente en Windows. Fuimos realizando pruebas parciales de este programa para clasificar curvas en general, usando materiales de otros trabajos que ya disponíamos, mientras se iban obteniendo los correspondientes a este proyecto. Estos resultados fueron objeto de publicación en revistas arbitradas de difusión internacional (González et al., 2004; Alvarez et al., 2005). De esta forma logramos ir ajustando el programa a nuestros requerimientos específicos, a la vez que se fueron definiendo otras modificaciones que considerábamos necesario realizar antes de comenzar la clasificación de las curvas de períodos de retorno de las sacudidas sísmicas.

Las modificaciones estuvieron ubicadas, en primer lugar en la categoría de “entrada/salida” de datos y resultados y en segundo lugar, fue necesario incorporar un algoritmo denominado de “conjuntos compactos maximales” que permitía una solución más estable del problema a resolver. A continuación se presenta una breve descripción de los aspectos teóricos de los métodos de clasificación no supervisada y supervisada incluidos en el programa “P4”.

Algoritmos de clasificación

Dentro de los algoritmos o procedimientos incluidos en el programa “P4” se encuentra el módulo de clasificación sin aprendizaje (no supervisada) utilizando modelos jerárquicos de los métodos de clasificación basados en la búsqueda de componentes conexas y de conjuntos

compactos dentro de la muestra de objetos (Pico,1999), al que se le añadió la búsqueda de conjuntos compactos maximales. El otro módulo presente es el de clasificación con aprendizaje.

Las características de los algoritmos de clasificación sin aprendizaje se pueden resumir en:

- Sean el objeto “ O_j ” la curva correspondiente al punto “ j ”, y la variable “ x_i ” la ordenada de las curvas en el valor de la abscisa número “ i ”. Entonces el valor de la ordenada para la abscisa número “ i ” en la curva “ j ” será “ $x_i(O_j)$ ”.
- Sea $S(O_i, O_j)$ la función de similaridad entre los objetos O_i y O_j (ver más adelante). Dos objetos O_i y O_j son β_o -similares, si y solo si $S(O_i, O_j) \geq \beta_o$, donde β_o , el nivel de la clasificación, está entre 0 y 1.
- Un objeto pertenece a una componente conexa si todos los objetos β_o -similares a él pertenecen a dicho conjunto.
- Un objeto pertenece a un conjunto compacto si el más β_o -similar a él está en ese conjunto también, o si es el más similar a otro objeto que pertenece al conjunto.
- Un objeto pertenece a un conjunto maximal si es β_o -similar a todos los elementos de dicho conjunto.
- Un objeto pertenece a un conjunto compacto maximal si el más β_o -similar a él está en ese conjunto también, o si es el más similar u otro objeto que pertenece al conjunto y a su vez todos los elementos del conjunto son mutuamente β_o -similares.
- Los conjuntos compactos y las componentes conexas son representadas gráficamente en un dendrograma, donde los diferentes niveles representan la β_o -similaridad, el cual puede ser usado para construir grupos. Seleccionando interactivamente sobre este esquema un nivel β_o , se puede determinar una partición particular en conjuntos β_o -compactos o en componentes β_o -conexas.
- Para las componentes conexas el dendrograma forma un sólo árbol; esto es, hay un nivel β_o tal que todos los objetos están conectados. A diferencia, el dendrograma para los conjuntos compactos está en general formado por varios árboles aislados; esto es, reduciendo el nivel β_o , el número de grupos independientes no puede ser reducido bajo cierto límite. Este comportamiento es debido al hecho de que en el caso de los conjuntos compactos la condición de conectividad entre los objetos es más restrictiva que en el caso de las componentes conexas.
- El conjunto maximal compacto se obtiene de encontrar conjuntos maximales de una partición de conjuntos compactos.
- Un objeto puede pertenecer a la vez a varios conjuntos compactos maximales. Esta característica impide su representación en un dendrograma.
- Para evitar la clasificación de un objeto en varios grupos simultáneamente es necesario introducir criterios adicionales en el algoritmo; en nuestro caso se decidió que una vez que un objeto se asignara a un grupo, ya no se volviese a considerar; al algoritmo le llamaremos de “conjuntos maximales compactos modificado”. De esa manera se pueden obtener varias representaciones, dependiendo del orden en que se comparen los objetos. Para lograr una uniformidad en este proceso los objetos son ordenados descendientemente tomando en cuenta la varianza de sus variables componentes.
- El procedimiento parte de analizar los conjuntos β_o -compactos en el dendrograma correspondiente; entonces se fija el nivel β_o y se procede a la obtención de los conjuntos compactos maximales.

Algunas formas de definir la similaridad (o semejanza) entre los objetos:

- Sean $\max(x_i)$ y $\min(x_i)$ los extremos de la variable x_i sobre todos los objetos. El criterio de comparación entre los valores de la variable x_i es la función C_i , definida como:

$$C_i[x_i(O_i), x_i(O_j)] = 1 - \frac{|x_i(O_i) - x_i(O_j)|}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (1.34)$$

- Se puede definir un umbral de semejanza para cada variable x_i :

$$C_i[x_i(O_i), x_i(O_j)] = \begin{cases} 1 & \text{if } |x_i(O_i) - x_i(O_j)| \leq \varepsilon_i \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (1.35)$$

donde los ε_i se seleccionan a criterio del usuario

- En el caso de valores de las variables enteros, como los pertenecientes a una codificación (k-valentes), la comparación es realizada por simple igualdad:

$$C_i[x_i(O_i), x_i(O_j)] = \begin{cases} 1 & \text{if } x_i(O_i) = x_i(O_j) \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (1.36)$$

- La similaridad entre los objetos en todos los casos se calcula por la fórmula

$$S(O_i, O_k) = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n C_i[x_i(O_i), x_i(O_k)] \quad (1.37)$$

donde n es el número de variables consideradas y C_i el criterio definido más arriba

La clasificación con aprendizaje se realiza con los algoritmos de votación (Ruiz et al. 1992b, 1993), cuyas características se pueden resumir en:

1. Se comparan objetos con patrones establecidos previamente (clases).
2. Los criterios de comparación entre objetos son del mismo tipo que los que se utilizaron en el agrupamiento (clasificación sin aprendizaje).
3. El algoritmo de votación toma en cuenta la comparación del objeto a clasificar con cada uno de los objetos de cada clase. Por clase se calcula el promedio de similitud y se determina la pertenencia a la clase cuya valoración promedio es superior.

Para más detalles sobre los métodos de clasificación con aprendizaje usando algoritmos lógico-combinatorios puede consultarse la monografía (Gitis et al., ed., 1992).

Breve descripción del programa “P4”

Lo primero que se realiza al iniciarse el programa es leer una matriz inicial, que puede ser una matriz de aprendizaje para clasificación supervisada o una matriz de datos para clasificación no supervisada. Una vez hecho esto se activan todas las ventanas del menú principal (figura.1.26), las cuales incluyen varias de edición y aspecto, y 3 específicas

- **Agrupar:** clasificación sin aprendizaje
- **Clasificar:** clasificación con aprendizaje
- **OrdenarMA:** ordenamiento de los objetos de acuerdo a los valores en las variables con mayor dispersión

Igualmente, en la ventana que se abre con los datos de la matriz, pinchando dos veces en los botones que dicen “Objn”, con n = número del objeto y “varn”, con n = número de la variable se abre una ventana para editar el objeto o la variable correspondiente.

Cuando se usa la opción clasificar → dendrograma, inmediatamente aparece la ventana con éste, con un botón inferior que permite seleccionar la opción deseada (componentes conexas, conjuntos compactos y conjuntos compactos maximales) (ver figura 1.27). Sobre el dendrograma se selecciona el umbral β_o , el cual corresponde a una línea horizontal. Los dendrogramas correspondientes a los casos de conjuntos compactos (figura 1.27) y componentes conexas (figura 1.28) son diferentes. Para el caso de conjuntos compactos maximales, aparecerá el dendrograma de los conjuntos compactos, el cual se usa sólo para seleccionar el umbral β_o , ya que este tipo de agrupamiento no permite un dendrograma específico. En estas ventanas aparece un botón nombrado “Partición”, que permite realizar otras funciones como revisar los resultados del agrupamiento,

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

salvarlos y, en el caso particular de los conjuntos compactos maximales, crear una matriz de aprendizaje usando la curva promedio de cada uno de los grupos creados (figura 1.29).

	1 var1	2 var2	3 var3	4 var4	5 var5	6 var6	7 var7	8 var8	9 var9
Obj1	0.021	0.025	0.03	0.038	0.044	0.06	0.068	0.091	0.103
Obj2	0.024	0.028	0.034	0.042	0.049	0.066	0.075	0.101	0.116
Obj3	0.026	0.031	0.038	0.046	0.054	0.075	0.086	0.117	0.134
Obj4	0.025	0.031	0.037	0.045	0.052	0.072	0.083	0.117	0.136
Obj5	0.025	0.029	0.035	0.043	0.05	0.068	0.078	0.109	0.125
Obj6	0.025	0.029	0.034	0.041	0.047	0.064	0.073	0.1	0.114
Obj7	0.025	0.029	0.033	0.04	0.046	0.063	0.073	0.105	0.12
Obj8	0.021	0.024	0.028	0.035	0.042	0.06	0.069	0.091	0.101
Obj9	0.019	0.023	0.027	0.034	0.041	0.058	0.066	0.085	0.094
Obj10	0.022	0.027	0.032	0.039	0.045	0.062	0.07	0.096	0.109
Obj11	0.029	0.035	0.042	0.051	0.06	0.081	0.092	0.126	0.143
Obj12	0.035	0.043	0.05	0.061	0.071	0.096	0.109	0.15	0.169
Obj13	0.037	0.044	0.053	0.067	0.083	0.137	0.171	0.253	0.284
Obj14	0.034	0.041	0.049	0.061	0.074	0.123	0.155	0.217	0.246
Obj15	0.031	0.038	0.045	0.055	0.065	0.089	0.102	0.143	0.161
Obj16	0.033	0.039	0.046	0.056	0.064	0.086	0.098	0.136	0.157
Obj17	0.027	0.032	0.038	0.046	0.054	0.073	0.083	0.107	0.121
Obj18	0.04	0.048	0.056	0.066	0.076	0.099	0.111	0.15	0.169
Obj19	0.038	0.045	0.052	0.062	0.071	0.095	0.11	0.166	0.193
Obj20	0.033	0.04	0.046	0.055	0.063	0.084	0.097	0.141	0.167
Obj21	0.023	0.027	0.032	0.04	0.048	0.067	0.077	0.101	0.112
Obj22	0.021	0.025	0.03	0.038	0.045	0.061	0.068	0.087	0.096
Obj23	0.022	0.027	0.031	0.039	0.045	0.061	0.069	0.092	0.104
Obj24	0.032	0.039	0.046	0.056	0.065	0.089	0.102	0.144	0.164
Obj25	0.033	0.04	0.047	0.059	0.072	0.114	0.142	0.213	0.234
Obj26	0.04	0.049	0.06	0.077	0.098	0.193	0.246	0.331	0.356
Obj27	0.028	0.035	0.042	0.055	0.07	0.113	0.136	0.194	0.216

Fig. 1.26. Ventana principal. Se han leído los datos de una matriz inicial y están activas todas las opciones.

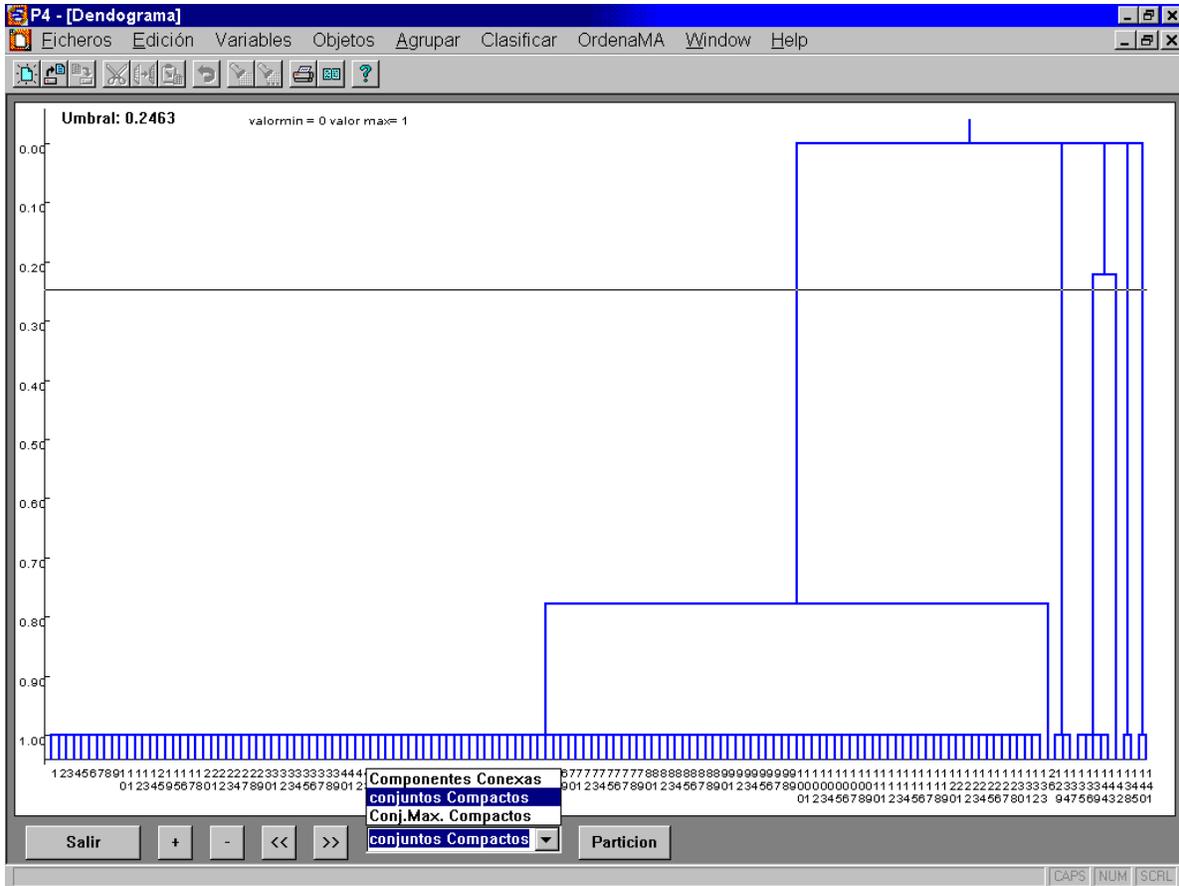


Fig. 1.27. Caso de agrupamiento por conjuntos compactos. Se muestran las opciones posibles de agrupamiento.

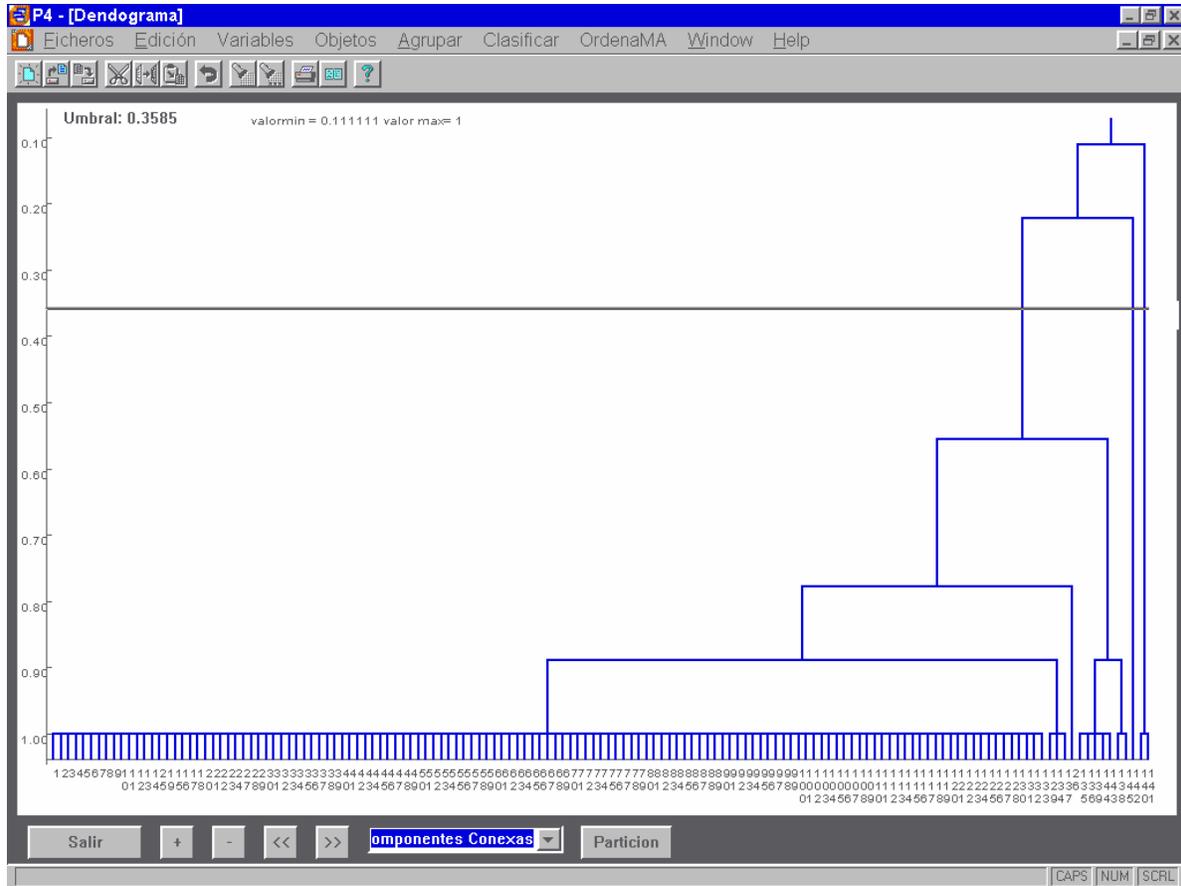


Fig. 1.28. Caso de agrupamiento por componentes conexas.

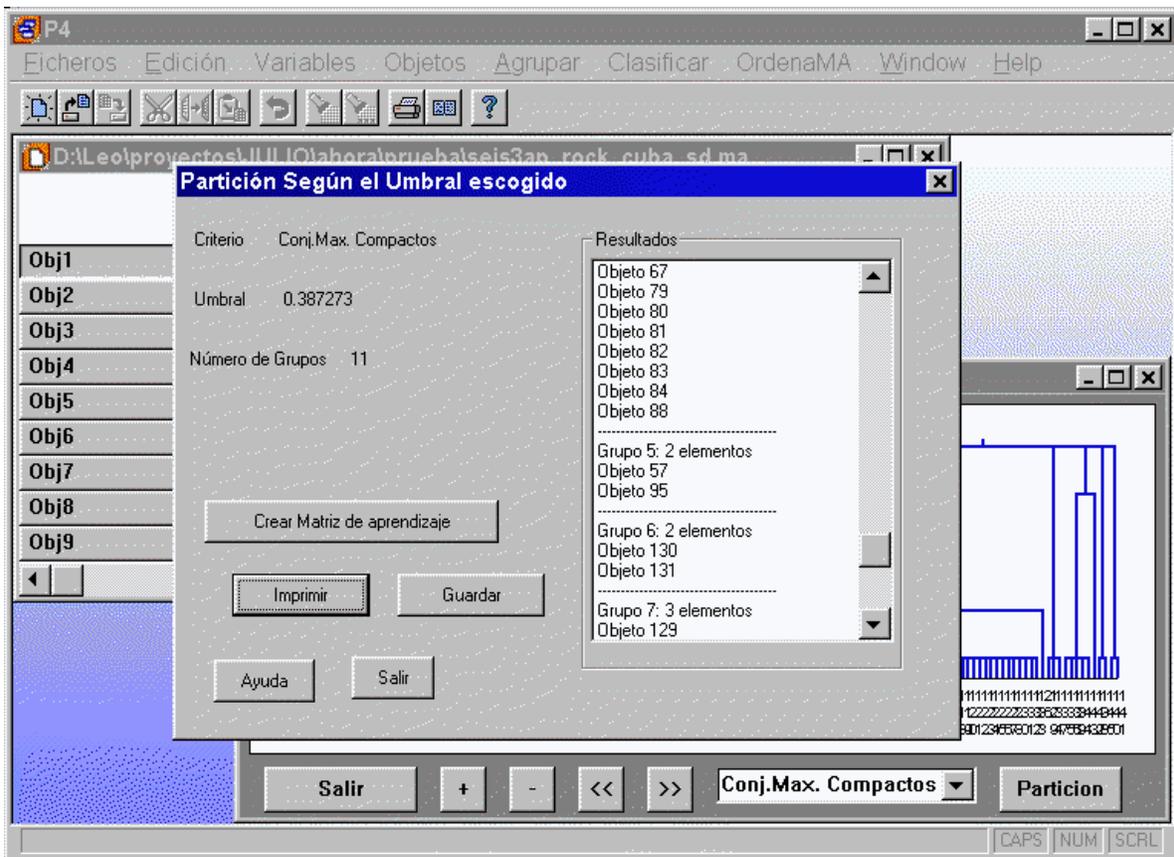


Fig. 1.29. Se muestran los resultados de un agrupamiento específico, luego de la selección del umbral, que se obtiene marcando el botón “Partición”. Para cada grupo, aparece además especificado el número de elementos que lo componen y cuáles son ordenados de forma creciente.

Cuando se usa la opción clasificar, es necesario haber leído inicialmente la matriz de aprendizaje y se tienen 2 variantes, clasificación simple (Clasificar) y clasificación de matriz de control (Clasificar MC). En ambos casos son leídos los datos a clasificar y se abre una ventana denominada “Clasificación supervisada con ALVOT”. En ella hay distintos botones con funciones diversa, entre ellas el denominado “Clasificar”, que realiza el proceso (figura 1.30). En el caso de “Clasificar MC”, una vez que termina la clasificación, este botón cambia su nombre por “Mostrar matriz de confusión”, el cual genera una tabla con la estadística de los objetos clasificados por clase (figura 1.31).

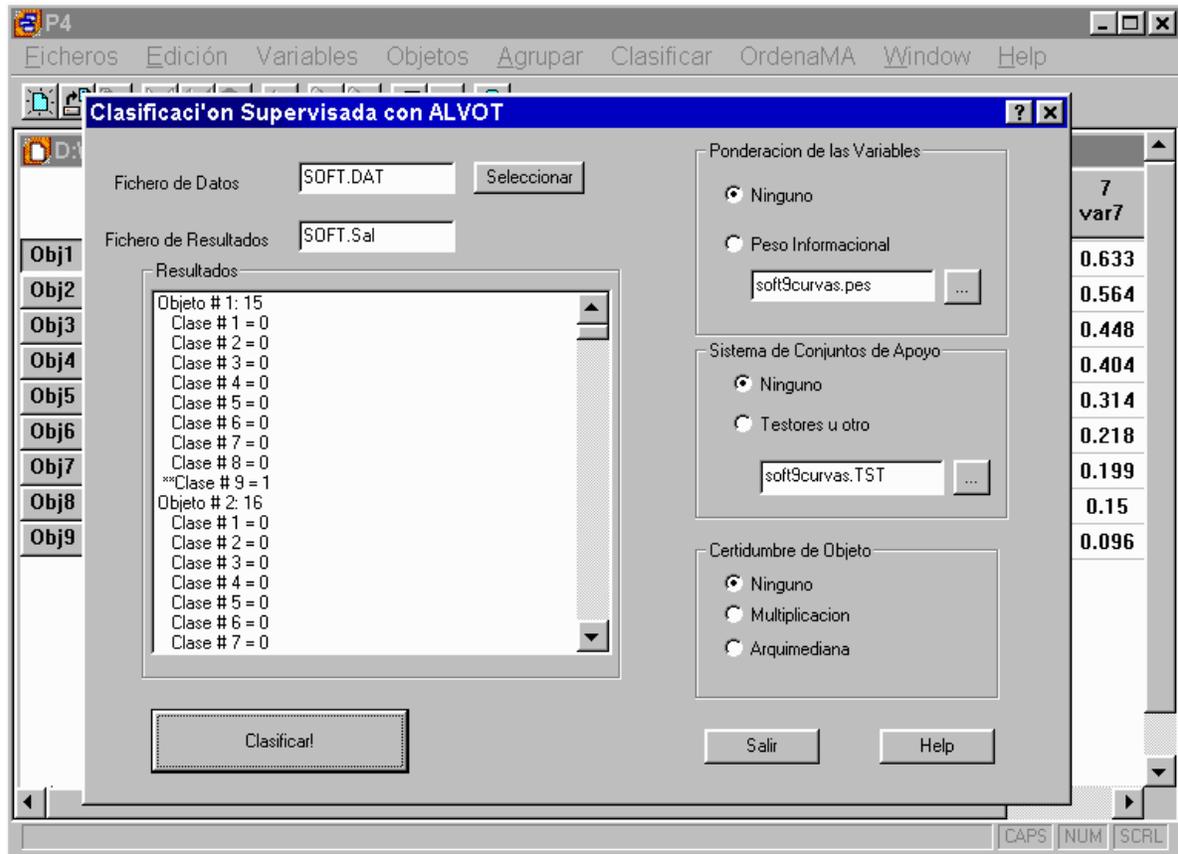


Fig. 1.30. Resultados de una clasificación simple. En la ventana se pueden fijar parámetros y cambiar el fichero a clasificar. Una vez tomada las decisiones el proceso se realiza al marcar el botón clasificar y los resultados se muestran en el cuadro blanco de la izquierda para ser revisados. Los parámetros que se fijan a la derecha permiten seleccionar el tipo de clasificación con aprendizaje a realizar [ver (Ruiz et al. (1992b, 1993)]

Matriz de Confusion										
+NAN < F < +NAN K = 0.996716	1 Clase # 1	2 Clase # 2	3 Clase # 3	4 Clase # 4	5 Clase # 5	6 Clase # 6	7 Clase # 7	8 Clase # 8	9 Clase # 9	Total
1 Clase # 1	22	18	59	37	65	395	82	437	508	1623
2 Clase # 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 Clase # 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4 Clase # 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 Clase # 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6 Clase # 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7 Clase # 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8 Clase # 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9 Clase # 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	22	18	59	37	65	395	82	437	508	1623
Ex.U	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E.C	0	100	100	100	100	100	100	100	100	0

Fig. 1.31. Matriz de confusión que se obtiene como segundo resultado de usar la opción “Clasificar MC” (el primero es la clasificación simple de la figura anterior)

Otros programas auxiliares

El sistema para el análisis de datos de la peligrosidad sísmica puntual mediante técnicas de clasificación lógico - combinatorias no supervisada consta del programa “P4”, ya descrito en el epígrafe anterior y de algunos programas auxiliares de preparación de datos y graficado de resultados. Los ficheros de datos obtenidos en el epígrafe 1 son tablas que contienen una línea con comentarios e indicación de los períodos de retorno, y a continuación una línea por punto con los datos de coordenadas y aceleraciones pico para los períodos de retorno de 10, 35, 50, 75, 100, 200, 475, 750, 1000, 5000, 10000, 50000, 100000, 500000 y 1000000 años (ver tabla 1.8).

Tabla 1.8. Encabezamiento típico de un fichero de datos de curvas a clasificar. Constituye la salida del programa preparado para procesar los resultados de estimación de peligrosidad sísmica usando un árbol lógico de decisión (ver anexos 1.a-1.c). Se incluyen sólo las primeras líneas

Long	Lat	10	35	50	75	100	200	475	750	1000	5000	10000	50000	100000	500000	1000000
-83.345	23.319	0.029	0.039	0.042	0.046	0.049	0.058	0.068	0.074	0.077	0.101	0.114	0.157	0.182	0.249	0.281
-82.910	23.335	0.032	0.043	0.047	0.052	0.056	0.063	0.075	0.081	0.085	0.113	0.128	0.187	0.230	0.339	0.374
-82.476	23.350	0.034	0.048	0.052	0.056	0.060	0.068	0.080	0.087	0.091	0.121	0.140	0.214	0.264	0.385	0.422
-82.041	23.364	0.033	0.046	0.050	0.055	0.058	0.068	0.079	0.086	0.090	0.118	0.136	0.220	0.274	0.406	0.439

Los programas auxiliares de preparación de datos fueron escritos en lenguaje Fortran77 , mientras que los de graficado lo fueron en lenguaje IDL (IDL, 2000). Dados los lenguajes en que fueron escritos, todos son multi-plataforma, lo que no es el caso del “P4” que sólo funciona en Windows:

- **programa “tree2ma”:** Convierte los ficheros de la tabla 1.7 a los usados por el programa “P4”. Permite además realizar una selección de los períodos de retorno a usar para construir las curvas a clasificar. Genera los ficheros “.ma” y “.dat” que usa el “P4” (el primero para caso de clasificación no supervisada y el segundo para caso de clasificación supervisada), así como uno “.idl” para preparar el gráfico correspondiente.
- **programa “mao2idl”:** Prepara, a partir de una matriz de aprendizaje “.mao”, creada por el programa “P4” en el proceso de clasificación no supervisada usando conjuntos compactos maximales, un fichero .idl para preparar el gráfico correspondiente.
- **programa sal2post:** Los resultados de la clasificación supervisada son escritos por el programa “P4” en un formato específico. Este programa, usando este fichero más los ficheros de entrada requeridos por dicho programa, prepara dos ficheros para la representación gráfica de los resultados. Uno de ellos contiene las coordenadas de los puntos y los resultados de la clasificación (“*post.dat”) y el otro es una matriz inicial (“*pend.ma”) que contiene los puntos que no fueron clasificados en ninguna clase.
- **programa pltree_num:** Prepara los gráficos de las curvas a clasificar, ya clasificadas, etc., a partir de los ficheros tipo (“.idl”). Usa un fichero de entrada general denominado “pltree_num.inp”, donde se definen las características de los gráficos y se da la lista de ellos. La salida es en formato “.ps” (formato “postscript”, muy usado en UNIX, que garantiza una alta calidad de impresión) y en caso de que se requieran varias páginas se numeran consecutivamente.
- **programa plmap2:** Prepara en formato “.ps” un mapa de la región con los resultados de la clasificación. Usa como entrada general un fichero denominado “plmap.inp” donde se definen las características del mapa y se da la lista de los ficheros de datos necesarios.

El proceso de graficado, tanto de los mapas como de las curvas, puede ser realizado igualmente con cualquier otro programa de procesamiento de gráficos; por ejemplo, para los mapas, con el programa Surfer para Windows (Golden Software Inc., 1993-1996)

Conclusiones y recomendaciones

1. Fue creado el sistema para el análisis de datos de la peligrosidad sísmica puntual mediante técnicas de clasificación lógico - combinatorias no supervisada que consta de: (a) programa

“P4”: creado a partir del sistema PROGNOSIS incluyéndole facilidades específicas del problema a tratar, entre ellas un nuevo algoritmo de clasificación no supervisada, (b) programas auxiliares en Fortran77 e IDL para preparación de datos para el “P4” y el procesamiento de sus resultados, incluida la confección automatizada de gráficos

2. Durante el desarrollo de esta tarea fueron probadas las diferentes posibilidades de trabajo que brinda el “P4” con resultados satisfactorios, los cuales fueron enviados a publicar en revistas arbitradas de difusión internacional.
3. Debe continuarse trabajando con el programa “P4” para obtener una versión multiplataforma en Java.

1.4 Clasificación de las curvas de peligrosidad sísmica obtenidas y realización de la zonación sísmica.

Leonardo Alvarez Gómez¹, Ramón Pico², Julio A. García Peláez¹

¹Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS)

²Instituto de Cibernética, Matemática y Física (ICIMAF)

Introducción

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) emplearon la clasificación de estas curvas, mediante técnicas lógico-combinatorias, con vistas a obtener una zonación sísmica. En ese trabajo, sobre la base de un estudio simple de peligrosidad sísmica de Jamaica y La Española, se prepararon curvas de intensidad en función del período de recurrencia, las cuales fueron clasificadas usando el sistema PROGNOSIS (ICIMAF, 1992; Ruiz et al. 1992). Más adelante, Pico et al. (1997) volvieron a aplicar estas técnicas al caso de Cuba. Es por ello que en este proyecto se decide aplicar esas técnicas (ver epígrafe 1.3), con los mismos objetivos, esta vez usando los estimados de peligro sísmico obtenidos mediante el procedimiento de árbol lógico.

Planteamiento del problema

Un mapa de zonación sísmica consta del mapa propiamente dicho, donde se divide la región en zonas con un comportamiento cuasi aleatorio del fenómeno “peligrosidad sísmica” y una documentación anexa que contiene explicaciones de cómo es ese fenómeno dentro de cada una de las zonas. Por ejemplo, en las regionalizaciones sísmicas de la URSS, aparte de un libro de texto con una discusión de los métodos y del mapa propiamente dicho (Bune y Gorshkov, ed., 1980) se presentaba, con fines normativos, una lista de puntos habitados en cada una de las zonas presentes en él. Este mapa representa un efecto (PGA, intensidad, etc.) para un período de recurrencia o retorno dado, que puede ser uniforme para todo el mapa o variar de zona a zona. Sin embargo en él no está presente la multiplicidad de información que se puede obtener de un estudio de peligro sísmico. Nosotros consideramos que el mapa de zonación sísmica debe tener por supuesto una división en zonas, pero cada zona no puede estar caracterizada por un parámetro único, sino por un conjunto de curvas de peligro sísmico que representen el peligro sísmico integral con su error asociado.

Datos iniciales

En el anexo 1.a se discutió detalladamente el proceso de obtención de los estimados de peligro sísmico, en términos de aceleración pico del terreno (PGA), con su error asociado. En total se procesó dos veces un árbol lógico de 36 ramas que contenía todas las variantes de

decisiones sobre los datos iniciales. La primera vez se procesó sin considerar la dispersión estándar de la fórmula de atenuación (incertidumbre aleatoria), y la segunda 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 —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 la dispersión
- aceleraciones pico promedio en suelos friables para diferentes períodos de retorno sin considerar la dispersión
- aceleraciones pico promedio + 1 desviación estándar de las fórmulas de atenuación (incertidumbre aleatoria) en roca para diferentes períodos de retorno
- aceleraciones pico promedio + 1 desviación estándar de las fórmulas de atenuación (incertidumbre aleatoria) en suelos friables para diferentes períodos 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 períodos 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 períodos 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 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ (10 km aproximadamente), para un total de 897 puntos. Corresponden a las aceleraciones pico para los períodos de retorno de 10, 35, 50, 75, 100, 200, 475, 750, 1000, 5000, 10000, 50000, 100000, 500000 y 1000000 años. No se incluyeron en el presente estudio las zonas de Jamaica y La Española que está presente en todos los resultados discutidos en el epígrafe 1.2.

Procesamiento de datos

La forma más lógica de procesar los datos sería proceder a su agrupamiento directo usando cualquiera de los algoritmos de reconocimiento de patrones no supervisado que posee el programa P4. Sin embargo, el conjunto de curvas a clasificar es demasiado extenso (897 objetos) y excede la capacidad de trabajo del programa.

Por ello fue necesario preparar un conjunto reducido, obtenido de muestrear la información inicial con un mayor espaciamiento ($0.4^\circ \times 0.4^\circ$ aproximadamente), pero que mantiene las características generales de la muestra inicial. El área abarcada por esta muestra es algo mayor, pues dada la condición de que no quedasen puntos de la muestra inicial fuera del área cubierta por ella, necesariamente deberá contener sectores vacíos producto de la diferencia de espaciamiento. En la figura 1.33 se representan ambas muestras en un mapa. Este nuevo conjunto (de 145 objetos) se clasifica usando el algoritmo de conjuntos compactos maximales modificado (ver descripción en Anexo 2). Con los resultados de esta clasificación se prepara una matriz de aprendizaje, donde cada objeto se forma tomando el valor medio por ordenada de las curvas contenidas en los grupos en que ha sido clasificada la muestra reducida (esto se realiza por el propio programa P4). Usando esta nueva matriz se realiza un proceso de clasificación con aprendizaje sobre todos los objetos contenidos en la muestra inicial. Al final, para cada objeto (punto de la malla usada para el cálculo de peligro sísmico) se obtiene su asociación con una de las curvas típicas obtenidas en el procesamiento de la muestra reducida. Esta información, coordenadas del punto y número de curva típica es usada para preparar el mapa de zonación sísmica.

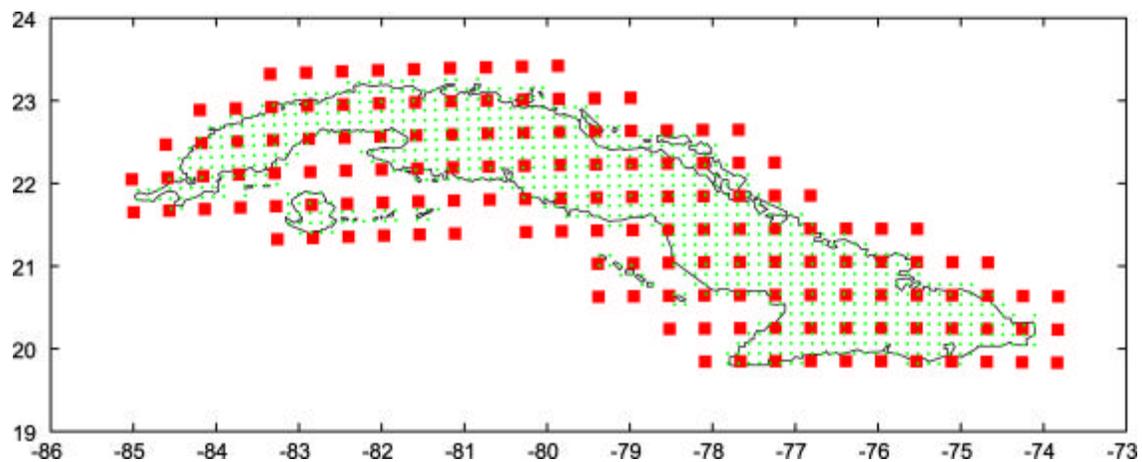


Fig. 1.33 Ubicación geo-espacial de las dos muestras utilizadas en el trabajo. Con puntos verdes aparece la muestra a $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ y con cuadrados rojos la muestra a $0.4^\circ \times 0.4^\circ$. Nótese que la segunda muestra barre un área mayor que la primera e incluye sectores de muy elevada sismicidad al sur de la región de Cuba oriental.

De los 15 valores de períodos 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.

Los ficheros de datos se convierten al formato de entrada del programa P4 usando el programa "tree2ma" (ver Anexo2) el cual permite realizar una selección de los períodos de retorno a usar para construir las curvas a clasificar, y crea también un fichero para preparar el gráfico correspondiente con el programa para IDL (IDL, 2000) llamado "pltree_num" (ver Anexo2).

Resultados

En la figura 1.34a se presenta el gráfico para la muestra completa de aceleraciones en roca para el caso de valor medio + SDT, mientras que en la 1.35a se presenta el gráfico correspondiente para caso de suelos friables. Son precisamente estas dos muestras las que se seleccionaron para el proceso de clasificación.

Las muestras reducidas para las aceleraciones pico promedio en roca y suelo (Fig. 1.34b y 1.35b) fueron sometidas a un proceso de agrupamiento (clasificación no supervisada) por el algoritmo de conjuntos compactos maximales. Se usó el criterio de comparación dado por (2.2) con un umbral de semejanza e_r para cada variable dado por su dispersión estándar, promediada sobre toda el área. El valor de β_0 controla la cantidad de grupos que se obtienen. Valores relativamente altos de este parámetro (alrededor de 0.5) daban como resultado entre 11 y 14 grupos diferentes, una cantidad muy alta para el territorio tan poco extenso investigado, por lo que se disminuyó dicho valor hasta lograr un valor menor de 10 grupos. En ambos casos se obtuvieron soluciones estables para clasificación en 9 grupos ($\beta_0=0.089$ para el caso de roca y $\beta_0=0.111$ para el caso de suelos). Esta reducción del valor de β_0 trae aparejada la pérdida de algunos detalles en la forma de las curvas a favor de su generalización, lo cual no afecta los objetivos finales que nos proponemos. Con los valores medios de las ordenadas de las diferentes curvas incluidas en estos grupos se confeccionaron los dos conjuntos de patrones que constituyen las matrices de aprendizaje para clasificar las muestras completas. En la figura 1.36 se presentan los gráficos correspondientes.

Las muestras completas fueron clasificadas utilizando algoritmos de votación. No se usó ningún algoritmo complejo, los elementos para clasificar se compararon con los patrones (las 9 curvas típicas determinadas en el paso anterior usando los mismos criterios que se usaron en el proceso de agrupamiento recién descrito. Como resultado se obtuvieron unos ficheros que indicaban el grado de similitud de cada objeto a clasificar con cada uno de los patrones de la muestra de aprendizaje, seleccionándose el patrón con similitud máxima. Estos valores (número entre 1 y 9) fueron representados en mapas para un análisis preliminar. Se detectó que había algunas zonas en la región suroriental de Cuba con muy poca representación (1-4). Analizando este problema, vemos que esas curvas en la muestra de aprendizaje corresponden a grupos formados en gran medida con puntos que se encuentran fuera del área cubierta por la muestra inicial (ver figura 1.33). Esto que motivó la decisión de unir algunas de las mismas (la 1 con 2 y la 3 con la 4). De tal forma, el número total de zonas pasó de 9 a 7. Las zonas finales fueron numeradas por conveniencia en orden descendente del nivel de peligro sísmico. Los mapas finales referidos a roca y suelo friable se presentan en las figuras 1.37 y 1.38. Para cada una de las 7 zonas que están presentes en ambos mapas se obtuvieron las curvas de peligro sísmico promediando las ordenadas de las curvas correspondientes a las celdas pertenecientes a cada zona en lugar de tomar el patrón de clasificación que aparece en la figura 1.36. Esto se hizo así por dos motivos. En primer lugar, los patrones usados como matriz de aprendizaje no son tomados de la misma muestra que los de la matriz inicial, sino de una muestra que espacialmente barre un área mayor, y por tanto pueden estar influenciados por el nivel de peligro sísmico de esos sectores adicionales (esto es más evidente en la región suroriental, donde la muestra reducida cubre sectores de las acuatorias de alta actividad). En segundo lugar, los patrones de clasificación sólo existen para el caso valor medio de PGA+SDT, lo que no permite obtener un estimado de peligrosidad sísmica con error asociado uniforme.

Posteriormente se prepararon los gráficos de peligro sísmico con error asociado a cada una de estas zonas (figuras 1.38 y 1.39), los mismos 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).

En las figuras 1.37 y 1.38, se muestran como ejemplo los gráficos de peligro sísmico asociados a las zonas 1 y 7, máximo y mínimo peligro sísmico respectivamente.

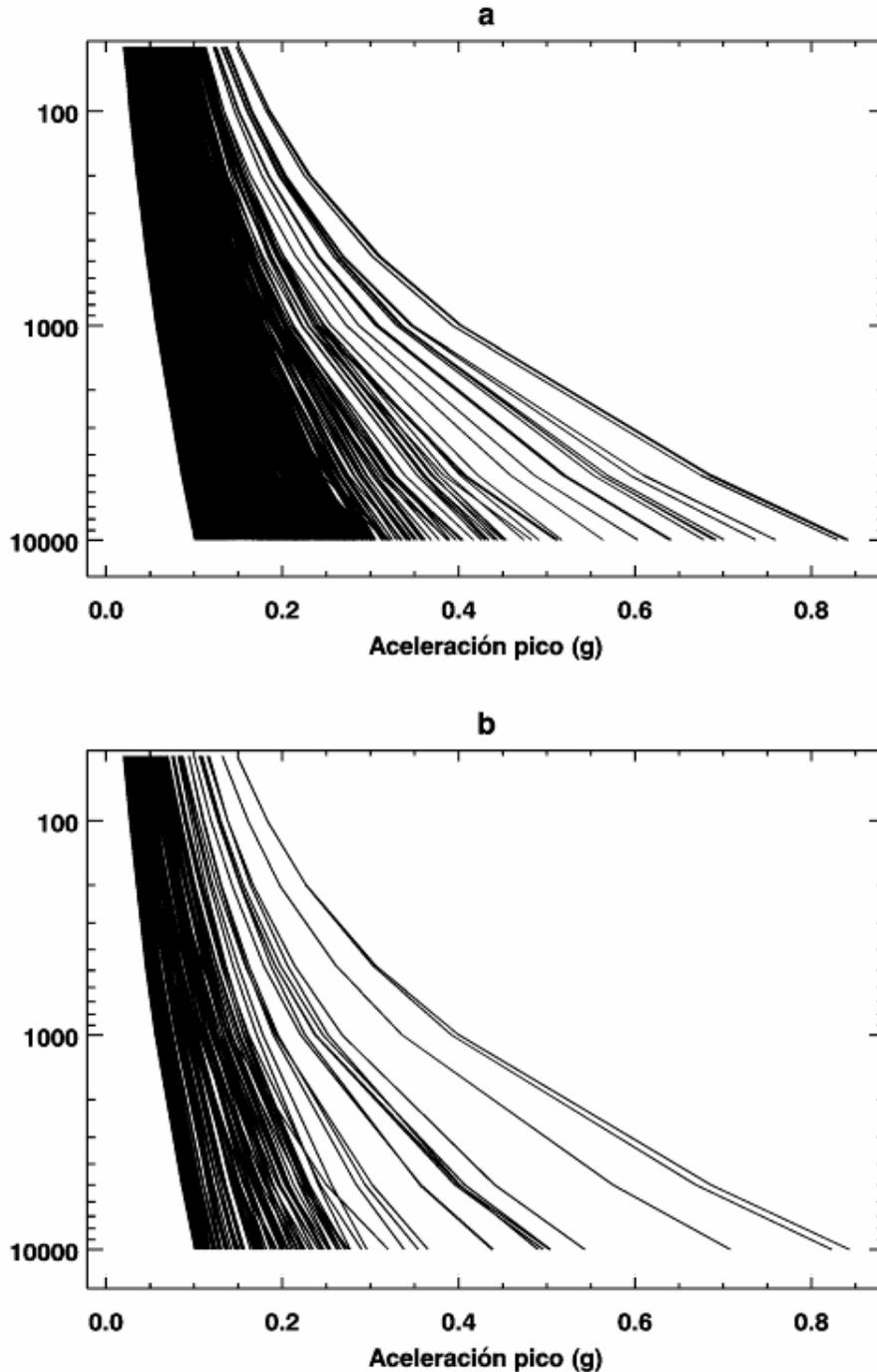


Fig. 1.34. Curvas de período de retorno vs. aceleración pico para roca en el intervalo de 35 a 10000 años para el caso de “valor medio de PGA +SD”. a) muestra completa (897 puntos), b) muestra reducida.

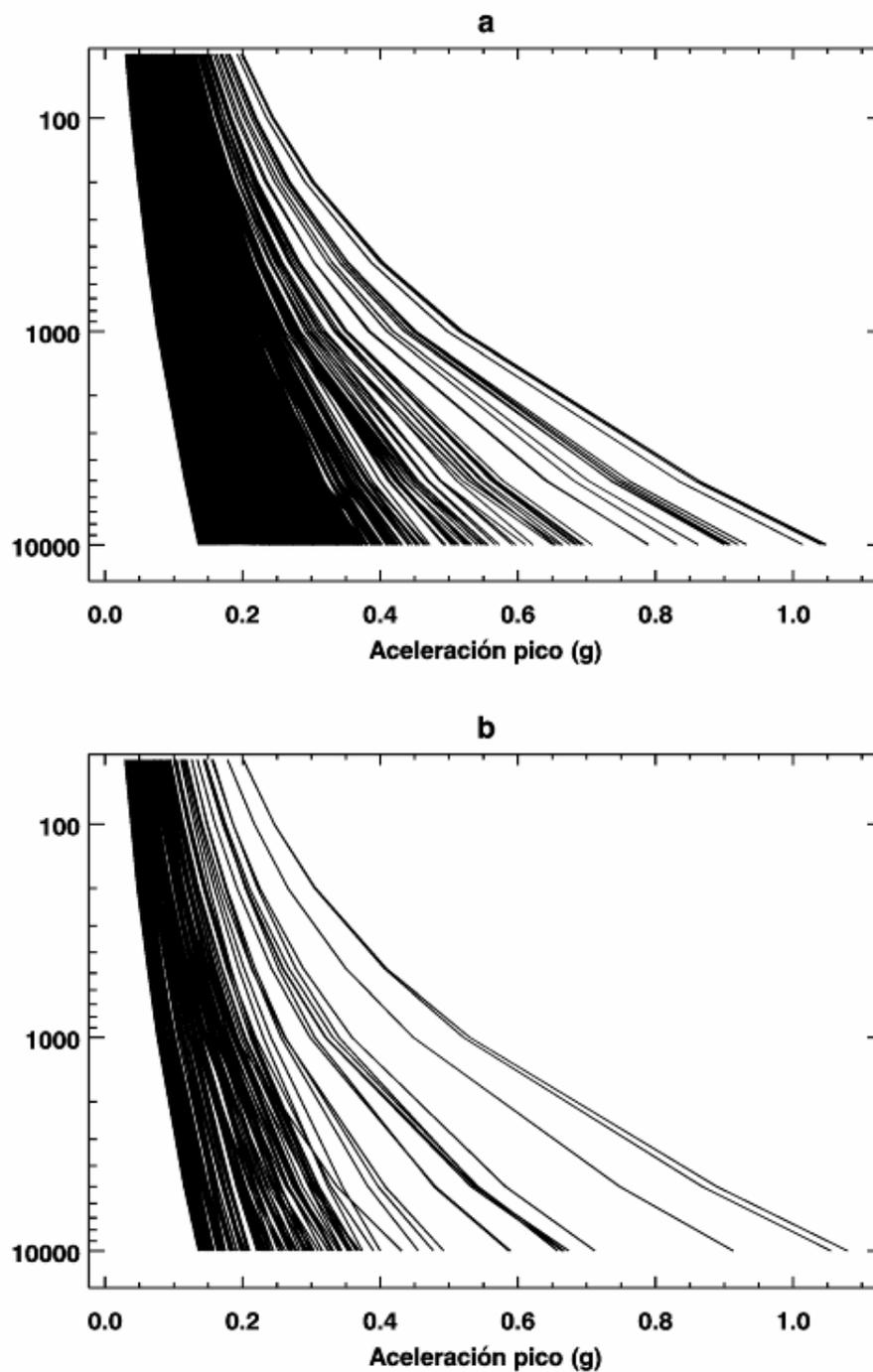


Fig. 1.35. Curvas de período de retorno vs. aceleración pico para suelos friables en el intervalo de 35 a 10000 años para el caso de “valor medio de PGA + SD” a) muestra completa (897 puntos), b) muestra reducida.

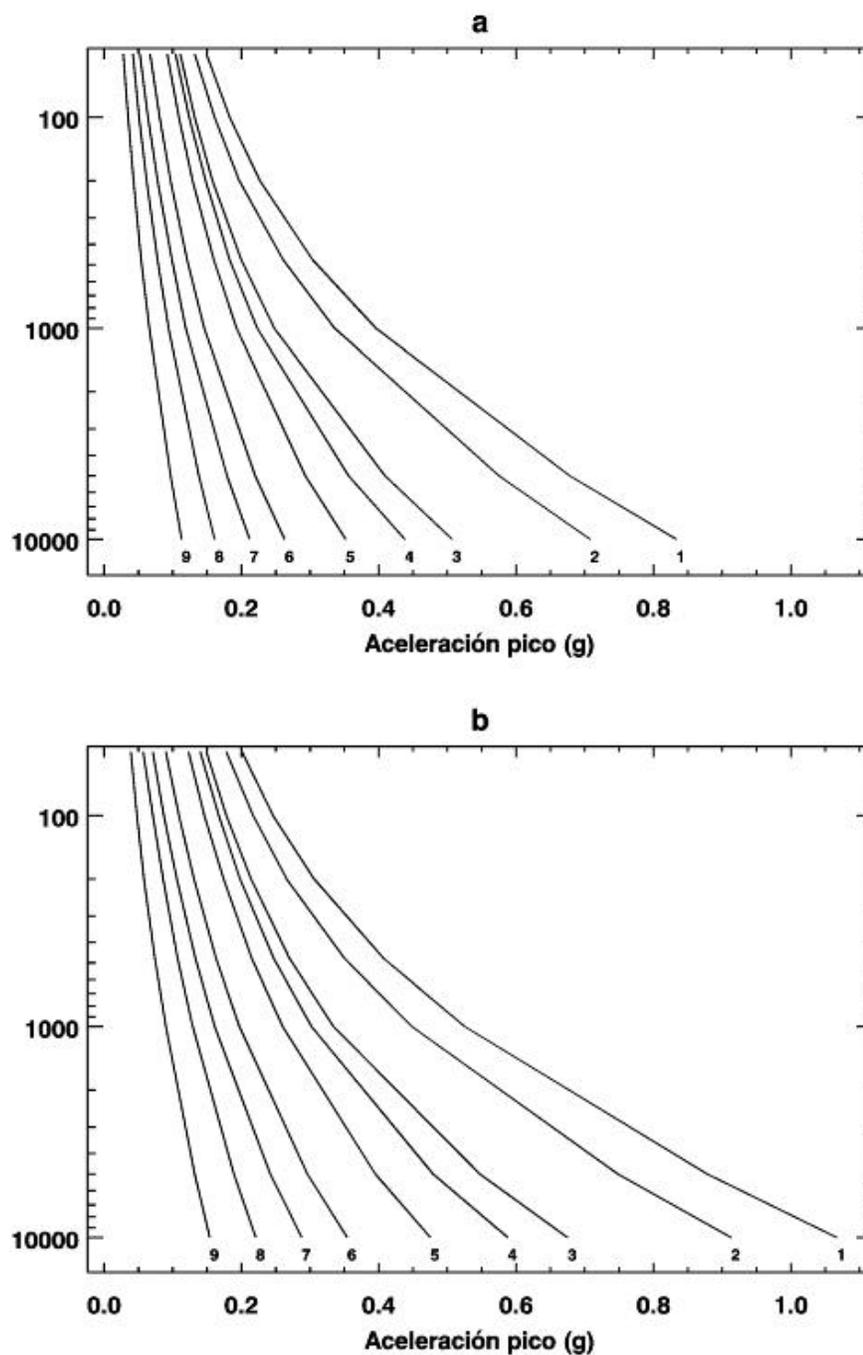


Fig. 1.36. Resultado de la clasificación de las muestras reducidas. (a) caso de roca y (b) caso de suelos friables. Estas curvas corresponden a los patrones encontrados en las muestras reducidas de 145 puntos.

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

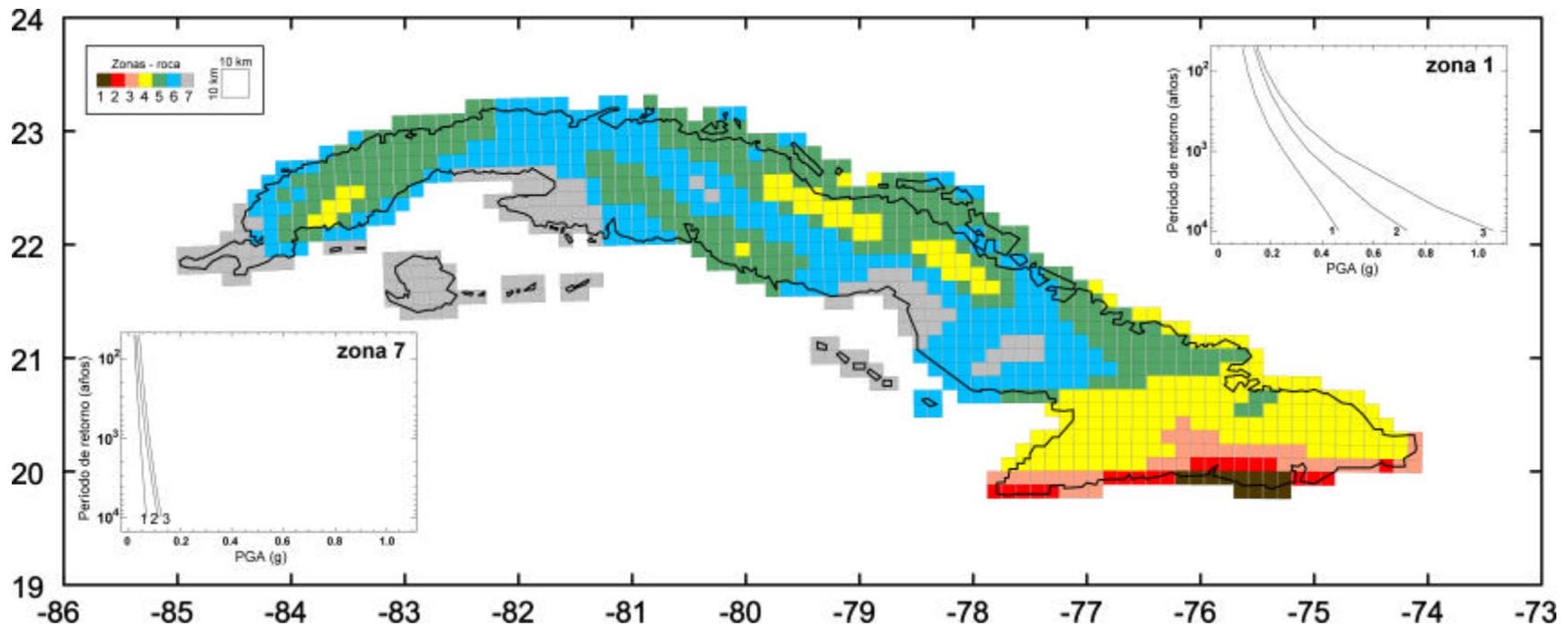


Fig. 1.37. Mapa de zonación sísmica para roca. Los números en la leyenda corresponden a la numeración seleccionada en orden descendente del nivel de peligro sísmico. La peligrosidad sísmica asociada a cada una de las zonas se presenta en la figura 1.38, como ejemplo se incluyen en esta figura los gráficos sísmicos de las zonas 1 y 7, ver el texto o el pie de figura 1.39 para conocer el significado de los numeración de las curvas.

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

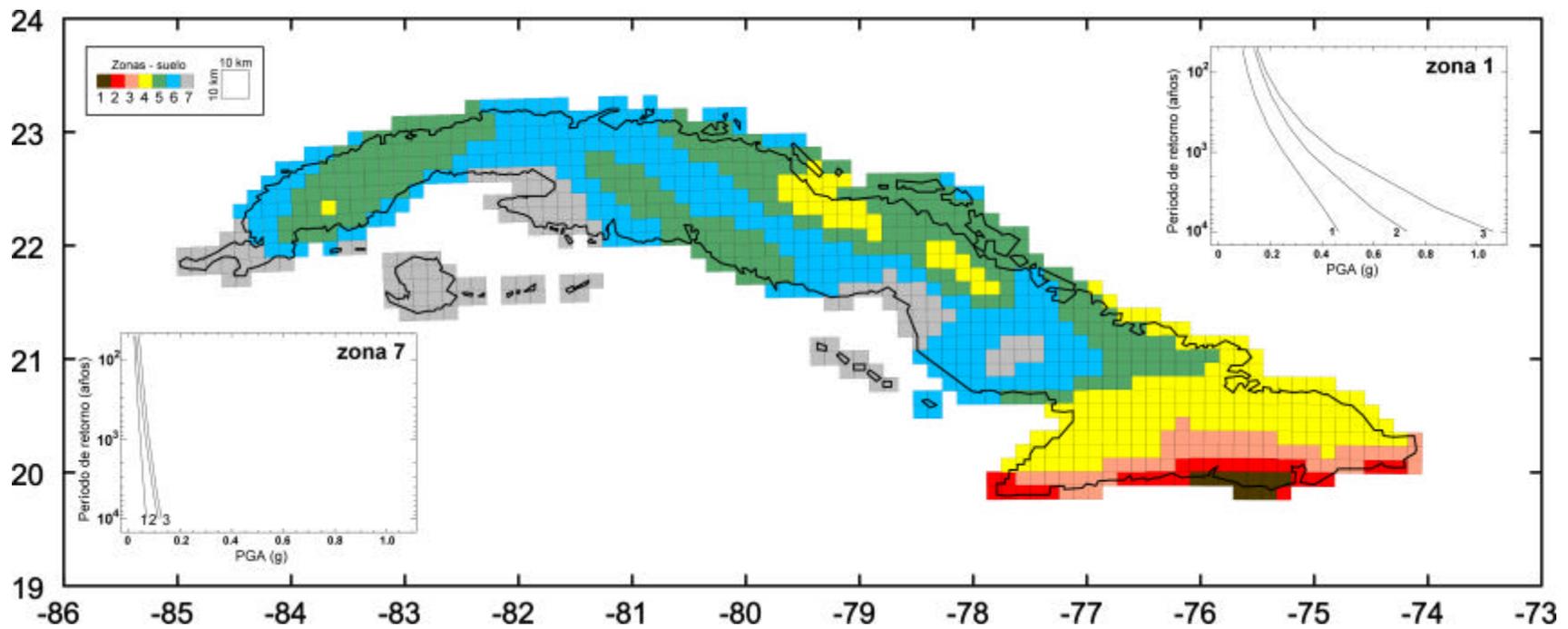


Fig. 1.38. Mapa de zonación sísmica para suelo friable. Los números en la leyenda corresponden a la numeración seleccionada en orden descendente de peligro sísmico. La peligrosidad sísmica asociada a cada una de las zonas se presenta en la figura 1.40, como ejemplo se incluyen en esta figura los gráficos sísmicos de las zonas 1 y 7, ver el texto o el pie de figura 1.40 para conocer el significado de los numeración de las curvas.

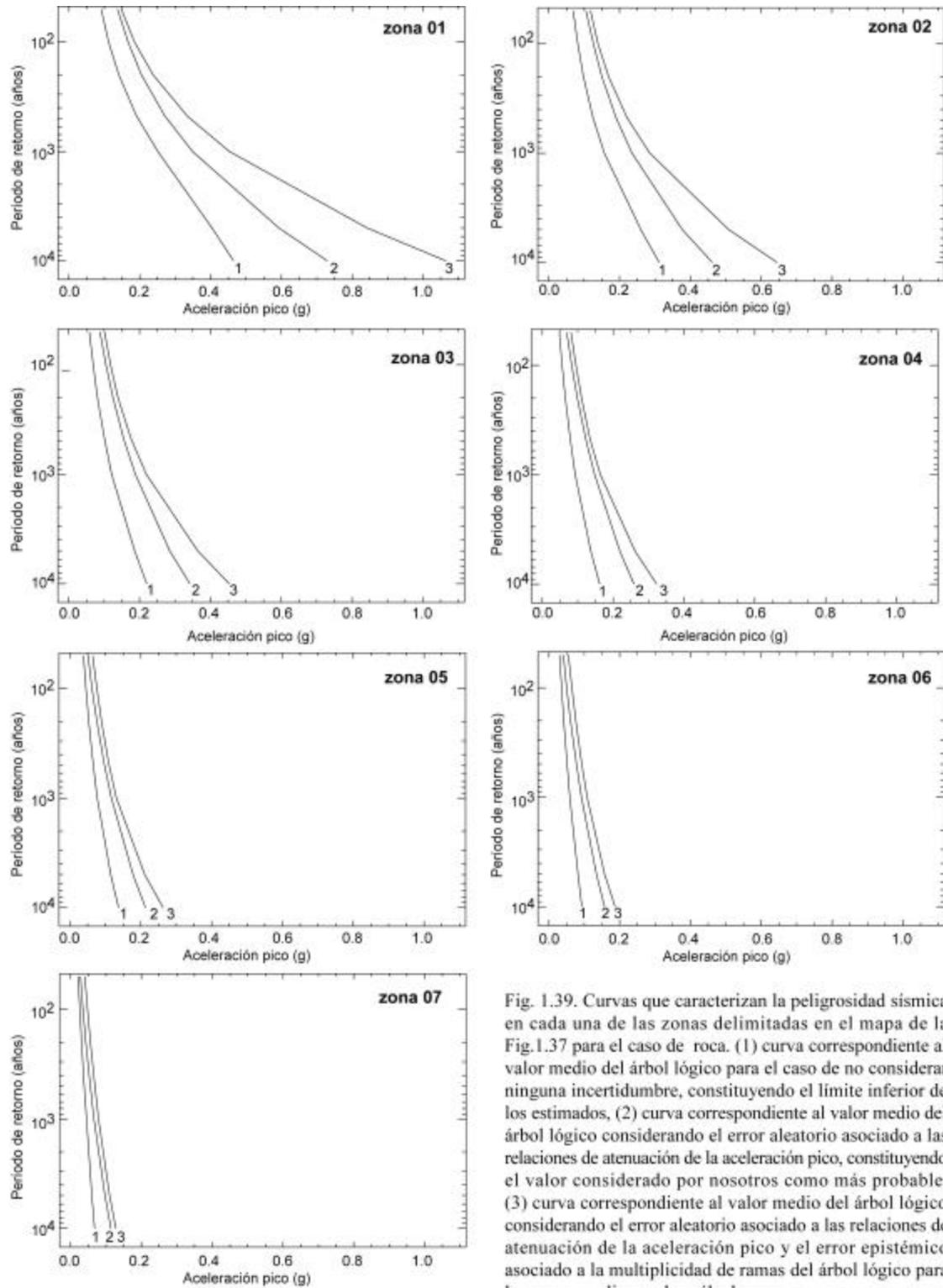


Fig. 1.39. Curvas que caracterizan la peligrosidad sísmica en cada una de las zonas delimitadas en el mapa de la Fig.1.37 para el caso de roca. (1) curva correspondiente al valor medio del árbol lógico para el caso de no considerar ninguna incertidumbre, constituyendo el límite inferior de los estimados, (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.

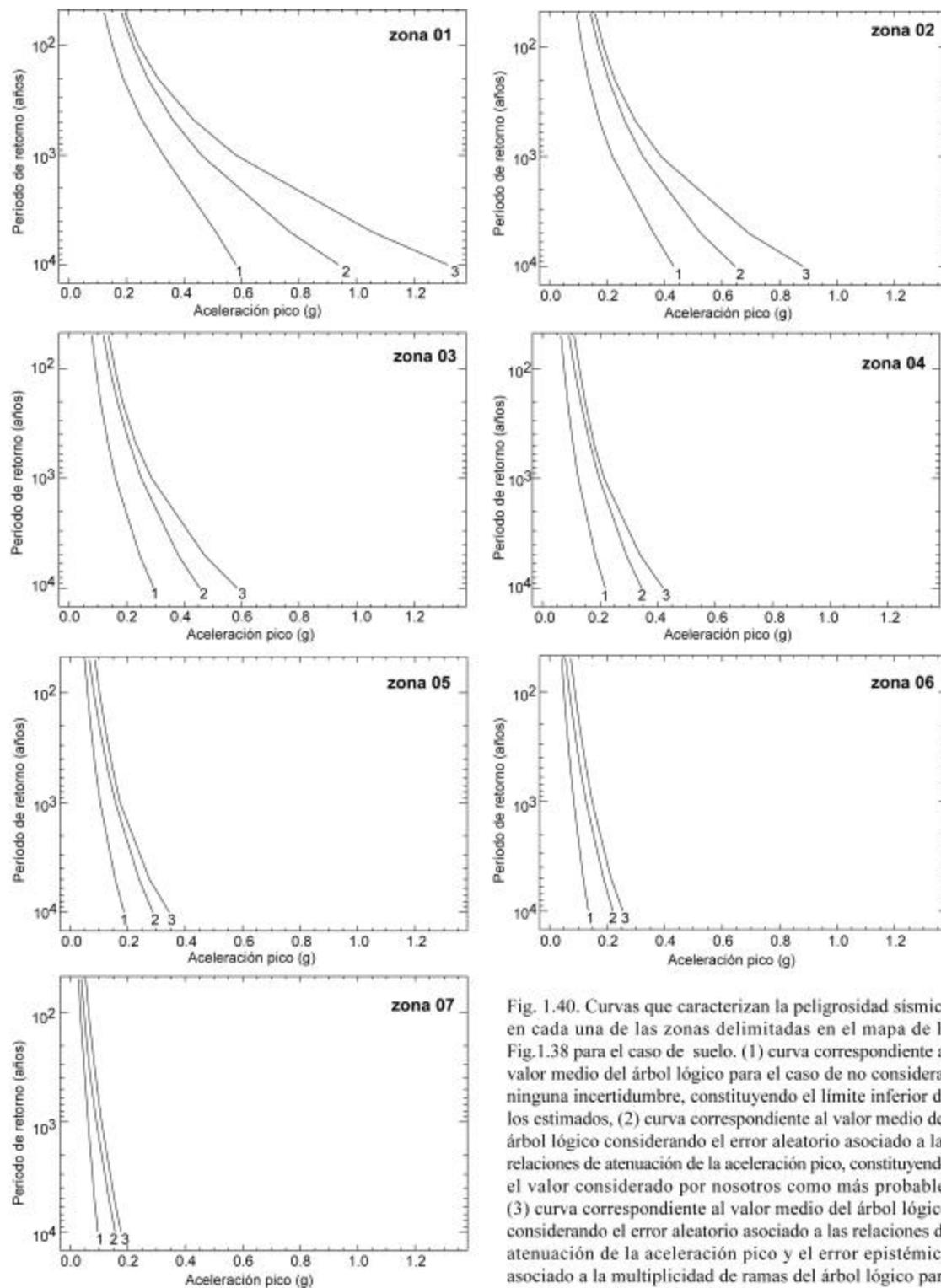


Fig. 1.40. Curvas que caracterizan la peligrosidad sísmica en cada una de las zonas delimitadas en el mapa de la Fig. 1.38 para el caso de suelo. (1) curva correspondiente al valor medio del árbol lógico para el caso de no considerar ninguna incertidumbre, constituyendo el límite inferior de los estimados, (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.

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 un lugar de un valor, una 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.

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 897 puntos en Cuba y sus acuatorias (red de aproximadamente $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$) fueron obtenidas a partir del procesamiento estadístico de los resultados de un estudio de peligrosidad sísmica de Cuba del tipo árbol lógico (Anexo 1.a de este informe)
- 2) Las curvas correspondientes a los casos de roca y suelo friable para una muestra reducida (145 puntos a intervalos de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$) fueron agrupadas con el algoritmo de conjuntos maximales compactos modificado, obteniéndose 9 grupos en cada caso. La curva media correspondiente a cada grupo se utilizó para preparar las matrices de aprendizaje de cada caso.
- 3) Usando esas matrices de aprendizaje se clasificaron las muestras completas usando algoritmos de votación. 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), representativas de la incertidumbre o el error asociado al cálculo de la PS en cada punto.

- 4) 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.

Capítulo 2

Cálculo de las pérdidas potenciales para la ciudad de Santiago de Cuba usando técnicas SIG

La estimación de las pérdidas potenciales esperadas en caso de la ocurrencia de un evento sísmico de gran intensidad ha sido estudiada en la literatura internacional por largo tiempo. Las técnicas usadas inicialmente se basaban en caracterizar el terremoto en términos de intensidad sísmica, calcular la vulnerabilidad de las construcciones en función de esta intensidad sísmica y posteriormente, pronosticar las pérdidas potenciales a partir de la interacción de estos dos parámetros: peligro – vulnerabilidad. El primer intento de realizar una estimación de pérdidas humanas para Santiago de Cuba con una metodología de ese tipo fue el de Oliva et al. (1991). Más recientemente, estos resultados fueron mejorados en (García et al., 2002), al utilizar un escenario de riesgo más robusto, la diferenciación de los daños por tipología constructiva y un nivel de detalle cartográfico no alcanzado hasta el momento (manzana).

En los últimos tiempos, el desarrollo de la ingeniería sísmica ha permitido desarrollar otro enfoque del cálculo de la vulnerabilidad de las construcciones, esta vez en función de los parámetros dinámicos (aceleración pico, aceleración espectral, velocidad y desplazamiento del terreno) que caracterizan las sacudidas sísmicas provocadas por los terremotos. La metodología desarrollada al efecto (Kircher et al., 1997; FEMA, 1997), implica que para cada construcción típica (modelo estructural y no estructural) se construyan curvas de vulnerabilidad (capacidad y fragilidad), las cuales caracterizan completamente su comportamiento ante diferentes niveles de demanda sísmica (expresada en términos dinámicos). Hasta el presente en Cuba no se había aplicado este enfoque, y aquí se presentan los resultados preliminares obtenidos.

Debe señalarse que para realizar un buen estimado de pérdidas es imprescindible tener un inventario detallado de las construcciones existentes en la región de estudio y el grado de ocupación de ellas en el momento de ocurrencia de un terremoto. Cuando se planificó este proyecto se contaba con la utilización de los datos del censo realizado a escala nacional en el año 2000 por la Oficina Nacional de Estadística (ONE), cuya terminación y acceso a los resultados previstos, había sido anunciada. Sin embargo, durante todo el desarrollo del proyecto no pudieron obtenerse los datos necesarios para Santiago de Cuba por motivos ajenos a nuestra voluntad; por lo que ha sido necesario (y obligatorio) reformular los objetivos a alcanzar en este sentido. Además de esto, no contamos con la fuerza de trabajo prevista (estudiantes en práctica de producción), para la realización del trabajo de campo necesario para la clasificación “in situ” de las construcciones de la ciudad de Santiago de Cuba según las escalas macrosísmicas empleadas (MSK y EMS) y la clasificación propuesta por el proyecto HAZUS (FEMA, 1997).

De tal forma, como no era posible estimar las pérdidas utilizando la metodología propuesta por el proyecto HAZUS (uso de parámetros dinámicos en la definición del peligro y las curvas de vulnerabilidad), decidimos simplemente demostrar su factibilidad. Aunque logramos mejorar los estimados de vulnerabilidad sísmica y avanzar en el conocimiento de esta temática, creemos que es una gran limitante, no poder utilizar los estimados de peligro sísmico con error asociado obtenidos en términos de aceleración pico, así como la clasificación de las tipologías constructivas presentes en la ciudad a partir de curvas de vulnerabilidad en función de este parámetro .

En lugar de esto, se profundizó en la evaluación de pérdidas cuando el terremoto se evalúa en términos de intensidad macrosísmica. Para ello se usan los estimados de peligrosidad obtenidos en términos de intensidad sísmica (ver anexo 2), los que lamentablemente no tienen la robustez de los correspondientes a aceleración pico, pero son igualmente válidos.

Se centró el trabajo en la creación de una base de cálculo para la estimación de las pérdidas potenciales humanas mediante la modelación de diversos escenarios de riesgo. Se incluyeron estos resultados al Sistema de Información Geográfica para el cálculo del riesgo sísmico en Santiago de Cuba (García et al. 2002), por lo que se entrega una versión mejorada del mismo.

2.1 Base de cálculo para la estimación de las pérdidas potenciales humanas debido a un terremoto de gran intensidad

Julio A. García Peláez¹, José Leonardo Álvarez Gómez¹

¹Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS)

Introducción

Las pérdidas humanas causadas por terremotos son uno de los “perjuicios” principales luego de la ocurrencia de un sismo de gran intensidad; su reducción es uno de los objetivos principales en la etapa de prevención, preparación y mitigación. El colapso total o parcial de las edificaciones es considerado la causa principal de las muertes y lesiones de la población durante un terremoto, pudiendo calcularse el número de las víctimas por el número de edificios con daños de consideración.

Las metodologías actualmente en uso para la estimación de las pérdidas potenciales humanas ocasionadas por un sismo de gran intensidad, asumen que existe una fuerte correlación entre los daños (estructurales y no estructurales) ocasionados por los terremotos en las edificaciones y el número de personas que en el momento del terremoto están bajo las mismas. Por ende, una estimación sobre el número de personas que se encuentran dentro de las edificaciones durante el terremoto es necesaria para los cálculos.

Generalmente, eventos de mediana intensidad ocasionan mayormente daños no estructurales y pocos daños estructurales, provocando un número insignificante de pérdidas fatales y un número variable de heridos de menor gravedad. En cambio, cuando ocurre un evento de gran intensidad, donde un número apreciable de edificaciones sufren daños de consideración o colapsan, es posible esperar un elevado número de pérdidas fatales y heridos (con diferentes grados de gravedad), en las edificaciones que experimentan este grado de daño. No obstante, aun conociendo el comportamiento de las estructuras ante las sacudidas sísmicas de diferente intensidad, la estimación de las pérdidas humanas ha sido siempre aproximada y basada mayormente en estudios de caso y bajo criterios de expertos.

En este informe presentamos dos enfoques diversos a partir de los cuales se enfrenta esta problemática, con el fin de preparar la base de cálculo necesaria para estimar las pérdidas humanas ocasionadas por un evento sísmico de gran intensidad.

Un aspecto importante en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras es definir el daño que pueda sufrir una estructura debido a un terremoto. En realidad, el daño va asociado a la vulnerabilidad, ya que una estructura es más o menos vulnerable dependiendo del daño que pueda sufrir ante un terremoto. La palabra daño se utiliza ampliamente para describir distintos fenómenos que puedan ocasionar los movimientos sísmicos a las estructuras, refiriéndose principalmente al deterioro físico. Generalmente, se diferencia el deterioro físico en dos grandes grupos, dependiendo de los elementos que sufren los daños:

Daño estructural. Es evidente que el daño estructural es el de mayor importancia, ya que éste puede ocasionar que una estructura colapse o, en el mejor de los casos, que su reparación pueda ser muy costosa. El daño estructural depende del comportamiento de los elementos resistentes de una estructura como son las vigas, columnas, muros de carga, sistemas de piso, y esto tiene que ver con la calidad de los materiales que componen dichos elementos, su configuración y tipo de sistema resistente y, obviamente, de las características de las cargas actuantes.

Daño no estructural. Este tipo de daño esta asociado principalmente a elementos que no forman parte del sistema resistente, como pueden ser muros divisorios, ventanales, revestimientos, etc. Sin embargo, a pesar de que este tipo de daño no pone en peligro el comportamiento de la

estructura, sí es la causa de un incremento considerable en las pérdidas económicas, como se ha podido comprobar en los sismos de Loma Prieta (1989) y Northridge (1994).

Grados de Daños

Las escalas macrosísmicas utilizan el daño en la construcción y otros fenómenos para evaluar el desempeño de las estructuras de una región ante la ocurrencia de un movimiento sísmico. A partir de la descripción de los daños en la estructura para diferentes intensidades, es posible deducir funciones de vulnerabilidad para tipos de estructuras en particular. Los grados de daño dentro de las escalas macrosísmicas son los encargados de representar el estado de daño que alcanza la estructura que sufre una intensidad dada. En particular en la escala EMS-98 (Grünthal, 1998), se definen 5 grados de daño, los cuales intentan representar un aumento lineal en la fuerza de la vibración. Esto se logra solo aproximadamente, y estos grados están influenciados mayormente por la necesidad de que quien use la escala pueda describir clases de daños que pueden distinguirse fácilmente:

1. Sin daño o daño leve (sin daño estructural, daño no estructural leve)
2. Daño moderado (daño estructural leve, daño no estructural moderado)
3. Daño substancial a severo (daño estructural moderado, daño no estructural moderado)
4. Daño muy severo (daño estructural severo, daño no estructural muy severo)
5. Destrucción (daño estructural muy severo)

Una versión reducida de la escala EMS-98 se presenta en el anexo 6.

Se debe también hacer notar que no todas las combinaciones posibles de grados de vulnerabilidad y grados de daño se mencionan para cada grado de la escala; usualmente solo se mencionan los dos tipos de daños de mayor intensidad para una clase particular de vulnerabilidad; asumiendo que un número proporcional de edificios sufrirá daños de menor grado.

De hecho los autores se ven forzados a diferenciar los daños en edificios de mampostería y concreto reforzado, describiendo los estados de daño discretos que se alcanzan en cada grado de daño. Esta descripción alcanza incluso a diferenciar los daños estructurales de los no estructurales, en una correspondencia directa con otras metodologías como las presentadas por la ATC-13 (Applied Technology Council, 1985). Especial cuidado se debe tener a la hora de evaluar estructuras con diseños sismorresistentes, debido a que la progresión de los daños puede no aumentar en forma lineal en función de las sacudidas sísmicas.

Estados de daño

Los estados de daño representan una condición límite o tolerable establecida en función de tres aspectos fundamentales: 1) los daños físicos sobre los elementos estructurales y no estructurales, 2) el riesgo al que se encuentran expuestos los ocupantes de la edificación y 3) la funcionalidad de la edificación posterior al terremoto (SEAOC Vision 2000 Committee, 1995); esto no siempre es posible y en muchas ocasiones se definen únicamente los daños en las estructuras.

Para definir estos estados, es necesario correlacionar un calificativo con una descripción detallada de los tres aspectos mencionados. Por lo tanto, puede decirse que los estados discretos de daño corresponden a una descripción cualitativa de los efectos producidos por un sismo sobre los elementos, los ocupantes y el funcionamiento de una estructura. El uso de una descripción cualitativa de estas señales hace que la definición de los estados de daño sea una tarea bastante difícil y con un carácter algo subjetivo.

Las primeras clasificaciones de los estados de daño se basaban en el daño físico observado, no obstante, a partir de las lecciones aprendidas durante los últimos sismos, se han ido incluyendo los otros aspectos mencionados (el riesgo de los ocupantes y la funcionalidad de la estructura).

Estudios recientes como el ATC-40 (Applied Technology Council, 1996) establecen estados discretos de daño (niveles de desempeño) similares a los anteriores, pero con una descripción mucho más detalla, que involucra los daños en los elementos estructurales, no estructurales, y en los contenidos. En el HAZUS (FEMA, 1997) se tipifican 4 estados de daño:

- 1) daños ligeros
- 2) daños moderados

- 3) daños estructurales graves
- 4) daños estructurales muy graves
 - a) caso de no colapso
 - b) caso de colapso

Metodologías de cálculo.

Para la estimación total de las pérdidas humanas debidas a la ocurrencia de un terremoto de gran intensidad según Coburn y Spence (1992), es necesario considerar varios factores los cuales responden a una ecuación del tipo:

$$M_T = M_S + M_{NS} + M_{FS} \quad (2.1)$$

donde M_T es el número total de muertos, M_S es el número de muertos debido a los daños estructurales, M_{NS} es el número de muertos debido a los daños no estructurales y M_{FS} son las muertes ocasionadas debido a los daños físicos indirectos o fenómenos inducidos post - terremotos, como son grandes incendios, deslizamientos, licuefacción u otros. Las muertes por este tipo de fenómenos es difícil de modelar, pues dependerá en gran medida de las condiciones socio-geográficas y económicas del entorno físico donde ocurra el terremoto. Muertes por esta causa no suelen ocurrir siempre, pero cuando ocurren tienen un gran peso en el número total de muertes (por ejemplo, el terremoto del Perú de 1970, donde el deslave de la ladera de un volcán sepultó pueblos enteros). Los muertos debido a daños no estructurales (M_{NS}) son difíciles de predecir y varían grandemente para un mismo escenario, tienen un mayor peso en los grados de daños intermedios (grado 3 y grado 4) y muy poco en los grados superiores (≥ 5), en estos niveles de daño predominan las muertes por grandes daños estructurales o colapso de las edificaciones. Es este factor (M_S) el mas consistente y que en un porcentaje mayor contribuye al número total de muertos (M_T) debido a un evento sísmico de gran intensidad.

Para la estimación de las pérdidas humanas consideraremos únicamente los daños físicos directos (estructurales y no estructurales) ocasionados por los terremotos en las edificaciones, desestimando los daños indirectos, debido a fenómenos inducidos, como los deslizamientos, inundaciones, grandes incendios y accidentes con materiales químicos peligrosos, ya que este tipo de fenómenos requiere de estudios especiales.

El método más rápido o “directo” para la obtención de los coeficientes de la formula 2.1, sería realizar un trabajo de campo macrosísmico en el área afectada por el evento sísmico de gran intensidad, recolectando empíricamente la información necesaria para predecir directamente el daño causado por un terremoto en las edificaciones. En la literatura suelen referirse a estos métodos como “*estudios de vulnerabilidad observada*”. Las técnicas de investigación de campo requeridas por este método son bastante simples; no obstante, los resultados obtenidos sólo son aplicables a una muestra de la población, y no a una estructura en particular. Para recopilar la información de campo, suelen utilizarse distintos formularios que pueden ser más o menos complejos dependiendo del personal a cargo.

Estos métodos se consideran *empíricos*, cuando son el resultado de simples investigaciones de campo y estudios post - terremoto, y *subjetivos*, cuando se emplea el conocimiento y la experiencia de expertos en la evaluación del daño. A pesar de que estas investigaciones son válidas sólo en un sentido estadístico y sólo en zonas con tipologías constructivas análogas, son muy útiles a la hora de evaluar la vulnerabilidad de edificios a gran escala, incluso a toda una región, donde la aplicación de otros métodos puede resultar excesivamente costosa.

La obtención del número de muertos (y/o heridos) por edificación (o algún otro parámetro espacial similar: manzana, reparto, consejo popular, distrito, ciudad), la evaluación del grado de daños que los ocasionó y el número total de personas que se encontraban dentro de la edificación en ese momento, nos permite obtener las fracciones del número de muertos o heridos por edificación, a partir de un nivel de daño determinado.

En Cuba no contamos con estudios de este tipo, debido a que el último terremoto que ocasionó daños de envergadura ocurrió el 3 de febrero de 1932 (Chuy, 1999) y en esos momentos el país no contaba con especialistas (profesionales o aficionados) que pudieran al menos describir los daños a este nivel de detalle. Hay que decir también que este evento tuvo varios premonitores perceptibles (eventos sísmicos de mediana intensidad que ocurren un poco antes del terremoto principal), lo cual previno a la población, que conocedora del peligro, se trasladó a los lugares abiertos de la ciudad, evitando así en gran medida las pérdidas de vidas humanas. No obstante, si se hubiera hecho un estudio detallado post - terremoto, obteniéndose el número de personas que habitaban las casas con daños de envergadura y/o aquellas que colapsaron, pudiéramos tener en estos momentos una posible estimación de las pérdidas humanas que hubieran ocurrido producto de un terremoto de esta envergadura, sin contar con la “alerta temprana natural” proporcionada por los premonitores perceptibles, fenómeno natural oportuno, pero que no podemos garantizar ocurra en el próximo evento sísmico de esta magnitud.

Para la obtención de la base de cálculo partiremos de dos enfoques diversos:

1. Obtención de las pérdidas humanas a partir de la descripción de los daños en la escala de intensidad macrosísmica.
2. Obtención de las pérdidas humanas a partir de las funciones de vulnerabilidad de las edificaciones.

Estimación de las pérdidas humanas a partir de la descripción de los daños de la escala de intensidad macrosísmica

Las escalas de intensidad definidas con anterioridad a la escala MSK (Medvedev et al., 1965; Ad-hoc Panel, 1981) manejaron la evaluación de los daños de una forma limitada y restringida declarando que, a un grado de intensidad sísmica, debería ocurrir un cierto grado de daños en las edificaciones, siendo su distribución uniforme, lo cual no es cierto y fue reconocido por Richter en 1956 en el prefacio a la formulación de la escala Modificada de Mercalli (Gutenberg, B. and C.F. Richter; 1956). La escala MSK introdujo un enfoque cualitativo y cuantitativo del daño, al asociar los daños con el tipo de edificación (o una tipología constructiva) y su vulnerabilidad y la probabilidad de ocurrencia de distintos tipos de daños según el grado de intensidad sísmica a esperar (Anexo 5). Este enfoque ha sido mejorado en la escala EMS (Grünthal, 1998) con la definición de nuevas clases de vulnerabilidad y la inclusión del comportamiento de edificaciones con algún grado de diseño sismorresistente (Anexo 6).

En este caso, es posible obtener el grado de los daños esperados utilizando directamente la frecuencia de los distintos niveles de daño descritos en la escala en función de la tipología constructiva y del grado de intensidad sísmica. La ventaja de este método consiste en la posibilidad de predecir los daños sin que el análisis este ligado a la realidad territorial y por lo tanto a la ocurrencia de un terremoto de gran intensidad en el pasado, sin embargo hay que recalcar que la descripción de los niveles de daños y su frecuencia en función de la intensidad y las distintas tipologías o clases de vulnerabilidad en las escalas MSK y EMS no es completa. Por ejemplo, para el grado de intensidad X en la escala MSK-78, viene especificado el colapso (grado 5 de daño) del 75 % de los edificios de tipo A, pero no se brinda ninguna información de los daños en los edificios de las restantes tipologías (B y C en este caso). El empleo de este método por lo tanto tiene un alto nivel de subjetividad y lo recomendamos únicamente para la estimación preliminar de los daños en el área afectada, conocida la distribución de las intensidades.

El uso de matrices de probabilidad de daños (MPD) obtenidas a partir de trabajos de campo post-terremotos, en áreas afectadas por eventos de gran intensidad es una metodología más eficiente y de uso común en los trabajos de riesgo sísmico que utilicen la intensidad sísmica como parámetro que describe y cuantifica los daños. La MPD es capaz de pronosticar los posibles daños en cada una de las tipologías descritas en la escala, según la severidad del evento sísmico esperado. Este enfoque es bien conocido y ampliamente utilizado en la práctica sismológica (Braga et. al., 1982;

Braga et. al., 1985; Oliva et al., 1991; Oliva y Avich, 1995; Chávez, 1998; Chávez et al., 1998; SES, 2002).

En el caso de las escalas macrosísmicas en uso actualmente en Cuba (MSK y su sucesora EMS), la estimación de las pérdidas humanas se obtiene de forma empírica como una función del número de personas que se encuentran bajo las estructuras que sufrirán daños de 3^{er}, 4^{to} y 5^{to} grados de la forma:

$$N_{mi} = d_i (a_i D_{3i} + b_i D_{4i} + c_i D_{5i}) \quad (2.2)$$

donde N_{mi} es el número de pérdidas fatales para la tipología constructiva "i", D_{3i} , D_{4i} y D_{5i} son los coeficientes de la matriz de probabilidad de daño (MPD) para los grados de daños 3, 4 y 5 descritos por la escala macrosísmica para la tipología constructiva (escala MSK) o clase de vulnerabilidad (escala EMS) "i" (en una primera aproximación 3=Daños considerables, 4=Daños graves y 5=Daños Totales), d es el número de personas que se encuentran en las edificaciones que sufren los daños descritos por D_{3i} , D_{4i} y D_{5i} y a_i , b_i y c_i son coeficientes empíricos obtenidos a partir de estudios de casos de terremotos históricos o recientes, mientras que d_i es el número total de personas que se encuentran bajo construcciones tipo "i". Ver Anexo 7 para formulación probabilística del problema.

El número total de pérdidas fatales será la suma de las correspondientes a cada tipo constructivo existente:

$$N_m = \sum_i N_{mi} \quad (2.3)$$

En el caso de la escala MSK-78 se especifican solamente 3 tipologías constructivas (A, B, y C). Usando dicha clasificación se obtienen las expresiones:

$$N_{mA} = d_A (a_A D_{3A} + b_A D_{4A} + c_A D_{5A}) \quad (2.4)$$

$$N_{mB} = d_B (a_B D_{3B} + b_B D_{4B} + c_B D_{5B}) \quad (2.5)$$

$$N_{mC} = d_C (a_C D_{3C} + b_C D_{4C} + c_C D_{5C}) \quad (2.6)$$

obteniéndose el número total de pérdidas fatales N_m como:

$$N_m = N_{mA} + N_{mB} + N_{mC} \quad (2.7)$$

El número de heridos se calcula de la misma manera a partir de:

$$N_{hA} = d_A (e_A D_{3A} + f_A D_{4A} + g_A D_{5A}) \quad (2.8)$$

$$N_{hB} = d_B (e_B D_{3B} + f_B D_{4B} + g_B D_{5B}) \quad (2.9)$$

$$N_{hC} = d_C (e_C D_{3C} + f_C D_{4C} + g_C D_{5C}) \quad (2.10)$$

donde N_{hi} es el número de heridos para la tipología constructiva "i", obteniéndose el número total de heridos N_h como:

$$N_h = N_{hA} + N_{hB} + N_{hC} \quad (2.11)$$

donde N_{hA} , N_{hB} y N_{hC} representan el número total de heridos (sin especificar su gravedad) que se encuentran en las edificaciones que sufrieron daños descritos por D_{3i} , D_{4i} y D_{5i} , así como e_i , f_i y g_i son también coeficientes empíricos como en el caso anterior.

En el caso de la escala EMS se deben incluir las clases de vulnerabilidad no descritas en la MSK (D, E, y F). Usando dicha clasificación se obtienen las expresiones:

$$N_{mD} = d_D (a_D D_{3D} + b_C D_{4D} + c_D D_{5D}) \quad (2.12)$$

$$N_{mE} = d_E (a_E D_{3E} + b_E D_{4E} + c_E D_{5E}) \quad (2.13)$$

$$N_{mF} = d_F (a_F D_{3F} + b_F D_{4F} + c_F D_{5F}) \quad (2.14)$$

obteniéndose para esta escala el número total de pérdidas fatales N_m como:

$$N_m = N_{mA} + N_{mB} + N_{mC} + N_{mD} + N_{mE} + N_{mF} \quad (2.15)$$

Para los heridos igualmente se incluyen las otras clases de vulnerabilidad :

$$N_{hD} = d_E (e_D D_{3D} + f_D D_{4D} + g_D D_{5D}) \quad (2.16)$$

$$N_{hE} = d_E (e_E D_{3E} + f_E D_{4E} + g_E D_{5E}) \quad (2.17)$$

$$N_{hF} = d_F (e_F D_{3F} + f_F D_{4F} + g_F D_{5F}) \quad (2.18)$$

y el número total de heridos como:

$$N_h = N_{hA} + N_{hB} + N_{hC} + N_{hD} + N_{hE} + N_{hF} \quad (2.19)$$

Los heridos también pueden ser clasificados en 3 categorías:

S1: leves, requieren un tratamiento medico básico, no es necesario el ingreso en un hospital.

S2: graves, requieren una ayuda médica mayor y pueden incluso requerir hospitalización, pero no se espera que la misma se convierta en un tratamiento de por vida.

S3: muy graves, requerirán un tratamiento de por vida si no son inmediatamente “ayudados” de manera adecuada (la mayoría de ellos son personas que quedan atrapadas en las estructuras colapsadas o semidestruidas)

por tanto, los coeficientes e_T , f_T y g_T , ($T=A,B,C,D,E,F$) de las fórmulas 2.16-2.18 pueden ser subdivididos en 3 partes:

$$\begin{aligned} e_T &= e_T^{S1} + e_T^{S2} + e_T^{S3}, \\ f_T &= f_T^{S1} + f_T^{S2} + f_T^{S3}, \\ g_T &= g_T^{S1} + g_T^{S2} + g_T^{S3}, \end{aligned} \quad T = A,B,C,D,E,F \quad (2.20)$$

Para ellos serán válidas las fórmulas 2.8-2.10 y 2.16-2.18 donde en lugar de los e_T , f_T y g_T totales se ponen los correspondientes a una categoría particular de heridos. El número total de heridos se puede calcular por categoría igualmente, donde se tendrá N_{hT}^{Si} , $i=1,3$ en lugar del N_{hT} anteriormente definido cumpliéndose, en lugar de 2.19, la siguiente relación:

$$N_h = \sum_{Si,T} N_{hT}^{Si} \quad (2.21)$$

Debe señalarse que los coeficientes D_{GT} ($G=3,4,5$; $T=A,B,C,D,E,F$), presentes en las fórmulas anteriores, son función de la intensidad sísmica de los terremotos, o propiamente $D_{GT}(I)$. Por tanto, los N_h y N_m (así como los N_{hT} y N_{mT}) también son función de la intensidad sísmica o $N_h(I)$ y $N_m(I)$ [$N_{hT}(I)$ y $N_{mT}(I)$]. No se usó explícitamente esta dependencia para no recargar las fórmulas.

Las matrices de probabilidad de daño (MPD) se determinan: (a) extrapolando las definiciones de las escalas macrosísmicas y (b) por datos experimentales de terremotos. Sobre las experimentales no hay casi nada que decir; se basan en la estadística de los daños ocurridos en terremotos bien estudiados. Sin embargo, las obtenidas por extrapolación no siempre coinciden. Las

escalas de intensidades dan conceptos cuantitativos muy vagos, como “pocos”, “algunos”, “muchos”, que cada investigador interpreta como quiere. Algunos fijan valores a estos conceptos y otros crean una función de distribución de la probabilidad (fdp) de los daños para diferentes intensidades y toman de esta “fdp” el valor correspondiente a cada elemento de la MPD. Por ejemplo, Fäh et al. (2001) dan una MPD, obtenida a partir de la escala EMS diferente a la que presentamos en la tabla 2.3 (SES, 2002).

En las tablas 2.1 y 2.2, se presentan dos variantes de matrices de daños a partir de la escala MSK, la primera propuesta por Oliva et al. (1999), ha sido utilizada en nuestro país (García et al., 2002), la segunda (Braga et al., 1985) fue obtenida a partir de datos experimentales después de la ocurrencia del terremoto del 23 de noviembre de 1980 en Irpinia, Italia. En ambos casos se presentan únicamente los coeficientes para los grados de daño 3, 4 y 5.

Tabla 2.1- Matriz de probabilidad de daño, propuesta por Oliva et al. (1999). Únicamente se incluyen los grados de daño G3 (daño grave), G4 (daño muy grave) y G5 (daño total). Estos valores corresponden a los coeficientes D_{GT} de la MPD.

GRADO 3		Intensidad MSK					
	Tipología	VII	VIII	IX	X	XI	XII
	A	0.20	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00
	B	0.00	0.20	0.20	0.30	0.25	0.00
	C	0.00	0.05	0.20	0.50	0.25	0.00
GRADO 4		Intensidad, MSK					
	Tipología	VII	VIII	IX	X	XI	XII
	A	0.05	0.20	0.30	0.45	0.00	0.00
	B	0.00	0.05	0.20	0.50	0.20	0.00
	C	0.00	0.00	0.05	0.20	0.55	0.45
GRADO 5		Intensidad, MSK					
	Tipología	VII	VIII	IX	X	XI	XII
	A	0.00	0.05	0.20	0.55	1.00	1.00
	B	0.00	0.00	0.05	0.20	0.55	1.00
	C	0.00	0.00	0.00	0.05	0.20	0.55

Tabla 2.2- Matriz de probabilidad de daño, propuesta por Braga et al. (1985). Únicamente se incluyen los grados de daño G3(daño grave),G4 (daño muy grave) y G5 (daño total). Estos valores corresponden a los coeficientes D_{GT} de la MPD.

GRADO 3	Intensidad MSK					
	Tipología	VI	VII	VIII	IX	X
A	0.117	0.25	0.29	0.11	0.03	
B	0.042	0.12	0.31	0.29	0.11	
C	0.002	0.03	0.17	0.28	0.34	
GRADO 4	Intensidad MSK					
	Tipología	VI	VII	VIII	IX	X
A	0.023	0.09	0.38	0.37	0.23	
B	0.005	0.02	0.16	0.38	0.37	
C	0.	0.00	0.04	0.11	0.31	
GRADO 5	Intensidad MSK					
	Tipología	VI	VII	VIII	IX	X
A	0.002	0.01	0.20	0.50	0.73	
B	0.	0.00	0.03	0.19	0.50	
C	0.	0.00	0.00	0.02	0.12	

En la tabla 2.3 se presenta la matriz de daño obtenida a partir de la escala EMS- 98 (SES, 2002) y en la tabla 2.4 la matriz de daño de Chávez (Chávez, 1998; Chávez et al., 1998) . Esta última es conocida como modelo Irpinia - Cataluña, y fue también obtenida a partir de un examen de los daños reportados en 32548 edificaciones que se vieron afectadas por el terremoto de Irpinia, Italia.

Tabla 2.3- Matriz de probabilidad de daño (SES, 2002), expresada en % de edificaciones dañadas según los grados de intensidad y la clasificación de daños y tipología de la escala EMS. Únicamente se incluyen los grados de daños G3: daño grave, G4: daño muy grave y G5: destrucción total-colapso. Los valores corresponden a los coeficientes D_{GT} de la MPD multiplicados X 100.

		V			
		A	B	C	D
G3		0	0	0	0
G4		0	0	0	0
G5		0	0	0	0
		VI			
		A	B	C	D
G3		0	0	0	0
G4		0	0	0	0
G5		0	0	0	0
		VII			
		A	B	C	D
G3		27	8	0	0
G4		8	0	0	0
G5		0	0	0	0
		VIII			
		A	B	C	D
G3		45	27	8	0
G4		27	8	0	0
G5		8	0	0	0

		IX				
		A	B	C	D	E
G3		20	45	27	8	0
G4		45	27	8	0	0
G5		35	8	0	0	0
		X				
		A	B	C	D	E
G3		0	20	45	27	8
G4		20	45	27	8	0
G5		80	35	8	0	0
		XI				
		A	B	C	D	E
G3		0	0	20	45	27
G4		0	20	45	27	8
G5		100	80	35	8	0
		XII				
		A	B	C	D	E
G3		0	0	0	0	0
G4		0	0	10	20	20
G5		100	100	90	80	80

Tabla 2.4- Matriz de probabilidad de daño (Chávez, 1998, Chávez et al., 1998), obtenida de datos experimentales según los grados de intensidad y clasificación de daños y tipología de la escala EMS. Únicamente se incluyen los grados de daños G3: daño grave, G4: daño muy grave y G5: destrucción total-colapso. Nótese que en este caso no existe información para el tipo de construcción E ni para los grados XI y XII, pues no estaban presentes en el área de estudio. Los valores corresponden a los coeficientes D_{GT} de la MPD

V				
	A	B	C	D
G3	0.025	0.04	0.001	0.
G4	0.02	0.	0.	0.
G5	0.	0.	0.	0.
VI				
	A	B	C	D
G3	0.104	0.025	0.004	0.002
G4	0.019	0.002	0.	0.
G5	0.001	0.	0.	0.
VII				
	A	B	C	D
G3	0.227	0.104	0.025	0.004
G4	0.074	0.019	0.002	0.
G5	0.01	0.01	0.	0.

VIII				
	A	B	C	D
G3	0.346	0.227	0.104	0.025
G4	0.262	0.074	0.019	0.002
G5	0.08	0.01	0.01	0.
IX				
	A	B	C	D
G3	0.191	0.346	0.227	0.104
G4	0.409	0.262	0.074	0.019
G5	0.351	0.08	0.01	0.001
X				
	A	B	C	D
G3	0.017	0.191	0.346	0.227
G4	0.184	0.409	0.262	0.074
G5	0.798	0.351	0.08	0.01

Los coeficientes empíricos: a_i , b_i y c_i necesarios no pudieron ser encontrados en la literatura para las escalas MSK o EMS; solo existían para los diferentes tipos constructivos descritos en el HAZUS (FEMA, 1997). Esto obligó a utilizar un método indirecto para calcularlos.

Partiendo del hecho de que los estados de daños alcanzados para cada grado de intensidad y clase de vulnerabilidad descrita por las escalas macrosísmicas es comparable con los estados discretos de daño que caracterizan cada tipología constructiva (a partir de sus funciones de vulnerabilidad propias), es posible en la práctica generalizar el comportamiento de tipologías (clases) análogas siempre y cuando la definición de los estados de daños sea compatible, como ocurre entre la escala EMS-98 y la metodología HAZUS.

A partir de la premisa anterior se obtuvieron los coeficientes empíricos: a_i , b_i y c_i necesarios, asociando a la clase de vulnerabilidad macrosísmica los coeficientes empíricos obtenidos por HAZUS para la misma tipología constructiva, utilizando en este procesamiento las 17 tipologías constructivas presentes en Santiago de Cuba (ver discusión en epígrafe 2.2 y esquema simplificado en tabla 2.9).

Los coeficientes empíricos: a_i , b_i y c_i necesarios para la obtención del número de muertos se presentan en la tabla 2.5, expresando en % la frecuencia de muertes para cada grado de daño en función de la clase de vulnerabilidad descrita en la escalas MSK-78 y EMS-98. En la tabla 2.6 se presenta el número de heridos totales (coeficientes e_i , f_i y g_i) en dependencia del grado de daños alcanzado y la tipología constructiva en cuestión. Los valores están expresados en %.

Tabla 2.5- Número de pérdidas fatales (expresado en %) para los grados de daños G3: daño grave, G4: daño muy grave y G5: destrucción total-colapso, según la clases de vulnerabilidad descritas en las escalas MSK-78 y EMS-98.

Clase EMS	Clase MSK	Grado 3	Grado 4	Grado 5
A	A	0.002	0.02	10
B	B	0.002	0.02	10
C	C	0.001	0.01	10
D	-	0.001	0.01	10
E	-	0.001	0.01	10
F	-	0.001	0.01	10

Tabla 2.6- Número de heridos, especificando su gravedad: s1-heridos leves, s2- heridos con daños de consideración (requieren hospitalización pero no se espera pierdan la vida), s3-heridos de gravedad (requieren hospitalización inmediata o pueden fallecer), para los grados de daños G3: daño grave, G4: daño muy grave y G5: destrucción total - colapso, según la clases de vulnerabilidad descritas en las escalas MSK-78 y EMS-98 (valores en %).

Escala		grado 3 (%)				grado 4 (%)				grado 5 (%)			
EMS	MSK	s1	s2	s3	total	s1	s2	s3	total	s1	s2	s3	total
A	A	2	0.2	0.002	2.202	10	2	0.02	12.02	40	20	5	65
B	B	2	0.2	0.002	2.202	10	2	0.02	12.02	40	20	5	65
C	C	1	0.1	0.001	1.101	5	1	0.01	6.01	40	20	5	65
D	-	1	0.1	0.001	1.101	5	1	0.01	6.01	40	20	5	65
E	-	1	0.1	0.001	1.101	5	1	0.01	6.01	40	20	3	63

Para la obtención de los valores presentados se tuvo en cuenta la propuesta de la ATC-13, el proyecto HAZUS99 y Ho (2001).

Un enfoque muy utilizado en la actualidad para estudios regionales de riesgo y la estimación de las pérdidas en la población (que no tuvimos en cuenta hasta el momento y creemos necesario incluir ahora) es el propuesto por Coburn y Spence (1992). Este método parte de que el número de pérdidas fatales debido a un terremoto de gran intensidad va a depender en gran medida del número de edificaciones con daños de grado 5, es decir, del número de edificaciones dependiendo de su clase de vulnerabilidad que colapsen o se destruyan totalmente, excluyendo de hecho los muertos por daños no estructurales y por daños estructurales en los grados de daño 3 y 4. Además, considera en el análisis parámetros que tienen que ver con el escenario de riesgo como: la hora en que ocurre el evento sísmico y el uso de las edificaciones, los cuales influyen grandemente en la porcentual de sobrevivencia.

El número de muertos, siguiendo la notación de (2.1), debido al colapso de las edificaciones se expresa de la forma:

$$M_{S_i} = D5_i \times \left[M1 \times M2 \times M3 \times (M4 + M5(1 - M4)) \right] \quad (2.22)$$

donde $D5_i$ es el número total de edificaciones destruidas totalmente o colapsadas tipo i (A, B o C en la escala MSK; A, B, C, D, E o F en la escala EMS), los factores del M1 al M5 no son mas que parámetros de pueden afectar o favorecer el aumento del número total de muertes M_{S_i} en las edificaciones de clase i y su significado se detallara a continuación.

M1: Número de habitantes por edificación. Este parámetro puede cambiar considerablemente de un lugar a otro, siendo mayor en el centro de ciudades densamente pobladas con un gran desarrollo o una tasa de emigración alta y más pequeño en las zonas rurales o semi-rurales.

M2: % de ocupación de la edificación en el momento del colapso. La hora del día en que ocurra el evento sísmico es importante y determinara en gran medida el número de muertes, debido a la presencia o no, de las personas que habitan o trabajan en la edificación en cuestión. Para zonas rurales o semi-rurales, en la madrugada (2 am), uno de los escenarios escogidos, el % de ocupación de las edificaciones dedicadas a viviendas es de mas de un 90%, mientras a las 2 p.m. es de solamente un 20%. En cambio para la misma categoría ocupacional, en una zona urbana, en el primer escenario, encontramos que solo un 78% de las personas como promedio se encuentran dentro de sus casas, mientras que a las 2:00 p.m. el porciento de ocupación es menor y alcanza un 40%. En las zonas urbanas, en las edificaciones no dedicadas a viviendas, por lo general, un 12% de la población se encuentra dentro de estas edificaciones a las (2:00 a.m.), mientras más de un 85% se podría encontrar dentro de ellas como promedio a las 2:00 p.m.

M3: % de personas que quedan atrapadas bajo los escombros. Este parámetro tiene que ver con las personas que quedan atrapadas en las estructuras colapsadas y no mueren instantáneamente, debido a que al colapsar la estructura no todas las estructuras se desploman o destruyen totalmente. Este parámetro varia entre 5 y el 75% in función de la tipología constructiva. Los autores no dejan claro el valor que debe asignársele a cada tipología, en el caso de las edificaciones de mampostería este porciento depende de la intensidad de las sacudidas sísmicas (ver tabla 2.7), mientras que en el caso de las de hormigón armado el mismo depende de la cercanía de las edificaciones (de 3 a 5 pisos) al área de mayor intensidad de las sacudidas sísmicas. Las cercanas al epicentro, según dichos autores, colapsan con mayor facilidad debido a la contribución de las altas frecuencias; el porciento de personas atrapadas alcanza el 70%, mientras que este valor va disminuyendo con la distancia, según nos vamos alejando del epicentro, hasta alcanzar un 50%.

Tabla 2.7.- M3: Estimado medio de las personas que quedan atrapadas en las edificaciones de mampostería u hormigón armado según Coburn y Spence (1992)

Estructuras de Mampostería (hasta 4 niveles)				
MSK	VII	VIII	IX	X
	5%	30%	60%	70%
Estructuras de Hormigón (3-5 niveles)				
Cercano al epicentro, predominio de sacudidas de alta frecuencias				70%
Distante del epicentro, predominio de sacudidas de baja frecuencia				50%

M4 y M5: % de personas atrapadas que mueren instantáneamente (M4) y luego de haber sido extraídas de los escombros (M5). M4 generalmente varía entre el 20% de M3 para estructuras de hormigón armado y un 40 % para estructuras de mampostería y M5 entre el 45 – 90% de (M3-M4) para estructuras de mampostería y un 70 – 90 % de (M3-M4) en estructuras de hormigón armado, en dependencia del tiempo que hayan estado atrapadas bajo los escombros.

Otro indicador de importancia que puede obtenerse de esta estadística es el número de personas que quedan sin vivienda producto del colapso o daños estructurales. Este se obtiene sumando la cantidad de personas que viven en edificaciones destinadas a viviendas que sufren daños de grado 4 o 5. De forma aproximada puede ser estimada sumando la cantidad de personas que se encuentran en edificaciones que sufren daños de grado 4 o 5. Debe calcularse usando sólo la estadística de viviendas, ya que si se incluyen otras edificaciones sociales, estaremos sobreestimando su magnitud:

$$N_{SV} = \sum_T d_T \cdot (D_{4T} + D_{5T}) \quad (2.23)$$

donde N_{SV} es el número de personas que queda sin vivienda y T , al igual que antes, expresa la clase de vulnerabilidad de las construcciones.

Programa de cómputo para el cálculo de pérdidas humanas

Se preparó un programa en FORTRAN de fácil manejo, con vistas a calcular las pérdidas usando la metodología descrita más arriba. Se entrega el código ejecutable para Windows y para Linux. El programa se denomina “perdidas” y usa un fichero de entrada estándar llamado “perdidas.dat”. También se puede usar un fichero de entrada adicional en otro formato, llamado “perdidas.tab”. También admite la introducción de datos en forma interactiva. Un manual de usuario para este programa se presenta en el Anexo 8.

2.2 Estimación de los daños en las construcciones de la ciudad de Santiago de Cuba a partir de la metodología propuesta por el HAZUS

Pedro Iván Márquez Mercerón¹, Grisel Morejón Blanco¹, Julio César Vázquez Batista¹, Yelena Berenguer Heredia¹, Julio A. García Peláez¹

¹Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS)

INTRODUCCIÓN.

Los sismos representan uno de los fenómenos más impactantes de la naturaleza, ellos traen como consecuencia pérdidas de vidas humanas y la destrucción de las infraestructuras creadas por el hombre, demostrando de esta forma su potencial devastador. Las experiencias obtenidas en terremotos recientes han evidenciado el mal comportamiento de las edificaciones ante estos eventos y la necesidad de reforzar aquellas estructuras con poca o ninguna capacidad de respuesta sismorresistente.

El objetivo principal de la ingeniería sísmica es el análisis del comportamiento de las estructuras frente a las fuerzas sísmicas. La incertidumbre tanto en los parámetros que definen la acción sísmica como los correspondientes al modelo estructural, sugiere el uso de métodos probabilistas. (Bonett, et.al., 2001).

La estimación de los daños en las edificaciones producidos por terremotos es del interés de todos los decisores a nivel local, territorial y regional de forma tal que permita desarrollar o perfeccionar los planes o estrategias de mitigación en las comunidades bajo riesgo. Las metodologías más actuales están basadas en la obtención de las curvas de fragilidad de cada uno de los tipos constructivos.

Un ejemplo de lo anteriormente dicho lo constituye la metodología propuesta en el proyecto HAZUS (FEMA, 1997) para evaluar el daño esperado en su área en caso de ocurrencia de un sismo, el mismo contiene 36 tipos estructurales. Como estas clasificaciones fueron desarrolladas teniendo en cuenta edificios típicos de los Estados Unidos, es necesario conocer si las características estructurales de las edificaciones existentes en la ciudad de Santiago de Cuba coinciden y pueden ser representadas por las clasificaciones que brinda el HAZUS, por lo que es necesario verificar si los tipos estructurales existentes en la ciudad se pueden adaptar a la clasificación que brinda el HAZUS, lo cual constituye el objetivo fundamental de este trabajo.

METODOLOGÍA EMPLEADA.

Para alcanzar el objetivo anteriormente expresado, fue necesario realizar una serie de pasos, que no por sencillos dejan de ser imprescindibles; permitiendo un mejor dominio de la temática y unos resultados precisos, los pasos realizados fueron los siguientes:

1. Búsqueda y Recopilación de la información acerca de la temática: Se realizó una revisión de toda la bibliografía existente en el CENAIIS y en las diferentes bibliotecas del país, así como se revisaron los diferentes sitios web, donde se encontraban los artículos más recientes que abordaran la temática.
2. Interpretación de las descripciones propuesta por el HAZUS: Se interpretaron las descripciones de las tipologías correspondientes a las clasificaciones propuestas por el HAZUS.

3. Clasificación de los diferentes tipos constructivos existentes en la ciudad: Se analizaron los diferentes tipos constructivos existentes en la ciudad de acuerdo a su época, materiales y tipología constructiva, luego se escogieron los más representativos.
4. Clasificación de los tipos constructivos existentes en la ciudad según HAZUS: Se clasificaron las edificaciones existentes representativas, según el código de las clasificaciones propuestas por el programa HAZUS.
5. Modelación de las edificaciones representativas y obtención de las curvas de capacidad de ellas: Se modelaron las edificaciones seleccionadas en la ciudad con ayuda del programa SAP2000 (Computers and Structures, Inc., 1995), luego se obtuvieron las curvas de capacidad de cada una de estas edificaciones.
6. Comparación de las curvas obtenidas con las que brinda el programa HAZUS.
7. Conclusiones y Recomendaciones.

FUNCIONES DE DAÑOS DE EDIFICACIONES.

En la metodología propuesta en el proyecto HAZUS (FEMA ,1997), son utilizadas dos tipos de curvas o funciones para estimar los daños en las edificaciones producto de los sismos:

1. Curvas de capacidad.
2. Curvas de fragilidad.

Las curvas de capacidad estiman la respuesta pico de la edificación para un nivel dado de demanda espectral. Estas curvas son análogas a las curvas tipo “PUSHOVER” de edificaciones individuales y están basadas en parámetros ingenieriles (fluencia y resistencia última) del sistema estructural que caracteriza el comportamiento no lineal de diferentes tipos de modelos de edificios.

Las curvas de fragilidad predicen la probabilidad de alcanzar o exceder los estados de daños específicos para un nivel dado de respuesta sísmica pico. La probabilidad de estar en un estado particular de daño (la entrada usada para predecir las pérdidas relacionadas en las edificaciones) se calculó como la diferencia entre las curvas de fragilidad

Curva de capacidad de la edificación.

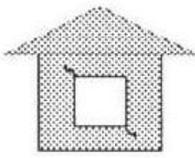
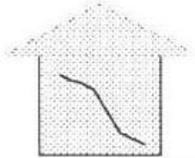
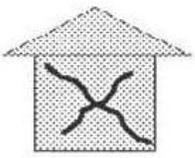
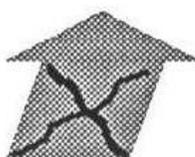
La curva de capacidad es el resultado de graficar el cortante basal estático equivalente contra el desplazamiento tope de la edificación. Para facilitar la comparación con la demanda espectral, el cortante basal se convierte en aceleración espectral y el desplazamiento tope en desplazamiento espectral usando las propiedades modales que se representan en la respuesta “pushover”.

Las curvas de capacidad se construyen para cada modelo estructural y representan diferentes niveles de fuerza lateral de diseño y funcionamiento. Cada curva está definida por dos puntos de control: (1) la capacidad de fluencia, y (2) la capacidad última. La capacidad de fluencia representa la resistencia lateral y la historia del diseño por resistencia, conservando los requerimientos del código y estimando la resistencia de los materiales (mayor que la nominal).

La capacidad última representa la resistencia máxima de la edificación cuando el sistema estructural global se convierte en un mecanismo (es decir, cuando se desarrollan articulaciones plásticas que hacen que la estructura pierda la estabilidad). Generalmente se asume que una edificación es capaz de deformarse más allá del punto último sin que pierda estabilidad pero el sistema estructural no suministra una resistencia para la fuerza sísmica lateral. Por encima de la fluencia se asume que la curva de capacidad es lineal con rigidez basada en una estimación del período esperado de la edificación. Desde la fluencia hasta el punto último las curvas de capacidad transitan en ascenso desde un estado esencialmente elástico hasta un estado totalmente plástico. Las curvas de capacidad

se asumen más allá del punto último. En la Tabla 2.8 y figura 2.1 se muestra un ejemplo de la obtención de la curva de capacidad para estructuras de madera.

Tabla 2.8. Ejemplo de estados de daño para edificaciones ligeras de madera.

Estado de daño		Descripción
	Ligero	Grietas pequeñas en el repello de las esquinas de puertas y ventanas e intersecciones del falso techo con las paredes; grietas pequeñas en chimeneas y enchapes de mampostería. Se observan grietas pequeñas con un ancho máximo menor de 1/8 pulgada (grietas mayores de 1/8 de pulgada se clasifican como grietas grandes).
	Moderado	Grietas grandes en el repello o enyesado en las esquinas de puertas y ventanas; grietas diagonales pasantes en paneles y paredes de cortante, observándose como grietas pequeñas en estucos y paneles de pared enyesados; grietas grandes en chimeneas de ladrillos; caída de chimeneas altas de mampostería.
	Grave	Grietas grandes diagonales pasantes en paneles de pared a cortante o grietas en uniones de madera; movimientos laterales permanentes del piso y del techo; caída de la mayoría de chimeneas de ladrillos; grietas en cimentaciones; rajaduras de vigas soleras de madera y/o deslizamientos de estructuras sobre cimentaciones.
	Total	Las estructuras pueden tener grandes desplazamientos laterales permanentes o estar en un peligro inminente de colapso debido a la falla de paredes o la falla del sistema resistente a cargas laterales; algunas estructuras se pueden deslizar y caerse de la cimentación; grietas grandes en la cimentación. El 5% del área total de la edificación con daño total se espera que colapse.

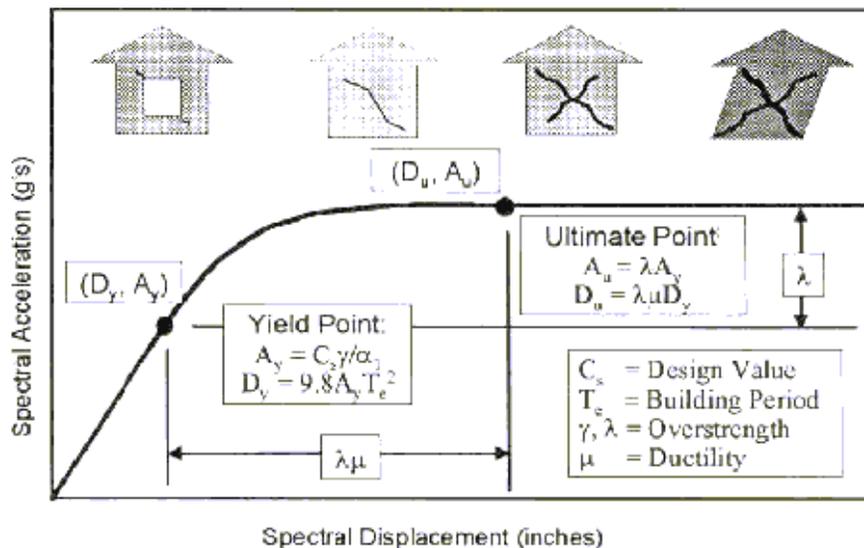


Figura 2.1. Ejemplo de curva de capacidad y puntos de control para edificaciones ligeras de madera.

En las fórmulas que aparecen en la figura se tienen los parámetros siguientes:

- El coeficiente de la resistencia de diseño, C_s , corresponde aproximadamente a la fuerza lateral de diseño exigida en los códigos sísmicos actuales y está en función de la ubicación de la edificación en la zona sísmica y de otros factores que incluyen las condiciones del suelo en el sitio, el tipo de sistema resistente a fuerzas laterales y el período de la edificación.
- El período modal fundamental elástico esperado de la edificación, T_e , es calculado usando la fórmula del período de la UBC 1990 (ICBO, 1990), modificado para reflejar las propiedades reales de la edificación y una altura típica de los tipos de modelos de edificaciones.
- Los parámetros modales “pushover”, α_1 y α_2 ; α_1 es la fracción del peso efectivo de la edificación y α_2 es la fracción de la altura de la edificación en elevación cuando el desplazamiento en el modo “pushover” es igual al desplazamiento espectral.
- El factor de sobrerresistencia, γ , relaciona la resistencia a fluencia real con la resistencia de diseño.
- El factor de sobrerresistencia, λ , relaciona la resistencia última con la resistencia por fluencia.
- El grado de ductilidad, μ , relaciona el desplazamiento último con el desplazamiento de fluencia.

Mediante las ecuaciones que aparecen en la figura 2.1 se pueden determinar los dos puntos de control que permiten obtener las curvas de capacidad para cada tipo estructural. Sin embargo, para estructuras más complejas es necesario utilizar como herramientas programas de computo, con el objetivo de realizar un cálculo más rápido y preciso; uno de los programas que permite realizar este tipo de análisis es el SAP2000 (Computers and Structures, Inc., 1995). El mismo realiza un análisis estático no lineal de la edificación y brinda como resultado las coordenadas de las curvas de capacidad (es decir, punto de fluencia, punto de desempeño y punto último), para diferentes estados de carga. Es necesario señalar que en nuestro caso debemos utilizar la variante de la obtención de las curvas de capacidad de las edificaciones por medio del método "pushover" ya que la norma sísmica vigente no considera los factores de sobrerresistencia para los materiales estructurales.

La respuesta de la edificación está determinada por la intersección de los espectros de demanda y la curva de capacidad de la edificación (Kircher et al, 1997). La intersección se ilustra en la figura 2.2 para tres ejemplos de espectros de demanda que pueden ser considerados como movimiento del terreno débil, medio y fuerte y dos curvas de capacidad de la edificación que representan construcciones rígidas y flexibles respectivamente. Como se puede observar en la figura 2.2, los desplazamientos en las construcciones más resistentes y rígidas son menores que los de las construcciones más flexibles y débiles para un mismo espectro de demanda por lo que los daños a esperar son menores en el sistema estructural y en los elementos no estructurales susceptibles al deslizamiento. Sin embargo, las edificaciones más resistentes tendrán valores de aceleración más elevados, y los daños a esperar serán mayores en los elementos y equipos no estructurales susceptibles a la aceleración.

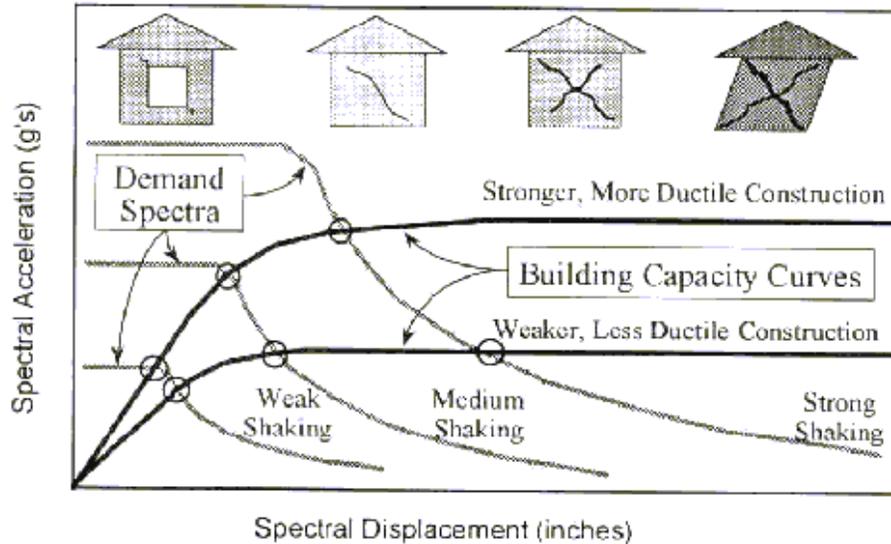


Figura 2.2. Ejemplo de intersección de espectros de demanda y las curvas de capacidad de dos edificaciones.

ESTRUCTURAS REPRESENTATIVAS.

El estudio del fondo habitacional de la ciudad de Santiago de Cuba requiere de un análisis de las diferentes tipologías constructivas existentes. Las edificaciones de la ciudad presentan características estructurales y arquitectónicas, técnicas constructivas, materiales y edades diversos en dependencia del período en que fueron construidas. En la ciudad se definen tres grandes períodos constructivos: el colonial, el republicano y el período revolucionario.

El período colonial comienza con la llegada de los españoles a Cuba, destacándose el siglo XIX como el período de mayor auge en las construcciones. A inicios del siglo XIX, la mayoría de las edificaciones que se realizaban eran relativamente sencillas; en lo fundamental, viviendas que no requerían para su fabricación de un nivel superior de formación técnica. En las zonas rurales, bohíos de tabla y guano constituían el alojamiento común de los campesinos. En las ciudades, muchos barrios de la periferia mantenían este tipo de construcción para las familias de más bajos ingresos, aparte de un significativo número de edificaciones de muros de albañilería y techo de tejas.

En realidad, la generalidad de las construcciones de inicios del siglo XIX se distinguían por la simplicidad de su estructura: una sola planta, paredes de mampostería y techo de tejas con excepción naturalmente de algunas obras oficiales y de las residencias de la aristocracia criolla y de los altos funcionarios del gobierno español, algunas concentradas alrededor de las principales plazas y otras dispersas por la ciudad.

Con el desarrollo de la ciudad surgieron obras civiles encaminadas al embellecimiento y ornamentación; contribuyendo de esta forma a la difusión de los elementos neoclásicos en la arquitectura de la ciudad. Es de notar en esta primera mitad del siglo XIX una mayor suntuosidad en las viviendas de los ricos hacendados y de los comerciantes criollos y españoles. (Llanes, 1986).

El período republicano comienza a inicios del siglo XX, donde se mantuvo la tendencia de los estilos europeos desplazados en pocos años por el interés en el estilo norteamericano, contribuyendo de esta a forma a la introducción de esta cultura constructiva en nuestro país. A esto se une la presencia en la isla de compañías constructoras norteamericanas, encargadas de ofrecer las estructuras completas de los proyectos que se presentaban. Esta época se caracterizó por la difusión y utilización del hormigón armado y el acero como materiales estructurales en las edificaciones, atravesando por los diferentes estilos arquitectónicos de la época.

En los primeros años de la etapa revolucionaria en las zonas rurales o suburbanas se edificaron viviendas aisladas y pareadas de un piso, con tecnología constructiva ligera y en ocasiones artesanales, compuestas por muros de ladrillos cerámicos o bloques de hormigón o de elementos del sistema Sandino; en los techos se empleó la viguetería de madera con cubiertas de tejas cerámicas o de asbesto cemento. En zonas urbanas se construyeron fundamentalmente edificios multifamiliares de 4 niveles con sistema tradicional, a los que se les fueron incorporando componentes prefabricados de hormigón, losas de hormigón ligero o losas prefabricadas de hormigón nervadas o macizadas. La producción de estos componentes prefabricados se hacía principalmente en moldeado a pie de obra. La necesidad cada vez mayor de viviendas, así de acortar los plazos de ejecución, reducir el empleo de mano de obra y lograr una mayor economía del proceso constructivo dio paso a la creación del primer sistema constructivo totalmente prefabricado, el sistema "Gran Panel".

El desarrollo de la industrialización de la construcción de viviendas se concibió inicialmente como la producción industrial de un modelo único de edificios, es decir, como prefabricación cerrada; desde finales de la década del 60 comenzaron a valorarse en el país las experiencias internacionales en relación con la prefabricación abierta como vía idónea para alcanzar objetivos más amplios de la arquitectura. (Medina y Rodríguez, 1986).

A continuación se detallan las características de los principales sistemas constructivos existentes en la ciudad.

Edificio E-14.

Existen diferentes variantes de este sistema constructivo, algunas semiprefabricadas y otras construidas in situ, conformadas por columnas y vigas de hormigón armado y muros de mampostería. La variante más generalizada en la ciudad es la Variante 3, estos edificios presentan 5 niveles y cada planta tiene 11 intercolumnios de 3.20 metros y 2 luces de 4.50 metros.



Edificio E-14. (5 niveles).

Su solución estructural está conformada por columnas fundidas in situ, las exteriores de sección de 0.20 x 0.40 metros y las interiores de 0.20 x 0.20 metros y muros de carga de 0.20 metros de espesor en el sentido transversal. Los muros en ambos sentidos se rigidizan con vigas de cerramiento fundidas in situ, en las que se apoyan las losas prefabricadas de 0.10 metros de espesor, las cuales trabajan en una dirección.

Sistema Prefabricado IMS.

Está conformado por variantes de edificios de 5, 8, 12, y 18 niveles; el sistema fue diseñado dentro de los principios de la prefabricación abierta.

Está basado en una red modular simple de 1 o 2 losas casetonadas y 4 columnas que se unen mediante una junta postensionada para formar una estructura de esqueleto con posibilidades de crecimiento en las tres dimensiones. La estructura portante está conformada por columnas y losas casetonadas postensionadas, las vigas se crean cuando se hormigonan las juntas entre los elementos horizontales (losa – losa, losa – viga de borde) que conforman el diafragma horizontal y son las encargadas de resistir las fuerzas gravitacionales transmitiéndolas a los elementos verticales y estos a su vez a la cimentación. El 83 % de las cargas horizontales son soportadas por los tímpanos ubicados desde la cimentación hasta el ultimo nivel, mientras que los pórticos solo absorben el 17 %.



Edificio IMS (18 plantas)

Sistema Prefabricado Gran Panel Soviético (GPS).

Estos edificios pueden ser de 20, 40 y 60 apartamentos, con o sin balcones, de 2 o 3 entradas y pueden tener 4 o 5 niveles.

Estructuralmente las cargas gravitacionales y sísmicas son transmitidas a la cimentación por paneles prefabricados en los dos sentidos de la edificación, dichos paneles también soportan las losas de entrepiso y cubierta. La cimentación es corrida fundida in situ, en la cual se colocan paneles zócalos que aportan gran rigidez a la estructura.



Edificio GPS. (5 niveles).

Sistema Sandino.

Estas edificaciones pueden ser de 1 o 2 niveles. El sistema se basa en paredes hechas a base de elementos prefabricados, columnas ligeramente armadas con sección de 0.11 x 0.11 metros y paneles de pared de hormigón sin refuerzo con dimensiones de 0.945 x 0.468 x 0.062 metros. La modulación es de 1.04 metros entre ejes de columnas, el espacio entre ellas es ocupado por 5 paneles de hormigón, cerámica o ventanas.



Escuela Sistema Sandino.

La luz empleada en viviendas es fundamentalmente 3.12 metros; para aulas, naves u otras construcciones puede llevarse a 6.24 metros mediante vigas o cerchas espaciadas a 3.12 metros con una columna especial en estos puntos. El puntal libre es de 2.50 metros. Los cimientos son aislados de hormigón ciclópeo; cuando se emplean pilarotes, son de hormigón armado. Las cubiertas pueden tener muchas variantes entre las que tenemos las losas fundidas in situ, planchas acanaladas de asbesto cemento, losas siporex, bovedillas cerámicas, etc.

Viviendas de Bajo Costo.

Son viviendas de un solo nivel de mampostería no reforzada utilizando las técnicas de adobe, tapial, mampuesto, materiales alternativos como suelo cemento, ladrillos cerámicos, etc, teniendo en cuenta que lo que prima en este tipo de construcción es la economía. Las cubiertas pueden ser ligeras o pesadas a una o dos aguas.



Vivienda de Bajo Costo.

Sistema Prefabricado Girón.

Su construcción principalmente se ha destinado a satisfacer las necesidades de obras sociales, fundamentalmente educacionales y hospitalarias, diseñándose edificaciones de hasta 5 niveles, los cuales pueden ser con niveles estructurales o apoyados en el terreno. Está compuesto en su dirección transversal esencialmente por una estructura de esqueleto de hormigón armado rellenas ocasionalmente con paredes del mismo material, algunas de las cuales, denominadas tímpanos, contribuyen a la resistencia global del edificio en esa dirección. Las estructuras de piso y cubierta están constituidas por losas doble T apoyadas sobre las vigas dispuestas transversalmente.

La transmisión de las solicitaciones producidas por las acciones sísmicas en la dirección longitudinal para los pisos superiores se asegura también a través de tímpanos prefabricados y para el piso inferior a través de los pedestales prefabricados. No obstante las losas doble T dispuestas en la dirección longitudinal y las columnas o pedestales forman un pórtico que pueden transmitir las solicitaciones producidas por las acciones horizontales de cargas de viento en caso de no disponerse tímpanos en esa dirección.



Edificio Girón. (Apoyado en el terreno).

Sistema Abierto de Esqueleto (SAE).

El sistema ha sido diseñado basándose en los principios de la tipificación abierta, para su aplicación en un amplio número de programas de uso masivo. La solución estructural está formada por pórticos de hormigón armado conformado por columnas con ménsulas y dobles vigas prefabricadas, estos pórticos están rigidizados con tímpanos formados por paneles prefabricados vinculados entre sí y a las columnas a través de juntas hormigonadas in situ.



Escuela Sistema SAE.

Los entrepisos y la cubierta están formados por losas spiroll de 0.20 y 0.30 metros de espesor arriostradas con fajas hormigonadas in situ. Los cierres son de albañilería reforzada atendiendo a sus características. La cimentación es con bases aisladas hormigonadas in situ con vasos prefabricados para las columnas no rigidizadas con tímpanos y corridas combinadas en el caso de los módulos rigidizados con tímpanos. Los puntales pueden ser de 3.3, 3.9, 4.2 y 4.8 metros, pudiendo ser mayores o menores cuando no hay nivel estructural en el nivel 0.00.

Edificaciones de madera.

Son construcciones de uno o dos niveles, relativamente pequeñas. Su solución estructural consiste en pórticos repetitivos de vigas o viguetas y horcones de madera y paredes de cierre de madera.



Vivienda de madera.

Los entrepisos están conformados por un entablado de madera con un relleno de piso. Las cubiertas generalmente son de armaduras, las cuales soportan las tejas cerámicas.

Construcciones convencionales de hormigón armado.

Son edificaciones de 1 o 2 niveles; la solución estructural está formada por pórticos de hormigón armado fundido in situ. Los entrepisos son de hormigón armado fundidos in situ y las cubiertas pueden ser ligeras o pesadas de hormigón armado. Las cimentaciones son aisladas con platos de hormigón armado fundidos in situ.



**Viviendas convencionales
(2 niveles).**

Edificios multifamiliares de hormigón armado.

Son edificaciones de 3 a 5 niveles; la solución estructural está formada por pórticos de hormigón armado fundido in situ.



Edificio de hormigón armado (4 niveles).

Los entrepisos y la cubierta son de hormigón armado fundidos in situ. Las cimentaciones son aisladas con platos de hormigón armado fundidos in situ. La soluciones de cierre son de muros de ladrillo. En algunos casos se utilizaron perfiles metálicos como reforzamiento en los pórticos y en los entrepisos pequeñas losas apoyadas sobre viguetas conformadas por perfiles metálicos.

Construcciones de mampostería sin reforzar.

Estas edificaciones pueden ser de 1 o 2 niveles, datan del período republicano, justamente en el período de esplendor del eclecticismo.

Su solución estructural se basa en muros de carga, los cuales pueden ser de agregados formados por piedras de tamaño pequeño, o de ladrillo; en algunas variantes cuentan con vigas de cierre perimetrales sobre las que se apoyan las armaduras de techo. Los techos pueden ser planos o colgadizos apoyados sobre armaduras de madera, los entrepisos son de hormigón ligeramente armado y en ocasiones se apoyan sobre algunos elementos de apoyo aporricados.



Vivienda de mampostería (2 niveles).

Construcciones de acero arriostradas.



Edificio de acero.

Estas edificaciones se utilizan generalmente en instalaciones industriales y sociales. El sistema estructural está conformado por pórticos de acero. Generalmente la estructura se encuentra arriostrada tanto en la dirección longitudinal como en la transversal, lo cual garantiza una adecuada rigidez de los entrepisos que conforman la edificación. Las paredes divisorias son de bloques de hormigón o de ladrillos.

Construcciones tipo naves con cubierta ligera.

Estas edificaciones se caracterizan por una gran longitud en planta; generalmente están constituidas por pórticos perimetrales de hormigón y cubierta ligera apoyada sobre cerchas metálicas o de madera; los muros de cierre generalmente son de ladrillos o bloques de hormigón.



Nave con cubierta ligera.

Naves industriales de acero.

Estas edificaciones están conformadas por pórticos de acero, donde los elementos estructurales (columnas y vigas) son perfiles laminados. La cubierta generalmente es ligera, apoyada sobre la estructura metálica. Los elementos de cierre pueden ser desde paneles prefabricados hasta elementos ligeros como el steel deck.

Construcciones móviles.

Estas son unidades prefabricadas que se transportan al sitio donde son ubicadas sobre pilotes aislados, burros o cimientos de bloques de mampostería sin ningún tipo de anclaje. El piso, la cubierta y los cierres son construidos con láminas de metal.



Construcciones móviles.

Naves industriales de hormigón armado.

El sistema constructivo para naves industriales prefabricadas de hormigón de 1 nivel presenta dos soluciones: la solución pesada y la solución ligera. Estas naves presentan 1 o más luces de 12, 18 y 24 metros y un número indeterminado de intercolumnios de 6 metros. Algunas de ellas presentan aleros, monitores y vigas para puente grúa de 5, 10 y 20 toneladas de capacidad de carga y transporte subcolgado. Generalmente la solución estructural se basa en pórticos formados por columnas y vigas o cerchas de hormigón prefabricado empotradas en vasos fundidos in situ.

La solución pesada se utiliza para naves con cubierta y fachada de paneles y losas de hormigón armado o pretensado. El método fundamental de unión de los elementos es para pared soldadura y fundición de hormigón y para cubierta fundición in situ. En dependencia de la distancia entre los ejes modulares en el sentido de la luz el elemento de soporte de la cubierta puede ser vigas de 12 y 18 metros o cerchas de 18 y 24 metros.



Nave cubierta pesada y monitor.



Nave con cubierta ligera.

La solución ligera se utiliza para naves con paredes, cubierta y fachada de asbesto cemento ondulado. El cierre de las fachadas se ejecuta por medio de viguetas de pared y tejas de asbesto cemento ondulado y como antepecho se utilizan losas spirill o nervadas

Para estimar los daños en las construcciones es necesario conocer el tipo de edificación (clasificados según las alternativas del programa), la altura del edificio y el nivel de diseño sísmico. Las clasificaciones fueron tomadas según el “HAZUS Technical Manual” (FEMA, 1997-1999), las mismas se desglosan en tres rangos de acuerdo al número de pisos: de 1 a 3, de 4 a 7 y mayores de 8. Primero los edificios se clasifican de acuerdo al material estructural principal:

- Madera.
- Acero.
- Hormigón armado.
- Hormigón prefabricado.
- Mampostería reforzada.
- Mampostería sin reforzar.

En segundo lugar se considera el sistema estructural utilizado para resistir las cargas horizontales y verticales; existen los sistemas de pórticos, de paredes, de pórticos arriostrados, o combinaciones de pórticos y paredes.

En nuestra ciudad los materiales de construcción más comunes son el hormigón armado y el acero, encontrándonos en una zona sísmica de grado 3 según la Norma Sísmica vigente (NC 46, 1999), por tanto se consideran 17 tipos de edificios. En la Tabla 2.9 se presentan los tipos de edificios con una breve descripción según HAZUS y las estructuras representativas en cada tipo de edificios.

Tabla 2.9. Tipos de edificaciones presentes en el área de estudio.

No.	Código HAZUS	Descripción Estructural	Rango de altura		Estructuras representativas
			Nombre	Pisos	
1	W1	Pórticos de madera ($\leq 464.5 \text{ m}^2$)		1 - 2 todos	Edificaciones de pórticos de madera de 1 o 2 pisos ($\leq 464.5 \text{ m}^2$)
2	S2L	Estructuras de pórticos de acero arriostrados.	Alt. baja	1 - 3	Construcciones de acero arriostradas
3	S2M		Alt. media	4 - 7	
4	S2H		Gran alt.	8+	
5	S5L	Pórticos de acero con paredes de mampostería no reforzada	Alt. baja	1 - 3	Naves industriales de acero
6	C1L	Pórticos de hormigón resistentes a momentos	Alt. baja	1 - 3	Construcciones convencionales de hormigón armado de 1 o 2 pisos. Edificios multifamiliares de hormigón armado. Naves industriales de hormigón armado
7	C1M		Alt. media	4 - 7	
8	C2L	Estructuras de paneles de hormigón	Alt. baja	1 - 3	Sistema Prefabricado Gran Panel Soviético
9	C2M		Alt. media	4 - 7	
10	C3L	Pórticos de hormigón con paredes de mampostería no reforzada	Alt. baja	1 - 3	Sistema Sandino. Construcciones tipo naves
11	C3M		Alt. media	4 - 7	Edificios E-14 de 4 y 5 plantas
12	PC2L	Pórticos de hormigón prefabricados con tímpanos de hormigón	Alt. baja	1 - 3	SAE y Girón de 1 a 3 pisos
13	PC2M		Alt. media	4 - 7	IMS de 5 plantas, Girón, SAE de 4 plantas.
14	PC2H		Gran alt.	8+	IMS de 8, 12 y 18 plantas.
15	URML	Paredes de cargas de mampostería sin reforzar	Alt. baja	1 - 2	Construcciones de mampostería sin reforzar de 1 o 2 niveles. Viviendas de bajo costo
16	RM1L	Mampostería reforzada	Alt. baja	1 - 2	Construcciones de mampostería reforzada de 1 o 2 niveles.
17	MH	Casas móviles		todos	Construcciones móviles

Donde:

La primera letra significa el material de los elementos estructurales: W = Madera (wood), S = Acero (steel), C = Hormigón (Concrete), P = Elementos Prefabricados (Precast), URM = Mampostería no reforzada (unreinforced masonry), RM = Mampostería reforzada (reinforced masonry) y MH = Casas Móviles (Mobile Houses), seguido por un número que identifica el tipo y una letra que identifica la altura: L = Baja (Low), M = Mediana (Medium) y H = Alta (High).

De la comparación realizada entre las clasificaciones de la Metodología HAZUS y los diferentes tipos constructivos existentes en la ciudad, se obtuvo como resultado que los 18 tipos estructurales representativos en la región de estudio coinciden con 17 tipos de edificaciones clasificadas por la metodología HAZUS. Esto se debe fundamentalmente a que un gran período de la historia de las construcciones en la ciudad estuvo influenciado por el estilo constructivo norteamericano, donde hubo una gran difusión de proyectos, técnicas constructivas y materiales provenientes de Estados Unidos, lo que trae como consecuencia que un gran número de edificaciones coincidan con la clasificación que propone el HAZUS.

OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE CAPACIDAD POR EL MÉTODO DEL PUSHOVER.

Una forma de controlar la justeza de la equivalencia encontrada entre los tipos constructivos presentes en Santiago de Cuba y los que están incluidos en el sistema HAZUS es calcular las curvas de capacidad de los tipos constructivos correspondientes y compararlas con las que presenta el HAZUS para sus equivalentes. La curva de capacidad puede ser obtenida mediante modelación de

la estructura por el método denominado “pushover” (Chopra y Goel, 2000), lo que efectuamos usando el programa SAP 2000 (Computers and Structures, Inc., 1998).

A modo de ejemplo se muestra la obtención de la curva de capacidad para un edificio de hormigón armado de cinco niveles, el que en la tabla 2.9 se hace corresponder con el tipo CM1 del HAZUS. La estructura está conformada por pórticos de hormigón armado en ambas direcciones. Las características generales de la edificación se muestran a continuación:

- 5 intercolumnios de 3.2 m.
- 2 luces de 4.5 m.
- 2.70 m de puntal.
- Columnas de 0.4 x 0.4 m.
- Vigas de 0.3 x 0.2 m.
- $T_a = 0.405$
- El suelo S2, T(0.5-0.8) seg
- $A_h = 0.3g$

El programa SAP 2000 (Computers and Structures, Inc., 1998) es interactivo. El proceso de modelación se explica con ayuda de diversas figuras que corresponden a ventanas de entrada de datos o de salida de resultados de dicho programa.

Asignando las propiedades de las articulaciones plásticas: se le asigna **DEFAULT P-M-M** a las columnas y la propiedad **DEFAULT M3** a las vigas; en caso que tuviéramos arriostres que sólo trabajan a fuerza axial se les debe asignar la propiedad **DEFAULT P**. La distancia relativa es medida desde el inicio del elemento y está basada en la longitud libre de éste entre los extremos rígidos. Una distancia de “0” indica que la articulación está ubicada en el origen del sistema de coordenadas locales del elemento y una distancia de “1” indica que la articulación está ubicada en el final del elemento, así mismo las articulaciones pueden estar ubicadas en cualquier posición de la barra.

Definiendo los casos de cargas pushover: se definen tres casos de cargas de tipo pushover; el primero corresponde a la aplicación de la carga gravitatoria sobre la estructura (PUSH1), el segundo a la aplicación de la aceleración en la dirección de x (PUSH2), el tercero a la aplicación de la aceleración en la dirección de y (PUSH4).

En la figura 2.3 se muestra el espectro de capacidad obtenida del PUSH2 y la familia de espectros de demanda para cuatro niveles de amortiguamiento; esto permite identificar el tipo de respuesta del edificio analizado.

La evaluación del nivel de desempeño de una estructura ante cierta demanda usualmente se determina superponiendo el espectro de capacidad con el espectro que caracteriza la demanda existente en la zona donde se encuentra localizada la edificación. La reducción del espectro de demanda, depende de la localización del punto de intersección de ambos espectros, con lo cual si el punto cae dentro de la zona elástica de la estructura, es decir, la zona de la curva de capacidad con pendiente constante, se dice que la estructura no entra en el rango no lineal y por consiguiente no es necesario reducir el espectro de demanda. Para el caso contrario, el espectro reducido se obtendrá a partir del amortiguamiento que ocurre cuando el sismo conduce a la estructura dentro del rango inelástico.

La respuesta pico de la edificación en el punto de intersección de la curva de capacidad y del espectro de demanda es el parámetro utilizado con las curvas de fragilidad para estimar los estados de daños.

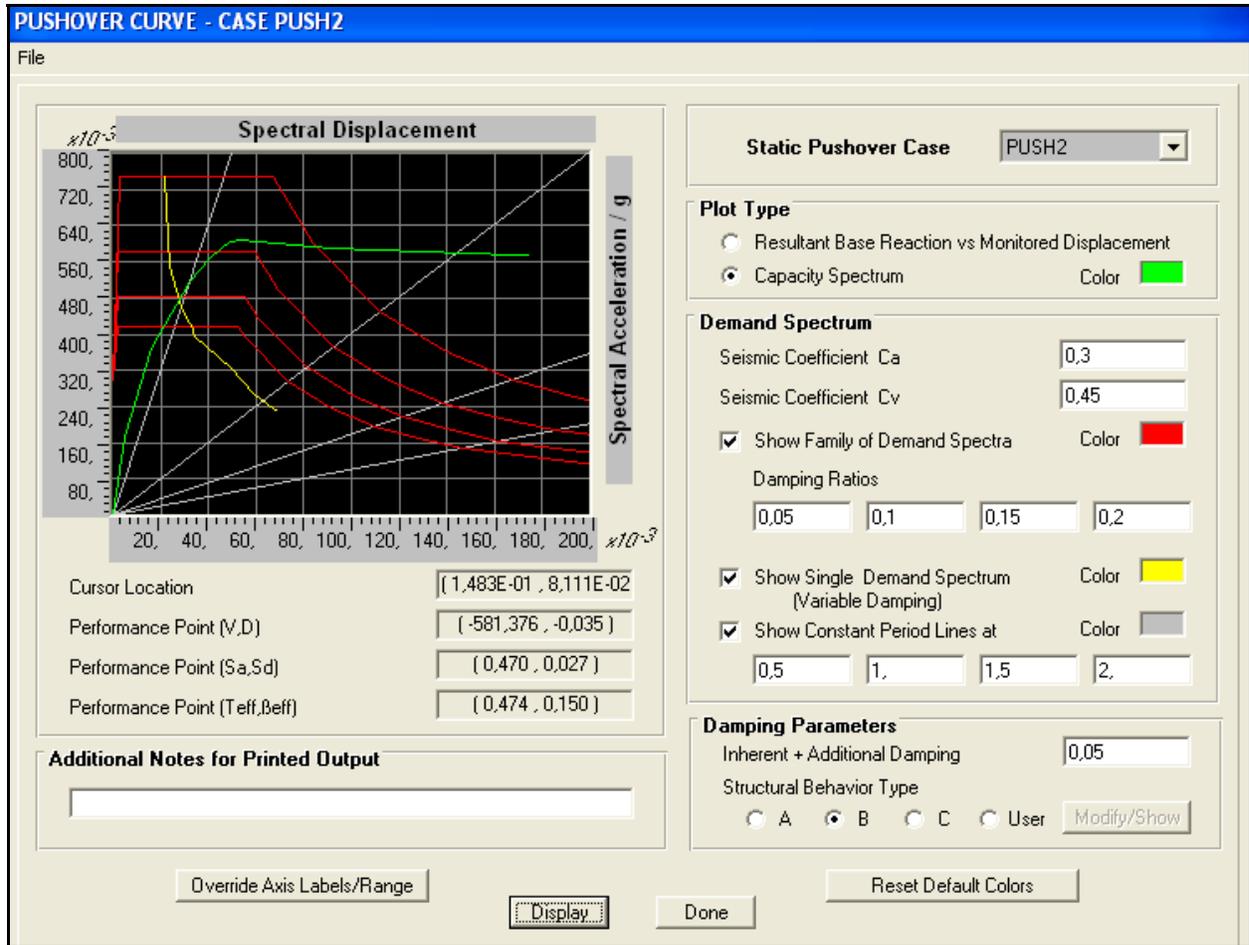


Figura 2.3. Curva de capacidad para el PUSH2.

La figura 2.4 representa los elementos donde se forman las articulaciones plásticas para cada incremento de la carga lateral. Se observa como se forman esas articulaciones según los niveles de desempeño (FEMA, 1992), donde:

- IO: Ocupación Inmediata.
- LS: Seguridad de Vida.
- CP: Prevención al Colapso.
- C: Colapso.
- D: Destrucción total o desplome.

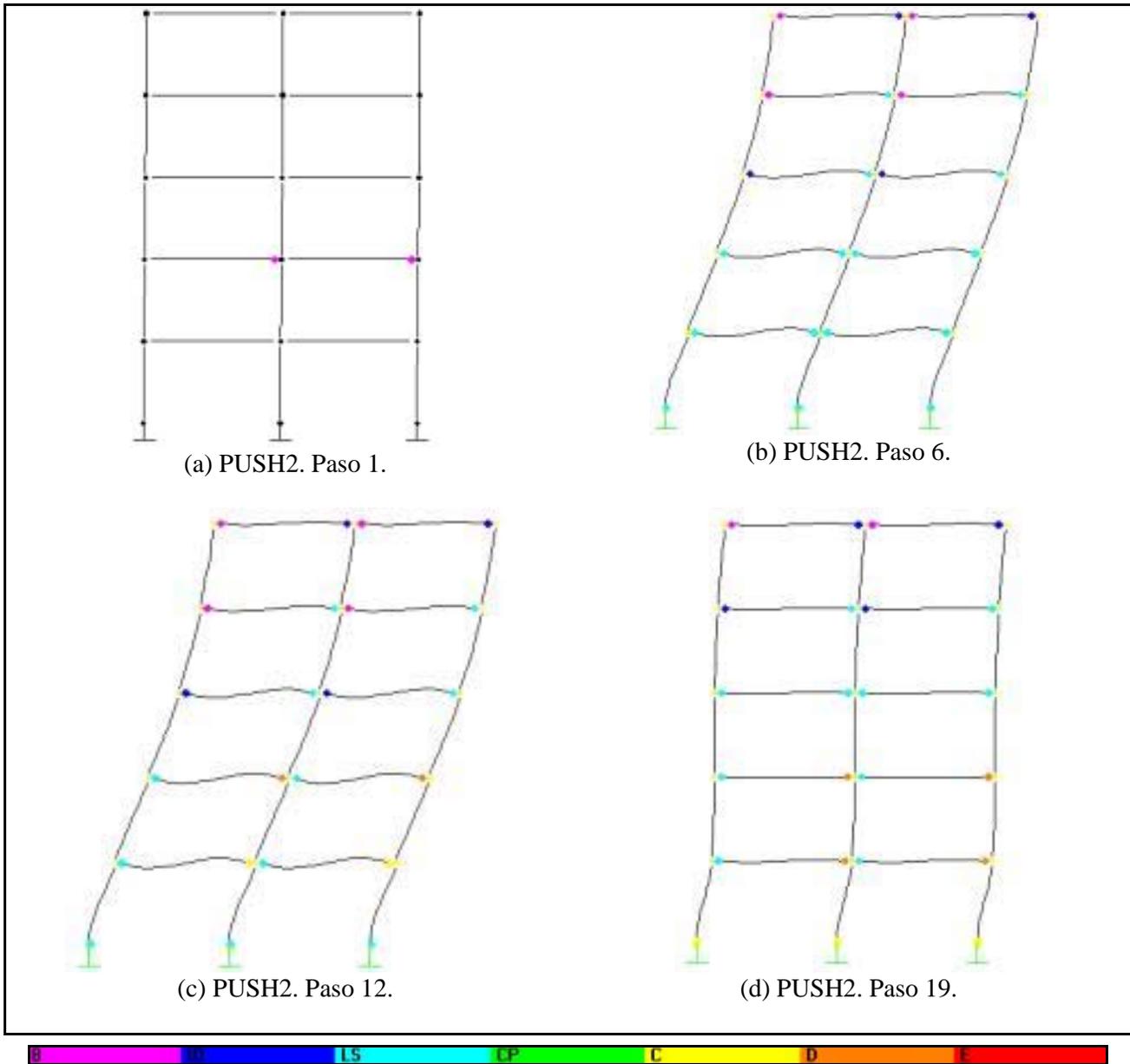


Figura 2.4. Formación de las articulaciones plásticas PUSH2.

En la figura 2.5 se muestra el resultado de la comparación de la curva de capacidad que brinda el HAZUS para el nivel de diseño moderado con la obtenida para el edificio estudiado según el método del pushover. Es necesario destacar que las curvas de capacidad definidas por el HAZUS están dadas solamente por dos puntos, el punto de fluencia y el de capacidad máxima, así que se usó para la construcción de la curva un polinomio de cuarto grado, el cual cumple con las siguientes condiciones:

- La curva pasa por el punto de fluencia (D_y, A_y).
- La curva pasa por el punto de capacidad máxima (D_u, A_u).
- Es lineal desde el origen hasta el punto de fluencia.
- Conserva la pendiente inicial en el punto de fluencia y es horizontal en el punto de capacidad máxima.

Dentro de la clasificación y el nivel de diseño se permiten variaciones aceptables con respecto a la curva de capacidad media y se les llama media +B y media -B, es decir, para obtener la curva superior se multiplica la ordenada de la curva media por e^B y para la curva inferior se multiplica la ordenada de la curva media por e^{-B} , siendo el valor de $B=0.25$.

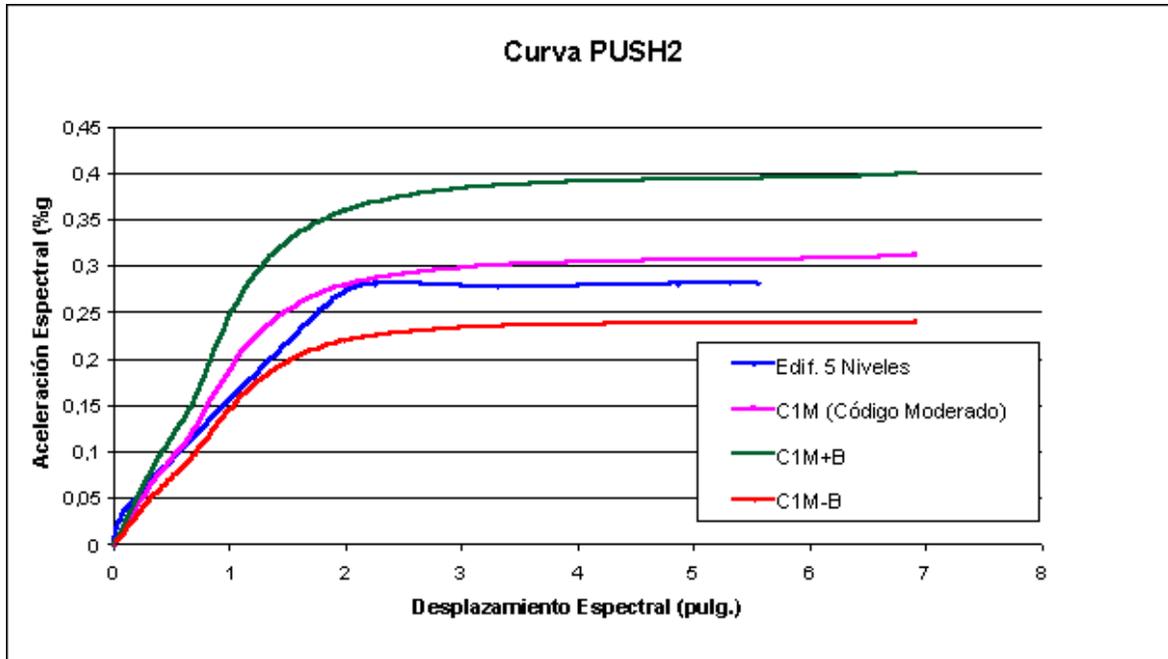


Figura 2.5. Curva de capacidad C1M. Nivel de diseño moderado.

En la tabla 2.10 se muestra un resumen de los parámetros de resistencia y capacidad del edificio estudiado y los que brindan el HAZUS para los edificios de pórticos de hormigón armado de altura media.

Tabla 2.10. Resumen de los parámetros de resistencia y capacidad.

Edificio	Capacidad fluencia		Capacidad última		Ductilidad	Período (seg)
	Dy (pulg.)	Ay (%g)	Du (pulg.)	Au (%g)		
C1M HAZUS	0.580	0.104	6.910	0.312	6.3	0.75
Edif. 5 niveles	0.133	0.042	5.549	0.282	5.4	0.56

Este proceso de validación es importante continuarlo. Por ejemplo, Márquez et al. (2005) obtuvieron la curva de capacidad por el método “pushover” para las naves con cubierta ligera, la cual se corresponde con la del tipo S5L del HAZUS, cuya analogía propusimos nosotros en este proyecto. Sin embargo, tipos constructivos de uso bastante frecuente, como son los sistemas prefabricados SAE y Girón, dados sus parámetros de diseño, no admiten una modelación tipo “pushover”, y no es posible determinar su curva de capacidad por esta vía. Debido a ello es necesario buscar una alternativa para obtener la misma.

Es necesario señalar que existen en la zona estudiada un número considerable de edificaciones construidas después de 1959, la mayoría con sistemas constructivos cubanos. Consideramos que es necesario estudiar con mayor detalle estos sistemas constructivos a fin de construir con mayor precisión sus curvas de capacidad y compararlas con las curvas del HAZUS que corresponden con las clasificaciones hechas anteriormente.

CURVAS DE FRAGILIDAD.

El diseño para determinados niveles de desempeño requiere la conexión entre los determinados límites estructurales y su probabilidad de ocurrencia. Una de las formas más utilizadas para representar el funcionamiento de las estructuras son las curvas de fragilidad. La construcción de estas curvas requiere de una comprensión completa de los mecanismos de respuesta del sistema estructural para diferentes niveles de la demanda sísmica.

Las curvas de fragilidad son funciones logarítmicas que representan la probabilidad de alcanzar o exceder estados de daños; estas curvas pueden ser obtenidas a partir de observaciones después de ocurrido un sismo o mediante métodos matemáticos. En nuestro caso las obtendremos a partir de un análisis numérico en el tiempo, debido a la ausencia de observaciones posteriores a la ocurrencia de un sismo. Las condiciones anteriormente expuestas nos permiten adaptarnos al método analítico probabilístico utilizado en el proyecto HAZUS.

En este método, cada curva está caracterizada por los valores medio y de desviación standard logarítmica normal (β) de la demanda sísmica del suelo. Para daños estructurales, dado el desplazamiento espectral S_d , la probabilidad de alcanzar o exceder los estados de daño es modelada por la expresión 2.24.

$$P[ds/ S_d] = \phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{S_d}{\bar{S}_{d,ds}} \right) \right] \quad (2.24)$$

Donde:

$\bar{S}_{d,ds}$: Valor medio de desplazamiento espectral para el cual la edificación alcanza el estado de daño límite (d_s).

β_{ds} : Logaritmo natural de la desviación standard del desplazamiento espectral para el estado de daño (d_s).

ϕ : Función de la distribución normal standard acumulativa, es decir,

$$\phi = \int f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-t^2/2} dt$$

En la expresión 2.25 el símbolo S_+ representa el nivel +1 del logaritmo natural de la desviación standard de la curva de fragilidad. De forma similar en la expresión 2.26 el símbolo S_- representa el nivel -1 del logaritmo natural de la desviación standard de la curva.

$$S_+ = S_d \exp(\beta) \quad (2.25)$$

$$S_- = S_d / \exp(\beta) \quad (2.26)$$

El valor medio de desplazamiento espectral para el cual la edificación alcanza el estado de daño límite se obtiene mediante la expresión 2.27.

$$\bar{S}_{d,ds} = \delta_{R,sds} \alpha_2 h \quad (2.27)$$

Donde:

δ_{ds} : Grado de desplazamiento límite del estado de daño estructural, d_s .

α_2 : Fracción de la altura de la edificación donde los desplazamientos del modo PUSHOVER igualan al desplazamiento espectral.

h: Altura de la edificación del modelo típico.

En la figura 2.6 se muestran las curvas de fragilidad correspondiente al tipo de edificación C1M para cada uno de los estados de daños, estos valores se obtuvieron según las expresiones explicadas anteriormente donde se sustituyen los valores que proporcionan las tablas del HAZUS.

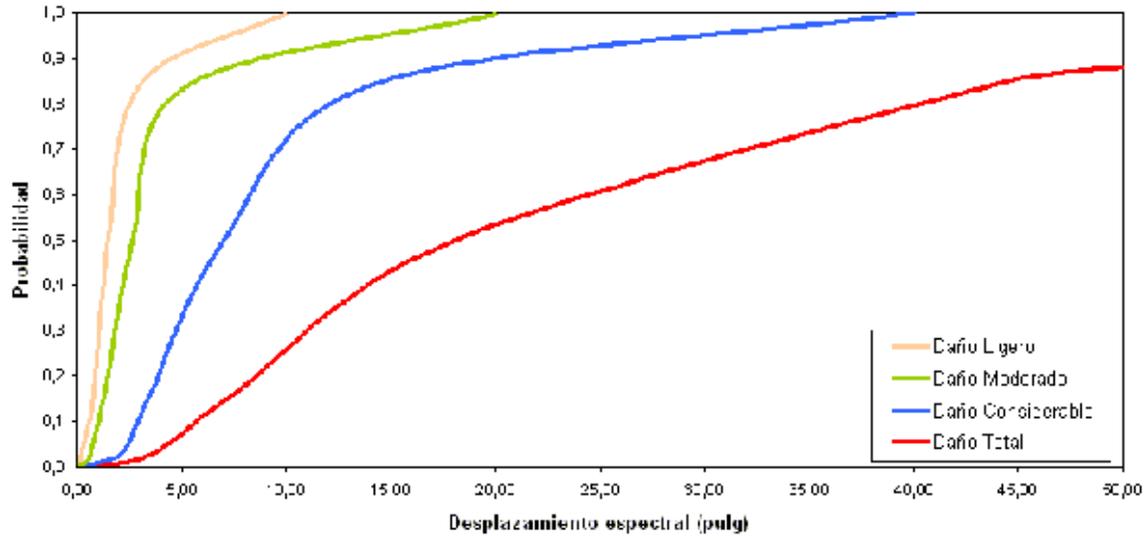


Figura 2.6. Curvas de fragilidad C1M. Código moderado.

Una vez definido los indicadores de la acción sísmica y de la respuesta estructural, es necesario determinar la relación existente entre ambos parámetros desde el punto de vista probabilista. Lo anterior implica llevar a cabo una serie de análisis dinámicos no lineales (curva de capacidad), que permitan cuantificar el efecto de la demanda espectral sobre el modelo estructural. Se obtiene de esa forma las curvas que relacionan la probabilidad acumulada de daño con el parámetro seleccionado para representar la respuesta estructural.

De la curva de capacidad se obtienen los valores de desplazamiento espectral en los puntos notables (fluencia, desempeño y último). Con estos valores se entra en las curvas de fragilidad y se obtiene la probabilidad de alcanzar o exceder los grados de daños para el tipo de edificación analizada. En la tabla 2.11 se pueden observar los valores de desplazamiento espectral de los puntos notables obtenidos de la curva de capacidad mostrada en la figura 2.7 y la probabilidad obtenida de graficar dichos puntos en las curvas de fragilidad (figura 2.8) para cada grado de daño.

Tabla 2.11. Probabilidad de alcanzar o exceder los estados de daños en puntos notables.

Pto. notable	Sd (pulg)	Probabilidad (%)			
		Daño ligero	Daño moderado	Daño considerable	Daño total
Fluencia	0.258	70	32	-	-
Desempeño	0.314	82	50	7	-
Último	0.282	92	85	38	9

Una vez establecida la analogía entre las construcciones existentes en Santiago de Cuba con algunas de las incluidas en el sistema HAZUS, las curvas de fragilidad se toman de los análogos en dicho sistema

CONCLUSIONES.

1. Las construcciones existentes en la ciudad se agrupan en tres grandes períodos: colonial, republicano y revolucionario, caracterizados cada uno por técnicas constructivas y materiales estructurales diferentes.
2. Del estudio realizado en la ciudad se agruparon las edificaciones existentes en 17 tipos de estructuras en dependencia de los materiales estructurales y las técnicas constructivas empleadas.
3. De la comparación realizada entre la edificación de 5 niveles de hormigón armado y el tipo de edificación propuesta por el HAZUS para edificaciones similares (C1M) podemos decir que coincide y que es factible la utilización de las curvas de capacidad propuestas por el HAZUS para este tipo de edificación.
4. Este tipo de comprobación no fue posible de efectuar con otras construcciones de uso bastante extendido, los sistemas constructivos SAE y Girón, ya que por sus características de diseño no permiten realizar una modelación tipo “pushover”. Es necesario buscar otra vía para la obtención de sus correspondientes curvas de capacidad.
5. Teniendo en cuenta las analogías encontradas entre nuestras edificaciones y las presentes en el HAZUS, tomamos la decisión de utilizar en lo adelante las curvas de capacidad y fragilidad que presenta el HAZUS para cada una de las estructuras equivalentes a nuestros tipos constructivos.

2.3 Estimación de las pérdidas humanas y los daños en la población.

Julio A. García Peláez¹, José Leonardo Álvarez Gómez¹

¹Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS)

Este enfoque intenta estimar las pérdidas a partir de la definición de funciones de vulnerabilidad que expresen los niveles de daño que pueden sufrir las edificaciones al ocurrir diferentes grados de intensidad o sacudidas sísmicas. Estas funciones evalúan la probabilidad de alcanzar estados discretos de daños estructurales y no estructurales en las edificaciones. A diferencia de los modelos de daños descritos en el epígrafe 2.1, basados en la escala macrosísmica, estas funciones usan para su definición parámetros dinámicos cuantitativos de las posibles sacudidas sísmicas (respuesta espectral, amplitudes máximas, etc.), analizan las edificaciones a partir de los elementos estructurales y no estructurales y las clasifican en función de su diseño estructural.

Dos clases de funciones o curvas son utilizadas en la metodología propuesta por Whitman et al. (1997) para obtener las funciones de daños en las edificaciones como resultado de las sacudidas sísmicas de diferente intensidad: 1- curvas de capacidad y 2- curvas de fragilidad.

Las curvas de capacidad evalúan la respuesta de la edificación ante un determinado nivel de demanda espectral. Estas curvas, basadas en parámetros ingenieriles de diseño (por ejemplo: fluencia y resistencia última) del sistema estructural de la edificación, caracterizan el comportamiento no-lineal de los diferentes modelos constructivos ante las sacudidas sísmicas. Las curvas de fragilidad predicen la probabilidad de alcanzar o exceder diferentes estados de daños (comparables a los grados de daños descritos por las escalas de intensidad macrosísmica) para un nivel dado de intensidad de las sacudidas sísmicas, expresadas por la aceleración espectral. La probabilidad de permanecer o mantenerse en un *estado de daños particular* es calculada como la diferencia entre las dos curvas descritas, siendo esta diferencia el parámetro usado para predecir el comportamiento de la edificación y por ende las futuras pérdidas.

La estimación de las posibles pérdidas humanas van a estar condicionadas por el comportamiento estructural y no estructural de la edificación teniendo en cuenta las características ingenieriles específicas del sistema constructivo en cuestión. Para la estimación de las pérdidas utilizando esta metodología es necesario e imprescindible la confección de un inventario que recoja (o reúna) las diferentes tipologías constructivas presentes en el área de estudio y la modelación de edificaciones “típicas” que puedan ser posteriormente generalizadas; esta problemática es ampliamente discutida en el epígrafe 2.1 para el caso de Santiago de Cuba.

Para la estimación de las posibles pérdidas humanas utilizaremos la metodología propuesta por Durkin y Thiel (1991), Corburn y Spence (1992) y Cheu (1994), y utilizada en el proyecto HAZUS 99 (FEMA, 1997- 1999). Esta metodología utiliza los desplazamientos y aceleraciones espectrales como medida de la acción sísmica, en vez de la intensidad sísmica como se utiliza en el ATC-13, definiendo 36 modelos estructurales para los cuales se describen los estados de daño estructural considerados: leve, moderado, severo y colapso. Los daños no estructurales se analizan aparte. La metodología considera cuatro niveles de diseño: alto, moderado, bajo y sin diseño sísmico. Para cada tipo de construcción y nivel de diseño, se dan los parámetros que permiten definir la capacidad de la estructura, las derivas máximas entre piso y finalmente, los desplazamientos espectrales en los umbrales de los diferentes estados de daño considerados.

En el caso de la estimación de los posibles daños esperados en las personas, esta metodología propone dividirlos en 4 niveles de severidad, según la gravedad de los daños (tabla 2.12).

Tabla 2.12.- Clasificación de los daños ocasionados en las personas según la severidad o gravedad de los mismos.

Nivel de daño	Descripción de los daños
1	Los heridos requieren solamente ayuda médica básica sin necesidad de hospitalizarse.
2	Los heridos requieren una ayuda médica mayor y pueden incluso requerir hospitalización, pero no se espera que la misma se convierta en un tratamiento de por vida.
3	Los heridos requerirán un tratamiento de por vida si no son inmediatamente “ayudados” de manera adecuada. La mayoría de ellos son personas que quedan atrapadas en las estructuras colapsadas o semidestruidas.
4	Heridos mortales o fallecidos de manera instantánea.

Además de los niveles de daños es necesario tener en cuenta:

1. El horario del día en que se supone ocurra el terremoto.
2. La distribución de la población.
3. Las funciones de vulnerabilidad específica para cada una de las edificaciones.

El número de las personas dentro de las edificaciones durante el día y la noche normalmente no es el mismo. Esta variación está estrechamente relacionada con el uso que se le da a la edificación. Por ejemplo, la población que permanece en las viviendas residenciales es más pequeña por el día (6:00 a.m-6:00 p.m.) que la población nocturna. Alternativamente, la población escolar y laboral alcanza índices altos durante el día y es casi inexistente durante la noche.

La metodología del proyecto HAZUS'99 (FEMA, 1997-1999) analiza 3 escenarios diferentes, donde el evento sísmico ocurre a:

- A las 2:00 a.m. (por la noche)
- A las 2:00 p.m. (por el día)
- A las 5:00 p.m.

Estos tres escenarios se supone que sean suficientes para describir los tres casos extremos: la mayoría de las personas están en su casa durmiendo (por la noche), la mayoría de las personas están trabajando o en las escuelas y el tercer caso se refiere al horario del día en que las personas están regresando a sus casas, ya sea de los centros de trabajo o de estudio. Este último caso es muy importante en los EE.UU., debido a la complejidad de su infraestructura de transporte.

La distribución de la población en los distintos escenarios también es un parámetro importante, pues definirá que por ciento de la población se encuentra en las edificaciones en cada uno de los horarios. En la tabla 2.13 se propone la probable distribución de la población para los dos primeros escenarios de cálculo. El tercer escenario no se tendrá en consideración debido a la imposibilidad de calcular en estos momentos las funciones de vulnerabilidad de los puentes y las carreteras, lo cual además no constituye un problema fundamental en nuestro contexto. Los valores de las tablas 2.13 y 2.14 son valores medios, estimados a partir de la estadística recogida en Coburn and Spence (1992). Estos estimados podrán modificarse en función de los resultados obtenidos en el Censo Nacional o los aportados por otras fuentes confiables, los cuales no están al alcance de los autores de este trabajo en estos momentos.

Tabla 2.13- Distribución de la población en los distintos escenarios de cálculo (en %) para una zona urbana. La población fue dividida en 4 categorías: sector residencial, sector comercial - industrial, sector educacional y de salud y personas en movimiento. Esta información es un estimado nuestro, el cual podrá modificarse en función de la obtención de los datos del Censo Nacional o de otras fuentes confiables.

Categoría	Escenario 1 (2:00 a.m.)	Escenario 2 (2:00 p.m.)
Sector residencial	85	30
Sector comercial - industrial	5	35
Sector educacional - salud	9	30
Personas en movimiento	1	5

Tabla 2.14- Distribución de la población en los distintos escenarios de cálculo (en %) para una zona rural. La población fue dividida en 4 categorías: sector residencial, sector comercial - industrial, sector educacional y de salud y personas en movimiento.

Categoría	Escenario 1 (2:00 a.m.)	Escenario 2 (2:00 p.m.)
Sector residencial	90	20
Sector comercial – industrial	2	45
Sector educacional - salud	7	30
Personas en movimiento	1	5

El último factor necesario para la estimación de las pérdidas humanas corresponde a las funciones de vulnerabilidad para cada una de las edificaciones (o sistemas constructivos), que caracterizaran la respuesta (estructural y no estructural) de las edificaciones ante un determinado grado de sacudidas sísmicas.

Integrando la información sobre el comportamiento de las edificaciones y la distribución de la población en los distintos escenarios de cálculo, se obtiene el número de personas (en por ciento) que sufrirán daños en cada edificación, para cada uno de los estados de daños (o índices de daños). En la figura 2.7 se representa a partir de un árbol lógico el proceso de cálculo de las pérdidas humanas según la metodología propuesta.

Este modelo es capaz de predecir con bastante robustez el número de personas fallecidas y lesionadas debido a la ocurrencia de un terremoto de gran intensidad, tanto a escala regional como local, incluyéndose el caso de edificaciones aisladas. No obstante, debemos aclarar que este modelo no tiene en cuenta las pérdidas humanas debido a causas psicológicas, ataques cardíacos o lesiones sufridas durante el período de rescate; también se excluyen los fallecidos o lesionados que se encontraban en el “exterior” de las edificaciones y que pueden ser víctimas de accidentes de tránsito o caídas de elementos estructurales y no estructurales de las edificaciones.

- Para la implementación de esta metodología es necesaria la participación de personal especializado del CENAIS o de otras instituciones, pero bajo la asesoría de especialistas de nuestro centro.
- Al igual que en el caso anterior, deben considerarse al menos dos tipos de escenario: durante la noche (2:00 a.m.) y durante el día (2:00 p.m.).

- Debe generarse a escala nacional un inventario de edificaciones que responda a los requerimientos de esta metodología.

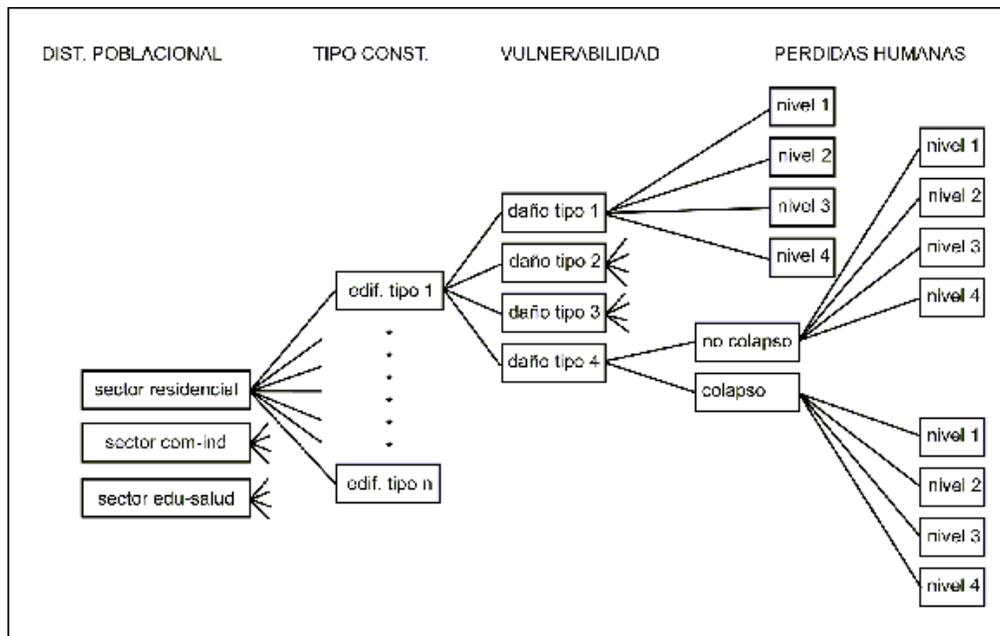


Fig. 2.7- Modelo de cálculo de las pérdidas humanas a partir de la metodología propuesta por el proyecto HAZUS99 (FEMA, 1997-1999).

Resultados obtenidos o implementación de la metodología:

En el epígrafe 2.1 se definieron las 17 tipologías constructivas según la clasificación propuesta por el HAZUS que están presentes en el medio ambiente construido de la ciudad de Santiago de Cuba. En la tabla 2.15 se presenta un resumen de las mismas. Usando las analogías entre las construcciones presentes en Santiago de Cuba y las tipologías descritas en el HAZUS se presentan, en las tablas 2.16, 2.17, 2.18, 2.19 y 2.20 los distintos niveles de daños a la población (desde una herida leve, nivel 1 hasta la muerte: nivel 4) que pueden aparecer al alcanzar un determinado estado de daño.

Tabla 2.15. Tipologías constructivas presentes en la ciudad de Santiago de Cuba y sus equivalentes en las incluidas en el HAZUS (ver epígrafe 2.2 para una discusión del tema)

No.	Equivalente HAZUS	Pisos	Estructuras representativas en Santiago de Cuba
1	W1	1 - 2	Edificaciones de pórticos de madera de 1 o 2 pisos ($\leq 464.5 \text{ m}^2$)
2	S2L	1 - 3	Construcciones de acero arriostradas
3	S2M	4 - 7	
4	S2H	8+	
5	S5L	1 - 3	Naves industriales de acero
6	C1L	1 - 3	Construcciones convencionales de hormigón armado de 1 o 2 pisos.
7	C1M	4 - 7	Edificios multifamiliares de hormigón armado. Naves industriales de hormigón armado
8	C2L	1 - 3	Sistema Prefabricado Gran Panel Soviético
9	C2M	4 - 7	
10	C3L	1 - 3	Sistema Sandino. Construcciones tipo naves
11	C3M	4 - 7	Edificios E-14 de 4 y 5 plantas
12	PC2L	1 - 3	SAE y Girón de 1 a 3 pisos
13	PC2M	4 - 7	IMS de 5 plantas, Girón, SAE de 4 plantas.
14	PC2H	8+	IMS de 8, 12 y 18 plantas.
15	URML	1 - 2	Construcciones de mampostería sin reforzar de 1 o 2 niveles. Viviendas de bajo costo
16	RM1L	1 - 2	Construcciones de mampostería reforzada de 1 o 2 niveles.
17	MH	todos	Construcciones móviles

Tabla 2.16.- Frecuencia de daños (expresado en %) en las personas que se encuentran dentro de las edificaciones presentes en la Ciudad de Santiago de Cuba, cuando se alcanza el estado de daño 1 (daños ligeros). La descripción de cada nivel se presenta en la tabla 2.12; la columna “No” se refiere al tipo constructivo de la tabla 2.15.

No	Nivel1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
1	0.05	0	0	0
2	0.05	0	0	0
3	0.05	0	0	0
4	0.05	0	0	0
5	0.05	0	0	0
6	0.05	0	0	0
7	0.05	0	0	0
8	0.05	0	0	0
9	0.05	0	0	0
10	0.05	0	0	0
11	0.05	0	0	0
12	0.05	0	0	0
13	0.05	0	0	0
14	0.05	0	0	0
15	0.05	0	0	0
16	0.05	0	0	0
17	0.05	0	0	0

Tabla 2.17.- Frecuencia de daños (expresado en %) en las personas que se encuentran dentro de las edificaciones presentes en la Ciudad de Santiago de Cuba, cuando se alcanza el estado de daño 2 (daños moderados). La descripción de cada nivel se presenta en la tabla 2.12; la columna “No” se refiere al tipo constructivo de la tabla 2.15.

No	Nivel1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
1	1	0.1	0.001	0.001
2	1	0.1	0.001	0.001
3	1	0.1	0.001	0.001
4	1	0.1	0.001	0.001
5	1	0.1	0.001	0.001
6	1	0.1	0.001	0.001
7	1	0.1	0.001	0.001
8	1	0.1	0.001	0.001
9	1	0.1	0.001	0.001
10	1	0.1	0.001	0.001
11	1	0.1	0.001	0.001
12	1	0.1	0.001	0.001
13	1	0.1	0.001	0.001
14	1	0.1	0.001	0.001
15	1	0.1	0.001	0.001
16	2	0.2	0.002	0.002
17	1	0.1	0.001	0.001

Tabla 2.18.- Frecuencia de daños (expresado en %) en las personas que se encuentran dentro de las edificaciones presentes en la Ciudad de Santiago de Cuba, cuando se alcanza el estado de daño 3 (daños estructurales graves). La descripción de cada nivel se presenta en la tabla 2.12; la columna “No” se refiere al tipo constructivo de la tabla 2.15.

No	Nivel1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
1	1	0.1	0.001	0.001
2	1	0.1	0.001	0.001
3	1	0.1	0.001	0.001
4	1	0.1	0.001	0.001
5	1	0.1	0.001	0.001
6	1	0.1	0.001	0.001
7	1	0.1	0.001	0.001
8	1	0.1	0.001	0.001
9	1	0.1	0.001	0.001
10	1	0.1	0.001	0.001
11	1	0.1	0.001	0.001
12	1	0.1	0.001	0.001
13	1	0.1	0.001	0.001
14	1	0.1	0.001	0.001
15	1	0.1	0.001	0.001
16	2	0.2	0.002	0.002
17	1	0.1	0.001	0.001

Tabla 2.19.- Frecuencia de daños (expresado en %) en las personas que se encuentran dentro de las edificaciones presentes en la Ciudad de Santiago de Cuba, cuando se alcanza el estado de daño 4 (daños estructurales muy graves, caso de no-colapso). La descripción de cada nivel se presenta en la tabla 2.12; la columna “No” se refiere al tipo constructivo de la tabla 2.15.

No	Nivel1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
1	5	1	0.01	0.01
2	5	1	0.01	0.01
3	5	1	0.01	0.01
4	5	1	0.01	0.01
5	5	1	0.01	0.01
6	5	1	0.01	0.01
7	5	1	0.01	0.01
8	5	1	0.01	0.01
9	5	1	0.01	0.01
10	5	1	0.01	0.01
11	5	1	0.01	0.01
12	5	1	0.01	0.01
13	5	1	0.01	0.01
14	5	1	0.01	0.01
15	5	1	0.01	0.01
16	10	2	0.02	0.02
17	5	1	0.01	0.01

Tabla 2.20.- Frecuencia de daños (expresado en %) en las personas que se encuentran dentro de las edificaciones presentes en la Ciudad de Santiago de Cuba, cuando se alcanza el estado de daño 4 (daños estructurales muy graves, caso de colapso). La descripción de cada nivel se presenta en la tabla 2.12; la columna “No” se refiere al tipo constructivo de la tabla 2.15.

No	Nivel1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
1	40	20	3	5
2	40	20	5	10
3	40	20	5	10
4	40	20	5	10
5	40	20	5	10
6	40	20	5	10
7	40	20	5	10
8	40	20	5	10
9	40	20	5	10
10	40	20	5	10
11	40	20	5	10
12	40	20	5	10
13	40	20	5	10
14	40	20	5	10
15	40	20	5	10
16	40	20	5	10
17	40	20	3	5

Programa de cómputo para el cálculo de pérdidas humanas: “HAZUS”

El sistema HAZUS esta conformado por una serie de paquetes o módulos, diseñados para ser incluidos dentro de un Sistema de Información Geográfica profesional como ARCVIEW y MAPINFO, de amplia difusión en el ambiente científico. Este paquete de programas fue desarrollado a partir de un proyecto de colaboración conjunto entre varias instituciones lideradas por la FEMA (Federal Emergency Management Agency) y el NIBS (National Institute of Building Sciences). Incluye 6 grandes módulos, los cuales se presentan en la figura 2.8:

1. Amenazas Naturales Potenciales (PESH en la figura 2.8)
2. Inventario de los bienes expuestos.
3. Daños Directos
4. Daños Inducidos
5. Perdidas Sociales y Económicas
6. Perdidas Indirectas

Todos los módulos son independientes y los resultados obtenidos en cada uno de ellos son potencialmente los datos de partida (o entrada) del modulo posterior.

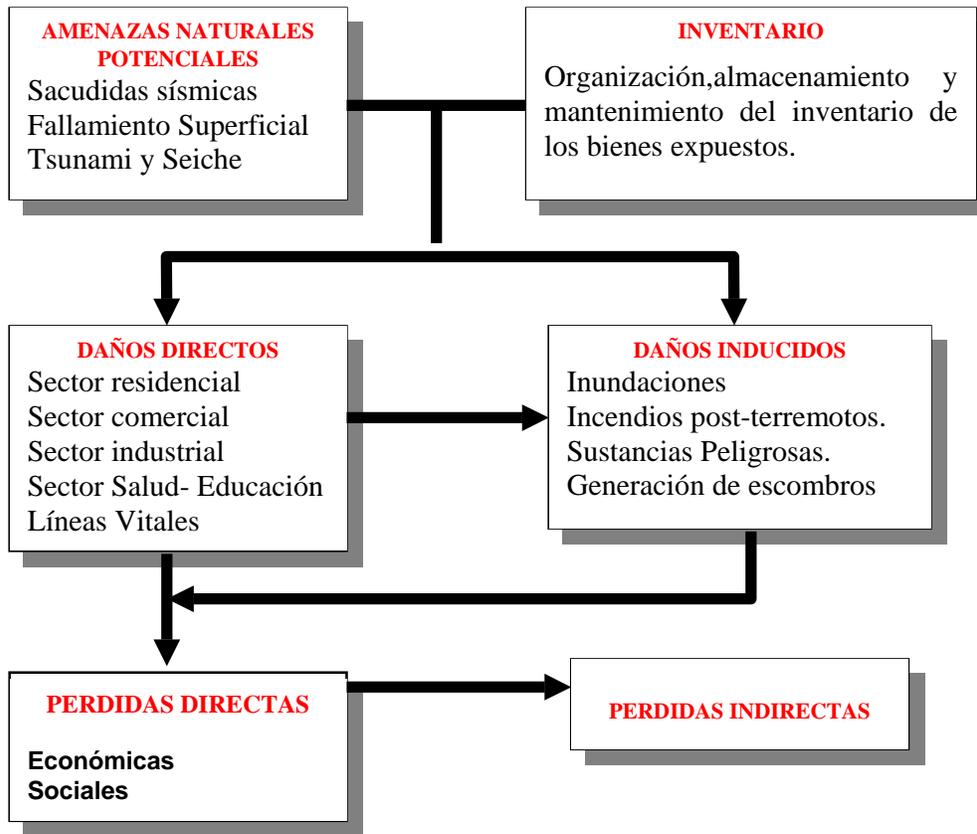


Fig. 2.8- Modelo conceptual para el cálculo de las pérdidas a partir de la metodología propuesta por el proyecto HAZUS99 (FEMA, 1997-1999).

1. *Amenazas naturales potenciales.*

Este módulo es capaz de generar estimados de peligrosidad sísmica (PS) tanto a nivel regional como local, asociando además a los resultados el aporte de los fenómenos secundarios asociados a la ocurrencia de un evento de gran intensidad sísmica, como son los deslizamientos o movimientos de tierra, la liquefacción y el fallamiento superficial o apertura de grandes grietas en el terreno. Los estimados de PS pueden obtenerse en términos de intensidad, aceleración horizontal pico (PGA), velocidad horizontal pico (PGV), desplazamiento horizontal pico (PGV), así como distintas variantes espectrales. En cada escenario de riesgo es posible incluir además el efecto de sitio y el peligro asociado a la generación de un tsunami o un seiche, según sea el caso y las distintas probabilidades de ocurrencia de un fenómeno u otro. El sistema proporciona además la oportunidad de obtener todos los resultados anteriormente descritos “fuera” del HAZUS y que éstos sean introducidos posteriormente en forma de mapas (capas de este modulo) como parte del SIG, algo extremadamente útil, y que será el método que emplearemos nosotros.

2. *Inventarios.*

Módulo encargado de generar, organizar, almacenar y codificar las bases de datos que contienen toda la información necesaria sobre los bienes expuestos, incluyendo a la población. La forma en que está almacenada la información y su acceso es la limitante principal al enfrentar un análisis de este tipo. Anteriormente abordamos este problema, cuando definíamos la base de calculo para la obtención de la vulnerabilidad sísmica. No obstante el sistema permite “acomodar” el inventario a las posibilidades reales del escenario. El uso del método, la calidad de los resultados y la incertidumbre de los mismos dependerán en gran medida de cuan completos sean nuestros

inventarios, es decir la descripción de los bienes expuestos y los parámetros que intervienen en su vulnerabilidad.

3. Daños directos.

Módulo donde se obtienen los daños físicos directos generados por las sacudidas sísmicas en cada uno de los grupos definidos en el modulo anterior, en nuestro caso:

- Sector residencial
- Sector comercial - industrial
- Sector educación - salud
- Líneas vitales

Los daños son obtenidos a partir de la probabilidad de haber alcanzado un estado de daño específico, bajo un nivel de sacudidas sísmicas (o amenaza) dado. La manera en que se obtienen los daños (estructurales y no estructurales) en cada una de las edificaciones es ampliamente discutido en un epígrafe anterior. Para la obtención de los daños ocasionados en las líneas vitales es necesario un inventario detallado de cada uno de los sistemas y subsistemas que las componen (servicio de agua potable, electricidad, gas, transporte, etc.). En estos momentos no contamos con la información básica necesaria para incorporar a nuestro escenario de riesgo un análisis de este tipo. En el futuro próximo se deberán hacer esfuerzos conjuntos entre las distintas instituciones para la creación de un inventario único y estandarizado que nos permita evaluar la vulnerabilidad de estos sistemas de una manera mas real y cuantitativa. Por el momento, no podemos incluir esta variante de cálculo en el sistema.

4. Daños inducidos.

En este módulo se obtienen los daños producidos por:

- Incendios post-terremotos
- Accidentes en lugares donde se manejan o almacenan sustancias tóxicas o peligrosas.
- Generación de escombros debido al colapso o daño de las estructuras.

5. Pérdidas económicas y sociales directas.

Modulo encargado de la estimación de las pérdidas. Se obtienen dos tipos de pérdidas directas:

- Económicas: A partir del costo de reparación y/o reemplazo de las estructuras y el sistema de líneas vitales, incluyendo los daños estructurales y no estructurales.
- Sociales: Cuantificadas a partir del numero de fallecidos, heridos (según su gravedad), personas sin hogar y las personas que deben ser evacuadas por un intervalo corto de tiempo.

El caso que nos ocupa en este capítulo son las pérdidas sociales, el modo en que se obtienen se describe gráficamente en la figura 2.7. Esencialmente se combinan los resultados obtenidos en el módulo 3 (Daños directos) con la información contenida en el módulo 2 (Inventarios), cuantificando el numero de fallecidos, heridos y personas sin hogar, teniendo en cuenta las personas que se encuentran dentro de las edificaciones que sufren daños de consideración en tres momentos del día diversos (los autores del presente proyecto proponen sólo dos para las condiciones de nuestro país). Finalmente los resultados obtenidos pueden presentarse en forma de mapas o tablas según se prefiera.

6. Pérdidas indirectas.

Este módulo trata de evaluar el efecto de la ocurrencia de un terremoto de gran intensidad en la economía de la región donde ocurre el terremoto, utilizando parámetros económico-sociales como la tasa de desempleo, reducción de la producción de bienes y servicios, baja de los mercados comerciales y financieros, etc. Este módulo se basa en parámetros que no están acordes con nuestro sistema económico y por lo tanto no será utilizado.

El esquema de cálculo de las pérdidas es equivalente al analizado para el primer caso. Si se conoce la cantidad de personas que se encuentran a la hora de posible ocurrencia de terremoto en cada uno de los 17 tipos de construcciones de la ciudad, el programa usa las bases de datos que posee para determinar, ante un efecto dado (valor esperado de la aceleración pico), las probabilidades de ocurrencia de los diferentes estados de daño posibles, y usando los coeficientes de las tablas 2.16-

2.20 determina la cantidad de personas afectadas con cada nivel de daño. Tiene la ventaja de que como se monta sobre un sistema de información geográfica (SIG), la información puede ser manejada con un alto grado de detalle y ser además actualizada posteriormente, mejorando los resultados .

Discusión

Este caso nunca ha sido implementado en Cuba, requiere de numerosos datos de tipo ingenieril, y de una organización, codificación y grado de detalle de los datos cartográficos que no estamos en condiciones de implementar completamente en la ciudad de Santiago de Cuba. Por esta razón habíamos decidido implementar esta metodología solo parcialmente utilizando como área de estudio el Distrito 26 de Julio, mas precisamente el Consejo Popular Guillermón Moncada presente en el mismo. Para este propósito se obtuvieron las funciones de vulnerabilidad de 17 tipologías típicas presentes en la ciudad y los coeficientes de las funciones de daño de cada tipología en cuestión, para cada uno de los niveles de daño descritos por el método (ver epígrafe 2.2).

Para aplicar este método es imprescindible la obtención de datos fidedignos sobre las características de la vivienda (tipo, estado técnico) y sobretodo la distribución de la población por edificación presente en la región que se va a estudiar. Durante el transcurso de este proyecto no tuvimos acceso a los datos del censo del 2000 que se habían planificado utilizar para este propósito a pesar de haber hecho las gestiones necesarias para tener acceso al mismo. No nos queda otra alternativa que posponer la implementación de esta metodología hasta tanto por medios propios u por otro concepto podamos obtener los datos necesarios para llevar a feliz termino nuestro propósito inicial.

2.4 Creación de la base de datos para el análisis de la vulnerabilidad

Julio A. García Peláez¹, Pedro Iván Márquez Mercerón¹, Grisel Morejón Blanco¹,
Julio César Vázquez Batista¹, Yelena Berenguer Heredia¹

¹Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS)

Entre los parámetros fundamentales en cualquier estudio de riesgo sísmico, están sin duda alguna las características (estructurales y no estructurales) de los elementos expuestos, a partir de los cuales y como consecuencia del análisis se obtendrá su vulnerabilidad sísmica. Por lo tanto, la elección de una metodología u otra dependerá en gran medida de la disponibilidad de la información requerida sobre los elementos en riesgo, así como del tipo de suelo donde se encuentran edificados, aunque este segundo aspecto no lo analizaremos en este capítulo. De forma general y de acuerdo a la metodología utilizada podemos diferenciar dos grandes grupos:

- 1) **Específicas.** En este caso se realiza un análisis estructural dinámico lineal de un edificio en particular, por lo tanto se dispone de la información necesaria a este nivel de detalle: dimensiones en planta y en elevación, características generales de los materiales (resistencia, peso, etc.) que se utilizaron en la construcción, así como la acción de entrada (fuerzas laterales equivalentes o espectro de diseño) a la que se someterá el edificio para determinar su comportamiento. Sin embargo, si se pretende realizar un análisis no lineal los requerimientos son aún más complejos; por ejemplo, se necesita información detallada de la distribución de los refuerzos longitudinal y transversal en los elementos estructurales, además de la mencionada anteriormente, así como los registros de acelerogramas de sismos reales o simulados para realizar el análisis. Con toda esta información y con el uso de algún programa de análisis lineal ó no lineal se puede obtener una aproximación suficiente del comportamiento real del edificio. La desventaja es la gran cantidad de información que se necesita para ejecutar un estudio de este tipo a una escala mayor, lo que hace que estas metodologías sólo se utilicen en el caso de edificios especiales que requieran seguir funcionando después de una crisis sísmica.
- 2) **Urbanas.** En este caso se agrupan las metodologías para realizar estudios a nivel urbano, donde se requiere de un menor número de parámetros para el análisis: tipo de material, año de construcción y su estado técnico-constructivo. Estas metodologías no permiten conocer el comportamiento de un edificio en particular, aunque sí se pueden usar como un resultado previo (a nivel de manzana, barrio, distrito o ciudad), para identificar las áreas de mayor riesgo y acometer un estudio más detallado. En el caso específico de la ciudad de Santiago de Cuba, García et al. (2002) optaron por una metodología de este tipo obteniendo resultados a nivel de manzana.

En los párrafos que siguen explicaremos de una forma resumida la información con que se cuenta hasta el momento de los edificios de la ciudad y los procedimientos utilizados para la extracción de los datos, su codificación, y la creación de la base de datos geo-espacial obtenida finalmente.

En nuestro país lamentablemente no existe una Institución que se responsabilice con la generación, organización, actualización e integración de la “metadata” necesaria (datos espaciales y sus atributos) para llevar a cabo un estudio de este tipo. Esta información se encuentra dispersa en varias Instituciones (IPF, GEOCUBA, INV, ONE, CEPDE), existiendo discrepancias y no

uniformidad en los datos que almacenan o custodian (clasificaciones, formatos). En muchos casos, aun existiendo la información necesaria, no es fácilmente accesible.

Por esta razón, junto a la Empresa GEOCUBA Santiago nos propusimos generar una base geoespacial donde se integraran de una manera conjunta la información cartográfica contenida en el catastro y las características de las edificaciones (atributos) almacenada en bases de datos digitales.

La información correspondiente al catastro constituyó la base fundamental para la construcción de la base geoespacial, debido a que los datos contenidos en estos archivos (formato AUTOCAD: DXF o DWG), organizados por distritos, consejos populares, manzanas y parcelas son los objetos espaciales necesarios para la representación cartográfica del estudio. La estructura del catastro confeccionado por GEOCUBA Santiago, se presenta en la tabla 2.21. Es necesario hacer notar que la información contenida en estos archivos es únicamente cartográfica y no es posible realizar ningún tipo de análisis cuantitativo, las consultas realizables son puramente visuales.

Tabla 2.21. Información contenida en los archivos del catastro (capas del fichero AUTOCAD).

Tema	Tipo	Ejemplo	Significado
COSTA	línea		Limite de costa.
FERREAS	línea		Líneas férreas.
HIDRO	polígono		Ríos y arroyos.
PARCELAS	línea		Limite de la parcela o lote.
POSTES	polígono	○ △	Postes eléctricos o telefónicos.
PUENTES	línea		Puentes sobre ríos o arroyos.
R-CONST	texto	2P	Numero de pisos de la edificación.
R-DESCRIP	texto	EGREM	Uso de la edificación.
R-HIDRO	texto	Yarayo	Denominativo del tema HIDRO y COSTA.
R-PARCELA	texto	/6	Numero de la parcela o lote.
R-POSTAL	texto	170	Numero postal de la edificación.
R-TPARC	texto	26	Numero de lotes dentro de la manzana.
R-TVIV	texto	VM	Tipo de Vivienda.
R-UBIT	texto	689	Numero de la manzana.
R-VIALES	texto	Aguilera	Nombre de las calles.
UBIT	polígono		Limite de la manzana
VIALES	línea		Limite del vial

Como ejemplo, se muestra en la figura 2.9 una manzana del Distrito 26 de Julio. En ella se indican los objetos o datos espaciales (líneas y polígonos) que se usaron para la construcción de las coberturas temáticas y la información descriptiva (texto) de los mismos, útiles para la identificación de las características constructivas de las edificaciones y otros datos de interés. La nomenclatura utilizada es la misma que la mostrada en la tabla 2.21.

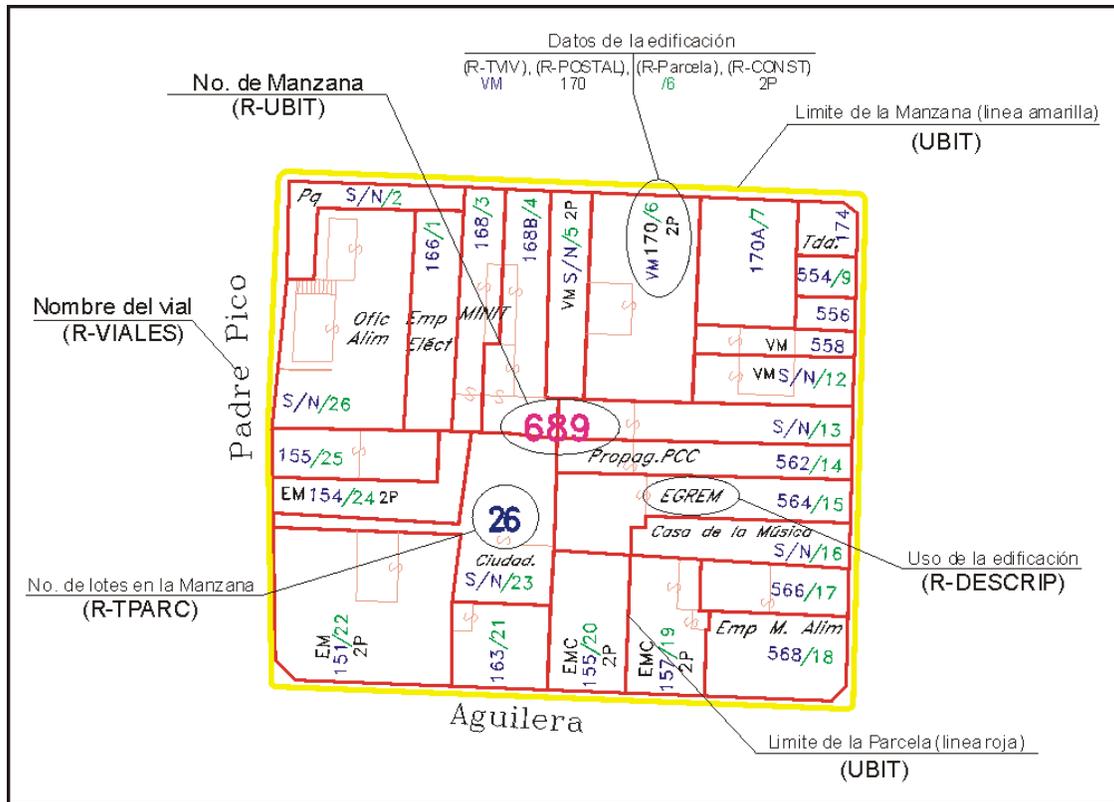


Figura 2.9. Datos existentes en los archivos del catastro confeccionado por GEOCUBA Santiago. La información de la edificación resaltada corresponde a: VM-Vivienda Multifamiliar; 170- numero postal, /6- número de la parcela dentro de la manzana y 2P- número de niveles de la edificación.

Con la ayuda del programa AUTOCAD2000 (Autodesk Map, 2003) fue posible crear una nueva base de datos donde se almacenara por una parte la información referente a la ubicación o localización georreferenciada de los elementos de estudio (datos espaciales) ya existente, y por la otra la información descriptiva de los mismos. La parcela o lote fue la unidad básica utilizada, pues es ella la encargada de representar la edificación y sus características estructurales posteriormente dentro del Sistema de Información Geográfica (SIG). En la tabla 2.22 se muestra la estructura de esta base; los datos espaciales (parcelas) fueron vinculados a la tabla de atributos (datos no espaciales) a partir de un indicador común (Id), ver figura 2.10.

Tabla 2.22. Información contenida en los archivos del catastro.

Campo	Nombre	Tipo	Ancho	Dec.	Índice	Ordenación	Nulos
1	ID	Carácter	16		Asc.		No
2	UBIT	Carácter	10				No
3	LOTE	Numérico	3				No
4	NO_POSTAL	Carácter	8				No
5	USO	Carácter	24				No
6	REPARTO	Carácter	24				No
7	CONS_POP	Carácter	24				No
8	DISTRITO	Carácter	24				No
9	DESC	Carácter	32				No
10	PISO	Numérico	3				No

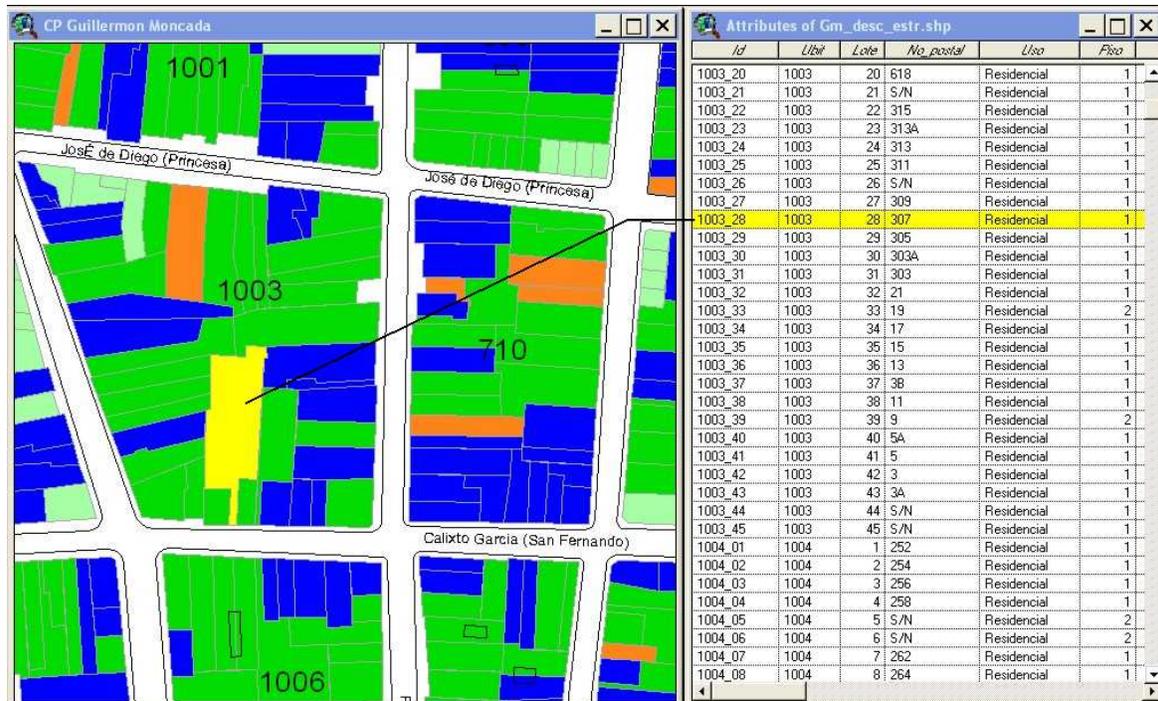


Figura 2.10. Vinculación de los datos espaciales (parcelas) con sus atributos descriptivos (datos no espaciales) dentro del SIG, el polígono que limita la parcela (o lote) 28 de la manzana (UBIT) 1003 en la ventana de la izquierda está vinculado unívocamente a los atributos de la fila en amarillo de la base de datos (ventana de la derecha).

Para la construcción de las coberturas dentro del SIG, se extrajeron de los ficheros del catastro (formato DXF) los 8 tipos de líneas presentes, en diferentes etapas (capas: COSTA, FERREAS, HIDRO, POSTES, PUENTES, VIALES, UBIT y PARCELAS de la tabla 2.21), junto con sus atributos, algunos presentes ya en la nueva base de datos (campos de la tabla 2.22) y otros creados dentro del SIG para efectuar el análisis de la vulnerabilidad de las edificaciones.

Además, fue necesario ejecutar un riguroso y extenso trabajo de campo (parcela por parcela), con el fin de verificar la veracidad y calidad de la información contenida en el catastro y clasificar “*en situ*”, cada una de las edificaciones existentes en el área de estudio, en esta inspección visual se clasificaron las edificaciones según su tipología constructiva de acuerdo a las escalas MSK, EMS y HAZUS99 y su estado técnico constructivo (nivel I, B-bueno, R- regular, M-malo), estas características se le añadieron como nuevos campos a la base de datos. En el trabajo de campo fue necesario comprobar y actualizar la información sobre el número de pisos y el uso de las edificaciones.

El distrito seleccionado para este estudio fue el “26 de Julio” (Distrito 2) por ser éste el más antiguo de la ciudad y donde se encuentra el mayor número de edificaciones en mal estado. Este distrito (ver figura 2.11) está limitado por las calles Jesús Menéndez – Trocha – Martí – Hernán Cortés – Avenida Central y presenta tres consejos populares (Guillermón Moncada, José María Heredia y Los Maceos), 400 manzanas y 12275 parcelas. Predominan las edificaciones de 1 y 2 pisos (ver figura 2.12); las mismas constituyen más del 95% del total de edificaciones presentes en el distrito, existiendo muy pocas edificaciones de 3 o más pisos.

El uso de los suelos se presenta en la figura 2.13; el 93% de las parcelas del Distrito 26 de Julio está ocupado por viviendas (categoría Residencial en la misma figura), un 4% se dedica al comercio

(Comercio Minorista, Mayorista, Interior, Gastronomía, etc.), un 2% pertenece a la categoría social, en la cual se agrupan las edificaciones que brindan servicios a la población como los cines, casas estudiantiles, parques, museos, oficinas centrales de los distintos ministerios y las organizaciones de masas, entre otras. El sector industrial ocupa el 1% de las parcelas y éstas se encuentran mayoritariamente ubicadas en el área del puerto. También se han diferenciado los sectores salud y el educacional, ocupando ambos el 0.6% de las parcelas aproximadamente.

Dentro del Distrito 26 de Julio, se seleccionó el consejo popular “Guillermón Moncada” debido a que éste se encuentra próximo a la bahía (terreno desfavorable), es el de mayor extensión y además presenta los mayores problemas en cuanto al estado técnico de las edificaciones (ver figura 2.14). Este consejo popular cuenta con 153 manzanas que representan aproximadamente un 38% del total de las manzanas del distrito y 4548 parcelas o lotes. Esta área presenta características constructivas, materiales utilizados y edades de edificaciones diversos, aunque la mayoría de las edificaciones son edificios de mampostería sin reforzar de baja altura, los que corresponden a la categoría URML, según HAZUS99. Existe además una gran cantidad de edificaciones de hormigón armado de baja altura con pórticos resistentes a momentos (clasificadas como C1L) y en menor medida edificios de mampostería reforzada de baja altura (RM1L).

Además, se encontraron algunas edificaciones con pórticos de madera, clasificadas como W1 dentro del HAZUS99, algunas con pórticos de acero y paredes de mampostería (S5L), otras con pórticos de hormigón prefabricado y tímpanos de hormigón (PC2L) y edificaciones con pórticos de hormigón armado y paredes de mampostería (C3L). Es necesario señalar que se encontraron algunas edificaciones con paredes de cuje y piedra picada que fueron clasificadas como URML ya que el sistema soportante fue sustituido por paredes de mampostería sin reforzar.

En la figura 2.15 se presentan los resultados de la clasificación de las edificaciones pertenecientes al Consejo Popular Guillermón Moncada según la clasificación estructural propuesta por el proyecto HAZUS99. En la misma figura se resume de forma grafica la cantidad de edificaciones para cada una de las categorías presentes en el área de este Consejo Popular.

Otro aspecto mencionado anteriormente y que se tuvo en cuenta fue el estado técnico de las edificaciones, en este Consejo Popular el 32% (1472) de las edificaciones se encuentran en estado técnico bueno, mientras que el 54% (2460) están en estado regular y un 13% (582) en estado malo, dado fundamentalmente por la edad de dichas edificaciones, la falta de mantenimiento y la ausencia de criterios sismorresistentes.

También fue posible clasificar las parcelas según las escalas macrosísmicas actualmente en uso en el CENAI; en la figuras 2.16 y 2.17 se muestran los resultados. La primera clasificación, según la escala MSK (Medvedev et. al, 1965; Ad-hoc Panel, 1981) se realizó durante el trabajo de campo y la segunda (escala EMS, Grünthal, 1998), a partir de la información existente sobre las características estructurales de las edificaciones y su estado técnico constructivo.

1. Se preparó una base geo-espacial, partiendo de un catastro obtenido en GEOCUBA, mediante la incorporación de nuevos campos que garantizan su utilización para el cálculo de pérdidas con el programa HAZUS.
2. A partir de los resultados es posible evaluar a una escala detallada la vulnerabilidad física de las edificaciones de la ciudad, la vulnerabilidad poblacional no fue evaluada por no contar con los datos necesarios para este propósito.
3. Es necesario en el futuro con vistas a poder abarcar todo el universo constructivo de la ciudad, proponer un proyecto de investigación regional donde se genere una base de datos geo-espacial como la utilizada en este trabajo.

Figura 2.11. Distrito 26 de Julio y límites de los consejos populares.

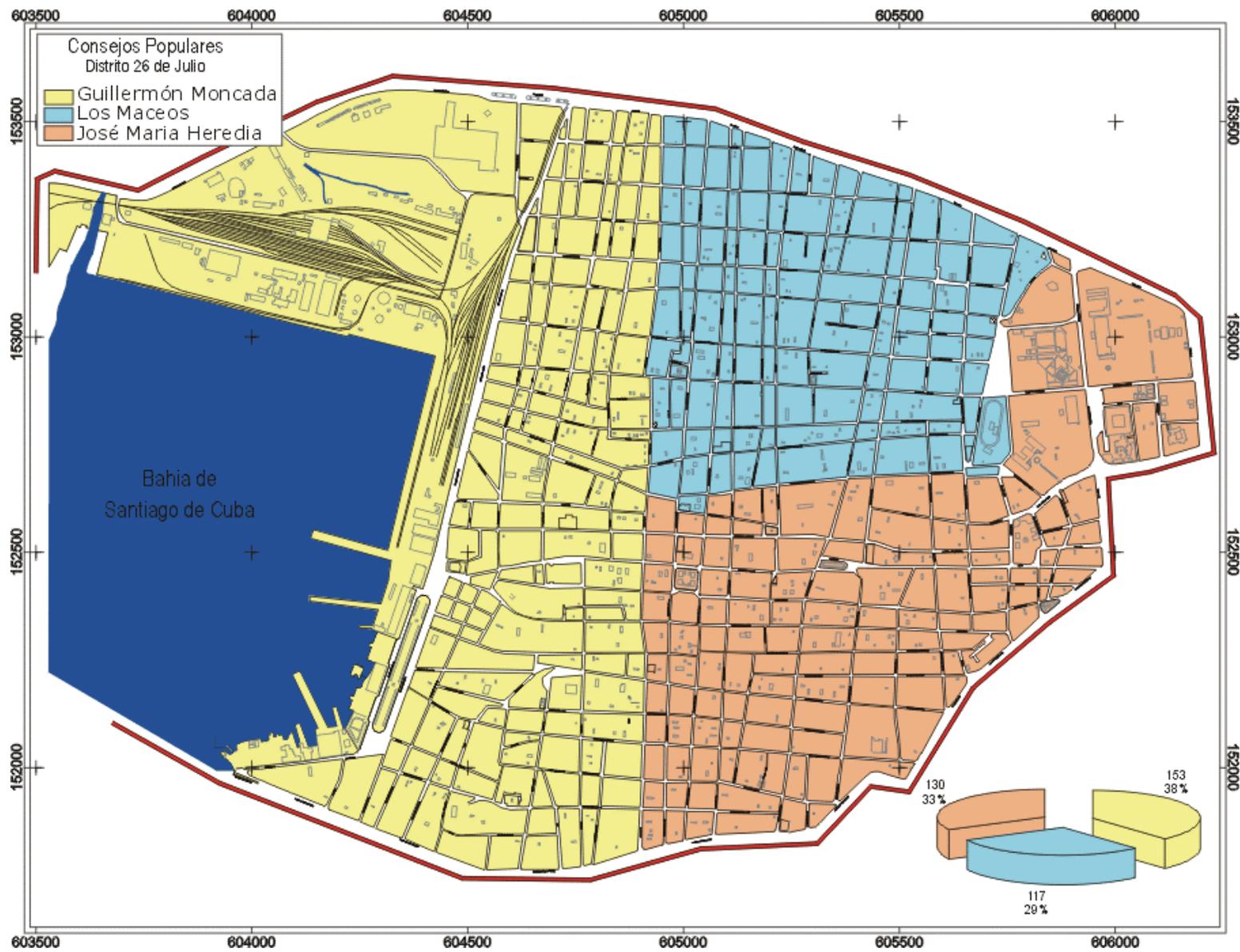


Figura 2.12. Distrito 26 de Julio. Altura de las edificaciones, según el número de pisos. Predominan las edificaciones de 1 o 2 pisos (12 075), algunas de 3 o 4 pisos (115) y muy pocas de mas de 4 (6).

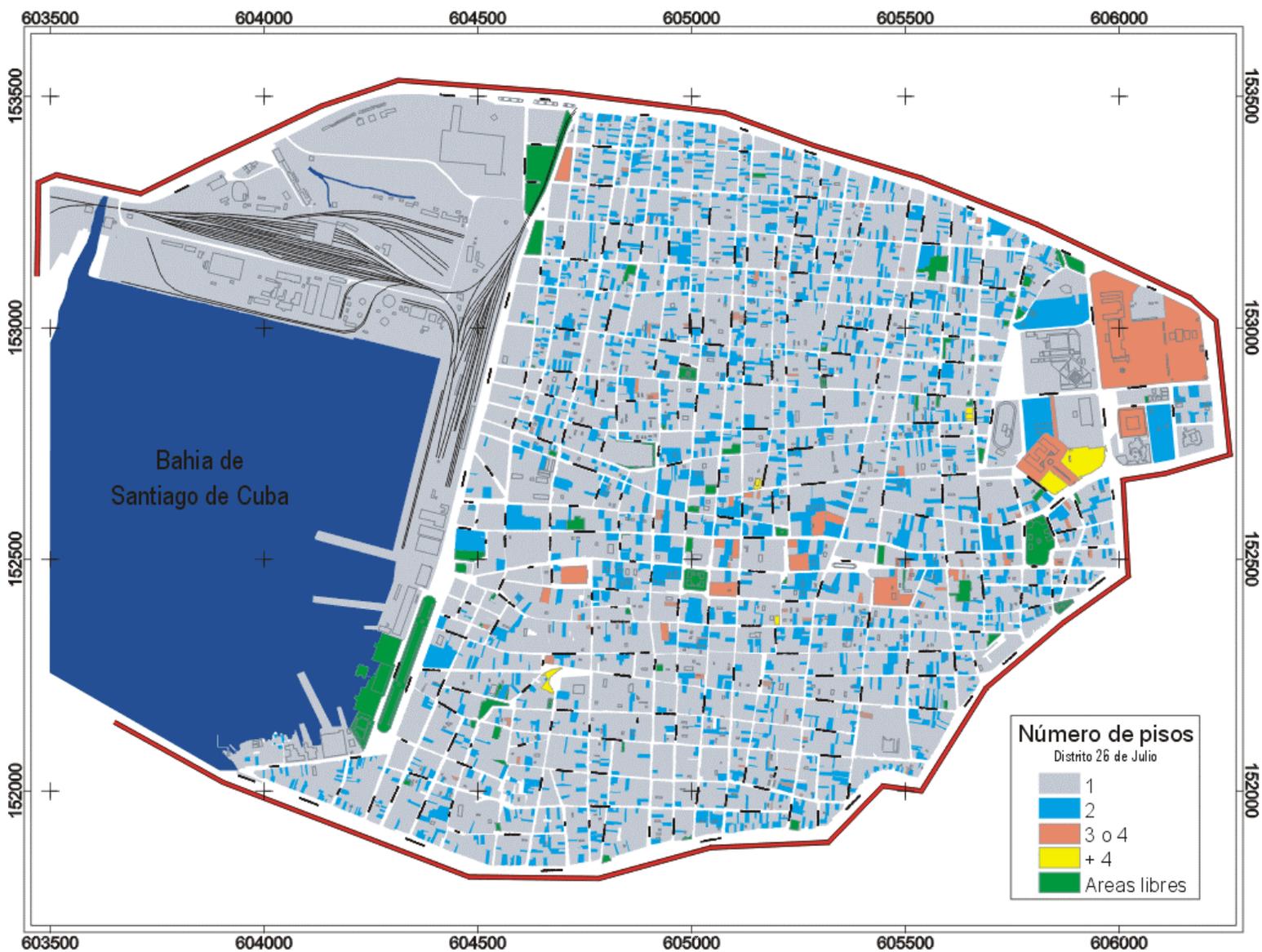
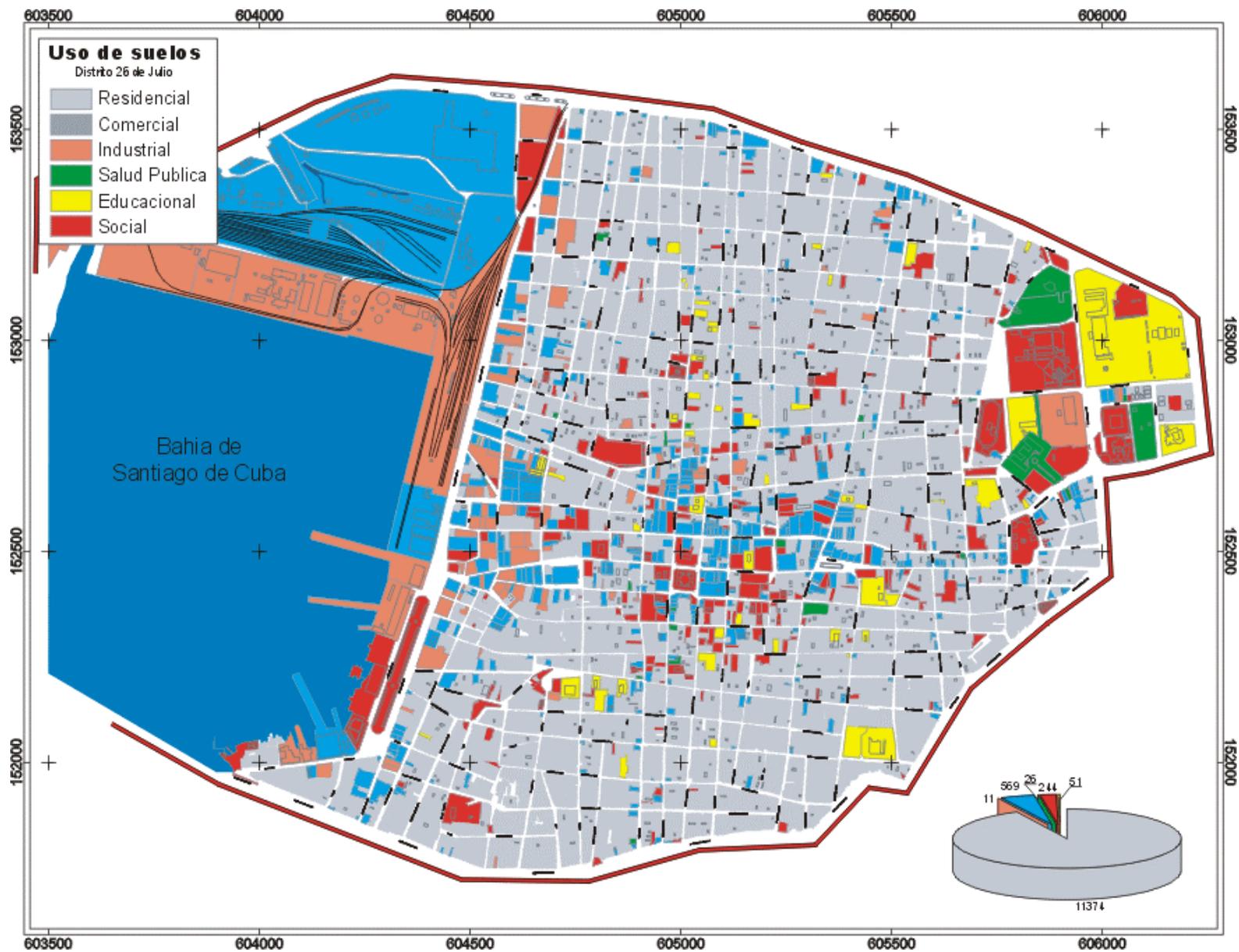


Figura 2.13. Distrito 26 de Julio. Uso de suelo. En el gráfico se muestra el número de edificaciones en cada categoría, se usaron los mismos colores que en la leyenda. .



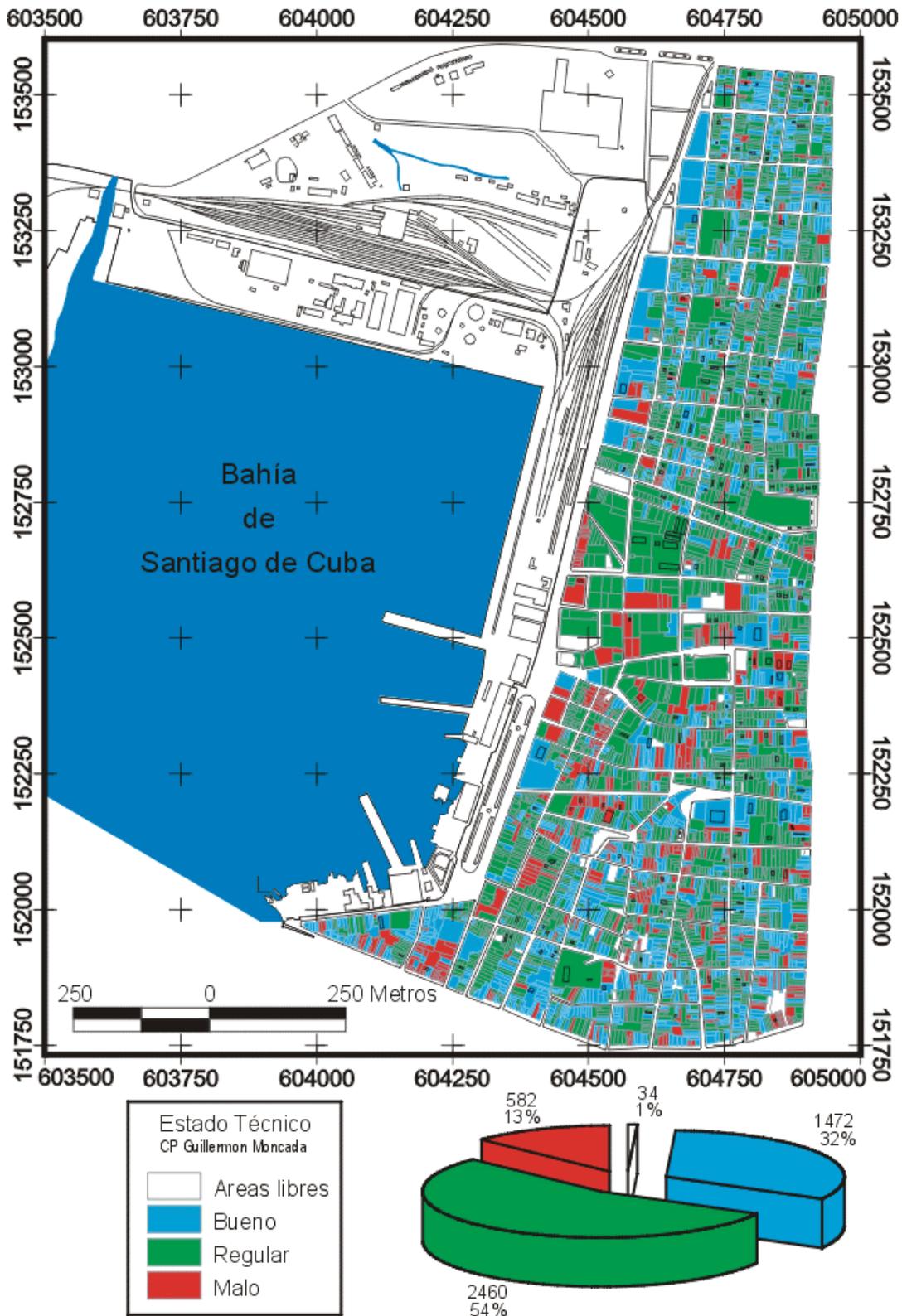


Figura 2.14. Consejo Popular “Guillermón Moncada”. Estado técnico de las edificaciones (Nivel I). En el grafico se muestra el número de edificaciones en cada categoría, se usaron los mismos colores que en la leyenda.

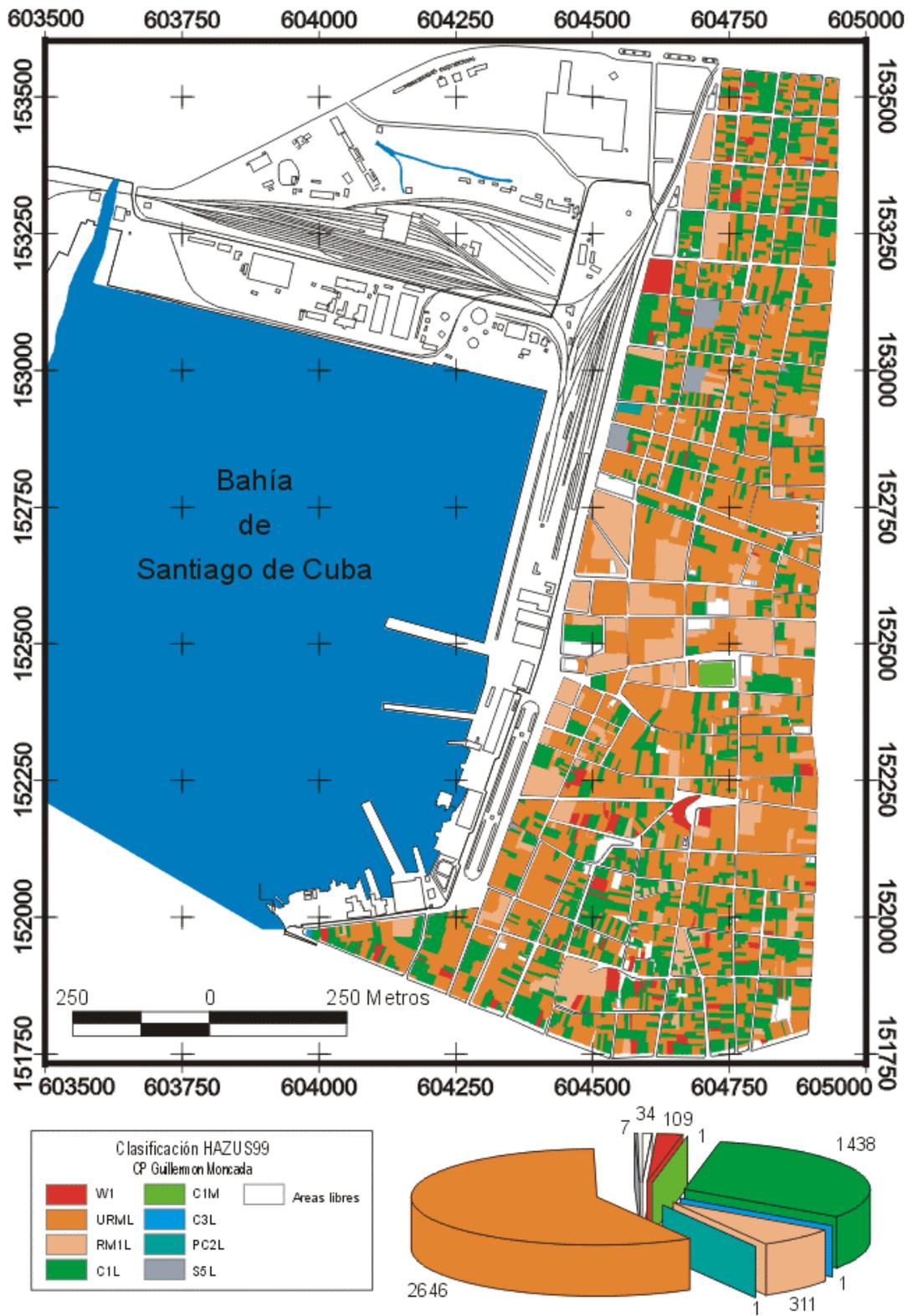


Figura 2.15. Consejo Popular “Guilemón Moncada”. Clasificación estructural de las edificaciones según HAZUS99. En el gráfico se muestra el número de edificaciones en cada categoría, se usaron los mismos colores que en la leyenda.

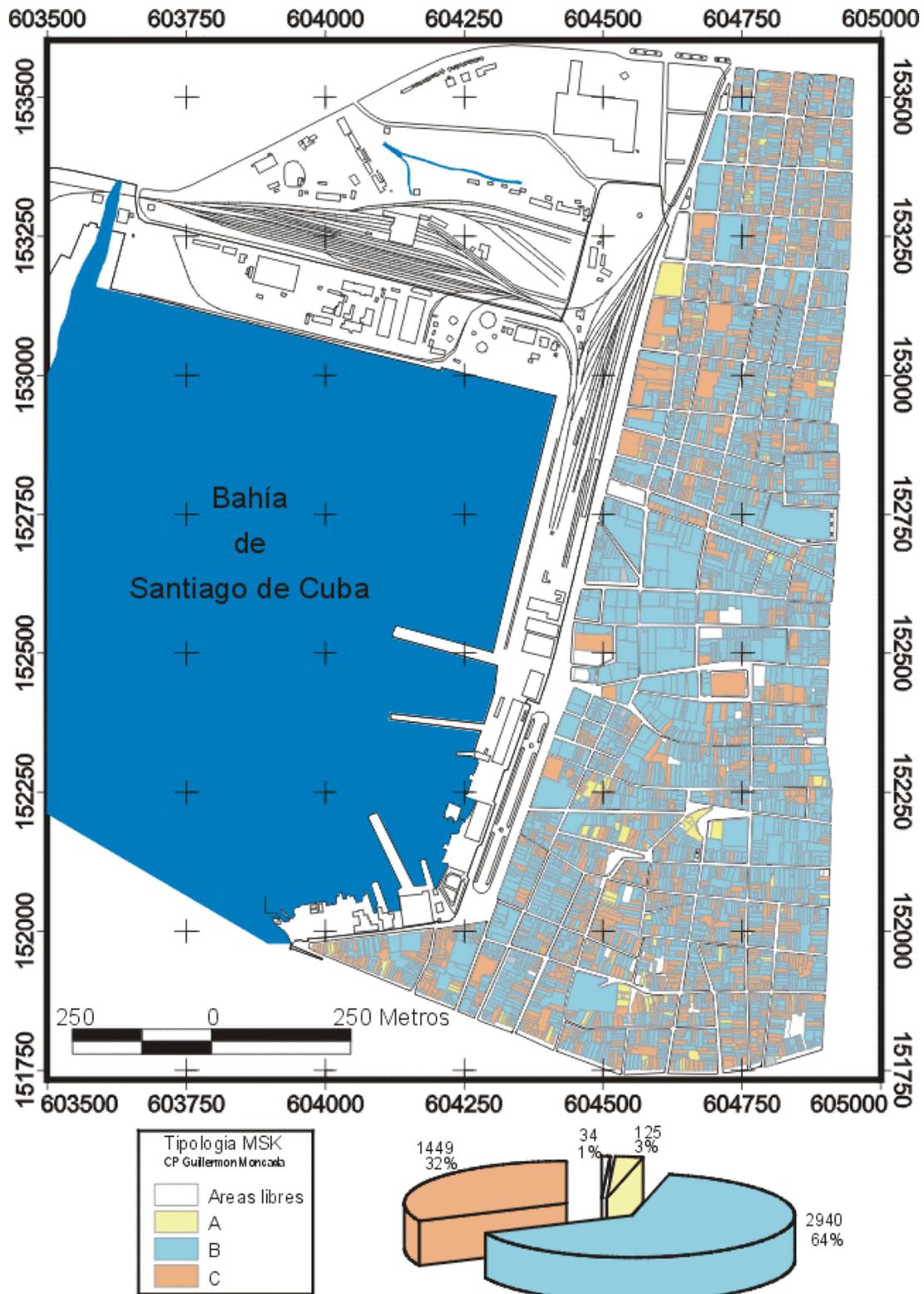


Figura 2.16. Consejo Popular “Guillermón Moncada”. Clasificación de las edificaciones según la escala MSK. En el grafico se muestran el número de edificaciones (y el por ciento) en cada categoría, se usaron los mismos colores que en la leyenda.

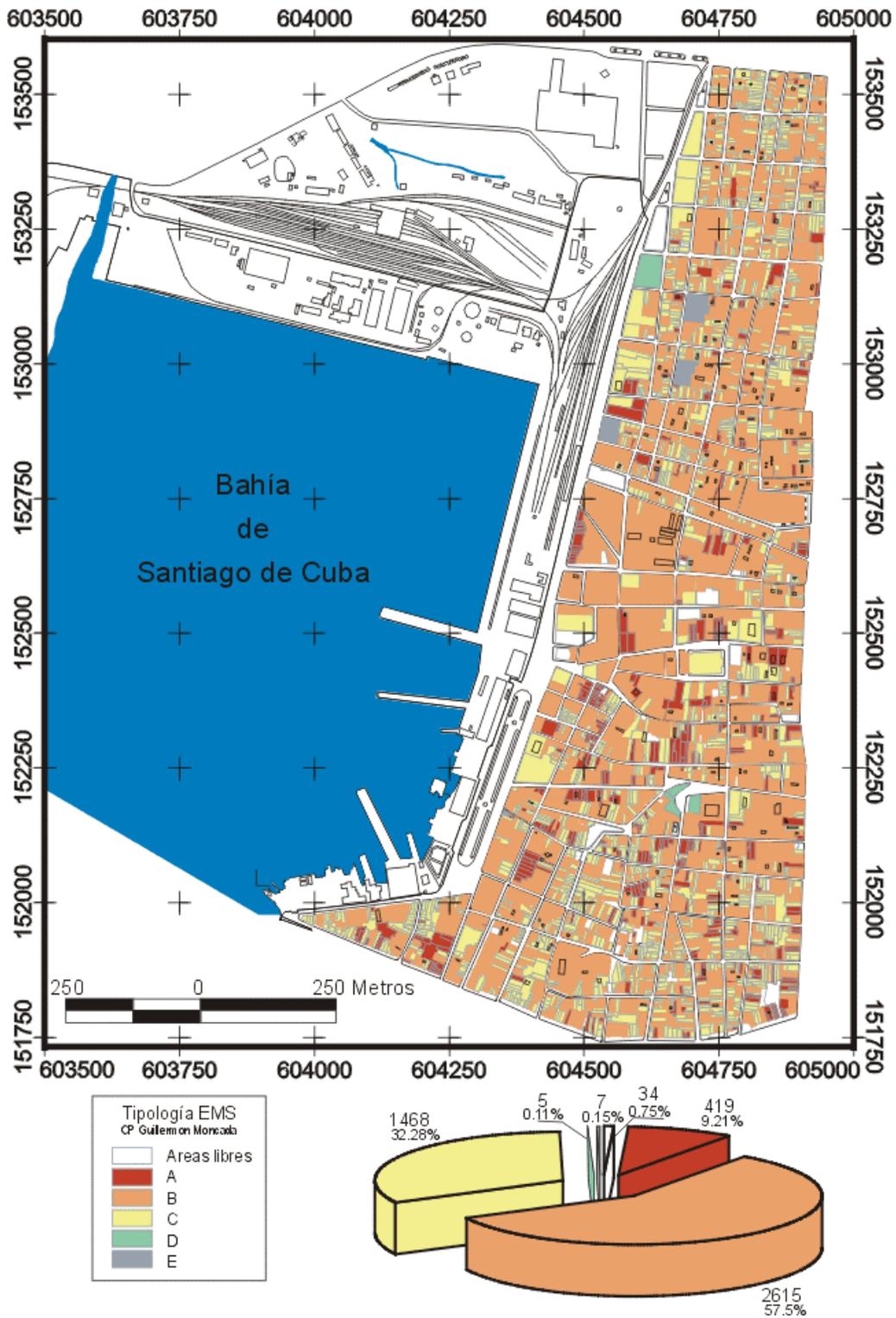


Figura 2.17. Consejo Popular “Guillermón Moncada”. Clasificación de las edificaciones según la escala EMS. En el grafico se muestran el número de edificaciones (y el por ciento) en cada categoría, se usaron los mismos colores que en la leyenda.

2.5 Definición del escenario probabilístico de riesgo sísmico para la ciudad de Santiago de Cuba.

Julio A. García Peláez¹

¹Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENSAIS)

Introducción.

Hace algunos años, la percepción del riesgo sísmico al cual estaba sometido nuestro país, estaba estrechamente relacionado con el conocimiento del peligro sísmico (de hecho en algunos países se usaba indistintamente el mismo vocablo en inglés: “risk” para describir ambas definiciones). A partir de este enfoque se desarrollaron investigaciones (Rubio, 1985; Alvarez *et al.* 1991; Chuy y Alvarez, 1995) con el objetivo de determinar la localización y potencialidad de las zonas sismogeneradoras o las fallas o sistemas de fallas que las componen, la distribución temporal y espacial de los terremotos que las mismas producen y sus efectos. La escala de los trabajos, así como la metodología usada para obtener los resultados no fue la misma, dependiendo esta de la calidad de los datos de partida o los objetivos que se perseguían.

Es necesario reconocer que los resultados de estos trabajos (mapas y curvas de peligrosidad sísmica), que a la postre formaron parte de los códigos sísmicos (Chuy y Alvarez, 1995) o estudios de emplazamientos de facilidades nucleares [Orbera *et al.* (1990), Chuy *et al.* (1992), y Gonzalez *et al.* (1993)], fueron aceptados y bien “entendidos” por los inversionistas y empresas de proyecto, y no tanto por los encargados de dictar las políticas ambientales, sociales y administrativas a nivel nacional y local.

No obstante, y aunque los estudios de peligrosidad sísmica (PS) constituyen una parte importante del conocimiento del riesgo sísmico ($R = P \otimes V$, donde R= riesgo, P= peligro y V= vulnerabilidad, con R expresado en unidades monetarias o vidas humanas según sea el caso), por si solos no pueden pronosticar las pérdidas económicas y sociales que provocaría la ocurrencia de un evento sísmico de gran intensidad o de cualquier otro evento natural o humano que provoque un desastre; solo pueden dar respuesta en el mejor de los casos, sobre la intensidad de las sacudidas sísmicas, su probabilidad de ocurrencia y la extensión espacial de los posibles daños.

Los estudios de riesgo van mas allá, al considerar las consecuencias potenciales tanto materiales como humanas que provocaría un evento sísmico determinado en las construcciones, las llamadas “líneas vitales”, el medio ambiente y la población.

Las catástrofes recientes han obligado a la comunidad científica y los gobiernos de todo el mundo a desarrollar estudios de riesgo sísmico para reducir los daños provocados por los terremotos. En la actualidad, existe una gran cantidad de trabajos que tratan de evaluar el riesgo sísmico a escala nacional o en zonas urbanas, auspiciados por organismos internacionales y/o gobiernos, con el fin de implementarlos dentro de sus programas de protección civil.

Algunas ciudades ya cuentan con estudios de riesgo sísmico como son las de Memphis y el condado de Shelby (Chang *et al.*, 1995), los de la ciudad de Salt Lake (King *et al.*, 1994), el distrito urbano de Niza (Thibault y Velkiv, 1995), la ciudad de Lisboa (Lopes, 1996), la Ciudad de México (Nassar *et al.*, 1996), la ciudad de Barcelona (Yépez, 1996; SERGISAI, 1998; Chávez, 1998); entre otras.

En América Latina el estudio del riesgo sísmico es un campo de investigación que hasta hace poco no había recibido atención por parte de investigadores de la región misma. Los terremotos de Huaraz, Perú (1970); Managua, Nicaragua (1972); y Guatemala (1976) fueron desastres de gran magnitud que provocaron investigaciones de su impacto y de la respuesta social e institucional. Sin embargo, estas investigaciones fueron realizadas generalmente por investigadores externos a la región y sus resultados fueron publicados en inglés y nunca difundidos ampliamente en los países donde ocurrieron los desastres.

A mediados de la década de los 80 y principalmente en la década posterior se han realizado estudios en esta misma área, donde la concepción del riesgo, los elementos que lo componen y la ocurrencia de desastres naturales se evalúa a partir de una concepción holística o integral (Cardona, 2001), considerando en el análisis no solamente variables geológicas, geofísicas y estructurales, sino también variables económicas, sociales, políticas y culturales.

En Cuba, los primeros trabajos acerca de las consecuencias de un desastre natural provocado por un terremoto de gran envergadura, tuvieron un carácter puntual y trataban de pronosticar la probabilidad de ocurrencia de sacudidas de un valor dado a partir de la construcción de un escenario particular. Los estudios realizados por Orbera *et al.* (1990), Chuy *et al.* (1992), y Gonzalez *et al.* (1993), para el emplazamiento de objetivos nucleares en nuestro país son un buen ejemplo. Estos trabajos tienen en común un estudio profundo y detallado de la amenaza sísmica a partir de la cual se proponen los parámetros de diseño de las estructuras a construir. En este enfoque se supone que la amenaza es “bien” conocida y que los (futuros) elementos expuestos no son vulnerables para este nivel de amenaza y por lo tanto el riesgo es nulo o imperceptible.

Con un enfoque diferente, a partir de la necesidad de evaluar las consecuencias de un desastre en un medio ya construido (ciudades, poblados, edificación en particular), se realizaron trabajos a diferentes escalas [Fundora *et al.* (2001); Vega *et al.* (2000), González *et al.* (2004)].

Recientemente, y como antecedente inmediato a este trabajo, en García *et al.* (2002), se desarrolló un proyecto SIG (Sistema de Información Geográfica), capaz de estimar las pérdidas probables de toda una zona urbana (ciudad de Santiago de Cuba), inmediatamente después de ocurrir un terremoto semejante al acaecido el 3 de Febrero de 1932 ($I_{max}=VIII$). Esta información permite a las instituciones gubernamentales y administrativas de la ciudad tomar las respectivas medidas de mitigación, para organizar y coordinar las actividades de emergencia, inmediatamente después de una crisis sísmica.

Este trabajo es una actualización directa del mismo y tenía como objetivo principal la estimación del riesgo sísmico a partir de diferentes escenarios probabilísticos de riesgo sísmico, utilizando los resultados obtenidos en los epígrafes anteriores, concretamente la estimación de la vulnerabilidad de las edificaciones “típicas” de la ciudad y como medida de la amenaza la aceleración horizontal teniendo en cuenta además las variaciones del efecto sísmico de este parámetro.

Lamentablemente, a pesar de obtener los parámetros necesarios para la obtención de los resultados según los objetivos que nos trazamos, no ha sido posible poner a punto la herramienta informativa (programa HAZUS-99) requerida para hacer un análisis de esta envergadura, una versión de este *software* que nos fue gentilmente cedido por un laboratorio italiano tenía problemas graves de funcionamiento en el módulo de entrada de los datos de partida, los cuales no pudieron ser resueltos a pesar de trabajar arduamente en este sentido. Por esta razón, decidimos postergar la modelación del riesgo sísmico a partir de este escenario y continuar mejorando el escenario propuesto por García *et al.* (2002).

Se trabajó en tres escalas de trabajo diversas (ver figura 2.18), según el tipo de datos (o parámetros de cálculo) y la celda elemental a la cual se asigna el resultado final:

1. Ciudad de Santiago de Cuba y sus alrededores.
2. Distrito 26 de Julio
3. Consejo Popular Guillermon Moncada.

A nivel de ciudad se obtuvieron los parámetros referidos a la PS y los elementos que intervienen en su estimación, a nivel de Distrito se obtuvieron los estimados de los daños y las pérdidas, referidos ambos a cada manzana y a nivel de Consejo Popular los resultados se obtuvieron a nivel de edificación, tomando como referencia el espacio físico que ocupa el lote donde esta construida la misma.

Riesgo sísmico.

La mayoría de los estudios de riesgo sísmico a nivel urbano utilizan como descriptor de la PS, la intensidad macrosísmica (I), la aceleración máxima (PGA) o cualquier otro parámetro dinámico que defina el comportamiento del terreno (PSV, PSD, etc.), y para evaluar el riesgo sísmico se utilizan las matrices de probabilidad o las funciones de vulnerabilidad, obtenidas a partir de las experiencias con terremotos pasados, mediante técnicas de simulación (Yépez, 1996), o a partir de juicios de expertos. En forma esquemática, este procedimiento se muestra en la figura 2.19, donde las matrices de probabilidad de daño y las funciones de vulnerabilidad, son representadas matemáticamente de la siguiente manera:

Matrices de probabilidad de daño

$$R = \sum_j \sum_i P[D = j | i] \cdot P[i] \quad (2.28)$$

Donde el riesgo R se expresa como la probabilidad condicional, ($P[D = j | i]$) de que se produzca un nivel de daño j dado un sismo de intensidad i , multiplicado por la probabilidad ($P[i]$) de obtener dicho sismo para un periodo dado y todo esto para cada nivel de daño asociado a cada intensidad. De esta manera el riesgo queda asociado al mismo período de retorno que el proporcionando por la peligrosidad sísmica (PS).

Funciones de vulnerabilidad

$$F(\bar{d}) = \int_0^{\bar{d} \text{ max}} \int_0^{\text{Im ax}} f(d | I) \cdot f(I) \cdot dI \cdot dd \quad (2.29)$$

$$R = F(d \text{ max}) \quad (2.30)$$

Donde $F(d)$ es la función de distribución de probabilidades de daño acumulado para $d = \bar{d}$, siempre que las variables señaladas se pueden considerar como variables aleatorias, independientes y continuas en su rango de definición. La expresión $f(d|I)$ es la función de densidad de probabilidad de daño condicionada a la intensidad I del sismo, siendo I cualquier descriptor de la PS y $f(I)$ la función de densidad de probabilidad de la intensidad del terremoto. Por consiguiente, el riesgo R vendrá dado por el valor máximo de la función de distribución de daño acumulado, como se evidencia en la ecuación 2.30.

Escenarios de riesgo.

Los escenarios de riesgos pueden ser definidos teniendo en cuenta un evento específico (el más probable, el máximo posible o cualquier otro) o integrando probabilísticamente en el sitio de interés los efectos potenciales de los terremotos que ocurren en distintas zonas sismogeneradoras que están en su entorno. En este trabajo utilizamos el segundo enfoque, aprovechando los resultados de peligrosidad sísmica a escala nacional obtenidos de forma probabilística en los epígrafes anteriores. Tuvimos además en cuenta que los estimados de PS obtenidos son comparables con los estremecimientos ocasionados por el último sismo que provocó daños de consideración en la ciudad el 3 de Febrero de 1932. Estamos conscientes de que el aporte de las demás zonas sismogeneradoras es menor y que la PS asociada a la ciudad está en gran medida determinada por la zona Oriente, la misma que se supone generó el evento mencionado más arriba.

El riesgo sísmico se evalúa entonces a partir de dos escenarios diversos, ambos parten de la misma definición de PS regional y se diferencian principalmente en la manera en que se estiman o evalúan las variaciones locales del efecto sísmico debido a la influencia de los suelos presentes en el área de estudio. La base geo - espacial que contiene las características de los bienes expuestos se mantiene invariable en ambos casos, para cada escenario se utilizan dos celdas elementales para la evaluación

de la vulnerabilidad (la manzana y/o el lote). El cálculo de los daños y las pérdidas se realiza utilizando un único procesamiento de cálculo.

En lo adelante se presentarán los dos escenarios de riesgo propuestos, aunque la estimación de los daños y de las pérdidas potenciales se obtuvieron solo para el primero.

Escenario de riesgo A.

Este primer escenario ya fue definido y utilizado en García *et al.* (2002); creemos que continua siendo valido y por eso tratamos de mejorarlo en este trabajo. En la estimación del riesgo se utiliza como parámetro “amenazante” la intensidad macrosísmica y en estos términos también se evalúan los efectos locales. Para la estimación de los daños se utilizan 2 matrices de probabilidad de daño [Oliva (2000) a nivel de manzana y lote; y SES (2002) a nivel de lote]. Las pérdidas económicas se obtienen vinculando los daños ocasionados, con el costo de reposición de los mismos, según sea el tipo de edificación. Para la obtención de las pérdidas en la población se utiliza el procedimiento descrito en el epígrafe 2.1 de este mismo trabajo.

Escenario de riesgo B.

En este escenario se utiliza como descriptor de la PS la aceleración pico del terreno. La estimación de la variación local de los efectos se obtuvo utilizando la clasificación de suelos propuestas por la NEHRP (BSSC, 2001) y la EC8 (CEN, 2002) y los factores de amplificación por tipo de terreno propuestos por estos autores. Los daños en este caso se obtendrían utilizando las funciones de vulnerabilidad obtenidas en el epígrafe 2.2 a nivel de edificación (lote) y las pérdidas económicas y humanas del mismo modo que en el escenario anterior.

Peligro regional.

Para este propósito, solo es necesario adecuar los resultados obtenidos a nivel nacional en términos de aceleración e intensidades sísmicas a nuestro entorno de trabajo, la ciudad de Santiago de Cuba. Por esta razón, fue necesario realizar un procesamiento posterior con el fin de, sin variar los parámetros de partida, obtener los resultados en una red mas densa (1 valor puntual de PS por km²). Los resultados en términos de intensidad macrosísmica para un suelo medio (escenario A), en toda el área de estudio tienen un único valor (VIII grados), mientras en las figura 2.20 y 2.21 se presentan los resultados en términos de aceleración pico del terreno (escenario B), tanto para roca como para suelo medio. Estos estimados fueron obtenidos para un periodo de retorno de 475 años, o lo que es lo mismo: un 90% de probabilidad de que no sean excedidos estos valores de peligro en 50 años.

Peligro local.

Para la obtención de las variaciones locales de las sacudidas sísmicas de los sismos de moderada o gran intensidad en las construcciones, en Garcia et al. (2002) se utilizaron 2 métodos: 1)- medición y análisis de los microsismos registrados en diferentes puntos de la ciudad y 2)- combinación de métodos ingeniero - geológicos.

En el primer caso, la unificación de los datos de las diferentes campañas de medición no arrojó los resultados esperados, existiendo incongruencias entre los resultados de las mediciones, la geología y los efectos de los terremotos moderados y fuertes que han afectado la cuenca de la ciudad de Santiago de Cuba. Por esta razón, se utilizó el método de categorías de suelos (Medvedev, 1973) para la obtención de la respuesta dinámica de los terrenos presentes en la cuenca, mediante el cual se relacionaron la profundidad media del nivel freatico con la susceptibilidad litológica de las formaciones geológicas presentes en el área de estudio, extraídas del esquema geológico de la cuenca de Santiago de Cuba (Medina et al., 1999).

Posteriormente se categorizaron las áreas de acuerdo a su capacidad de respuesta dinámica, definiendo para cada una de ellas un incremento o decremento según su comportamiento. A este resultado los autores le llamaron: mapa de efecto de sitio y el mismo pronosticaba incrementos de hasta dos grados de intensidad en zonas con suelos no consolidados del cuaternario o de relleno, con niveles freáticos superficiales (alrededores de la bahía, parte baja del Casco Histórico, etc.) y decrementos de hasta dos grados en zonas donde predominan rocas consolidadas del grupo El Cobre.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos a nivel regional, se pueden obtener las variaciones locales del efecto sísmico para un período de retorno similar. El procedimiento es sencillo y únicamente se necesita incrementar o disminuir la PS regional obtenida en términos de intensidad sísmica. El mapa resultante se presenta en la figura 2.22. Como se puede apreciar dentro del área pueden esperarse efectos a partir de VI grados en zonas con rocas bien consolidadas independientemente de su edad geológica y hasta de X grados en zonas con predominio de suelos no consolidados o “malos”.

A este resultado se le adicionaron posteriormente los efectos producto de la cercanía a las zonas de inestabilidad tectónica de primer y segundo nivel (ver García et al. 2002). De esta manera se le asoció a cada celda elemental su grado base de amenaza o PS. En las figuras 2.23 y 2.24 se presentan estos resultados, correspondientes al escenario de riesgo A para el Distrito 26 de Julio y el Consejo Popular Guillermón Moncada.

Los mapas regionales en términos de aceleración pico no son capaces de describir las variaciones de este parámetro debido a que las relaciones de atenuación que se utilizan a esta escala de trabajo describen el comportamiento “promedio” de los efectos en un suelo homogéneo, ya sea roca o cualquier clase de suelo (duro, medio, blando); sin tener en consideración las heterogeneidades del medio geológico. Por esta razón es necesario obtener estas variaciones de las sacudidas sísmicas debidas al comportamiento de los suelos por otros métodos.

Es ya una practica común en los trabajos que evalúan los efectos locales en términos de aceleración pico o de sus variantes espectrales, la utilización de clasificaciones (geológicas o ingeniero – geológicas) de suelos en términos de la velocidad de las ondas de cizalla (V_{30}) en los primeros 30 metros del corte geológico. Las 2 clasificaciones de mayor uso en la actualidad, en ausencia de mediciones locales de este parámetro son las propuestas por el código sísmico europeo [EC8 (CEN, 2002)] y el Programa Nacional para la Reducción de Perdidas por Terremotos (NEHRP según sus siglas en ingles, BSSC, 2001). Como puede apreciarse en la tabla 2.23 entre ambas clasificaciones no existen diferencias de peso en cuanto los valores de V_{30} y si en la definición de las clases o tipos de suelos y los valores del factor de amplificación (F_a) para las dos ultimas clases de suelos principalmente.

Tabla 2.23- Tipos de suelos, velocidad de las ondas de cizalla (V_{30}) y factor de amplificación para cada uno de ellos según la NEHRP (BSSC, 2001) y el EC8 (CEN, 2002).

NEHRP				EC8			
Clase	Descripción	V_{30}	F_a	Clase	Descripción	V_{30}	F_a
A	Roca dura	>1500	0.8				
B	Roca	760-1500	1.0	a	Roca	>800	1.0
C	Semiroca	360-760	1.2	b	Suelo duro	360-800	1.2
D	Suelo duro	180-360	1.6	c	Suelo blando	180-360	1.15
E	Suelo blando	<180	2.5	d	Suelo muy blando	<180	1.35

Como no contamos con mediciones directas de la velocidad de las ondas de cizalla para la ciudad de Santiago de Cuba y sus alrededores fue necesario clasificar los suelos de forma indirecta. A partir del esquema geológico de la cuenca de Santiago de Cuba (Medina et al. 1999), la descripción

de las formaciones geológicas presentes en el área y el apoyo de la información ingeniero geológica conque cuanta el CENAIIS, fue posible clasificar los suelos. En la figura 2.25 se muestran los resultados de este procedimiento, así como los factores de amplificación (F_{a_u}) para cada tipo de suelo; estos valores fueron obtenidos promediando los factores de amplificación propuestos por el NERHP y el EC8.

Combinando convenientemente de forma multiplicativa estos factores de amplificación con los resultados de PS obtenidos para roca (figura 2.20), fue posible obtener nuevos valores de aceleración pico; en el mapa de la figura 2.26 se presentan estos resultados. En este mapa ya se tienen en consideración el aporte de los suelos en los efectos locales. Los valores de aceleración después de esta transformación aumentaron considerablemente en las zonas donde prevalecían los suelos no consolidados (mas de 0.5g) en los alrededores de la bahía, el casco histórico y el valle de inundación del río San Juan. De esta forma se modeló en el escenario B la PS o el nivel de amenaza al que estaban expuestos los elementos en riesgo, aunque no se presenten aquí los resultados a nivel de manzana y edificación.

Inventario de los bienes expuestos.

En el epígrafe 2.4, se describe ampliamente la forma en que se organizó, compiló y transformó la información existente sobre las edificaciones presentes en la ciudad, así como su uso, necesaria para la evaluación de los daños. La información estructural de las construcciones como ya fue dicho en el epígrafe citado más arriba fue comprobada *in situ* por estudiantes de construcción civil (nivel medio) y especialistas de ingeniería sísmica del CENAIIS, detectándose en muchos casos diferencias con la información preexistente. Es necesario hacer notar que el estado técnico - constructivo de las edificaciones no ha mejorado en el tiempo transcurrido entre este trabajo y el anterior (García et al. 2002) y en no pocas ocasiones ha empeorado.

En este epígrafe presentamos únicamente en las figuras 2.27 y 2.28 los mapas de susceptibilidad habitacional y poblacional, los cuales no estaban incluidos en el epígrafe 2.4 y por su importancia mostramos aquí. El procedimiento utilizado fue el mismo que en García et al. (2002).

Vulnerabilidad y estimación de los daños.

Una parte importante en la estimación del riesgo sísmico es la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones. La experiencia acumulada en el estudio de los daños ocasionados por terremotos en el pasado ha demostrado que existen edificaciones de una misma tipología constructiva que pueden sufrir un mayor o menor grado de daño debido a los efectos de un terremoto, a pesar de localizarse en el mismo sitio geográfico (Benedetti, *et al*, 1988; EERI Committee on Seismic Risk 1989; Grünthal, 1998). Este comportamiento se debe a que existen edificaciones con una calidad estructural superior a otras, o lo que es lo mismo, son menos vulnerables.

De la definición general de riesgo enunciada más arriba, se pueden deducir dos conceptos importantes: 1- si el nivel de amenaza (P) disminuye o se hace cero, el riesgo (R) es nulo o insignificante, independientemente de cuales sean los elementos expuestos (V); 2- por el contrario, si la vulnerabilidad de los elementos expuestos (V), es alta, no es necesario un nivel de amenaza (P) grande para que se produzcan pérdidas de envergadura.

El conocimiento real del comportamiento de una estructura es complejo y depende generalmente de parámetros difíciles de obtener de forma directa o indirecta. Algunos de estos parámetros incluyen la obtención de las características del movimiento sísmico del terreno donde esta emplazada la edificación, la resistencia de los materiales con los que está construida, la calidad de su construcción, la interacción de los elementos estructurales con los elementos no estructurales y el contenido existente en la estructura en el momento del terremoto, entre otros muchos.

Es evidente que al enfrentar estudios de riesgo a nivel urbano, en muy pocas ocasiones es posible contar con esta cantidad de información, y no nos queda otra salida que reducir el análisis, al conocimiento de algunos parámetros básicos para poder clasificar la edificación, o, en otras palabras al conocimiento de su calidad estructural.

Algunos trabajos que proponen metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica en estudios a nivel urbano son: la Escala Macrosísmica Europea EMS-98 (Grünthal, 1998); las normas ATC-13 y ATC-25 y el Método del índice de vulnerabilidad (Benedetti y Petrini, 1984); entre otros. Es importante, aclarar que la elección de una metodología u otra dependerá de los objetivos planteados en los estudios de Riesgo Sísmico y **fundamentalmente** de la información con que se cuente de los elementos bajo estudio.

Un aspecto importante en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras es definir el daño que pueda sufrir una estructura debido a un terremoto. En realidad, el daño va asociado a la vulnerabilidad, ya que una estructura es más o menos vulnerable dependiendo del daño que pueda sufrir ante un terremoto. La palabra daño se utiliza ampliamente para describir distintos fenómenos que puedan ocasionar los movimientos sísmicos a las edificaciones, refiriéndose principalmente el deterioro físico o estructural.

Por las razones descritas anteriormente solo fue posible utilizar el escenario de riesgo A para la obtención de los daños y las pérdidas potenciales en el Distrito 26 de Julio y el Consejo Popular Guillermon Moncada.

La metodología escogida fue el uso de las matrices de probabilidad de daños (MPD) obtenidas a partir de la definición de los daños descritos en las escalas MSK (Medvedev et al. 1965) y EMS (Grünthal, *ed.*, 2003). A partir de este enfoque, se obtiene el número de edificaciones que sufrirán un tipo de daño dado para cada grado de intensidad, según sea el tipología constructiva (o clase de vulnerabilidad).

La primera matriz propuesta por Oliva (2000), se basa en la descripción de los daños en las tipologías constructivas que propone la escala MSK y algunas consideraciones del autor a partir de su experiencia en la evaluación de daños reales en las edificaciones de nuestro país.

Tabla 2.24- Matriz de probabilidad de daño, propuesta por Oliva (2000). En la tabla: grado 0 = sin daños, grado 1= daños ligeros, grado 2 = daños moderados, grado 3 = daños graves, grado 4= daños muy graves y grado 5= daño total o colapso.

GRADO 0	Intensidad MSK						
	Tipología	VII	VIII	IX	X	XI	XII
A	0.30	0.15	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
B	0.50	0.30	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00
C	0.80	0.40	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00
GRADO 1	Intensidad MSK						
	Tipología	VII	VIII	IX	X	XI	XII
A	0.25	0.20	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
B	0.30	0.25	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
C	0.20	0.35	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00
GRADO 2	Intensidad MSK						
	Tipología	VII	VIII	IX	X	XI	XII
A	0.20	0.20	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00
B	0.20	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
C	0.00	0.20	0.20	0.25	0.00	0.00	0.00

GRADO 3		Intensidad MSK					
	Tipología	VII	VIII	IX	X	XI	XII
	A	0.20	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00
	B	0.00	0.20	0.20	0.30	0.25	0.00
C	0.00	0.05	0.20	0.50	0.25	0.00	
GRADO 4		Intensidad, MSK					
	Tipología	VII	VIII	IX	X	XI	XII
	A	0.05	0.20	0.30	0.45	0.00	0.00
	B	0.00	0.05	0.20	0.50	0.20	0.00
C	0.00	0.00	0.05	0.20	0.55	0.45	
GRADO 5		Intensidad, MSK					
	Tipología	VII	VIII	IX	X	XI	XII
	A	0.00	0.05	0.20	0.55	1.00	1.00
	B	0.00	0.00	0.05	0.20	0.55	1.00
C	0.00	0.00	0.00	0.05	0.20	0.55	

La segunda, SES (2002) fue obtenida a partir de la escala EMS. En la definición de los grados de intensidad de esta escala como en las otras, se indica la cantidad de edificaciones de un tipo que sufren un cierto grado de daño de forma literal: “muchos sufren daños de grado 3; algunos de grado 4”. Cuando se quieren traducir estas definiciones en números exactos aparecen varios problemas: los conceptos “algunos, muchos, mayoría” en la escala EMS se definen mediante rangos, que se solapan difusamente; entonces ¿con qué porcentajes interpretarlos? Los autores de esta MPD propusieron dos soluciones. La primera contempla valores intermedios para las definiciones de cantidad: pocas (0-15%)→8%, muchas (15-55%)→35%, la mayoría (55-100%)→80% y supone que los daños de las definiciones son acumulativos. La segunda indica el daño mínimo que se produce con una intensidad, sin extrapolar ni suponer nada de los daños menores que no aparecen en las definiciones. Nosotros preferimos utilizar la primera solución.

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

Tabla 2.25- Matriz de probabilidad de daño (SES, 2002), expresada en % según los grados de intensidad y la clasificación de daños y tipología de la escala EMS. En la tabla: G0 = sin daños, G1= daños leves, G2 = daños moderados G3: daños graves, G4: daños muy graves y G5: destrucción total - colapso

		V			
		A	B	C	D
G0		92	92	100	100
G1		8	8	0	0
G2		0	0	0	0
G3		0	0	0	0
G4		0	0	0	0
G5		0	0	0	0
		VI			
		A	B	C	D
G0		65	65	92	100
G1		27	27	8	0
G2		8	8	0	0
G3		0	0	0	0
G4		0	0	0	0
G5		0	0	0	0
		VII			
		A	B	C	D
G0		0	20	65	92
G1		20	45	27	8
G2		45	27	8	0
G3		27	8	0	0
G4		8	0	0	0
G5		0	0	0	0
		VIII			
		A	B	C	D
G0		0	0	20	65
G1		0	20	45	27
G2		20	45	27	8
G3		45	27	8	0
G4		27	8	0	0
G5		8	0	0	0

		IX				
		A	B	C	D	E
G0		0	0	0	20	65
G1		0	0	20	45	27
G2		0	20	45	27	8
G3		20	45	27	8	0
G4		45	27	8	0	0
G5		35	8	0	0	0
		X				
		A	B	C	D	E
G0		0	0	0	0	20
G1		0	0	0	20	45
G2		0	0	20	45	27
G3		0	20	45	27	8
G4		20	45	27	8	0
G5		80	35	8	0	0
		XI				
		A	B	C	D	E
G0		0	0	0	0	0
G1		0	0	0	0	20
G2		0	0	0	20	45
G3		0	0	20	45	27
G4		0	20	45	27	8
G5		100	80	35	8	0
		XII				
		A	B	C	D	E
G0		0	0	0	0	0
G1		0	0	0	0	0
G2		0	0	0	0	0
G3		0	0	0	0	0
G4		0	0	10	20	20
G5		100	100	90	80	80

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

Tabla 2.26- Ejemplo de los resultados obtenidos en forma de tabla después de estimar los daños en el Distrito 26 de Julio. La primera columna es el identificador geo-espacial de la manzana, las columnas que le siguen hasta VIVIENDAS (total de edificaciones dentro de la manzana) caracterizan el fondo habitacional dentro de la manzana (A, B y C= numero de edificaciones según la escala MSK, N_BUEN, N_REG y N_MAL, no son mas que el número de edificaciones de acuerdo a su estado técnico-constructivo → bueno, regular y mal). POB = número de habitantes y T_G0, T_G1, T_G2, T_G3, T_G4 y T_G5 representan el número total de edificaciones, independientemente de su tipología constructiva que sufren danos de grado 0, 1, 2, 3, 4, 5 respectivamente posteriormente el grado base de intensidad (Int).

MANZANA	A	B	C	N_BUEN	N_REG	N_MAL	VIVIENDAS	POB.	T_G0	T_G1	T_G2	T_G3	T_G4	T_G5	%_G0	%_G1	%_G2	%_G3	%_G4	%_G5	Int.
856	0	1	0	0	1	0	1	12	0	0	0	0	0	1	0	0	0	25	20	55	11
1053	0	0	10	0	10	0	10	120	0	0	0	3	6	2	0	0	0	25	55	20	11
1054	0	14	0	0	3	11	14	168	0	0	0	4	3	8	0	0	0	25	20	55	11
1434	0	15	3	3	0	15	18	216	0	0	0	5	5	9	0	0	0	25	26	49	11
861	0	112	22	15	12	107	134	268	0	0	6	45	60	24	0	0	4	33	45	18	10
1049	0	99	6	3	29	73	105	210	0	0	2	33	51	20	0	0	1	31	48	19	10
859	0	0	5	0	5	0	5	10	0	0	1	3	1	0	0	0	25	50	20	5	10
1089	0	25	1	1	15	10	26	78	4	5	5	5	5	1	16	20	20	20	19	5	9
1198	7	24	30	3	37	21	61	216	0	0	8	22	21	10	0	0	12	36	35	17	10
1201	1	49	19	3	24	42	69	272	0	0	0	17	20	32	0	0	0	25	29	46	11
1202	16	65	20	26	29	46	101	1020	0	0	0	21	24	56	0	0	0	21	24	55	11
1209	7	57	20	8	18	58	84	231	0	0	0	19	22	42	0	0	0	23	27	50	11
1203	4	22	12	1	29	8	38	408	0	0	0	9	11	19	0	0	0	22	29	49	11
1208	0	26	9	1	19	15	35	105	0	0	0	9	10	16	0	0	0	25	29	46	11
1204	0	26	22	6	27	15	48	576	0	0	6	19	17	6	0	0	11	39	36	13	10
1205	4	74	4	0	20	62	82	234	0	0	1	24	40	17	0	0	1	30	48	21	10
1193	1	35	17	1	33	19	53	208	10	11	11	11	8	2	20	21	20	20	15	4	9
1194	0	18	12	1	25	4	30	120	6	7	6	6	4	1	21	22	20	20	14	3	9
1196	0	18	6	4	10	10	24	72	0	0	2	8	10	4	0	0	6	35	43	16	10
1087	2	73	20	10	38	47	95	186	0	0	5	32	41	17	0	0	5	34	44	18	10
1197	10	37	15	1	34	27	62	156	0	0	4	19	26	14	0	0	6	30	42	22	10
1190	3	31	22	8	37	11	56	212	0	0	6	20	21	9	0	0	10	36	38	16	10
1189	23	36	17	8	36	32	76	212	0	0	4	19	32	21	0	0	6	25	42	27	10

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

Tabla 2.27- Ejemplo de los resultados obtenidos en forma de tabla después de estimar los daños en el Distrito 26 de Julio. La primera columna es el identificador geo-espacial de la manzana, las columnas que le siguen representan el numero de edificaciones por tipología constructiva que sufren daños de distinto grado

MANZANA	G0 A	G0 B	G0 C	G1 A	G1 B	G1 C	G2 A	G2 B	G2 C	G3 A	G3 B	G3 C	G4 A	G4 B	G4 C	G5 A	G5 B	G5 C	Int.
856	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	11
1053	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	6	0	0	2	11
1054	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	3	0	0	8	0	11
1434	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1	0	3	2	0	8	1	11
861	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	34	11	0	56	4	0	22	1	10
1049	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	30	3	0	50	1	0	20	0	10
859	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	0	0	1	0	0	0	10
1089	0	4	0	0	5	0	0	5	0	0	5	0	0	5	0	0	1	0	9
1198	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	7	15	3	12	6	4	5	2	10
1201	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	5	0	10	10	1	27	4	11
1202	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	5	0	13	11	16	36	4	11
1209	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	5	0	11	11	7	31	4	11
1203	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	3	0	4	7	4	12	2	11
1208	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	2	0	5	5	0	14	2	11
1204	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	8	11	0	13	4	0	5	1	10
1205	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	22	2	2	37	1	2	15	0	10
1193	0	5	5	0	7	4	0	7	3	0	7	3	0	7	1	0	2	0	9
1194	0	3	4	0	4	3	0	4	2	0	4	2	0	4	1	0	1	0	9
1196	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	5	3	0	9	1	0	4	0	10
1087	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	22	10	1	37	4	1	15	1	10
1197	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	11	8	5	19	3	6	7	1	10
1190	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	9	11	1	16	4	2	6	1	10
1189	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	11	9	10	18	3	13	7	1	10

A partir del valor de intensidad en cada celda elemental (manzana o lote), la tipología constructiva (MSK) o las clases de vulnerabilidad (EMS), el número de habitantes y los coeficientes de las matrices de vulnerabilidad, se estima el número de muertos, heridos y personas sin hogar y el de casas colapsadas, destruidas, con daños graves, moderados y leves.

En el caso de los daños a las edificaciones considerando la matriz de Oliva (2000), se consideran únicamente los daños estructurales de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} G0 \\ G1 \\ G2 \\ G3 \\ G4 \\ G5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} * N_A + \begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} * N_B + \begin{bmatrix} C \end{bmatrix} * N_C \quad (2.31)$$

donde G0, G1, G2, G3, G4 y G5 son los grados de daños (G0 = sin daños, G1 = daños ligeros, G2 = daños moderados, G3 = daños considerables, G4 = daños graves y G5 = daños totales); [A], [B] y [C] son los coeficientes de la matriz para cada tipología constructiva (A, B, y C), según la escala MSK y dependen del grado de intensidad presente en el área. N_A, N_B y N_C son el número de edificaciones tipo A, B o C dentro de la manzana.

El resultado final de este procesamiento es el número de edificaciones dentro de la manzana en los cuales van a ocurrir daños de distinta magnitud para cada una de las tipologías constructivas descritas en la escala macrosísmica usada para generar la MPD. La cantidad de información útil es grande (ver tablas 2.26 y 2.27) y solo presentaremos en forma de gráficos y mapas algunos resultados.

En forma de gráfica se presentan en la figura 2.29 el resultado inmediato de la estimación de los daños para un grupo de manzanas del Distrito 26 de Julio. En la figura 2.30 se presenta el porcentaje de edificaciones dentro de la manzana (con respecto al total), que independientemente de su tipología constructiva sufrirán daños de grado 5 (destrucción total o colapso), mientras en la figura 2.31 se muestran de la misma forma los resultados para el grado de daño 3 (daños considerables).

Aunque en las escalas macrosísmicas la definición de los daños se realiza a partir de un procesamiento estadístico de estos en una población de edificaciones de distintos tipos y por tanto la extrapolación al caso puntual podría alejarse del caso “promedio” que es el que propone o describe la escala. El otro problema es que según la escala los daños tienen un carácter acumulativo, y al evaluar los daños en las edificaciones de forma puntual este concepto debe obviarse pues en una edificación pueden encontrarse al mismo tiempo daños de distinto grado. Esta problemática ya fue abordado por los autores en García et al. (2002), al obtener los daños en las instituciones del ministerio de Educación y Salud Pública en la ciudad de Santiago de Cuba. En aquel momento se decidió asociar a las edificaciones, de forma conservadora un índice de daño general, similar al grado de daño más alto que podrían ocasionar las sacudidas sísmicas según la definición de la MPD.

En este trabajo seguimos otro camino, calculando de forma individual todos los efectos que provocaría un valor de intensidad dado en una edificación aislada utilizando la ecuación 2.32:

$$G_j = P[G = j | i] \cdot P[i] \quad (2.32)$$

Donde el grado de daño G se expresa como la probabilidad condicional, ($P[G = j | i]$) de que se produzca un nivel de daño j dado un sismo de intensidad i , multiplicado por la probabilidad ($P[i]$) de obtener dicho sismo para un periodo dado y todo esto para cada nivel de daño, (G_j , con $j= 0, 1, 2, 3, 4, 5$) asociado a cada intensidad.

Para otorgarle un índice de daño total a la edificación ponderamos los distintos grados de daño de la siguiente manera:

$$G_t = \sum_{j=0}^5 G_j * W_k \quad (2.33)$$

donde G_t es el índice de daño total, G_j son los distintos grados de daño y W_k es el peso otorgado a cada uno de ellos. En la definición de los mismos se tuvo en cuenta la gravedad del daño, aumentando el valor del peso según sea el grado de daño, como se puede apreciar en la tabla 2.28.

Tabla- 2.28 Pesos otorgados a los diferentes grados de daños para la definición del índice total de daño.

Grado de daño	Peso
G-0	0.02
G-1	0.05
G-2	0.08
G-3	0.15
G-4	0.30
G-5	0.40

En la figura 2.32 se presentan los resultados obtenidos para el Consejo Popular Guillermon Moncada a partir del uso de la MPD propuesta por Oliva (2000), mientras que en la figura 2.33 se presentan los resultados de la estimación de los daños usando la MPD propuesta por SES (2002). Como se puede apreciar, no existen grandes diferencias entre los resultados obtenidos usando una u otra MPD, las diferencias se deben principalmente a que en la escala EMS se definen nuevos tipos de edificaciones (clases de vulnerabilidad), las cuales estaban agrupadas en la tipología C de la escala MSK y por ende se suponía tenían un mismo comportamiento.

Otro elemento que ayuda a mejorar el proceso de cálculo y los resultados, es la incorporación en el proceso de estimación de los daños a partir de la MPD de Oliva (2000), el estado técnico - constructivo de las edificaciones, algo innecesario al utilizar la segunda MPD (SES 2002) porque este criterio se tienen en cuenta al asignar a cada edificación su clase de vulnerabilidad (ver anexo 6).

Conclusiones.

1. Se proponen dos escenarios de riesgo a partir de los resultados obtenidos, el primero es una actualización del propuesto en García et al. (2002), mientras que el segundo utiliza como descriptor de la PS la aceleración pico del terreno, los efectos se modelaron a partir de la clasificación propuesta por la NEHRP (BSSC, 2001) y la EC8 (CEN, 2002) y los daños se obtendrían utilizando las funciones de vulnerabilidad obtenidas en el epígrafe 2.2 para las edificaciones “típicas” de la ciudad.
2. Del análisis de la susceptibilidad (habitacional y poblacional) de los bienes expuestos, se corrobora la necesidad de disminuir el grado de vulnerabilidad de los mismos. En el estado actual del fondo habitacional, no es necesario que ocurra un evento sísmico de gran potencialidad para que se registren pérdidas materiales y humanas considerables.
3. Se estimaron los daños a nivel de manzana para el Distrito 26 de Julio y a nivel de edificación para el Consejo Popular Guillermon Moncada, utilizando el primer escenario de riesgo a partir de la definición de 2 matrices de probabilidad de daño obtenidas según la definición de los daños descritos por las escalas MSK y EMS.
4. Los resultados obtenidos son generales y tienen un cierto grado de incertidumbre, debido a la indefinición de algunos parámetros que intervienen en el proceso de cálculo que fueron obtenidos de forma indirecta o a partir de juicios de expertos, y por lo tanto los autores aconsejan utilizar estos resultados como orientativos y no como un pronóstico.

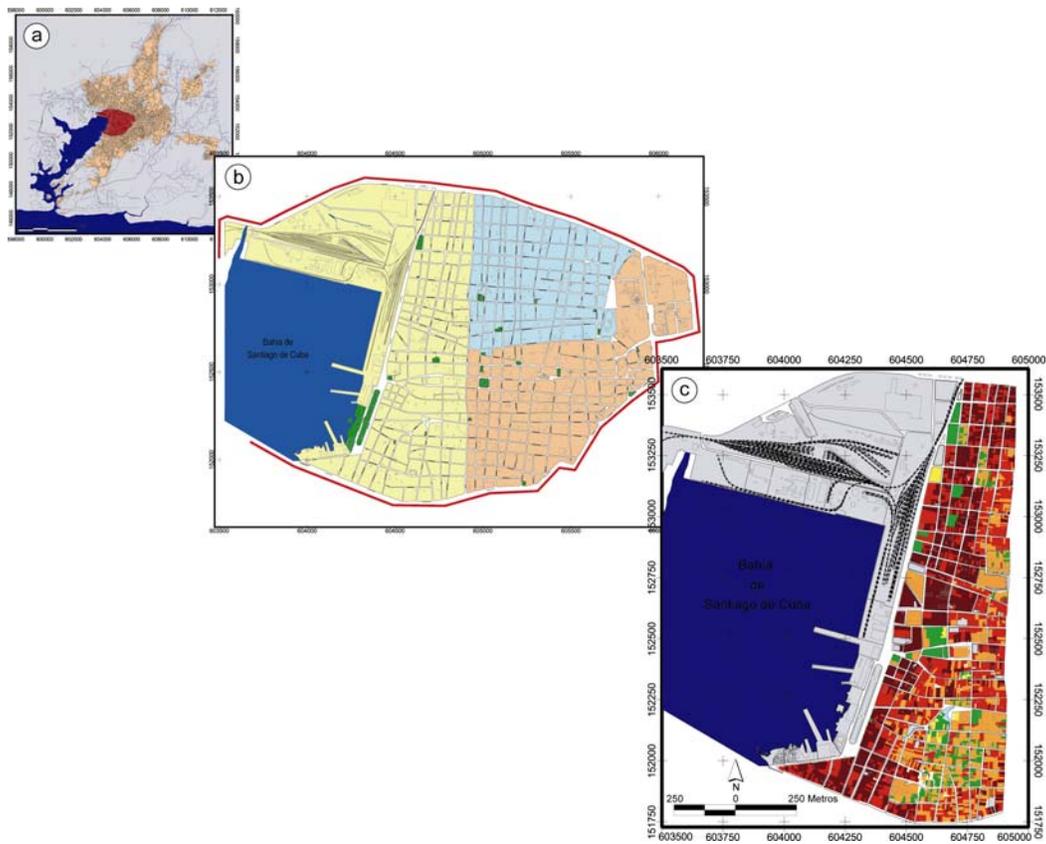


Figura. 2.18. Escalas de trabajo utilizadas para la estimación del riesgo: *a*)- toda la ciudad, *b*)- Distrito 26 de Julio y *c*)- Consejo Popular Guillermón Moncada.

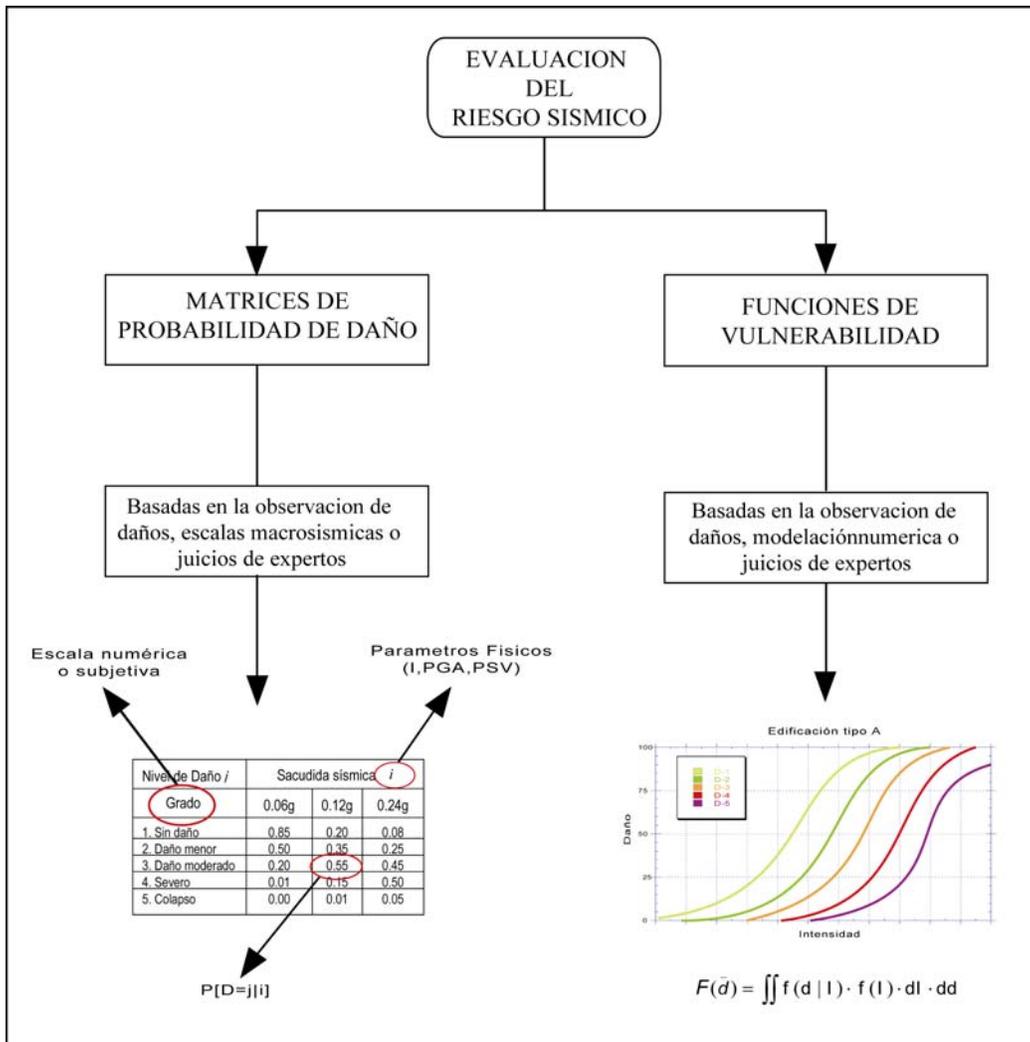


Figura. 2.19. Metodología propuesta para la estimación del riesgo.

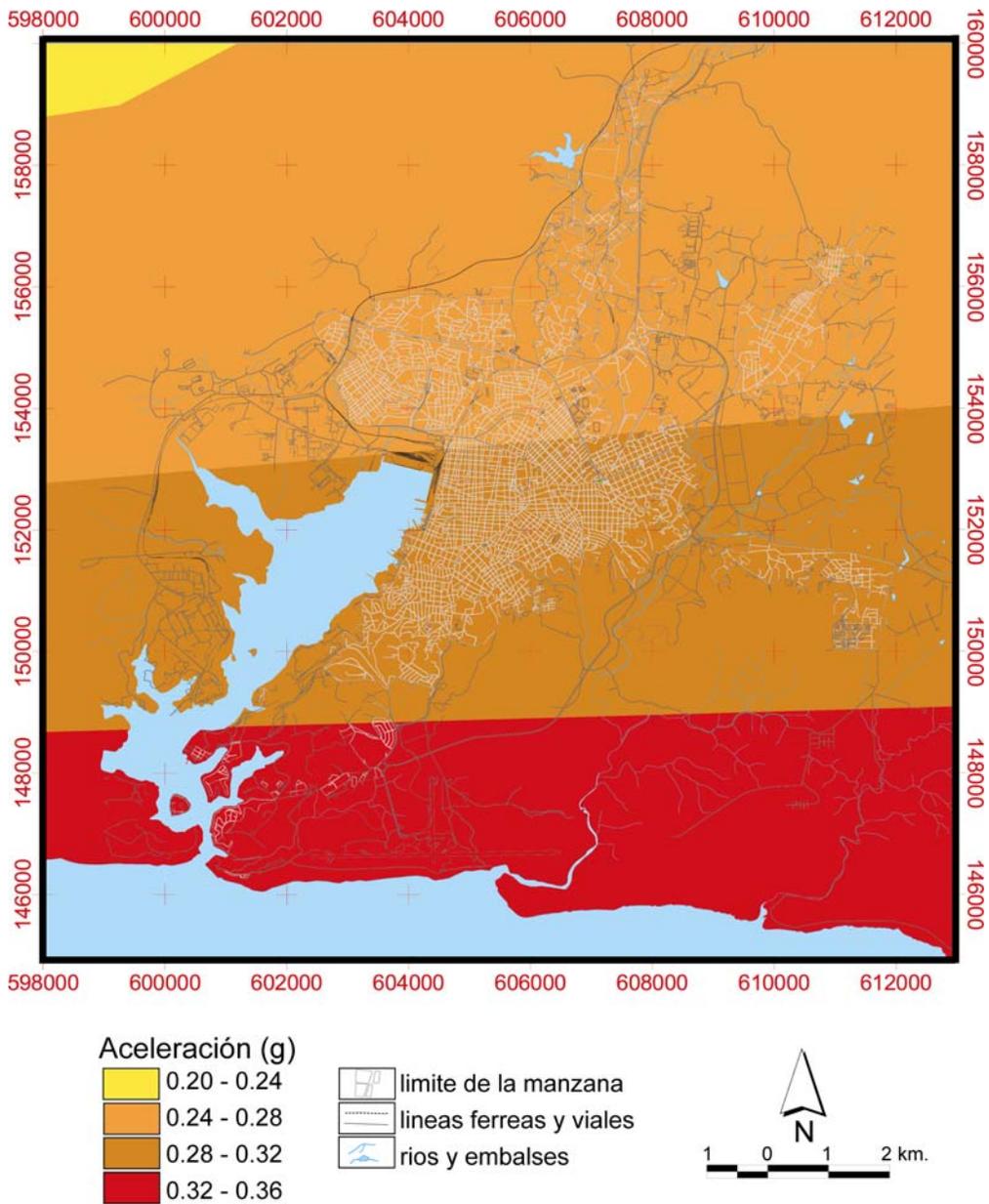


Figura. 2.20. - Estimados de peligrosidad sísmica en roca para un período de retorno de 475 años. El parámetro que caracteriza las sacudidas sísmicas es la aceleración pico del terreno (PGA) en unidades de g (aceleración de la gravedad).

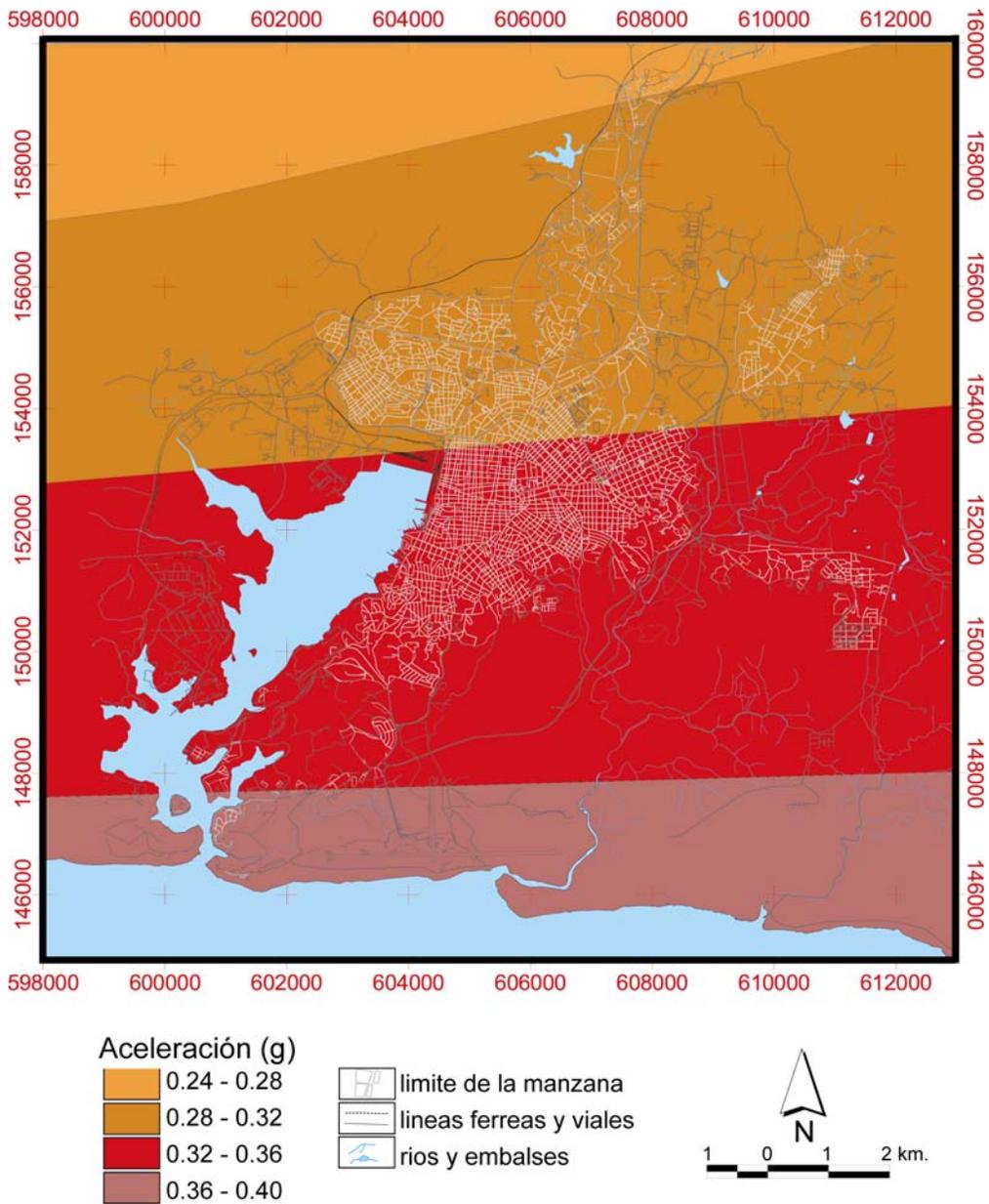


Figura. 2.21. Estimados de peligrosidad sísmica en suelos friables para un período de retorno de 475 años. El parámetro que caracteriza las sacudidas sísmicas es la aceleración pico del terreno (PGA) en unidades de g (aceleración de la gravedad)

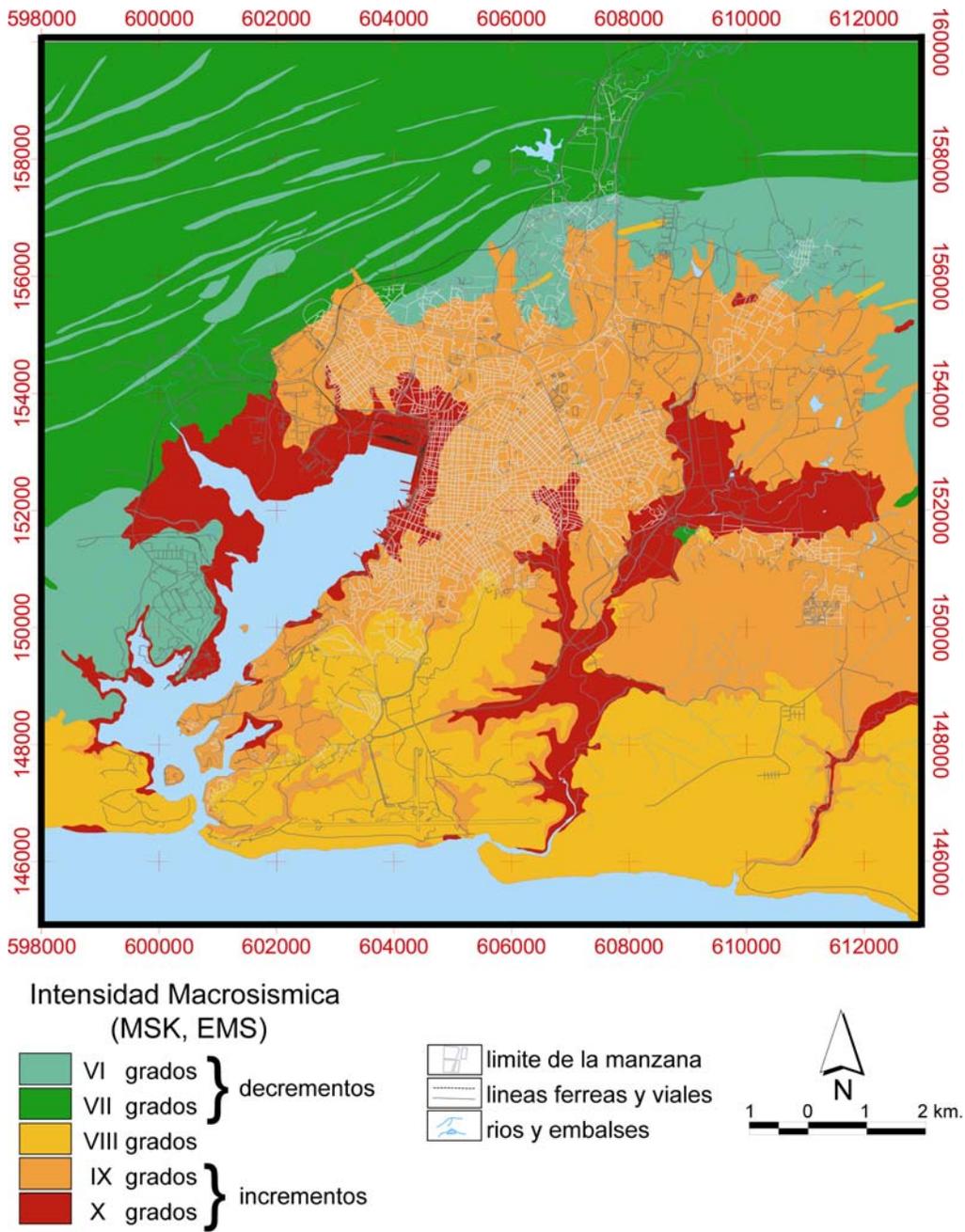


Figura. 2.22. Mapa de efecto de sitio (escenario A).

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

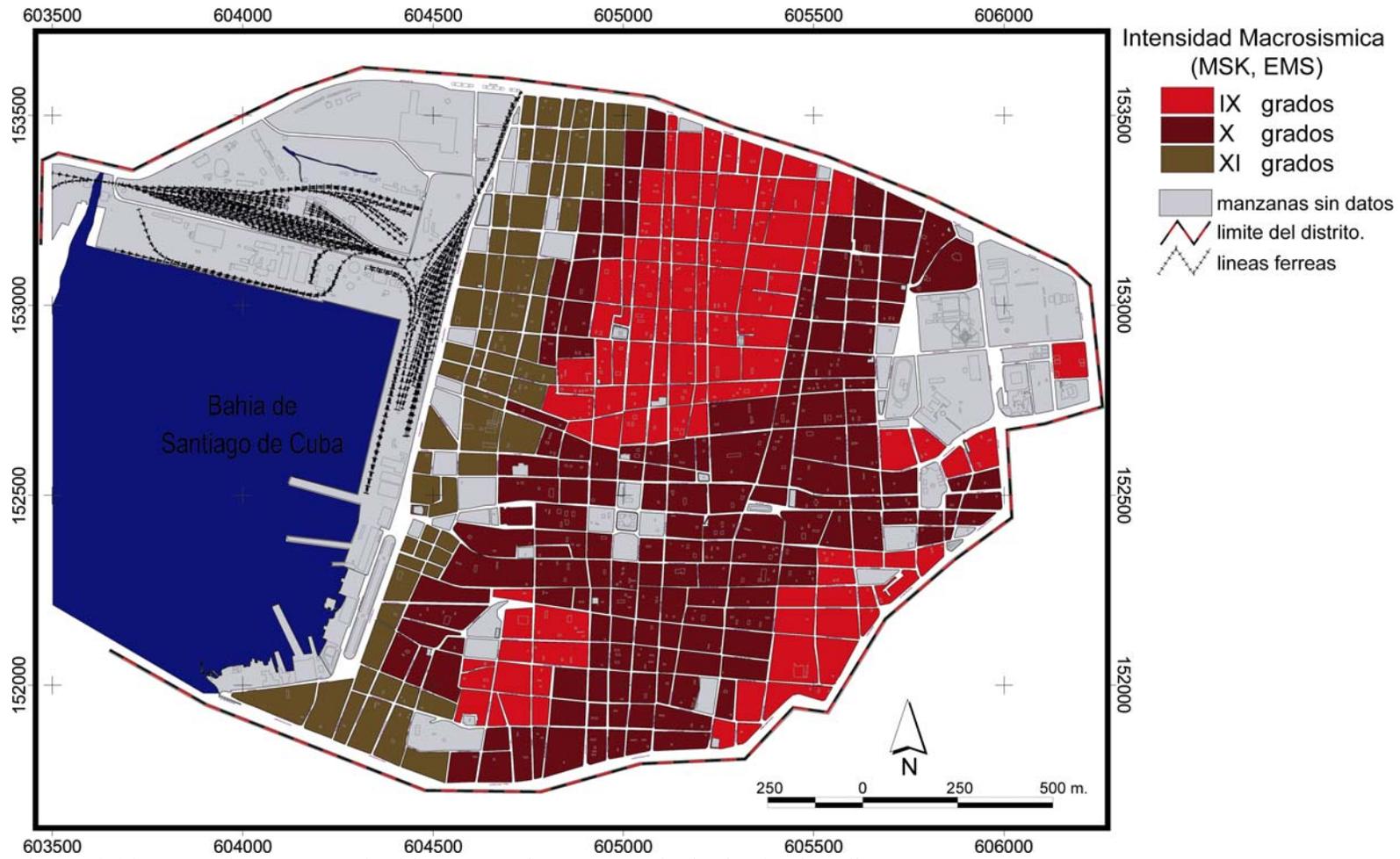


Figura. 2.23. Mapa de respuesta de sitio (escenario A), para el Distrito 26 de Julio.

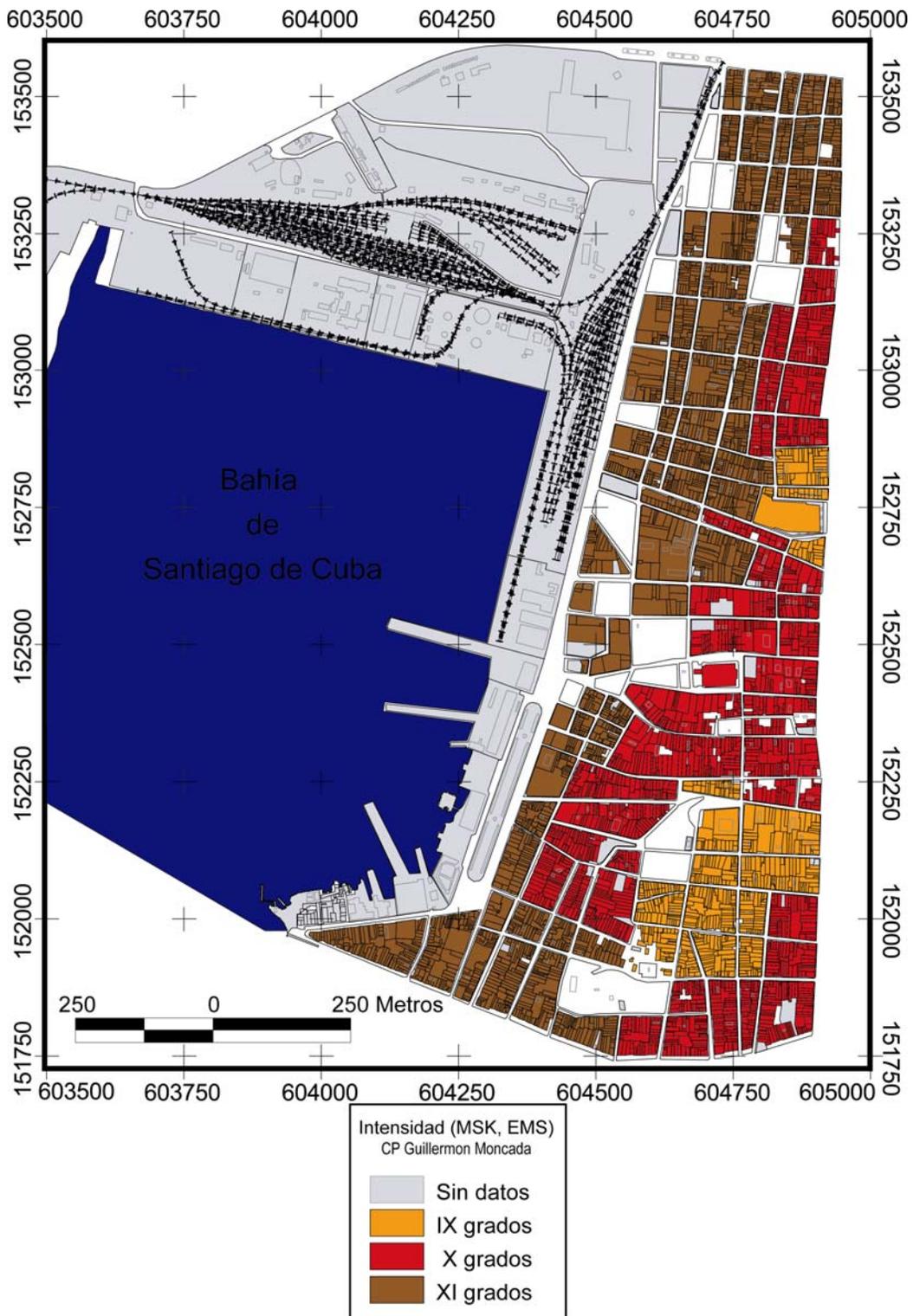
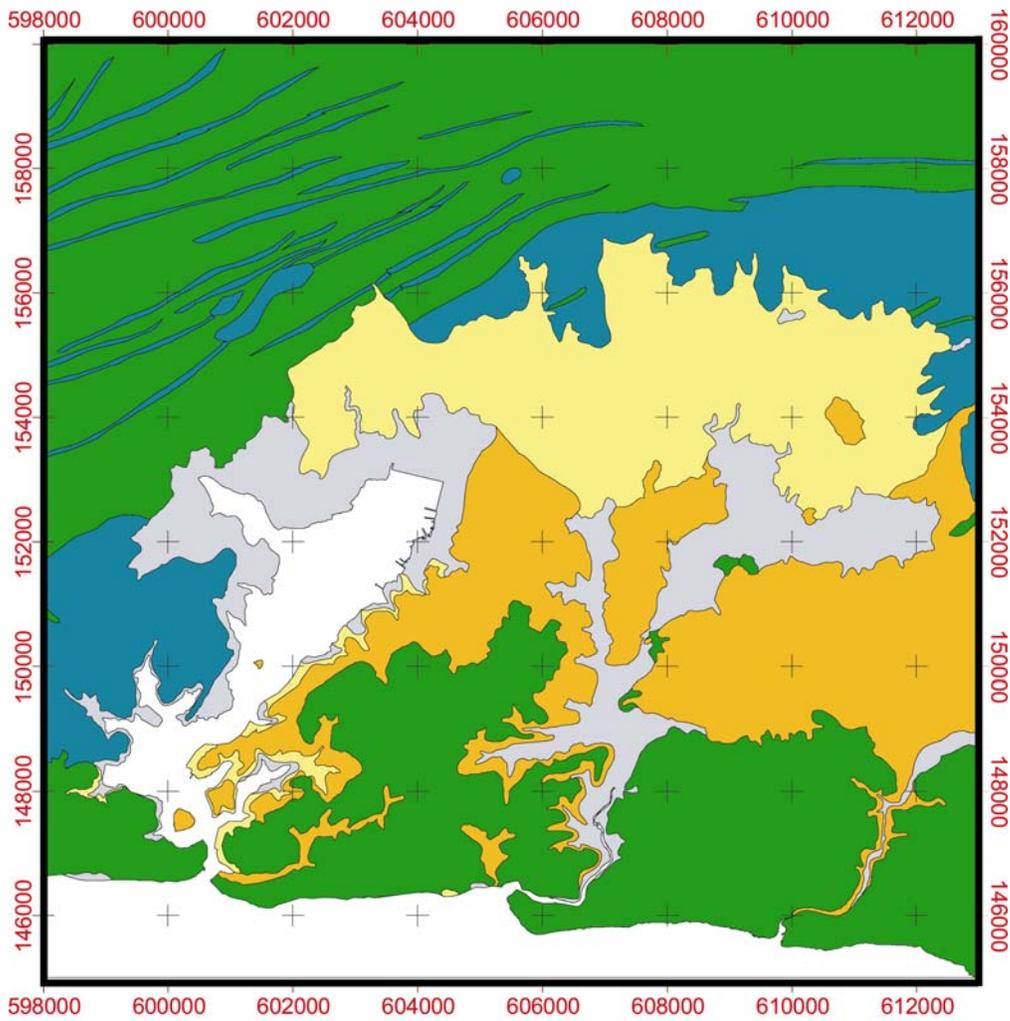


Figura. 2.24. Mapa de respuesta de sitio (escenario A), para el Consejo Popular Guillermon Moncada.



Clasificación de suelos

	NERHP - F_a	EC-8 - F_a	F_{a_u}
	A - 0.8	- - - -	0.8
	B - 1.0	a - 1.0	1.0
	C - 1.2	b - 1.2	1.2
	D - 1.6	c - 1.15 - 1.4	
	E - 2.5	d - 1.35 - 1.9	

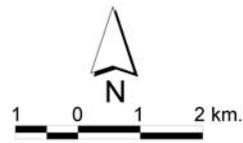


Figura. 2.25. Clasificación de los suelos presentes en el área de estudio a partir de la propuesta de la NEHRP (BSSC, 2001) y el EC8 (CEN, 2002). En la leyenda, F_a se significa: factor de amplificación del suelo y F_{a_u} el factor de amplificación utilizado en este trabajo.

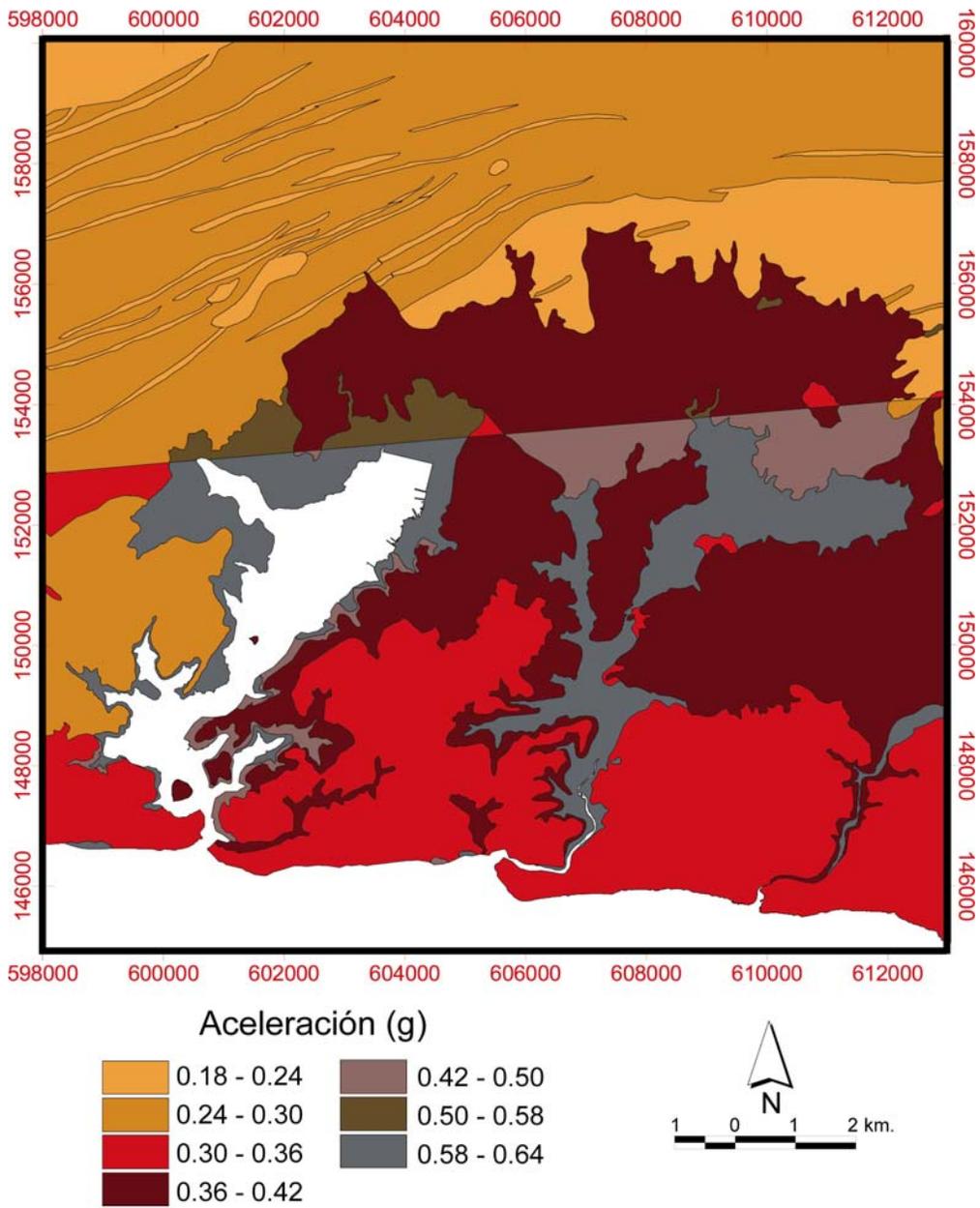


Figura. 2.26. Mapa de respuesta de sitio (escenario B).

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

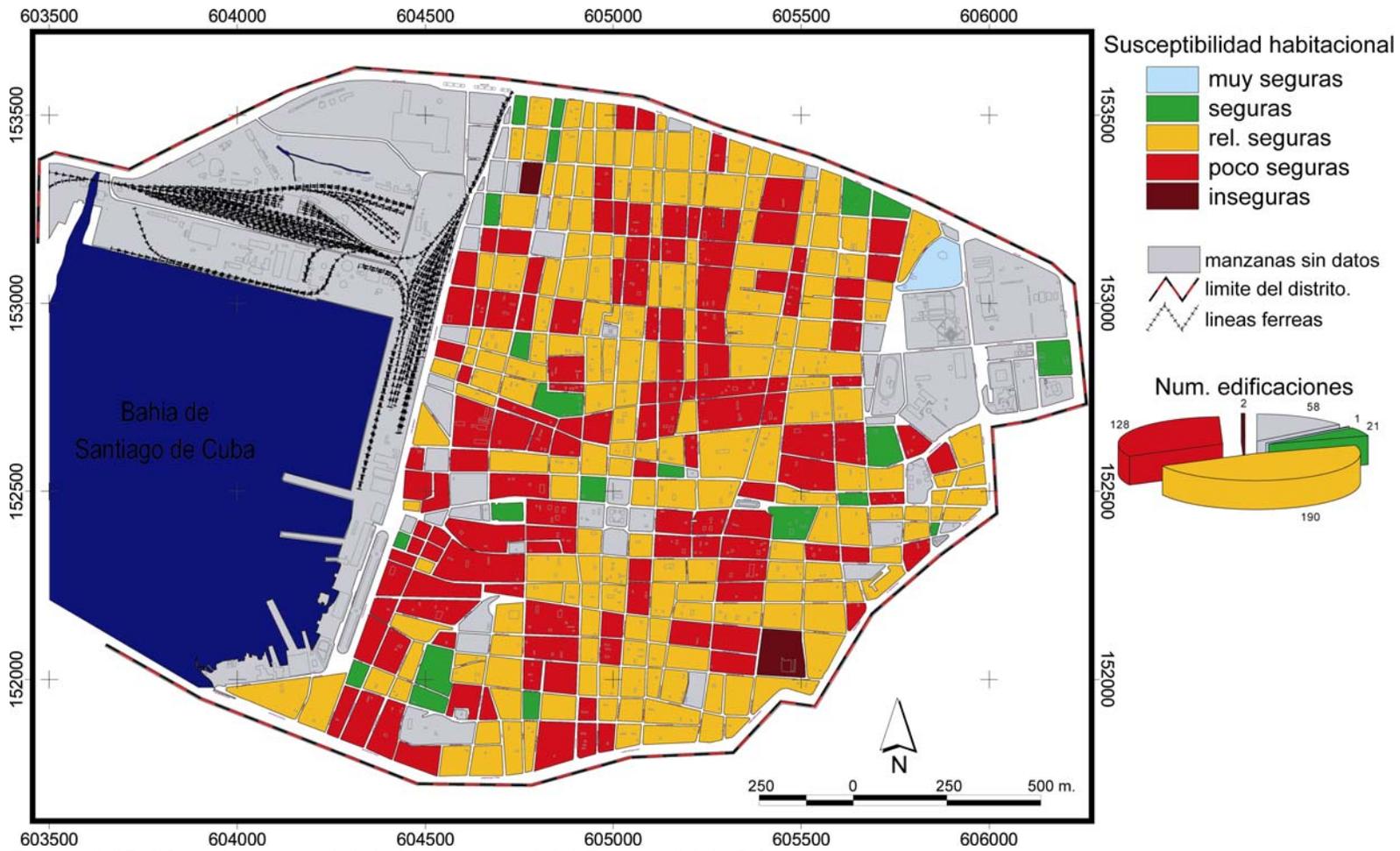


Figura. 2.27. Mapa de susceptibilidad habitacional del Distrito 26 de Julio.

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

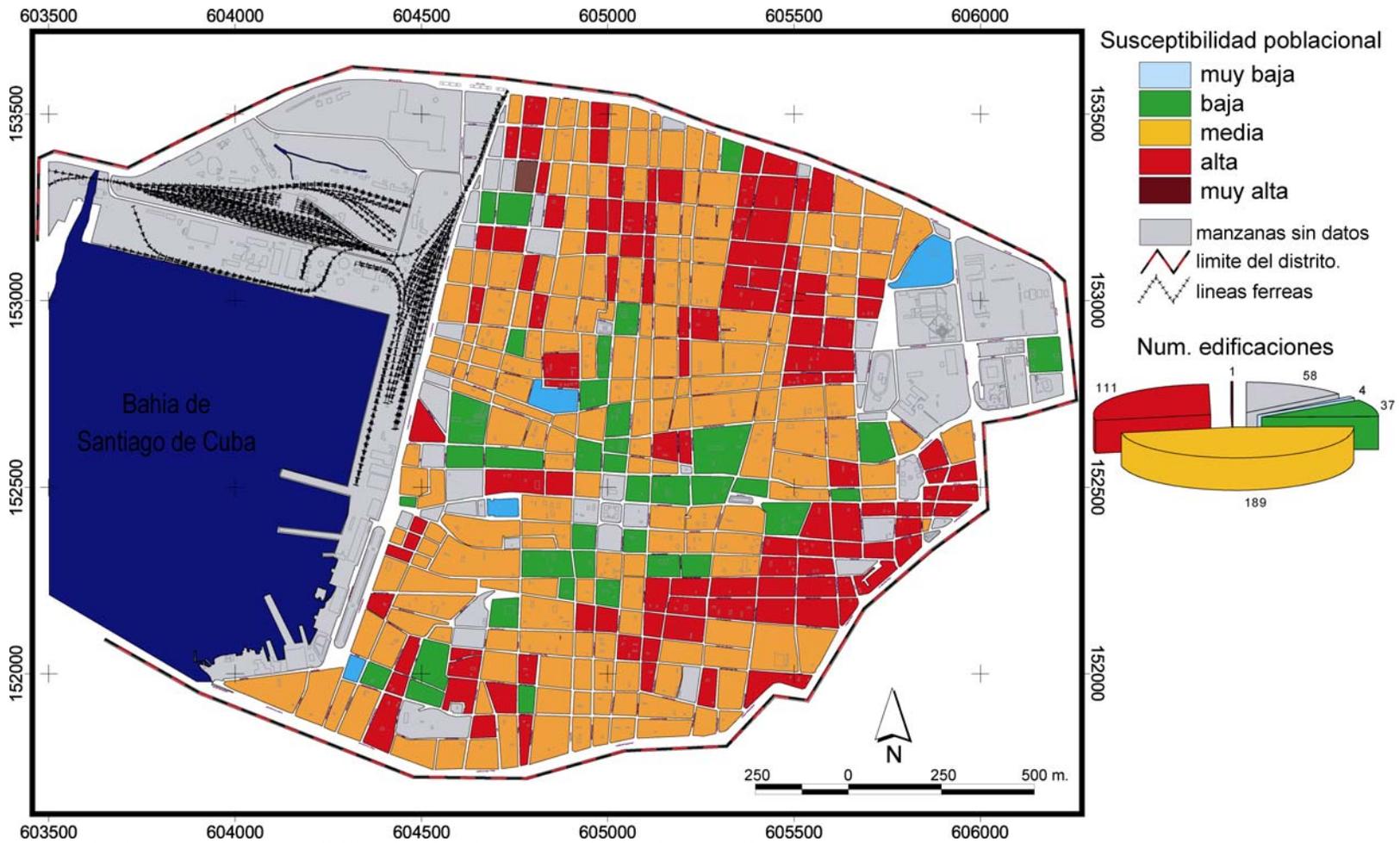


Figura. 2.28. Mapa de susceptibilidad poblacional del Distrito 26 de Julio.

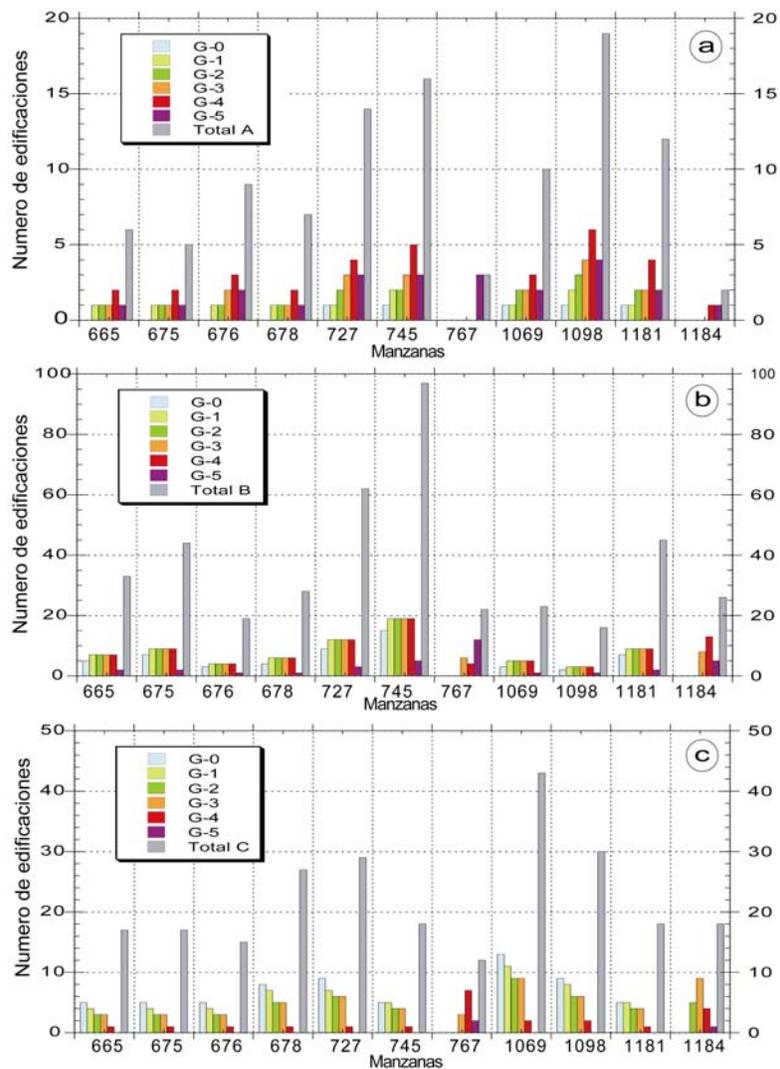


Figura. 2.29. Resultados de la estimación de los daños por tipología constructiva, para un grupo de manzanas del Distrito 26 de Julio, utilizando la MPD propuesta por Oliva (2000). G-0, G-1, G-2, G-3, G-4, y G-5 son los grados de daños, Total A, B y C es el numero de edificaciones de cada tipología presentes en la manzana.

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

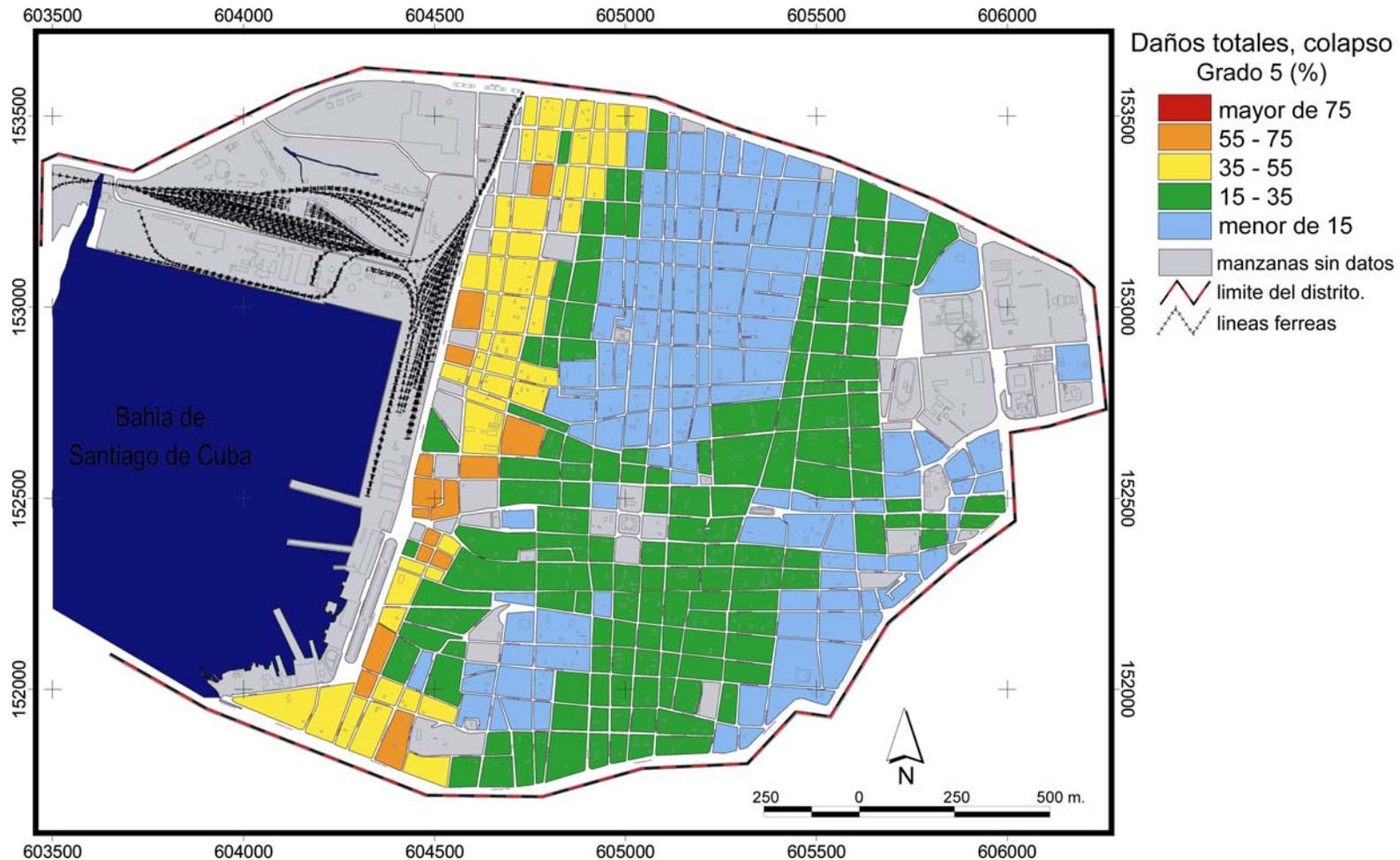


Figura. 2.30. Porcentaje de edificaciones dentro de la manzana (con respecto al total) donde ocurren daño de grado 5, independientemente de su tipología constructiva..

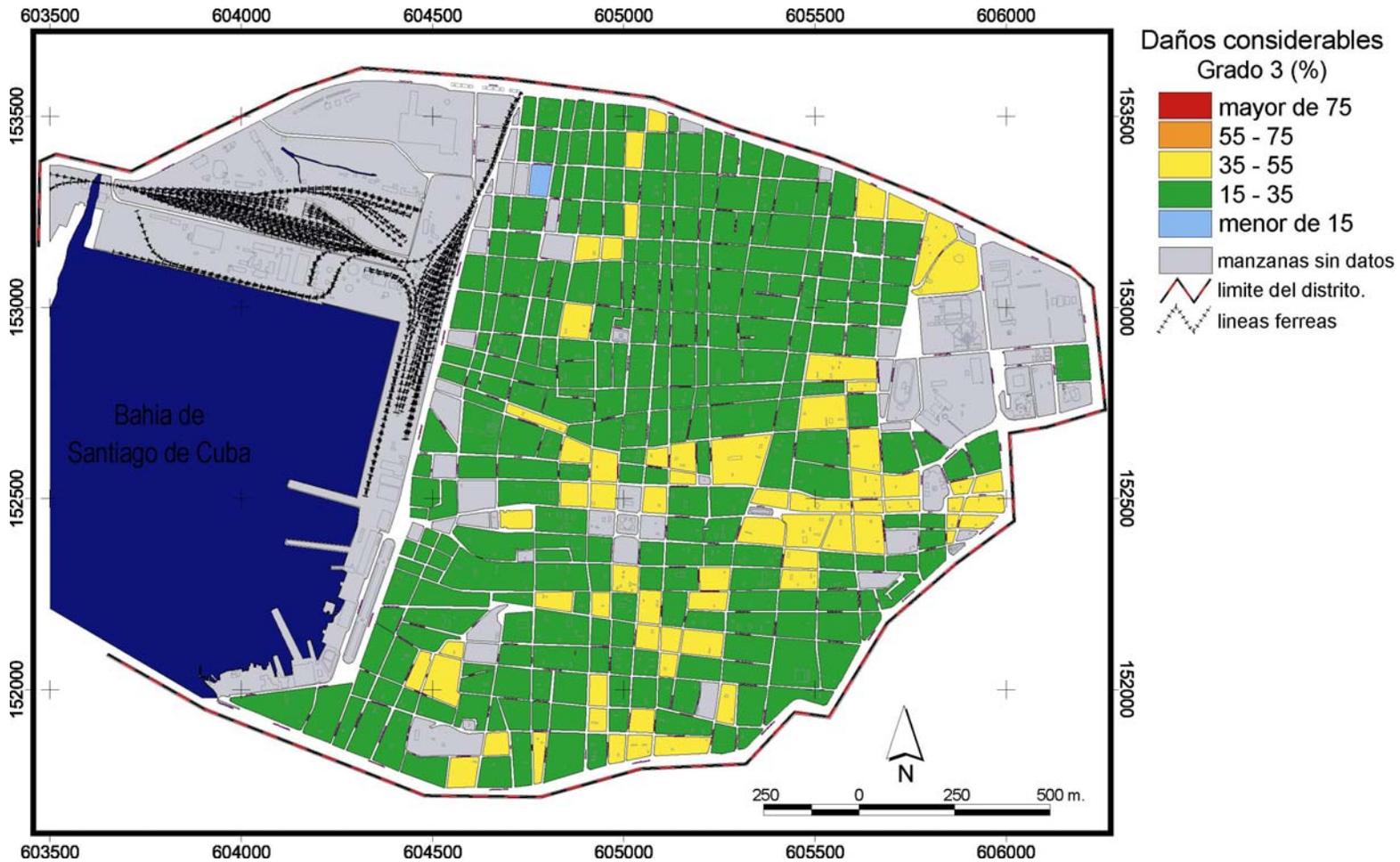


Figura. 2.31. Porcentaje de edificaciones dentro de la manzana (con respecto al total) donde ocurren daño de grado 3, independientemente de su tipología constructiva.

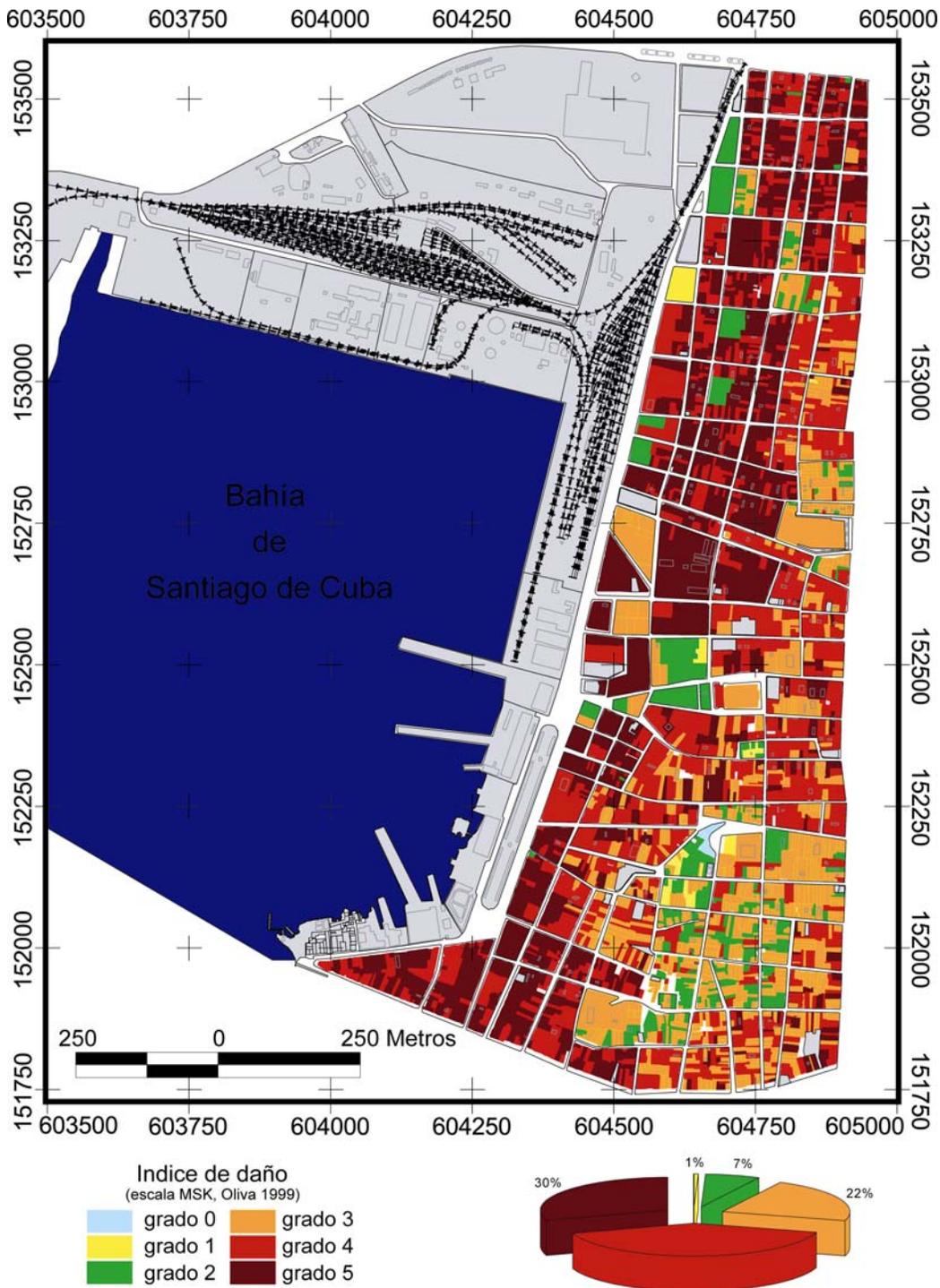


Figura. 2.32. Estimación de los daños en las edificaciones del Consejo Popular Guillermón Moncada, usando la MPD propuesta por Oliva (2000).

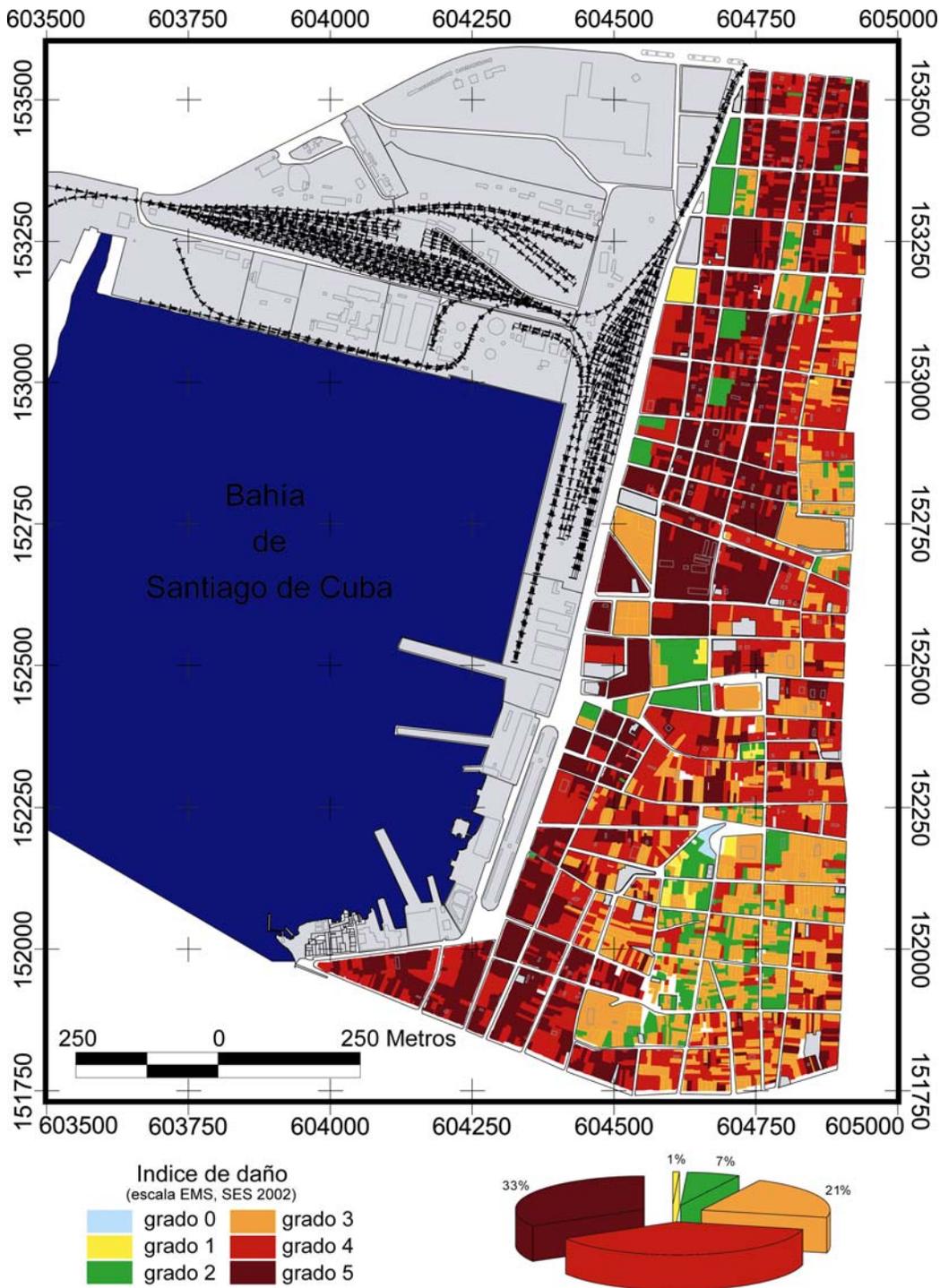


Figura. 2.33. Estimación de los daños en las edificaciones del Consejo Popular Guillermón Moncada, usando la MPD propuesta por SES (2002).

2.6 Estimación de las pérdidas potenciales y propuestas de mitigación del riesgo.

Julio A. García Peláez¹

¹Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS)

La culminación de un estudio de riesgo sísmico implica la estimación de las pérdidas económicas (directas o indirectas) y humanas que podrían ocasionar los daños asociados a la ocurrencia de un terremoto de moderada o gran intensidad.

Pérdidas económicas.

En este trabajo, las posibles pérdidas materiales se obtuvieron a partir del cálculo del costo de reposición de los daños estimados en el epígrafe anterior, de la misma manera que en García et al. (2002). En la tabla 2.29 se muestran los valores propuestos por el programa para el desarrollo tecnológico de la vivienda en el período 1997 – 2000 para las distintas tipologías constructivas definidas por el Instituto Nacional de la Vivienda (INV)

En el caso de la clase E (escala EMS) la cual no forma parte de esta clasificación tuvimos en cuenta dos aspectos: 1- de forma general la introducción de medidas antisísmicas en las edificaciones es superior al 10% del costo inicial, 2- este valor depende del grado de intensidad para el cual se diseñen las estructuras (mientras mas alto sea este mas costosa será la construcción). Tomando en cuenta la opinión de especialistas expertos en Ingeniería Civil pertenecientes al MICONS y a la DCN decidimos obtener el costo de reposición de esta tipología aumentando un 30% el costo de reposición de la tipología C.

Tabla 2.29- Costo de reposición de las viviendas según su tipología constructiva.

Costo de reposición		DAU	MSK	EMS
MN(en miles)	CUC(en miles)			
22	2.0			D
17	1.5	I	C	C
14	1.2	II	B	B
10	0.8	III	B	B
8	0.6	IV	A	A
6	0.5	V	A	A

Los valores de la tabla 2.29 se refieren al costo total de reposición de las edificaciones; por lo tanto es necesario definir que porcentaje de este costo se espera que “se pierda” al ocurrir cierto grado de daños. En la tabla 2.30 se presentan los valores propuestos.

Tabla 2.30- Variación del costo de reposición de los daños según la intensidad de los mismos.

Índice de daño	% del costo de reposición	Valor medio
Sin Daños	0	0
Daños Ligeros	0.1 – 0.2	0.15
Daños Moderados	0.2 – 0.4	0.30
Daños Considerables	0.4 - 0.6	0.50
Daños Graves	0.6 – 0.8	0.70
Daños Totales	0.8 – 1.0	0.90

Las pérdidas materiales se obtuvieron entonces como:

$$P_k = c_i \cdot I_k \quad (2.34)$$

donde P_k son las pérdidas monetarias según la tipología constructiva k , c_i es el costo total de reposición e I_k es la variación del costo total de reposición según el grado de daño esperado.

De esta manera fue posible obtener las pérdidas económicas o materiales **directas** relacionadas con la estimación de los daños estructurales que sufren las edificaciones del área de estudio (Distrito 26 de Julio y CP Guillermón Moncada), utilizando las dos MPD descritas en el epígrafe anterior.

En la figuras 2.34 y 2.35 se presentan las pérdidas económicas totales, valoradas en pesos cubanos y CUC para el Distrito 26 de Julio, mientras que en la figura 2.36 se presentan únicamente las pérdidas ocasionadas por los daños de grado 3 en todas las edificaciones independientemente de su tipología constructiva. Es posible representar también las pérdidas parciales (ver figura 2.37) ocasionadas por un nivel de daño específico en cada una de las tipologías constructivas presentes en el área de estudio.

En las figuras 2.38 hasta la 2.41 se presentan las pérdidas monetarias (expresadas en miles de pesos y CUC) para las edificaciones del CP Guillermón Moncada. En este caso utilizamos la estimación de los daños obtenida usando ambas MPD [Oliva (2000) y SES (2002)]. Al igual que para el Distrito 26 de Julio es posible obtener las pérdidas parciales por tipologías constructivas y niveles de daños. Toda esta información esta almacenada en forma de tablas dentro del SIG.

Pérdidas humanas.

Para estimar pérdidas esperadas en la población se utilizó la variante metodológica propuesta en el epígrafe 2.1, obteniéndose el número de personas fallecidas (figura 2.42), el número total de heridos (figura 2.43), el número de heridos de acuerdo a la severidad de los daños sufridos (S1, figura 2.44, S2, figura 2.45 y S3, figura 2.46), así como el número de personas sin hogar (figura 2.47).

En este caso solo fue posible obtener las pérdidas para el Distrito 26 de Julio, debido a que no contamos con la información necesaria (número de habitantes por edificación) para obtener los resultados a esta escala de detalle en otras partes de la ciudad. Preferimos esperar a que este disponible esta información a usar valores aproximados (como la media) que alejarían demasiado el escenario de la realidad.

Mitigación del riesgo sísmico.

Por **mitigación del riesgo sísmico** se entiende “cualquier acción preventiva que se toma antes de la ocurrencia de un fenómeno natural destructivo intentando reducir sus consecuencias”. En otras palabras, son todas las medidas ejecutadas para incrementar la resistencia de las edificaciones, mejorando su comportamiento ante las sacudidas sísmicas, la seguridad de las personas y por ende la reducción de las pérdidas económicas y su impacto social (Sauter, 1996). Como se señaló anteriormente, el cálculo del riesgo sísmico depende tanto de la peligrosidad sísmica del sitio como de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras.

Es evidente que la peligrosidad sísmica es un elemento poco modificable ya que es un factor que depende de la naturaleza. Sin ser fatalistas, en este sentido solo podemos mejorar las técnicas de estimación de la misma, disminuyendo con el desarrollo del conocimiento científico sobre esta temática y sobre los parámetros que intervienen en el proceso de cálculo, las incertidumbres que hasta el momento pesan sobre los resultados finales obtenidos. Sin embargo, sí se puede decidir edificar las estructuras en zonas lo suficientemente alejadas de las fallas, de zonas con suelos desfavorables (rellenos o pocos consolidados), de zonas donde puedan ocurrir fenómenos físico - geológicos catalizados por los terremotos como los deslizamientos, avalanchas o liquefacción .

La vulnerabilidad sísmica de las edificaciones (cualquiera de sus tipos) es un factor importante en el análisis del riesgo y la mitigación de los daños, debido a que su modificación se encuentra más al alcance de hombre. Existen en la actualidad muchos trabajos sobre rehabilitación de edificaciones de distintos tipos; los métodos utilizados son costosos, pero funcionales. En cambio, el cambio de uso del edificio, por ejemplo, es una medida poco costosa y, en el caso de edificios nuevos, aplicando correctamente las normas sismorresistentes y utilizando materiales de buena calidad pueden lograrse buenos resultados.

Para el caso de los edificios construidos se necesita realizar un estudio económico costo - beneficio, para decidir la factibilidad de su rehabilitación, readecuación, cambio de uso o destino, mejoramiento o demolición futura.

Otras estrategias para la mitigación del riesgo que se pueden aplicar a las zonas urbanas es evitar las grandes concentraciones en zonas cuya peligrosidad sísmica sea alta. Para esto las dependencias del Instituto de Planificación Física y/o urbanización, junto la Oficina Nacional de Estadísticas, deben proporcionar datos confiables de las áreas con una mayor densidad y sobre todo de la evolución del crecimiento de la población, lo cual permitirá hacer planes a largo plazo, mientras que los estudios de movilidad, emigración o población “flotante” (Martí, 2000), permitirán hacer planes a corto plazo. Además, los resultados de los estudios de riesgo sísmico, proporcionarán las zonas donde se requiera construir centros de atención y socorro frente a catástrofes, espacios abiertos que sirvan como zonas de refugio, rutas de evacuación, rutas por donde puedan entrar los equipos de rescate, etc.

En García *et al.* (2002) se propusieron un conjunto de medidas para la reducción de la vulnerabilidad sísmica y la mitigación del riesgo que no creemos ocioso repetir aquí, a partir de que el escenario pre - desastre en nuestra opinión no ha cambiado.

Medidas generales para reducir la vulnerabilidad sísmica y la mitigación del riesgo.

Medidas de Planificación Física.

1. Aplicación de los conocimientos existentes sobre PS y riesgo en el proceso de planificación urbana y el uso del suelo.
2. Destinar las zonas más peligrosas para parques y/o la agricultura urbana.
3. Incorporar en el proceso de planificación urbana la dimensión medio ambiental y de prevención de desastres.
4. Aplicación de un sistema de control que haga cumplir todo lo reglamentado y legislado para el uso del suelo.
5. Planificación y administración adecuada del medio ambiente que incluya la gestión de los recursos naturales y los peligros medio ambientales.

Medidas de construcción e ingeniería.

1. Ubicar los nuevos proyectos constructivos en zonas favorables desde el punto de vista sísmico.
2. Cumplimiento del código sismorresistente vigente.
3. Seguir realizando estudios de vulnerabilidad a las edificaciones existentes, teniendo en cuenta el período de vibración de las mismas y el del suelo de cimentación, así como la aceleración puntual del sitio.
4. Crear un sistema de control externo de la calidad de las construcciones para garantizar la seguridad sísmica.
5. Reducir la vulnerabilidad de las construcciones de los sistemas vitales.
6. Cumplir los requerimientos sismorresistentes para el mejor comportamiento sísmico de las viviendas de "bajo costo".
7. Crear un sistema de información automatizado que facilite la gestión de planificación urbana y de ingeniería en la toma de decisiones.
8. Incluir en el concepto de alerta temprana el mejoramiento técnico – constructivo del fondo habitacional.
9. Desarrollo de técnicas ingenieriles para la absorción de la energía que le transmite el sismo a las edificaciones.
10. Facilitar el intercambio de experiencias, conocimientos y tecnologías entre los especialistas cubanos y de otros países.
11. Trasladar o reforzar los centros que manipulen o almacenen sustancias peligrosas que al escaparse puedan crear situaciones de desastres.

Medidas económicas.

1. Destinar recursos para la prevención y reducción de la vulnerabilidad sobre todo en hospitales y escuelas, viviendas y líneas vitales.
2. Destinar recursos para la rehabilitación del fondo habitacional de la ciudad.
3. Utilización de la vía del seguro como forma de implementar medidas de mitigación.
4. Destinar parte del presupuesto estatal para la reducción de las posibles consecuencias de un desastre natural en la ciudad.

Medidas administrativas e institucionales.

1. Formación y capacitación de los recursos humanos de las instituciones locales en la prevención y mitigación de los desastres.
2. Integración de las medidas de prevención, mitigación y preparación en la planificación y el proceso presupuestario relacionado con el desarrollo.
3. Preparar proyectos de evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo o de prevención y preparación en caso de desastres, especialmente en áreas de mayor riesgo.
4. Incorporar la prevención y la mitigación de los desastres en los proyectos de desarrollo existentes.
5. Crear y desarrollar una cultura institucional de prevención y mitigación de los desastres y disminuir la emergencial.
6. Aplicación las medidas recomendadas en este informe por las instituciones pertinentes e incorporarlas al plan de medidas en caso de terremotos moderados y fuertes.

Conclusiones.

1. Se estimaron las pérdidas potenciales, tanto materiales como humanas resultantes de la estimación de los daños usando el escenario de riesgo propuesto en el epígrafe 2.5.
2. Las pérdidas materiales se obtuvieron a partir del costo de reparación de los daños estimados usando las matrices de probabilidad de daño propuestas por Oliva (2000) y SES (2002). Se logra con este método diferenciar las pérdidas por tipología constructiva y grado de daño que experimentan las edificaciones.
3. Se obtuvieron las pérdidas potenciales en la población utilizando la metodología propuesta en el epígrafe 2.1.
4. Se proponen un grupo de medidas para disminuir la vulnerabilidad de las construcciones y la mitigación del riesgo.

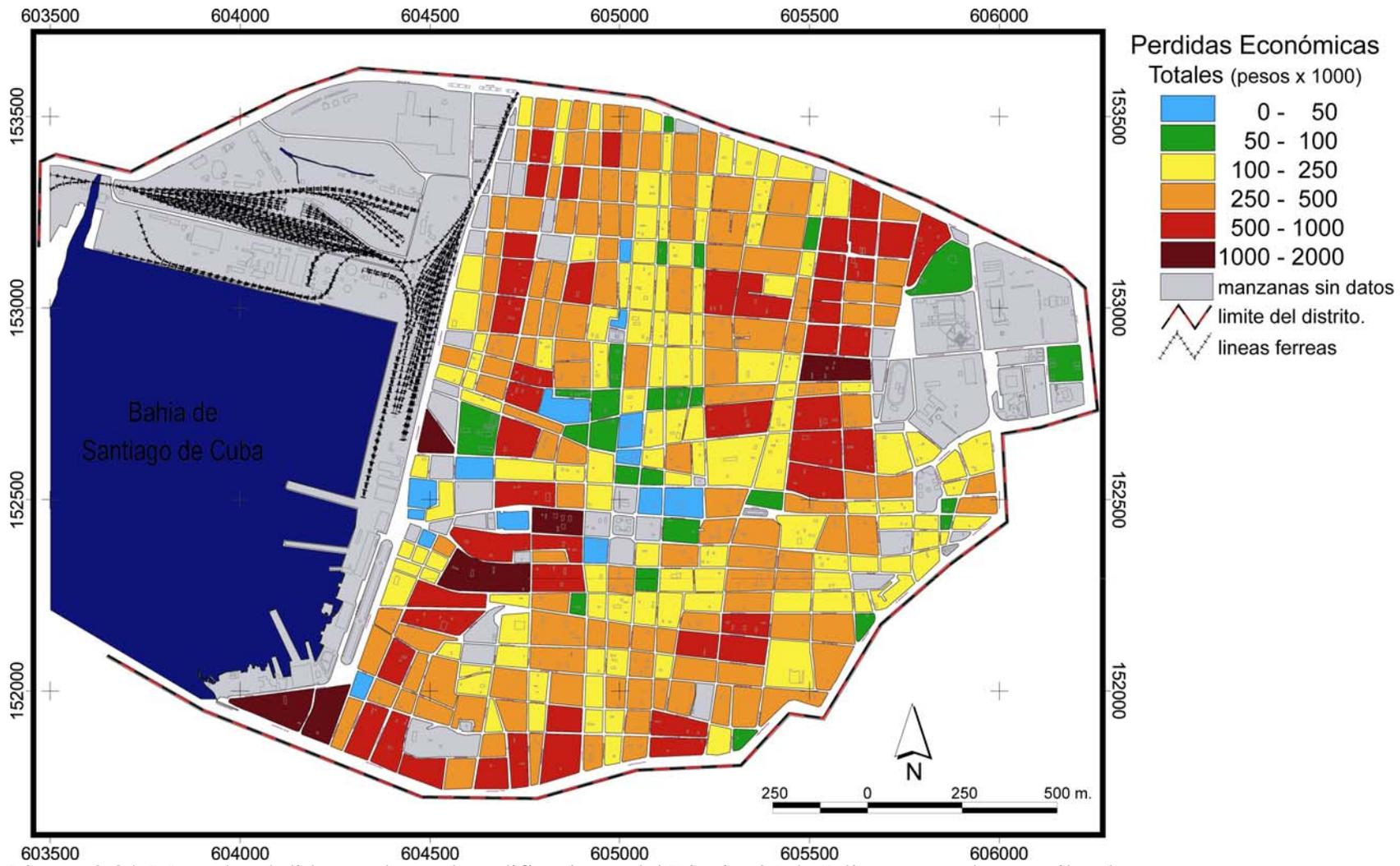


Figura. 2.34. Mapa de pérdidas totales en las edificaciones del Distrito 26 de Julio, expresadas en miles de pesos.

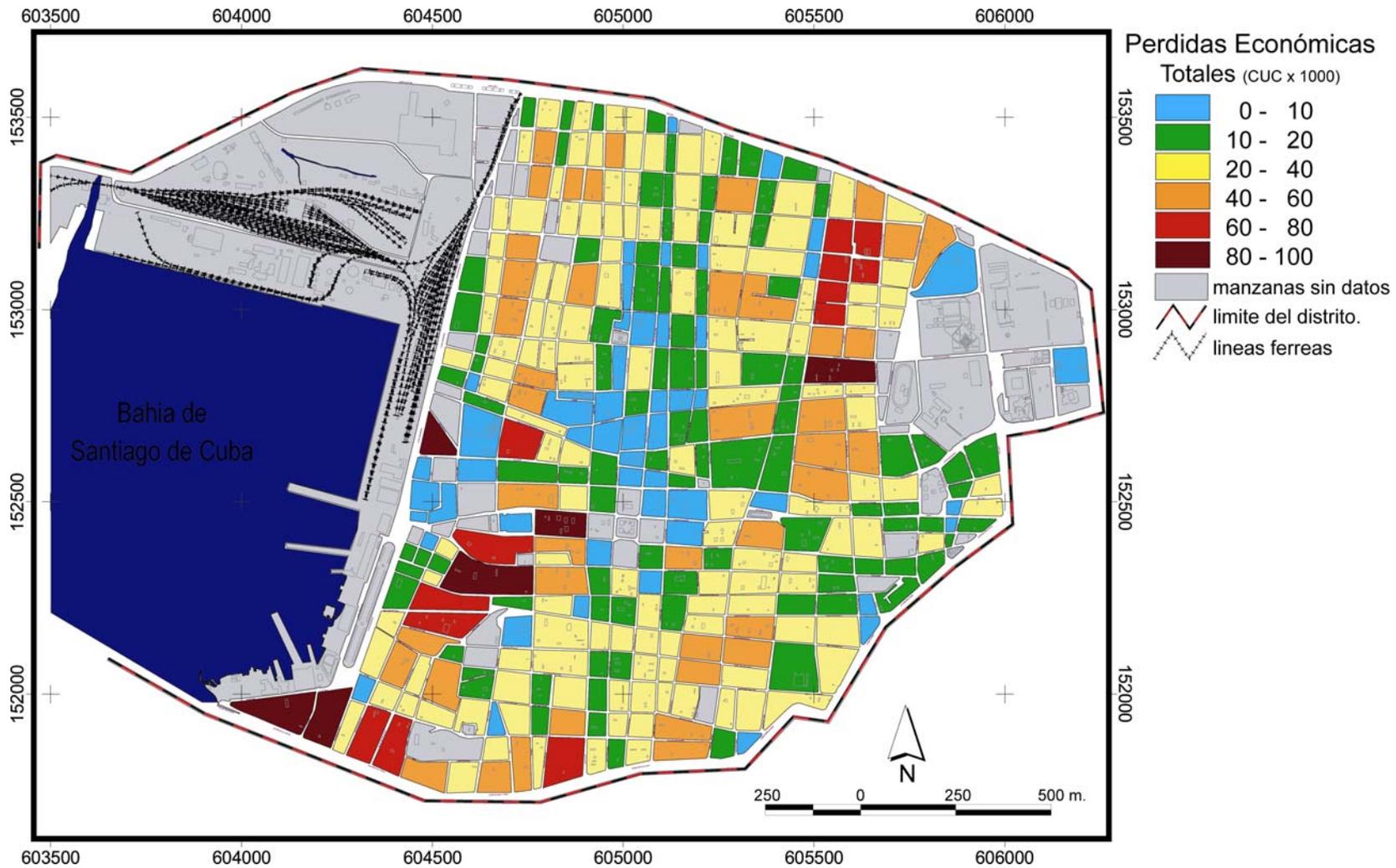


Figura. 2.35. Mapa de pérdidas totales en las edificaciones del Distrito 26 de Julio, expresadas en miles de CUC.

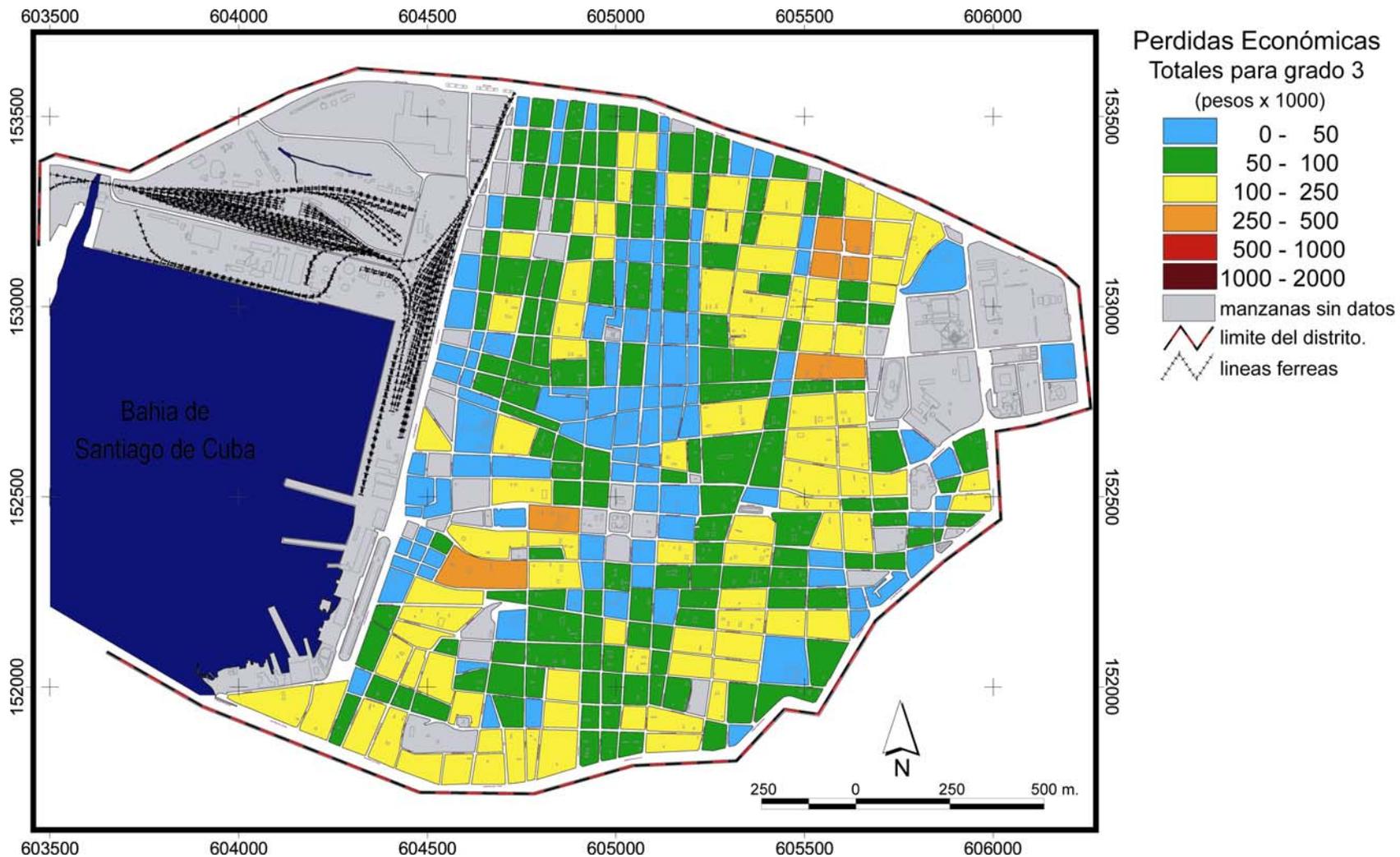


Figura. 2.36. - Mapa de pérdidas totales ocasionadas por daños de grado 3 en las edificaciones del Distrito 26 de Julio, expresadas en miles de pesos.

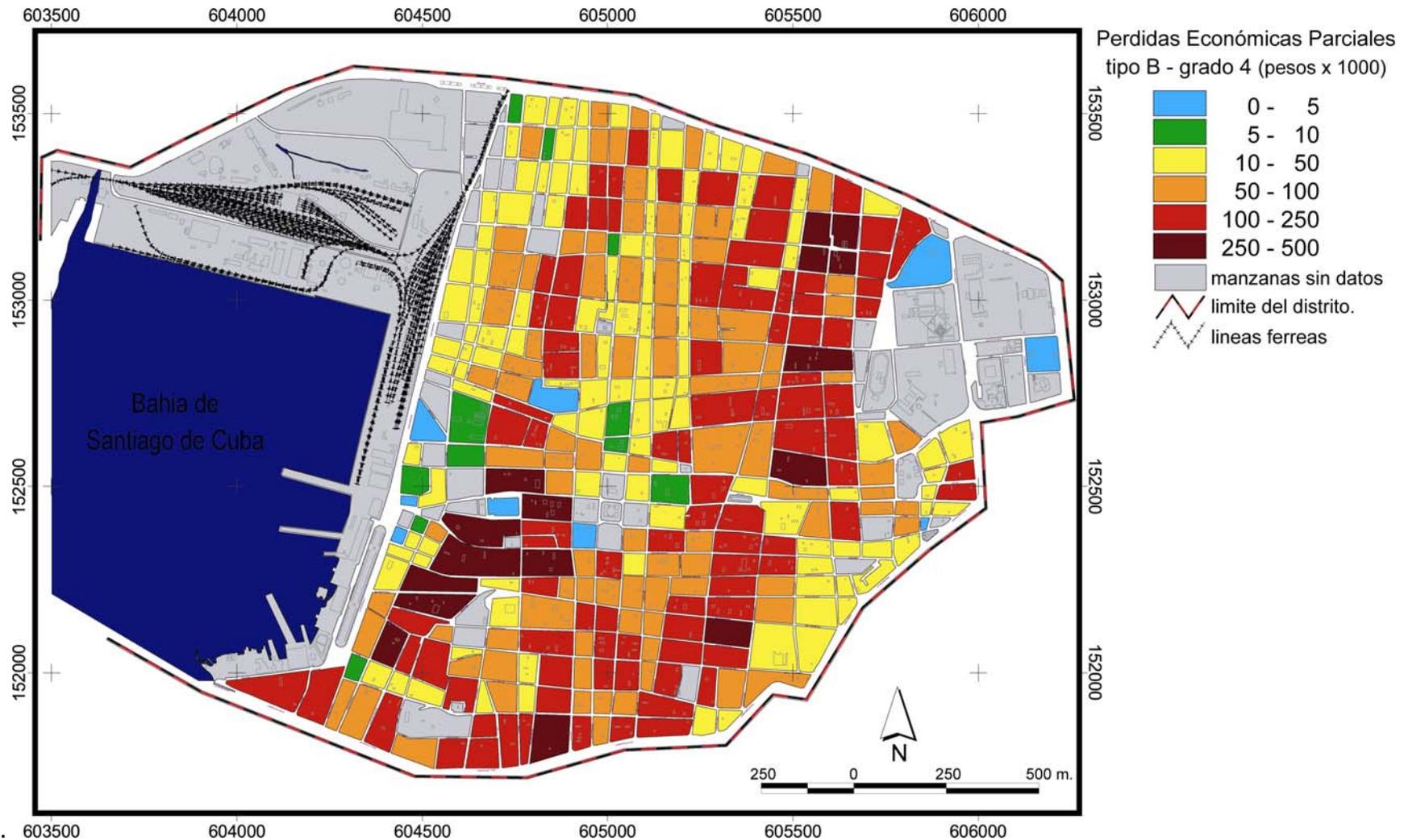


Figura. 2.37. Mapa de pérdidas Parciales ocasionadas por daños de grado 4 en las edificaciones de tipología B (escala MSK), del Distrito 26 de Julio, expresadas en miles de pesos.

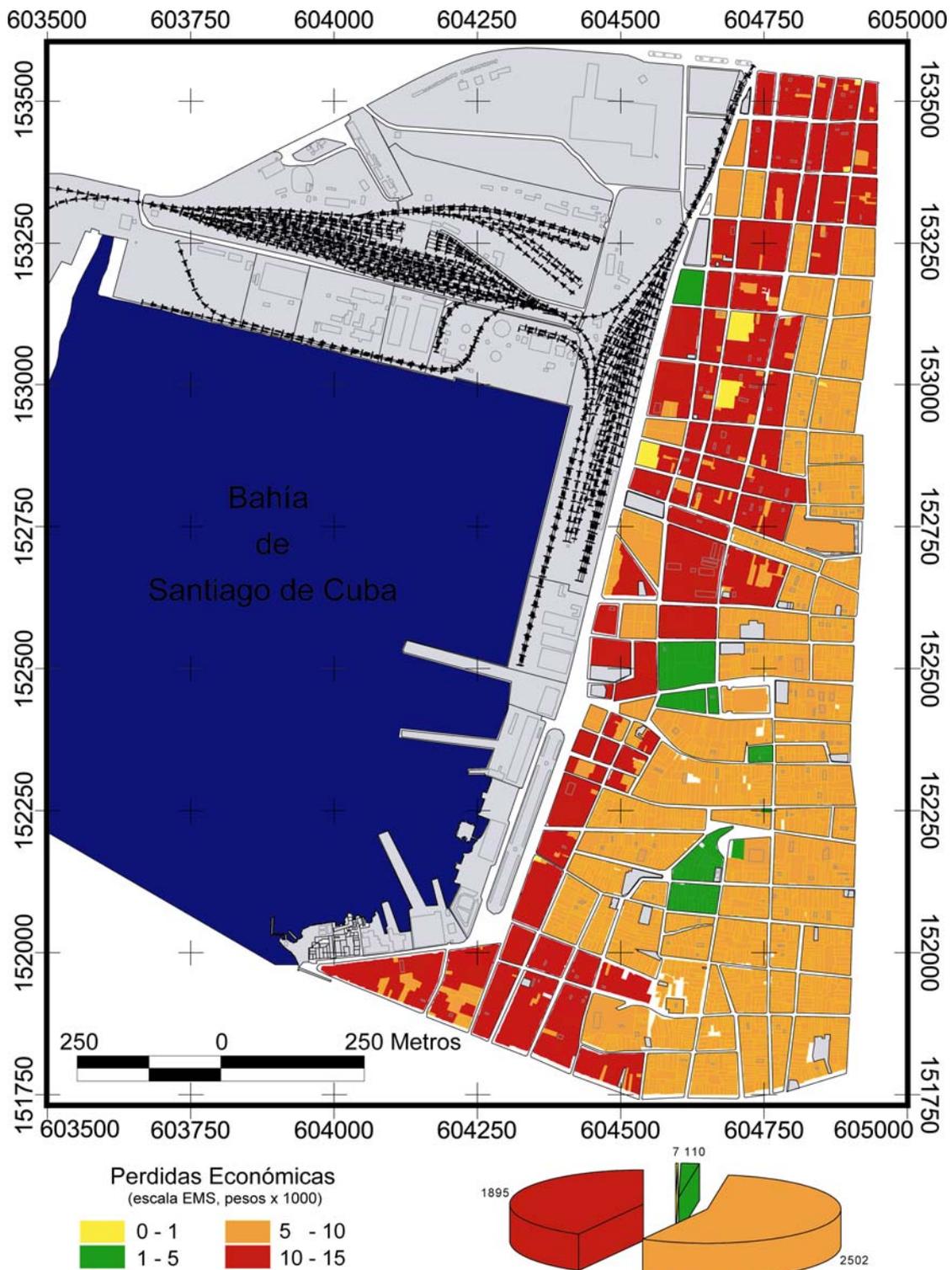


Figura. 2.38. Mapa de pérdidas totales (expresadas en miles de pesos), en las edificaciones del Consejo Popular Guiller món Moncada obtenido a partir del uso de la MPD propuesta por SES (2002). En el gráfico de pastel se presentan el número de edificaciones usando los mismos intervalos y colores que muestra la leyenda.

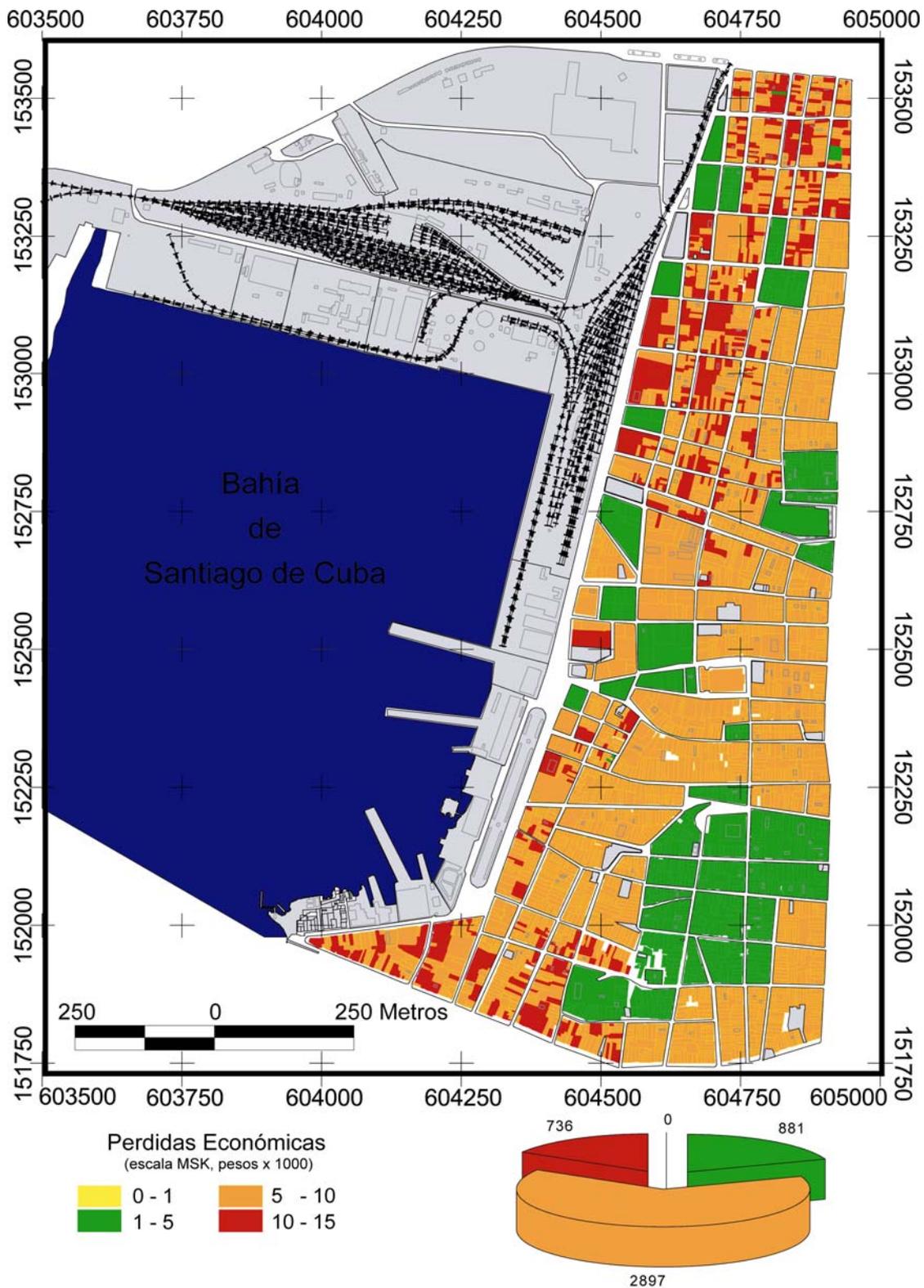


Figura. 2.39. Mapa de pérdidas totales (expresadas en miles de pesos), en las edificaciones del Consejo Popular Guiller món Moncada obtenido a partir del uso de la MPD propuesta por Oliva (2000). En el gráfico de pastel se presentan el número de edificaciones usando los mismos intervalos y colores que muestra la leyenda.

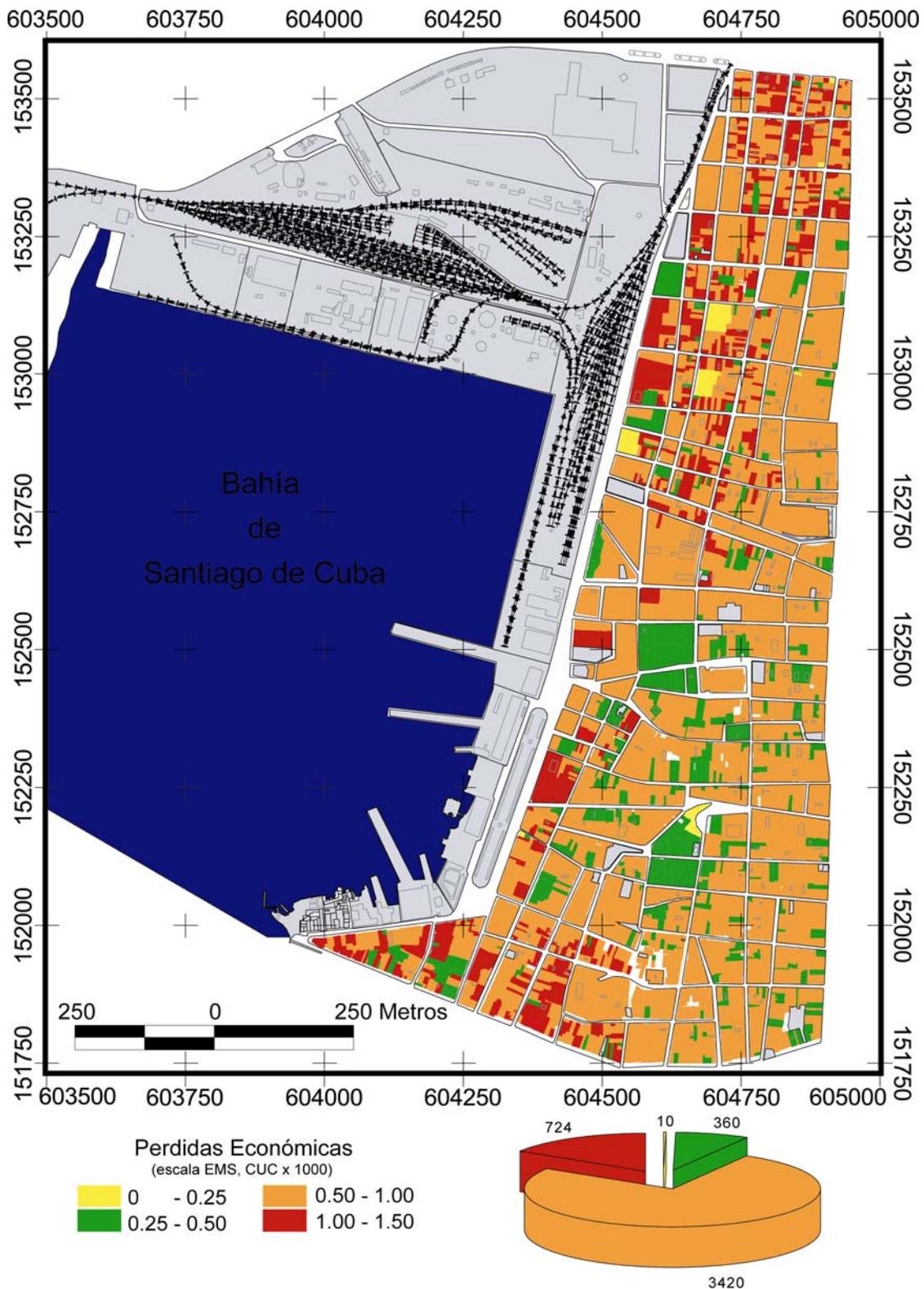


Figura. 2.40. Mapa de pérdidas totales (expresadas en miles de CUC), en las edificaciones del Consejo Popular Guillermón Moncada obtenido a partir del uso de la MPD propuesta por SES (2002). En el gráfico de pastel se presentan el número de edificaciones usando los mismos intervalos y colores que muestra la leyenda.

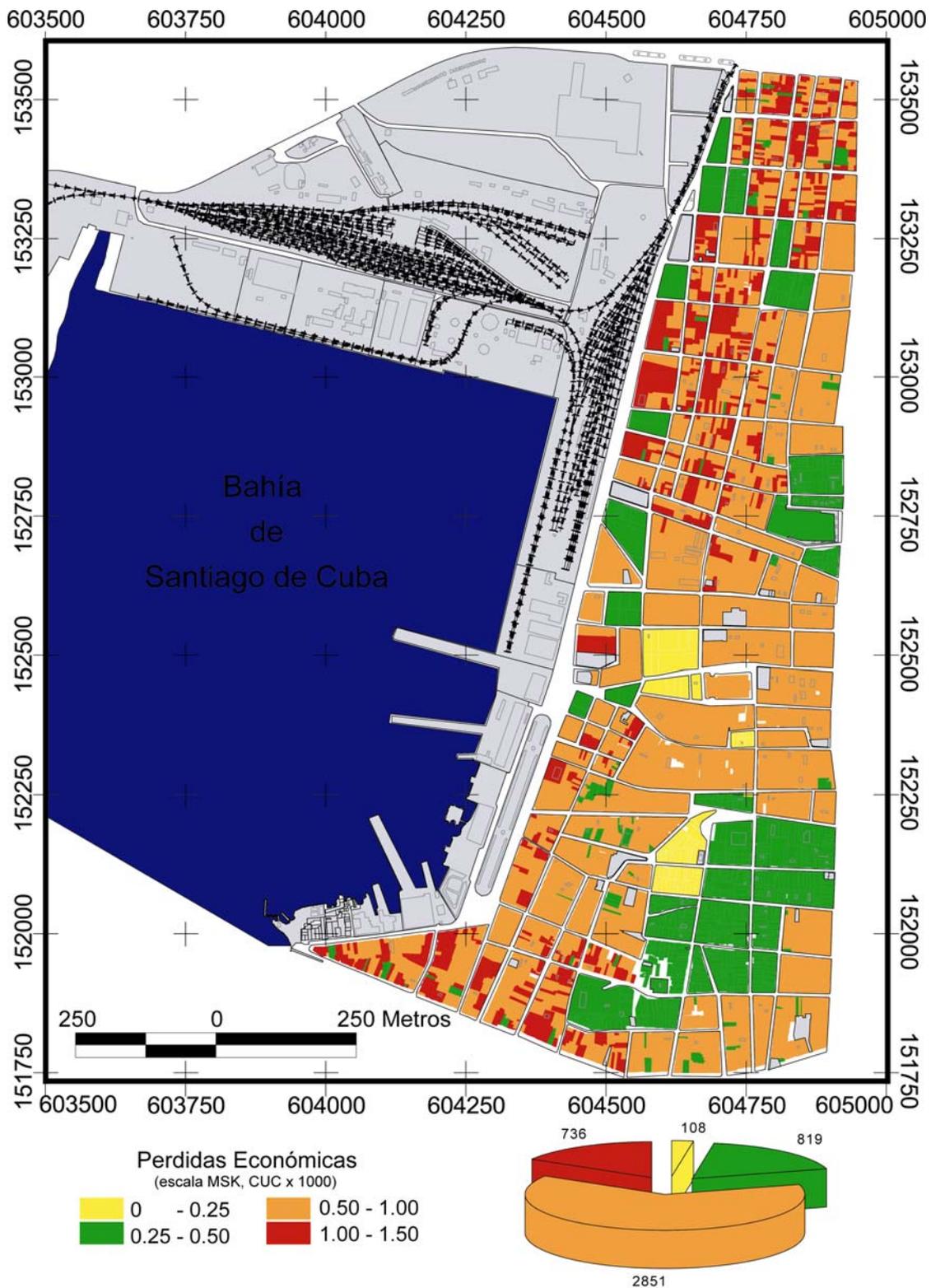


Figura. 2.41. Mapa de pérdidas totales (expresadas en miles de CUC), en las edificaciones del Consejo Popular Guiller món Moncada obtenido a partir del uso de la MPD propuesta por Oliva (2000). En el gráfico de pastel se presentan el número de edificaciones usando los mismos intervalos y colores que muestra la leyenda

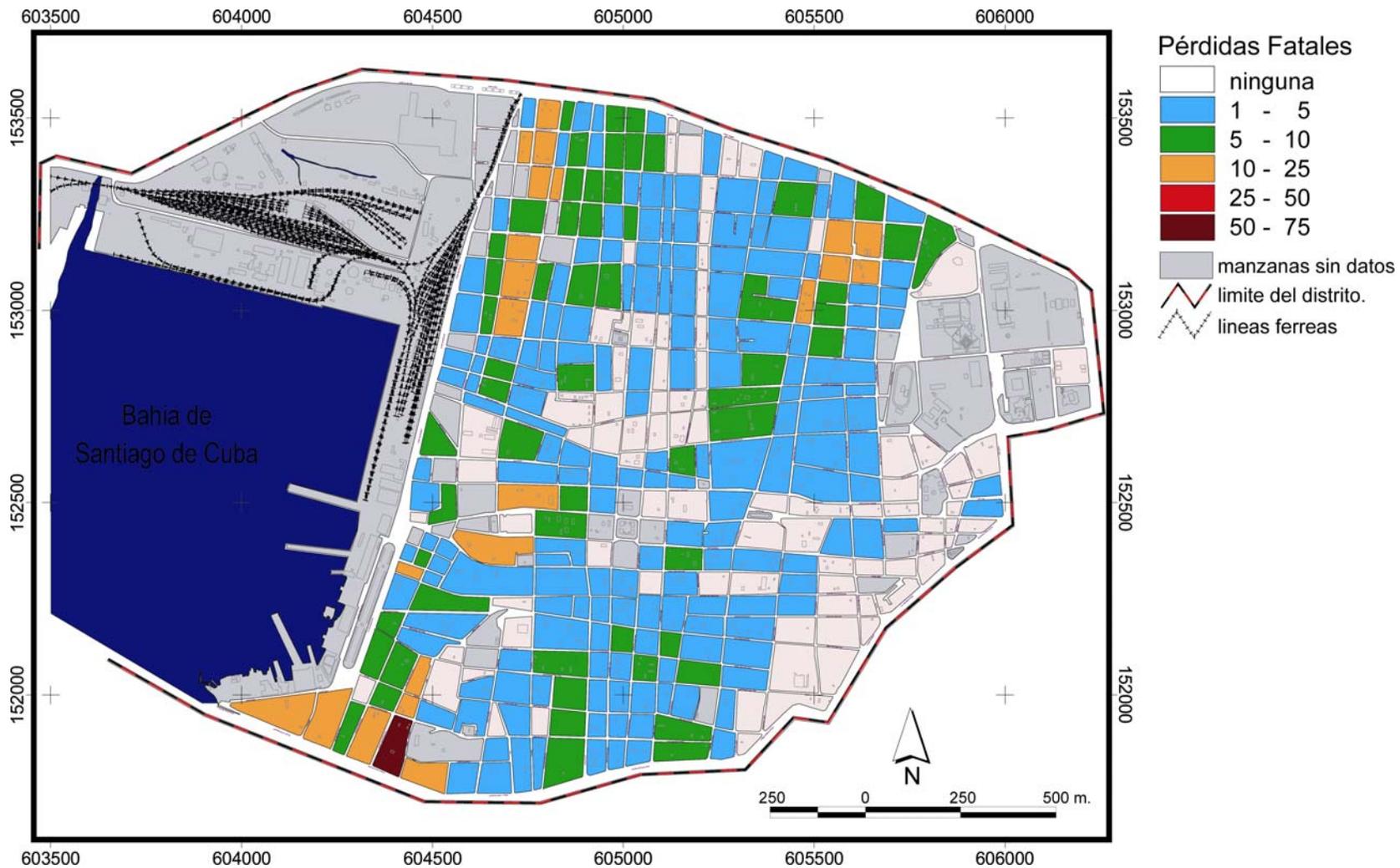


Figura. 2.42. Número de pérdidas fatales o fallecidos (por manzana), obtenidas a partir del uso de la MPD propuesta por Oliva (2000), dentro del Distrito 26 de Julio.

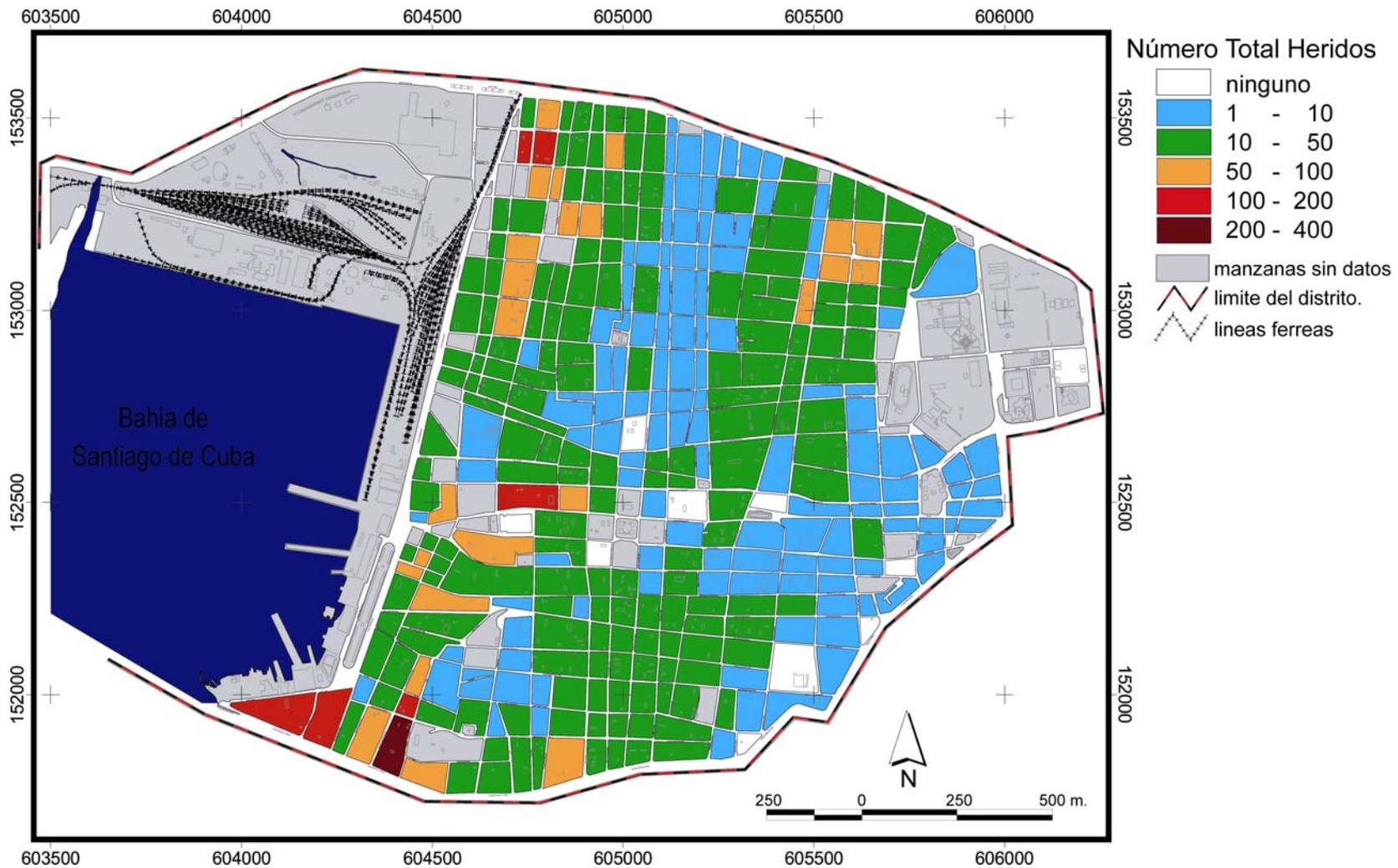


Figura. 2.43. Número total de heridos (por manzana), sin especificar su gravedad, obtenido a partir del uso de la MPD propuesta por Oliva (2000), dentro del Distrito 26 de Julio.

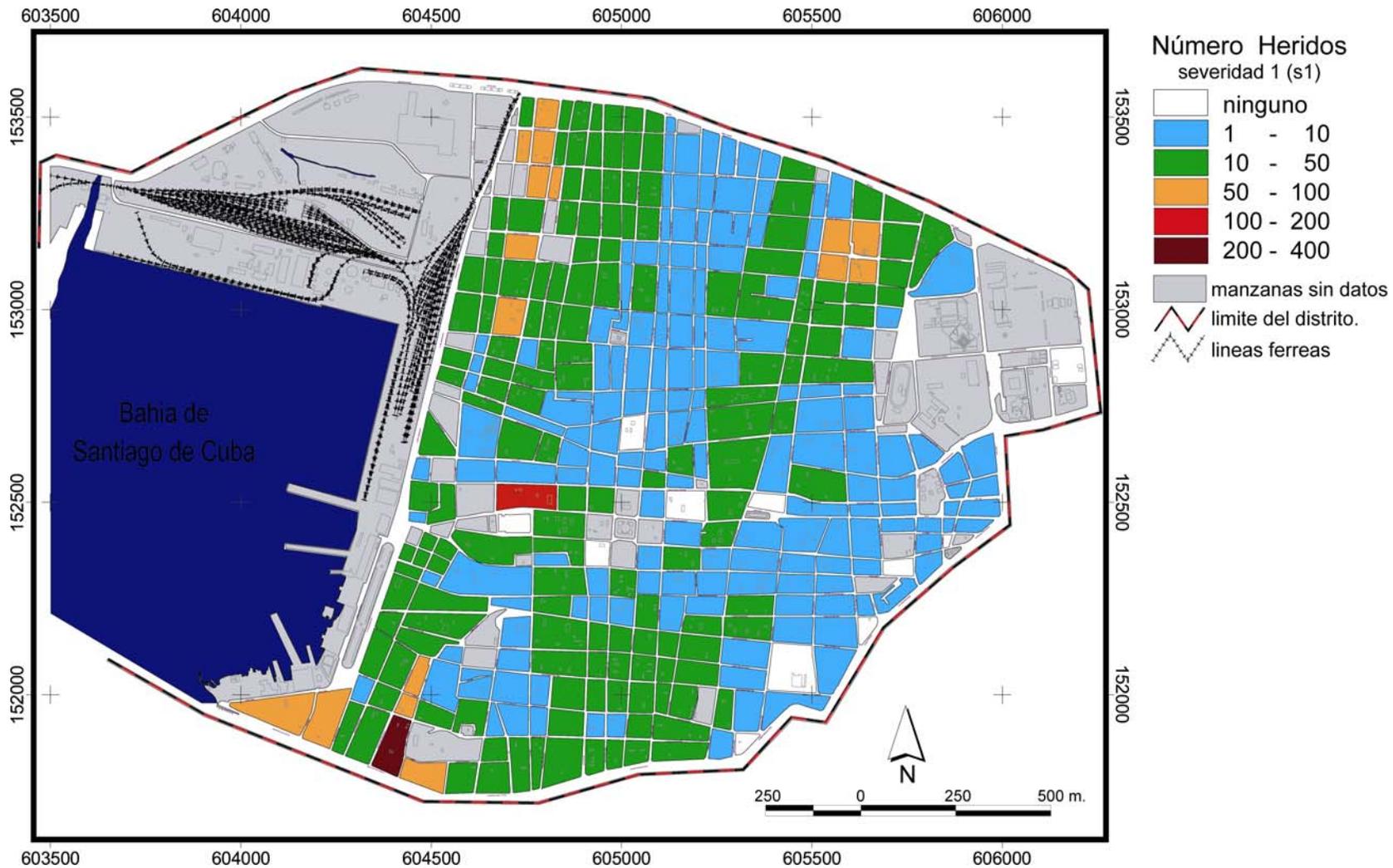


Figura. 2.44. Número heridos leves (por manzana), obtenido a partir del uso de la MPD propuesta por Oliva (2000), dentro del Distrito 26 de Julio.

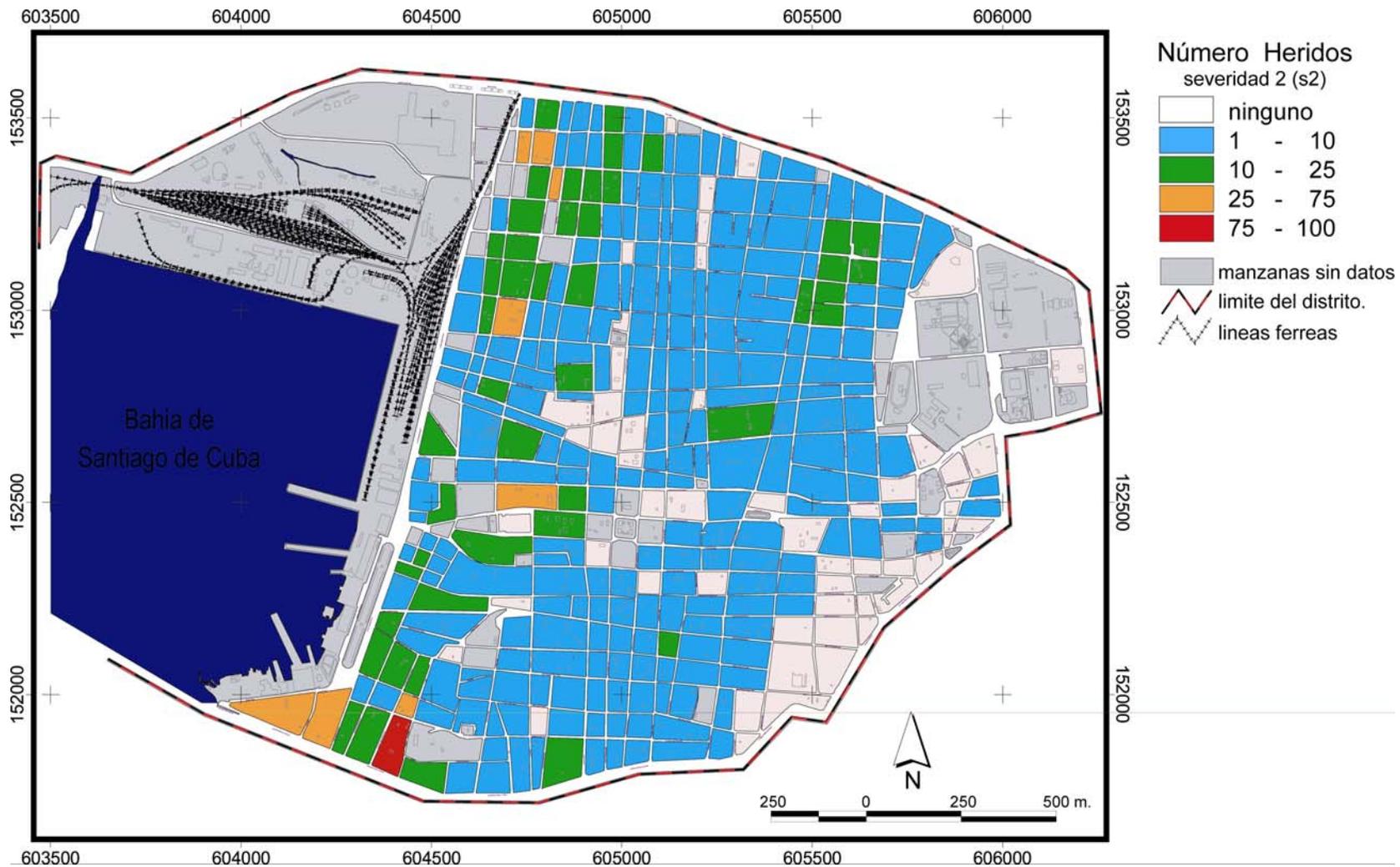


Figura. 2.45. Número heridos (por manzana) con daños de consideración (s2): requieren hospitalización pero no se espera que pierdan la vida, obtenido a partir del uso de la MPD propuesta por Oliva (2000), dentro del Distrito 26 de Julio.

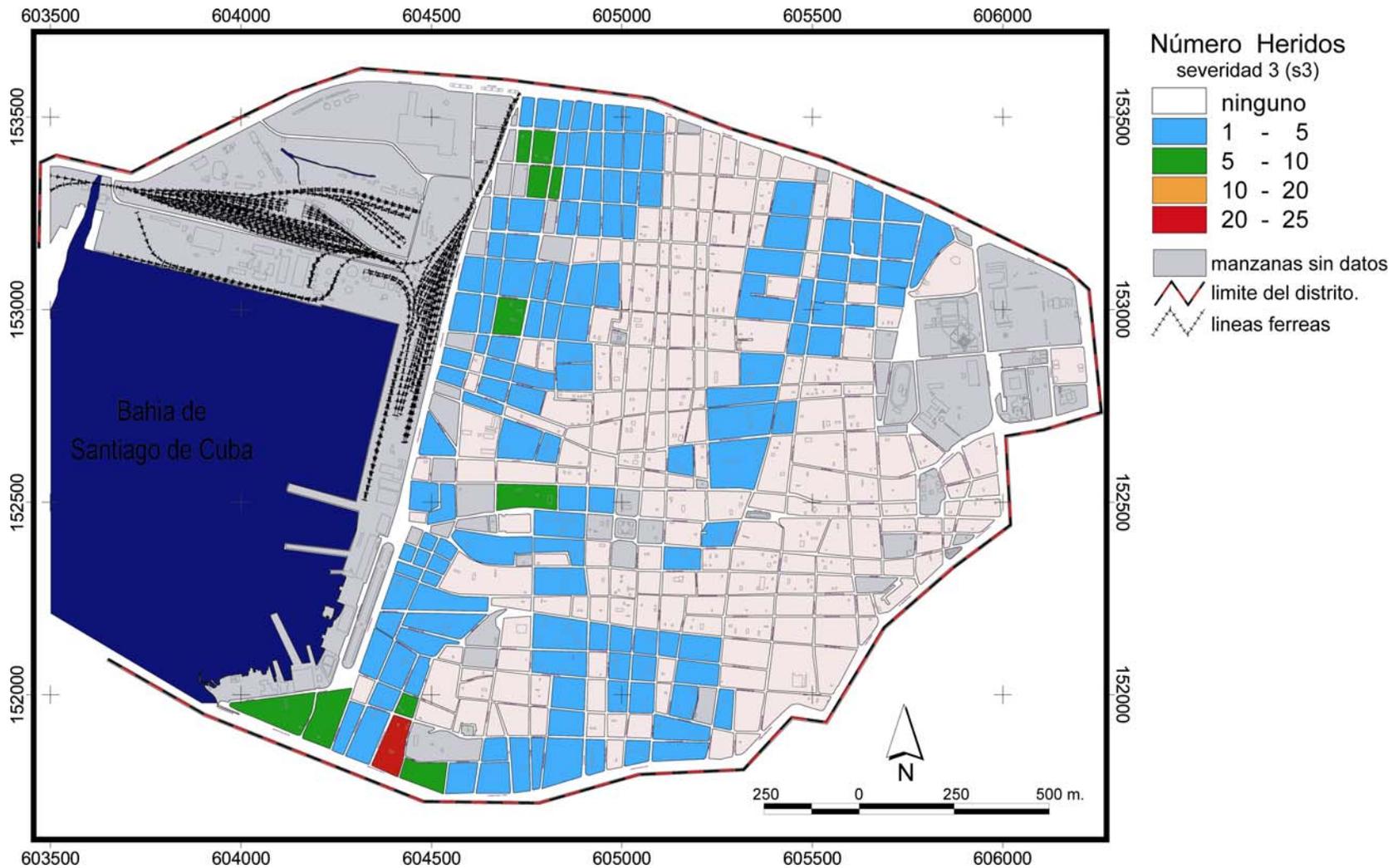


Figura. 2.46. Número heridos (por manzana) de gravedad (s3): requieren una hospitalización inmediata o pueden fallecer, obtenido a partir del uso de la MPD propuesta por Oliva (2000), dentro del Distrito 26 de Julio.

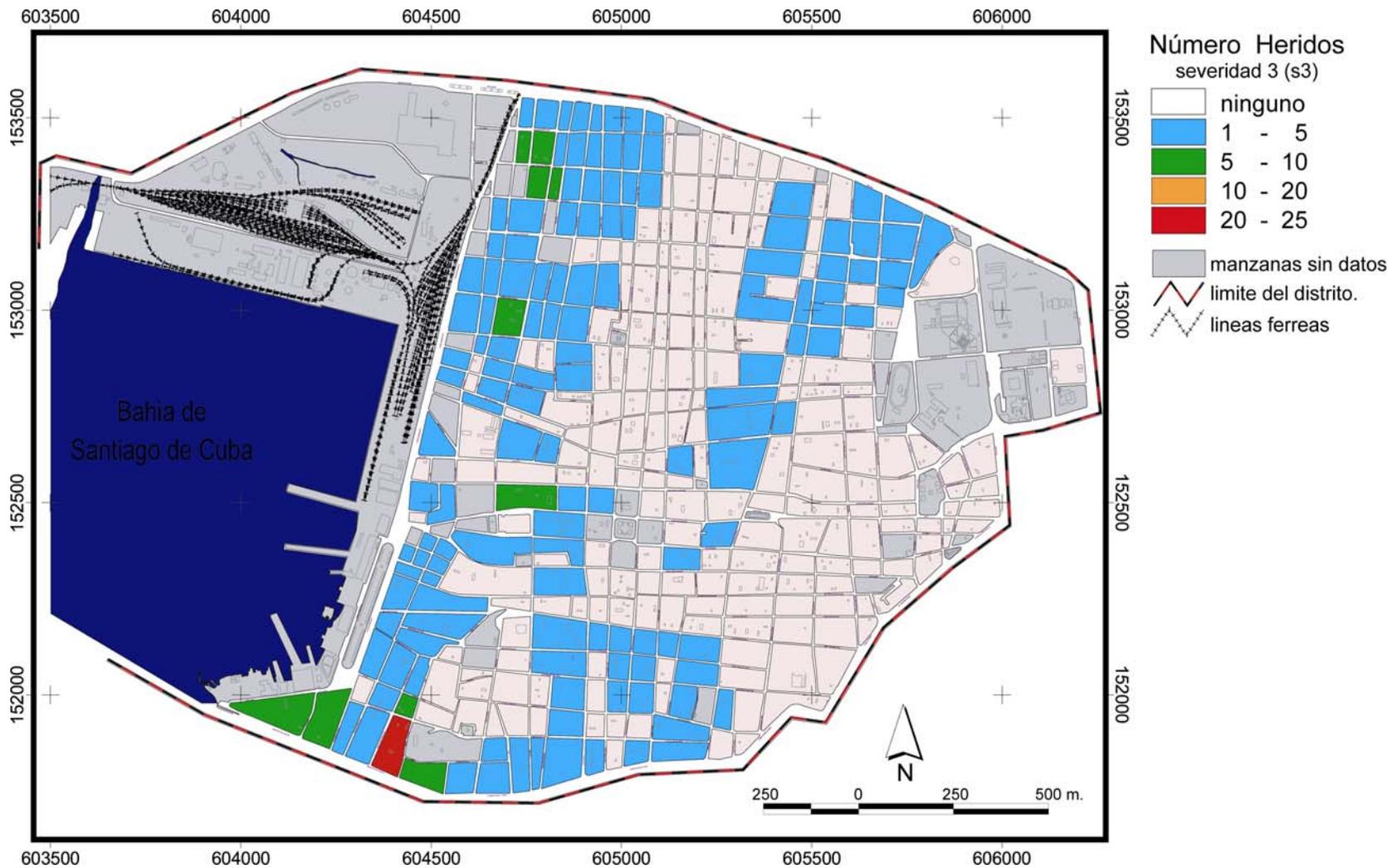


Figura. 2.47. Número de personas sin hogar (por manzana), obtenido a partir del uso de la MPD propuesta por Oliva (2000), dentro del Distrito 26 de Julio.

Bibliografía

- ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I.A. (1970): Handbook of mathematical functions, 9th ed. Dover Publ., New York
- AD-HOC PANEL (1981): Report on the Ad-hoc Panel meeting of experts on up-dating of the MSK-64 seismic intensity scale, Jene, 10-14 March 1980. Gerlands Beitr. Geophys. Vol.. 90, No. 3, pp 261-268
- ALVAREZ, H. (1970): Intensidad sísmica de Cuba. En: Atlas Nacional de Cuba, pp. 20. La Habana.
- ALVAREZ, L. (1995): *SACUDIDA: versión 2.0: Un programa para la estimación de la peligrosidad sísmica*, Editorial Academia, La Habana, 60 pp.
- ALVAREZ, L.; BUNE, V.I. (1985a): Seismic shakeability of earstern Cuba region (in Russian).Izv. Akad. Naukk S.S.S.R. Fizika Zemli, No. 10, pp. 3-12.
- ALVAREZ, L.; BUNE, V.I. (1985b): A computer program for seismic hazard estimation. Proceedings of the 3rd. International Symposium on the Analysis of Seismicity and on Seismic Risk, Liblice Castle, Czechoslovakia, June 17-22, pp. 432-439.
- ALVAREZ, L.; CHUY, T.; GARCÍA, J.; MORENO, B.; ALVAREZ, H.; BLANCO, M.; EXPOSITO, O.; GONZALEZ, O.; FERNANDEZ, A.I. (1999): *An earthquake catalogue of Cuba and neighbouring areas*, ICTP Internal Report IC/IR/99/1, Miramare, Trieste, 60 pp.
- ALVAREZ, L., CHUY, T.; COTILLA, M.; RUBIO, M. (1985) : Estudio de la sismicidad de la región del Caribe y estimación preliminar de la peligrosidad sísmica en Cuba. Informe Final Tema 31001, Fondos del CENAI, 600 pp.
- 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. (2003): Seismic microzoning from synthetic ground motion parameters: case study, Santiago de Cuba. ICTP Preprint No. IC/2003/80, 36 pp. (aceptado por Soil Dynamics and Earthquake Engineering)
- AMBROSEYS, 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.
- AMBROSEYS, N.N. (1995): Reappraisal of the prediction of ground accelerations in Europe – EAEE Working Group report, in *10th European Conference on Earthquake Engineering*, Duma (Editor), Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 3041 – 3048.
- APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL (1985): ATC-13. Earthquake Damage Evaluation Data for California, Applied Technology Council, Redwood City, CA.
- APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL (1996): ATC-40. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Redwood City, California.
- ARANGO, E. (1996): Geodinámica de la región de Santiago de Cuba en el límite de las Placas de Norteamérica y el Caribe. Tesis en opción al Grado de Master en Ciencias. Instituto Politécnico Nacional, México, D.F. 111 pp.

- ARANGO, E. (2000): Geodinámica del sistema de fallas transformante Bartlett–Caimán, al sur de Cuba oriental. En: Red de estaciones e investigaciones sismológicas en Cuba (Zapata, J., ed.), Editorial Academia, La Habana, 2000, pp. 72-87.
- AUTODESK MAP (2003): Autocad2000, ©Autodesk, Inc. 1983-2003. Washington D. C.
- BENDER, B. (1983): Maximum likelihood estimation of b values for magnitude grouped data. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, pp. 831-851.
- BENDER, B.; PERKINS, D.M. (1993): Treatment of parameter uncertainty and variability for a single seismic hazard map. *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No. 2, pp. 165-195.
- 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.
- BOMMER, J.J.; HERNANDEZ, D.A.; NAVARRETE, J.A.; SALAZAR, W.M. (1996): Seismic hazard assessments for El Salvador. *Geofísica Internacional*, 35(3), pp. 227–244.
- BONETT, R.L.; PUJADES, L.B.; HURTADO, J.E. (2001): Generación de curvas de fragilidad para estructuras de hormigón reforzado. Aplicación a la ciudad de Manizales. Universidad Politécnica de Cataluña. Universidad Nacional de Colombia. Asociación Española de Ingeniería Sísmica. II Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica.
- BOORE D.M.; AMBRASEYS, N.N. (1993): Some notes concerning prediction of ground motions for GSHAP. *Ann. Geofis.* Vol. 36, No 3 – 4. pp. 169-180.
- BRAGA, F.; DOLCE, M.; LIBERATORE, D. (1982): A statistical study on damaged buildings and an ensuing review of the MSK-76 scale, 7th European Conference on Earthquake Engineering, Atene.
- BRAGA, F.; DOLCE, M.; LIBERATORE, D. (1985): Statistical study of damage data from 23.11.80 Italy earthquake. US-Italy Workshop on Seismic Hazard and Risk Analysis, Varenna, Italy.
- BUNE, V.I.; GORSHKOV, G.P. (1980): Regionalización sísmica de la URSS. Principios metodológicos y descripción regional del mapa de 1978 (en ruso). Moscú, Nauka, 308 pp.
- CHÁVEZ, J. (1998): Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico a escala regional: aplicación a Cataluña. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 343 pp.
- CHÁVEZ, J.; GOULA, X.; ROCA, A., CABAÑAS, L.; BENITO, B.; RINALDIS, D.; SABETTA, F. (1998): Análisis de daños y de parámetros del movimiento del suelo correspondientes al terremoto de Irpina de 1980. 1^a Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica de Almería (CD-ROM, 1999).
- CHOPRA, A.K.; GOEL, R.K. (2000): Evaluation of nonlinear static pushover to estimate seismic deformation. *J. Structural Engineering*, ASCE, vol 126, No. 4.
- CHEU, D.H. (1994): Personal Communication - Comments on Casualty Issues, April.
- CHUY, T.J. (1999): Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de Peligrosidad y Microzonificación Sísmica. Tesis en opción al Grado de Doctor en Ciencias Geofísicas. Fondos del CENAI, 273 pp.
- CHUY, T.; RODRÍGUEZ, M. (1980): La actividad sísmica de Cuba por datos históricos. *Investigaciones Sismológicas en Cuba* 1, pp. 5-17.
- CHUY, T.; GONZALEZ, B.E.; ALVAREZ, L. (1983): Sobre la peligrosidad sísmica en Cuba. *Investigaciones Sismológicas en Cuba* 4, pp. 37-52.

- CHUY, T.; ALVAREZ, L.; ZAPATA, J.; GONZÁLEZ, B. (1992): *Investigaciones sismológicas complejas para el Complejo Hidroenergético Toa-Duaba*, Reporte de Investigación, Fondos del CENAI, 745 pp.
- CHUY, T.; ALVAREZ, L. (1995): *Mapa de peligrosidad sísmica de Cuba para la nueva norma sísmica de la República de Cuba*. CENAI, folleto, 21 pp.
- COBURN, A.W.; SPENCE, R.J.S.(1992): Factors Determining Human Casualty Levels in Earthquakes: Mortality Prediction in Building Collapse, *Proceedings of the 10 WCEE*, Madrid, Spain, pp. 5989-5994.
- COMMITTEE SEAOC VISION (1995). Performance based seismic engineering of buildings. Technical report, Prepared by Structural Engineers Association of California, Sacramento, California.
- COMPUTERS AND STRUCTURES, INC. (1998): SAP2000. Integrated Finite Elements Analysis and Design of Structures.
- COPPERSMITH, K.J.; YOUNGS, R.R. (1986): Capturing uncertainty in probabilistic seismic hazard assessments within intraplate environments, *Proceedings of the 3rd National Conference on Earthquake Engineering, vol. 1, pp. 301-312*.
- COPPERSMITH, K.J.; YOUNGS, R.R. (1990): Seismic hazard analysis using expert opinion: an example from Pacific Northwest, *Geological Society of America Memoir on Neotectonics in Earthquake Evaluation, Boulder, CO: The Geological Society of America, pp. 27-46*.
- CORNELL, C.A. (1968): Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.* 58, pp. 1583 – 1606.
- COTILLA, M.; BANKWITZ, P.; FRANZKEE, H.J.; ALVAREZ, L.; GONZALEZ, E.; PILARSKI, J.; DIAZ, J.L.; ARTEAGA, F. (1996): Una valoración sismotectónica de Cuba. *Revista Geofísica del Instituto Panamericano de Geografía e Historia*, No. 45, pp. 145-179.
- CRAMER, H. (1948): *Mathematical methods of statistics*. Princeton University Press, Princeton.
- 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.
- DESPAIGNE, G.; CHUY, T.; RODRÍGUEZ, A. (2002): Estimados de peligrosidad sísmica a partir de un nuevo enfoque geodinámico de la región Bartlett-Caimán. *En: Nuevas investigaciones sismológicas en Cuba (Chuy, T; Alvarez, L.; ed.) Editorial Academia, La Habana, pp. 47-56*
- DURKIN, M.E.; THIEL, C.C. (1991), Integrating Earthquake Casualty and Loss Estimation, *Proc. of the Workshop on Modeling Earthquake Casualties for Planning and Response*, Sacramento.
- DURKIN, M.E.; THIEL, C.C. (1993): Toward a Comprehensive Regional Earthquake Casualty Modeling Process, *Proc. National Earthquake Conference, Vol. I*, Central U.S. Earthquake Consortium, May, pp. 557-566.
- EKSTRÖM, G.; DZIEWONSKI, A. (1988): Evidence of bias in estimations of earthquake size, *Nature* 332, pp. 319-323.
- EPRI/SOG (1987): Seismic hazard methodology for the Central and Eastern United States, Vol 1: Methodology. NP-4726, Research Projects P101-38, Prepared by Risk Engineering, Inc., Geomatrix Consultants, Inc., Woodward-Clyde Consultants and Cygna Corporation for

Seismicity Owners Group and electric Power Research Institute, 3412 Hillview Ave., Palo Alto, CA 94304.

- FÄH, D.; KIND, F.; LANG, K.; GIARDINI, D. (2001): Earthquake scenarios for the city of Basel. *Soil Dynamics and Earthq. Eng.*, 21, pp. 405-413.
- FEDOTOV, S.A.; SHUMILINA S.L. (1971): Peligrosidad sísmica de Kamchatka (en ruso). *Izv. Akad. Nauk S.S.S.R., Fizika. Zemli*, 9, pp. 3–15
- FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA) (1992): NEHPR Handbook of the Seismic Evaluation of Existing Building: FEMA 178, Washington D. C.
- FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA) (1997-1999): HAZUS Technical Manual, Washington D. C.
- FRANKEL, A. (1995): Mapping seismic hazard in the Central and Eastern United States, *Seism. Res. Letts.*, v. 66, no. 4, pp. 8-21.
- FRANKEL, A.; MUELLER, C.; BARNHARD, T.; PERKINS, D.; LEYENDECKER, E.; DICKMAN, N.; HANSON, S.; HOPPER, M. (1996): National seismic-hazard maps: documentation June 1996, *U.S. Geological Survey, Open-file Report 96-532*, 110 pp.
- FRANKEL, A.; MUELLER, C.; HARMSSEN, S.; WESSON, R.; LEYENDECKER, E.; KLEIN, F.; BARNHARD, T.; PERKINS, D.; DICKMAN, N.; HANSON, S.; HOPPER, M. (2000): USGS National Seismic Hazard Maps, *Earthquake Spectra*, v. 16, pp. 1-19.
- GARDNER, J.K.; KNOPOFF, L. (1974): Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian?, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol 64, pp. 1363-1367.
- GARCÍA, J.; ARANGO, E.; ZAPATA, J.A.; OLIVA, R.; GONZÁLEZ, B.; FERNÁNDEZ, B.; CHUY, T.; REYES, C.; MONNAR, O. (2002): Programa nacional de la defensa, Informe final del proyecto “Mapa de riesgo sísmico de la ciudad de Santiago de Cuba”. Fondos del CENAI, 120 pp.
- 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.
- GINER, J.J.; MOLINA, S.; DELGADO, J.; JAUREGUI, P. (2002): Mixing Methodologies in Seismic Hazard Assessment via a Logic Tree Procedure: An Application for Eastern Spain, *Natural Hazards*, Vol. 25: pp. 59–81.
- GITIS, V.G.; RUIZ SHULCLOPER, J.; ALVAREZ, L. (ed.) (1992): Reconocimiento de elementos de estructuras espaciales. La Habana, Editorial ACADEMIA, 116 pp.
- GOLDEN SOFTWARE, INC. (1993-1996): Surfer (Win32), Version 6.02, Surface Mapping System.
- GONZALEZ, B.E.; CHUY, T.; ALVAREZ, L.; RUBIO, M. (1993): *Estudios sismológicos complejos de Cuba centro oriental para el emplazamiento de objetivos nucleares*, Reporte de Investigación, Fondos del CENAI, 357 pp..
- GONZALEZ, O.; ALVAREZ, L.; CHIMERA, G.; PANZA, G.F. (2004): Crust and upper mantle structure in the Caribbean Region by group velocity tomography and regionalization. ICTP Preprint IC/2004/16, 23 pp. (enviado a Pure and Applied Geophysics).
- GRÜNTAL, G. (1998). European macroseismic scale 1998. *Cahiers du centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, Vol. 15, 100pp.
- GUTENBERG, B.; RICHTER, C. F. (1954): *Seismicity of the Earth and associated phenomena*, 2nd ed. Princeton Univ. Press.

- GUTENBERG, B.; RICHTER, C.F. (1956): Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 46, pp. 105-145
- GRÜNTAL, G.; WAHLSTRÖM, R. (2001): Sensitivity of parameters for probabilistic seismic hazard analysis using a logic tree approach. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 309-328.
- HERRMAN, R.B. (1997): Recurrence relations, *Earthquake Notes* 48, pp. 47-49.
- HO, P. (2001): Estimating the direct and indirect losses from a midwest earthquake. Mid-America Earthquake Center, Project SE-10: Economic loss estimation, 21 pp.
- ICBO (1990): Division IV – Earthquake Regulations For Seismic – Isolated Structures. Chapter 16, Uniform Building Code, 1990 Edition.
- ICIMAF (1992): PROGNOSIS, versión 2.1. Software para las geociencias. Manual de usuario, 154 p.
- ITURRALDE-VINENT, M. (ed.) (1996): *Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba*, First Contribution of IGCP Project 364 “Geological Correlation of Ophiolites and Volcanic Arc Terrains in the Circum Caribbean Region, Miami, U.S.A”, 265 pp.
- JACOB, K., ARMBRUSTER, J.; BARSTOW, N.; HORTON, S. (1994): Probabilistic ground motion estimates for New York: comparison with design ground motions in national and local codes, in *Proceedings of Fifth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Chicago*, iii, pp. 119-128.
- JOYNER, W.B.; BOORE, D.M. (1981): Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. *Bull. Seis. Soc. Am.* vol 71, pp. 2011-2038.
- KIJKO, A.; GRAHAM, G. (1998): Parametric-historic procedure for probabilistic seismic hazard analysis. Part I: Estimation of maximum regional magnitude M_{max} . *Pure Appl. Geophys.*, vol 152, pp. 413-442.
- KIJKO, A.; GRAHAM, G. (1999): Parametric-historic procedure for probabilistic seismic hazard analysis. Part II: Assessment of seismic hazard at specific site. *Pure Appl. Geophys.*, vol 154, pp. 1-22.
- KIJKO, A.; SELLEVOLL, A. (1989): Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files. Part I. Utilization of extreme and complete catalogues with different threshold magnitudes, *Bull. Seism. Soc. Am.* vol 79, No. 3, pp. 645–654.
- KIRCHER, C.A.; NASSAR, A.A.; KUSTU, O.; HOLMES, W.T. (1997): Development of Building Damage Functions for earthquake Loss estimation. *Earthquake Spectra*, Volume 13, No. 4, pp. 663-682.
- KULKARNI, R.B.; YOUNGS, R.R.; COPPERSMITH, K.J. (1984): Assessment of confidence intervals for results of seismic hazard analysis. En: *Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering*, July 21-28.
- LAPAJNE, J. K.; ŠKET MOTNIKAR, B.; ZABUKOVEC, B.; ZUPANČIČ, P. (1997): Spatially-smoothed seismicity modelling of seismic hazard in Slovenia, *Journal of Seismology*, Vol. 1, No. 1, pp. 73-85.
- LAPAJNE, J.K. (2000): Some features of the spatially smoothed seismicity approach, *Proceedings of Workshop Seismicity modelling in seismic hazard mapping*, Poljče, May 22-24th, 2000.
- LIU, HUIXIANG (1987): On the seismic zoning map of China. En: *Proceedings of International Seminar on Seismic Zonation*, pp. 35-42.

- LLANES, L. (1986): Apuntes para una historia sobre los constructores cubanos. Editorial Letras Cubanas. Cuba.
- MÁRQUEZ, P.I.; MOREJÓN, G.; VÁZQUEZ, J.C., BERENGUER, Y.; ZAPATA, J.A.; CHUY, T.J. (2005): Evaluación de la vulnerabilidad del Instituto Preuniversitario en el Campo "José A. Cardona". Fondos del CENAIIS.
- McCORMACK T. C.; RAD, F.N. (1997): An earthquake loss estimation methodology for buildings based on ATC-13 and ATC-21. *Earthquake Spectra*, Volume 13, No. 4, pp. 605-622.
- McGUIRE, R. K. (1976): Fortran computer program for seismic risk analysis. U.S. Department of the Interior, Geological Survey. Open File report, No. 76-67.
- McGUIRE, R.K. (1977): Effects of uncertainties in seismicity on estimates of seismic hazard for the east coast of the United States, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 67, pp. 827-848.
- McGUIRE, R.K (1993): Computations of seismic hazard, *Ann. Geofis.* Vol. 36, No 3-4, pp. 181-201.
- McGUIRE, R.K.; SHEDLOCK, K.M. (1981): Statistical uncertainties in seismic hazard evaluations in the United States, *Bull. Seismol. Soc. Am.* Vol 71, pp. 1287-1308.
- McQUEEN, C.M. (1997): An evaluation of seismic hazard in the Caribbean and Central America using three probabilistic methods, Ph.D. Thesis, University of Lancasater, 342 pp.
- MEDINA, L.; RODRÍGUEZ, R. (1986): Sistemas Constructivos utilizados en Cuba. Tomo 1 y 2. Departamento de Construcciones. Facultad de Ingeniería Civil. ISPJAE. Ministerio de Educación Superior. La Habana.
- MEDVEDEV, S.V.; SPONHEUER, V.; KARNIK, V. (1965): Escala de intensidad sísmica MSK-1964 (en ruso). Moscú, Comité Geofísico Inter-departamental del Presidium de la AC de la URSS, 11 pp.
- MUELLER, C.S.; FRANKEL, A.D.; PETERSEN, M.D.; LEYENDECKER, E.V. (2003): Documentation for 2003 USGS Seismic Hazard Maps for Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands, U.S. *Geological Survey Open-File Report* 03-379.
- MUIR-WOOD, R. (1993): From global seismotectonics to global seismic hazard, *Ann. Geofis.*, vol. 36, No. 3 - 4, pp.153-169.
- MURPHY, J.R.; O'BRIEN, L.J. (1977): The correlation of peak ground acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters. *Bull. Seism. Soc. Am.* 67, pp. 877-915.
- NC 46: 1999: Construcciones sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción, La Habana, Comité Estatal de Normalización, 1999.
- OLIVA, R.; RUBIO, M.; MARISY, J. (1991): Vulnerabilidad Sísmica de la Ciudad de Santiago de Cuba. *Revista Geofísica*, No. 34, Instituto Panamericano de Geografía e Historia. pp. 177 - 184.
- OLIVA, R.; AVICH, B. (1993): Guía Metodológica para la Estimación de los Daños en las Viviendas y en la Población en Caso de Sismos Fuertes. Reporte de Investigación, Fondos del CENAIIS y la DCN. 20 pp.
- ORBERA, L.; GONZÁLEZ, B.; CHUY, T.; ORO, J. (1990): Investigación sísmica en la región de emplazamiento del Centro de Investigaciones Nucleares. Reporte de Investigación, 344 pp. Anexos gráficos, Fondos del CENAIIS.
- 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.
- PISARENKO, V.F.; LYUBUSHIN, A.A.; LYSENKO, V.B.; GOLUBIEVA, T.V. (1996): Statistical estimation of seismic hazard parameters: Maximum possible magnitude and related parameters, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol 86, pp 691-700.
- POLJAK, M.; ZUPANČIČ, P.; LAPAJNE, J.K.; ŠKET MOTNIKAR, B. (2000): Seismotectonic input for spatially smoothed seismicity approach, Proceedings of Workshop Seismicity modelling in seismic hazard mapping, Poljče, May 22-24th, 2000.
- QUIJADA, P.; GAJARDO, E.; FRANKE, M.; KOZUCH, M.; GRASES, J. (1993): Análisis de amenaza sísmica de Venezuela para el nuevo mapa de zonificación con fines de ingeniería, in *Memorias del Octavo Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismo-Resistente*, Mérida.
- RAUTIAN, T.G. (1964): Sobre la determinación de la enermía de los terremotos para distancias menores que 3000 km (en ruso). *Trudi Instituta Fizika Zemli* 32, pp. 88-93.
- REBEZ A.; SLEJKO, D. (2000): Sensitivity analysis on the input parameters in probabilistic seismic hazard assessment, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 20, pp. 341-351.
- REITER, L. (1990): Earthquake hazard analysis: issues and insights. Columbia University Press, New York, 252 pp.
- RESEARCH SYSTEMS INC. (2000): IDL, Version 5.4 (Win32 x86). (c) 2000, Research Systems, Inc., versión demostrativa.
- RICHTER, C.F. (1958): *Elementary seismology*, Freeman and Co., San Francisco, U.S.A., 1-768.
- RIZNICHENKO, Yu.V. (1959): On quantitative determination and mapping of seismic activity. *Annali di Geofisica*. Vol. XII, X-1862, pp. 227-237.
- RIZNICHENKO, Yu.V. (ed.) (1960) Métodos de estudio detallado de la sismicidad (en ruso). *Trudy IFZ AN SSSR*, No. 25, 176pp.
- RIZNICHENKO, Yu.V. (1964): Método de suma de terremotos para el estudio de la actividad sísmica (en ruso) *Isvestiya Akad. Nauk SSSR, Ser. Geofiz.*, No. 17.
- RIZNICHENKO, Yu.V. (1965): De la actividad de los focos de terremotos a la sacudibilidad de la superficie terrestre (en ruso) *Isvestiya Akad. Nauk SSSR, Fizika Zemli*, No. 11, pp. 1-12 (pp. 715-721 de la edición en inglés de la A.G.U.)
- RIZNICHENKO, Yu.V. (1966): Cálculo de la sacudibilidad de los puntos en la superficie de la Tierra debida a terremotos en su vecindad (en ruso) *Izveziya Akad. Nauk SSSR Fizika Zemli*, 1, pp. 16-32
- RIZNICHENKO, Yu.V.; GORBUNOVA, I.V. (1968) : Sobre los métodos de preparación de mapas de actividad sísmica (en ruso). En: *Regionalización sísmica de la URSS, Nauka, Moscow*

- RIZNICHENKO, Yu.V. (ed.) (1979): *Sacudibilidad sísmica del territorio de la URSS (en ruso)*. Nauka, Moscow, 184 pp.
- RIVERA, Z.; SLEJKO, D.; GARCÍA, J.; PERUZZA L.; REBEZ, A.; SANTULIN, M. (2004): Seismic hazard of the Bayamo region (eastern Cuba) considering local soil typologies, *Bol. Geof. Teo. Apl.*, vol. 45, No. 1-2, pp. 15-35.
- RODRÍGUEZ, M.; ALVAREZ, L.; GARCÍA, J. (1997): Estimaciones probabilísticas de la peligrosidad sísmica en Cuba, *Revista Geofísica del IPGH*, vol 47, pp. 46-77.
- ROJAHN, C.; KING, S.A.; SCHOLL; R.E.; KIREMIDJIAN, A.S.; REAVELEY, L.D.; WILSON, R.R. (1997): Earthquake damage and loss estimation methodology and data for Salt Lake County, Utah (ATC-36). *Earthquake Spectra*, Volume 13, No. 4, pp 623-662.
- RUBIO, M. (1985): The assessment of seismic hazard for the Republic of Cuba, in *Proc. 3rd Int. Symp. Analisis of Seismicity and Seismic Risk*, Czech. Ac. Sc., Prague, pp. 424-431.
- RUIZ, J.; PICO, R.; ALVAREZ, L.; CHUY, T. (1992a): Modelación matemática del pronóstico de magnitudes máximas de los terremotos en la región del Caribe. En: Reconocimiento de elementos de estructuras espaciales. La Habana, Academia, pp. 81-101.
- 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.
- SES (2002): Simulación de escenarios sísmicos. SES 2002. Manual Técnico. Dirección General de Protección Civil, Ministerio del Interior-España, 53 pp.
- SHEBALIN, N.V. (1971): Sobre la magnitud máxima y la intensidad máxima de los terremotos (en ruso). *Izv, Akad., Nauk SSSR, Fizika Zemli*, No. 6, pp. 12-20.
- SHEDLOCK, K.M. (1999): Seismic hazard map of North and Central America and the Caribbean, *Annali di Geofisica* 42, pp. 977-999.
- SHEDLOCK, K.M. (1999): Seismic hazard map of the western hemisphere, *Annali di Geofisica* 42, 1199-1214.
- SHEPHERD, J.B.; TANNER, J.G.; McQUEEN, C.M.; LYNCH, L.L. (1997): Seismic hazard in Latin America and the Caribbean, in *Seismic Hazard Maps for the Caribbean*, IRDC, Ottawa, vol. 5, 15.
- SINGHAL, A.; KIREMIDJIAN, A.S. (1995): Method for developing motion damage relationships for reinforced concrete frames. Technical report NCEER-95-008, State University of New York at Buffalo.
- SIROTINSKAIA, S.V. (1986): Métodos lógicos de análisis de información geológica (en ruso). Nedra. 1986.
- SKET MOTNIKAR, B.; LAPAJNE, J. K.; ZUPANČIČ, P.; ZABUKOVEC, B. (2000): Application of the spatially smoothed seismicity approach for Slovenia, *Proceedings of Workshop Seismicity modeling in seismic hazard mapping*, Poljče, May 22-24th, 2000.

- SLEJKO, D.; PERUZZA, L.; REBEZ, A. (1998): Seismic hazard maps of Italy, *Annali di Geofisica*, vol 41, pp. 183-214.
- STEPP, J.C. (1972): Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard. En: Proceedings of First Int. Conference on Microzonation, Seattle Washington, vol. 2, pp. 897-910.
- TATE, R.F. (1959): Unbiased estimations: Function of location and scale parameters, *Ann. Math. Statist.*, vol 30, pp. 331-366.
- THE CARIBBEAN DISASTER MITIGATION PROJECT (1999): Final report available at: <http://www.oas.org/CDMP/document/final/oasfinal.htm>
- STEPP, J.C. (1972): Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard. In: Proceedings of First Int. Conference on Microzonation, Seattle Washington, vol. 2, pp. 897-910.
- TRIFUNAC, M.D.; BRADY, A.G. (1975): On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of ground motion records, *Bull. Seism. Soc. Am.* 65, pp.139-162.
- ULOMOV, V.I. (1993): Regional seismicity structures and some aspects of seismic zoning in Eurasia. En: Proceedings of PRC/USSR workshop on Geodynamics and seismic risk assessment, Beijing, Seismolog. Press, pp. 283-301.
- ULOMOV, V.I.; SHUMILINA, L.; TRIFONOV, V.; KRONROD, T.; LEVI, K.; ZHALKOVSKY, N.; IMAEV, V.; IVASTCHENKO, A.; SMIRNOV, V.; GUSEV, A.; BALASSANIAN, S.; GASSANOV, A.; AYZBERG, R.; CHELIDZE, T.; KURSKEEV, A.; TURDUKULOV, A.; DRUMYA, A.; NEGMATULLAEV, S.; ASHIROV, T.; PUSTOVITENKO, B.; ABDULLABEKOV, K. (1999): Seismic hazard of Northern Eurasia. *Ann. Geofis.*, vol. 42, pp. 1023-1038
- VENEZIANO, D.; CORNELL, C.; O'HARA T. (1984): *Historical method of seismic hazard analysis*, Rep. NP-3428, Elec. Power Res. Inst., Palo Alto, California.
- VENEZIANO, D.; PAIS, A. L. (1986): Automatic source identification based on historical seismicity. Proceedings, 8th European conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.
- VORONIN, Yu.A.; KARATAEVA, G.N.; EPSHTEIN, E.N. (1968): Programas HOLOTIPO para la solución de problemas de reconocimiento de patrones (en ruso). Alma Atá.
- WEICHERT, D.H. (1980): Estimation of earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 70, pp. 1337-1356.
- WELLS, D.L.; COPPERSMITH, K.J. (1994): New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, and surface displacements, *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 84, pp. 974-1002.
- WILLIAMS, Ch.R.; MASTERS, S.; MORROW, G.; MUIR-WOOD, R. (1999): Caribbean probabilistic seismic hazard modelling in the complex zones of transition from subduction to strike-slip: Hispaniola case study. En: *Proceedings of GSA Penrose Conference: Subduction to strike-slip transitions on plate boundaries*, Jan. 18-24. Puerto Plata Village Caribbean Resort, Puerto Plata, Dominican Republic, pp. 118-199.
- WOODWARD-CLYDE CONSULTANTS (1982): Development and initial application of software for seismic exposure evaluation. Report for NOAA, Vol. II.

- ZAKHAROVA, A.I. (1986) Estimation of seismicity parameters using a computer. Russian Translations Series, No. 46. A. A. Balkema/ Rotterdam, 150 pp (traducción del original en ruso publicado por Izdat. Fan Publishers, Tashkent, 1972).
- ZHANG, P. (1993): Seismic hazard assessment in Continental Asia. Ann. Geofis. Vol. 36, No 3-4., pp. 41-61.
- ZHANG, P.; YANG, Z.; GUPTA, H.K.; BHATIA, S.C.; SHEDLOCK, K.M. (1999): Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) in continental Asia. Ann. Geofis., vol. 42, pp. 1167 - 1190.

Anexo 1

Seismic Hazard Map for the Cuban Region Using the Spatially Smoothed Seismicity Approach

Julio Garcia⁽¹⁾, Dario Slejko⁽²⁾, Leonardo Alvarez⁽¹⁾, Alessandro Rebez⁽²⁾, Marco Santulin⁽²⁾

⁽¹⁾ Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. Calle 212 No. 2906, e/ 29 y 31, La Coronela, La Habana, Cuba

⁽²⁾ Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Borgo Grotta Gigante 42/C 34010 Sgonico (Trieste), Italy

Artículo enviado a Bulletin of the Seismological Society of America (aceptado para publicar en septiembre de 2005.)

Abstract

The seismic hazard assessment for Cuba and the surrounding regions has been performed according to the methodology recently applied in the United States for the national seismic hazard map. In this approach the spatially smoothed seismicity is used to derive the hazard estimates. The major motivation for directly using the smoothed seismicity methodology is to avoid drawing seismic sources in a region where the structures, causative of seismicity, are not well known. We have defined three different seismicity models, according to the threshold magnitude used and the method applied for the rate computation, and four zonation models, for the seismicity parameter computation. This is a notable variant with respect to the original approach and is based on the evidence of seismotectonic heterogeneity of the broader Cuban region, consequently, different b -values and maximum magnitudes can be proposed for various parts of the studied area. In addition, two attenuation models have been considered. The resulting 24 hazard estimates have been treated with a logic tree approach. The results obtained show some similarities and differences and the final maps (median values and values at the 84th percentile) have been constructed assigning different weights to the different branches. A comparison between these new hazard estimates and those computed according to the standard approach of the seismotectonic probabilism indicates the areas where the spatial distribution of the seismicity supports the seismogenic zonation and the areas where a disagreement exists. These last are located around Santiago, where an epicentral cluster is suggested by the macroseismic data but not by the tectonic evidence, and on the northern coast of Hispaniola, where the existing seismogenic zonation is rather rough.

1. Introduction

Since 1985 several seismotectonic studies have been developed for Cuba in view of a revision of its national building code. Seismic hazard maps for Cuba and neighbouring areas, in terms of peak ground acceleration (PGA), for an average soil, and for macroseismic intensity, were computed by Garcia et al. (2003) according to the standard methodology of the seismotectonic probabilism (Muir-Wood, 1993), a methodology that was adopted also by the Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP; Giardini, 1999). These maps were based on the Cornell (1968) approach: a seismogenic zonation, with characterisation of the seismicity inside each seismogenic zone (SZ) was, so, requested. The delineation of the SZs, the definition of their seismicity rates, and the assessment of their maximum magnitude (M_{max}) present some uncertainties due to the scarcity of seismicity and tectonic data.

An alternative approach for probabilistic seismic hazard assessment (PSHA), which can be referred to in the methodology of historic probabilism (Muir-Wood, 1993), was proposed by Frankel (1995): in that approach no delineation of seismic sources is needed and seismic hazard is computed directly from seismicity, which is spatially smoothed in different ways. The Frankel (1995) treatment of seismicity improves the concept of seismic activity already proposed by Riznichenko (1959, 1966). The main difference in the Frankel (1995) approach consists in the use of a distribution function for seismicity, instead of its simple averaging (Riznichenko, 1965, 1966).

Similar approaches were also used in the past to obtain hazard estimates (Riznichenko, 1979; Zakharova, 1986; Jacob et al., 1994; Woo, 1996; Shepherd et al., 1997; Kijko and Graham, 1998, 1999). In particular, the Shepherd et al. (1997) results, based on the Historical Parametric Method (Veneziano et al., 1984), refer to the Caribbean region and were considered for the GSHAP hazard map of America (Shedlock, 1999; Shedlock and Tanner, 1999).

According to Muir-Wood (1993), hazard estimates based only on a statistical treatment of seismicity (historical probabilism) represents the second generation of hazard maps, while the use of tectonic information in addition to earthquake data (seismotectonic probabilism) goes one step beyond (third generation of hazard maps). Nevertheless, since the Cuban region is characterised by a moderate seismicity and the association of earthquakes to faults is problematic, hazard estimates based only on seismicity data can be a valid alternative to the standard seismotectonic approach (Cornell, 1968).

The goal of the present work is to produce a seismic hazard map for Cuba based on the Frankel (1995) approach and to compare the results with those already obtained with the seismotectonic probabilism (Garcia et al., 2003). From this comparison we aim to pinpoint the areas where seismicity data alone do not support the available seismogenic zonation, and to mark the possible corrections on that zonation.

2. Seismotectonic framework

The region of the present study, the islands of Cuba, Jamaica and Hispaniola (see Fig. 1), is located on the boundary of the North American plate and the Caribbean one, where an approximately sinistral transcurrent movement takes place.

The Caribbean-North American plate boundary zone comprises the Polochic-Motagua and the Swan Islands fault zones (outside the area represented in Fig. 1), and the Mid-Cayman Spreading Center (CSC). Eastwards, the plate boundary splays into two branches: the northern one consists of the upper extremity of the CSC, the Oriental Fault Zone (OFZ), the Septentrional Fault Zone (SFZ), and the "19-degree fault" (Speed and Larue, 1991); this last is located on the northern Puerto Rico margin (outside Fig. 1). The southern branch begins at the lower end of the CSC and comprises the Walton Fault Zone (WFZ), the Enriquillo Fault Zone (EFZ), the Plantain Garden Fault Zone (PGFZ), the Los Muertos Trough (LMT) and the Anegada Passage Fault Zone. The two branches

meet together to the east, in the Lesser Antilles subduction zone. The eastward motion of the Caribbean plate produces left-lateral deformation (Moreno et al., 2002) along the EFZ, the WFZ, and the OFZ.

The northeastern Caribbean plate is characterised by complex tectonics, with several subduction zones. Different authors have hinted at the existence of several microplates in the eastern Caribbean: Rosencrantz and Mann (1991) identified the region delimited by the OFZ, the WFZ, and the EFZ-PGFZ as one of them, and named it the Gonave Microplate.

The seismicity in the vicinity of Cuba (Fig. 1) clearly indicates the capability of the boundary between the North American and Caribbean plates to produce strong events: from the CSC, which generates normal faulting earthquakes, to the OFZ and the SFZ, where very large transpressive and strike-slip earthquakes occurred. The southern edge of the plate boundary zone, south of the OFZ, is defined by the left-lateral strike-slip WFZ, where some large events have been reported near the city of Kingston.

Cuban seismicity, which is documented by a catalog covering more than five centuries, can be divided into two types (Alvarez et al., 1991): intraplate and interplate. Interplate seismicity affects the southeastern region, where the earthquakes occur mainly in the OFZ. Seismic activity in southern Cuba is located along the coast and mainly offshore. The strongest concentration of seismicity can be seen around Santiago de Cuba, where the largest Cuban earthquakes were felt (1766 and 1852, both with $I_{\max} = \text{IX Medvedev} - \text{Sponheuer} - \text{Karnik, MSK}$). The intraplate seismicity affects the rest of the country, with events that occurred in the vicinity of some tectonic structures. During the documented period, only one earthquake causing strong damage (the 1880 San Cristobal-Candelaria earthquake, $M=6.0$ and $I_{\max} = \text{VIII MSK}$) occurred in the Pinar del Rio region (northwestern Cuba).

In recent times, small to moderate magnitude earthquakes were located by the Cuban seismometric network in the eastern part of the island, and some events occurred in the westernmost part, such as those of April 1974 ($I_{\max} = \text{VI MSK}$; $M_S=3.7$), December 1982 ($I_{\max} = \text{VI MSK}$; $M_S=4.9$) and March 1995 ($I_{\max} = \text{V MSK}$, $M_S=2.5$).

3. The smoothed seismicity approach for PSHA

The concept of seismic activity was introduced by Riznichenko (1959) in the Sixties: seismic activity A is the number of earthquakes in a given energy interval ($10^{K-0.5} - 10^{K+0.5}$) in the time and space unity, where K is the energy class related to magnitude M (Rautian, 1964) by:

$$K = 1.8 M + 4.0 \quad (1).$$

Seismic activity is computed, then, for a reference K : the popular A_{10} or A_{15} in Russian literature indicate the seismic activity related to $K=10$ or $K=15$, which roughly correspond to M 3.3 and 6.1, respectively. The mapping of seismic activity was introduced in seismological practice more than 40 years ago (e.g. Riznichenko, 1959) and a detailed discussion can be found in Riznichenko and Gorbunova (1968). Seismic activity maps were the basis for the first quantitative estimations of seismic hazard, represented at that time by seismic shakeability (Riznichenko, 1965, 1966).

Frankel (1995) retrieved the concept of seismic activity by computing seismic hazard directly through the a -values of the Gutenberg-Richter distribution derived from different magnitude thresholds, and produced the seismic hazard maps of the United States. This approach, called the spatially smoothed seismicity approach (Frankel, 1995), assumes that future large earthquakes will occur in areas that have experienced small to large earthquakes in the past. Later, Lapajne et al. (1997) slightly modified the Frankel (1995) method and produced the friendly oriented software OHAZ (Zabukovec, 2000). Further details about the modifications introduced, and the results obtained for Slovenia, can be found in Lapajne (2000), Sket-Motnikar et al. (2000), Poljak et al. (2000) and Lapajne et al. (2003).

3.1. Modeling distributed seismicity

In the present application, we have introduced a variation in the computation of the activity rate $n(m_0)$, i.e. the yearly cumulative number of earthquakes equal to, or greater than, the lower bound magnitude m_0 . In fact, the original method (Riznichenko, 1960; Frankel, 1995) requires fixing the period of the catalog which is complete for earthquakes with magnitude greater than, or equal to, m_0 and the remaining part of the catalog is not used. On the contrary, in this work we compute the activity rate also considering different completeness periods for the different magnitude classes. In such a way, a larger chunk of information is taken from the catalog:

$$n_i(m_0) = \sum_{i=m_0}^{m_u} \frac{n(m_i)}{T_i} \quad (2)$$

where $n_i(m_0)$ is the activity rate of Eq. (2), $n(m_i)$ is the number of earthquakes in the magnitude interval “ i ”, T_i is the corresponding completeness period.

In each grid cell i of the study area the activity rate $n_i(m_0)$ is computed and then $n_i(m_0)$ of each cell is spatially smoothed to $\tilde{n}_i(m_0)$ values using the formula proposed by Frankel (1995):

$$\tilde{n}_i(m_0) = \frac{\sum_j n_j(m_0) e^{-\Delta_{ij}^2/c^2}}{\sum_j e^{-\Delta_{ij}^2/c^2}} \quad (3)$$

where c is the correlation distance, and Δ_{ij} is the distance between the i th and j th cells. The correlation distance is an arbitrary parameter defined according to the average epicentral errors in the earthquake catalog and the possible location of future earthquakes. The seismicity is, then, represented by a map of the smoothed activity rate.

3.2. PSHA estimation

To calculate the annual rate $\lambda(u > u_0)$ of events exceeding ground motion u_0 at the study site, the n_j values of Eq. (2) are converted from cumulative to incremental ones using the Herrman (1977) formula, modified by Lapajne et al., (1997). The annual rate $\lambda(u > u_0)$ is computed using the integral over distance d and magnitude m classes instead of the sum (Frankel, 1995), following the formula (Lapajne et al., 1997):

$$\lambda(u > u_0) = \sum_i \tilde{n}_i \int_{m_{\min}}^{m_u} P[u > u_0 | d_i, m_j] p_m(m) dm \quad (4)$$

The i index covers all the grid cells, and the probability density function $p_m(m)$ is defined by the equation:

$$p_m(m) = \frac{b \ln 10 \cdot 10^{-b(m-m_0)}}{1 - 10^{-b(m_u-m_0)}} \quad (5)$$

where b is the decay rate of the Gutenberg – Richter relation. The conditional probability $P[u > u_0 | d_i, m_j]$ can be calculated from (Lapajne at al., 1997):

$$P[u > u_0 | d_i, m_j] = \frac{1}{2} \Phi^* \left(\frac{\ln u_0 - \ln u(d_i, m_j)}{\sigma \sqrt{2}} \right) \quad (6)$$

where $\ln u$ is the attenuation function used, σ is its standard deviation, and Φ^* represents the complementary error function. The ground motion values for a given exceedence probability are obtained by interpolating the values of Φ . The occurrence of events is assumed to be Poissonian.

4. PSHA of Cuba

The study area (17° N and 68°W to 24° N and 85° W) was divided by an 0.1° spacing grid (about 10 km in latitude and longitude).

A version of the Cuban earthquake parametric catalog (Alvarez et al., 1999) updated to December 2000 with the data reported by international agencies and those recorded by the Cuban seismometric network was used for the computation: it covers a time period of about 500 years (1502-2000). The total number of events in the catalog is 16525 and there is no threshold magnitude. The most common hypothesis in PSHA is that the earthquake occurrences form a Poisson process, i.e. a process stationary in time of independent and non-multiple events. Aftershocks were, then, removed from the catalog according to the Gardner and Knopoff (1974) technique with parameters calibrated for Cuba (Garcia et al., 2003). A data set of 10376 independent events with magnitude determination was obtained. 2041 earthquakes have a magnitude greater than, or equal to, 3.0 and are judged suitable for seismic hazard assessment.

4.1. The logic tree

The major motivations for directly using the smoothed seismicity methodology is to avoid a subjective judgement involved when drawing SZs in a region where to associate the seismicity with tectonic features is problematic. Nevertheless, the application of the smoothed seismicity methodology also involves some decisions affected by their own uncertainties. These uncertainties can be considered epistemic uncertainties (McGuire, 1977; McGuire and Shedlock, 1981; Toro et al., 1997) and can be, then, treated with the logic tree approach. The different uncertainties determine the branches of the logic tree, whose nodes are described in the following.

The first node (N1 in Fig. 2) takes into consideration different seismicity models. Three seismicity models have been taken into account: two of them refer to different threshold magnitudes ($M \geq 3$ and $M \geq 5$), the third model is based on normalized activity rates, i.e.: rates calculated by Eq. (2). The first two models request the completeness period for the threshold magnitude (see Table 1) while the third needs the different completeness periods for each magnitude class exceeding the threshold value ($M \geq 3$). An additional model considered by Frankel et al. (2000) refers to magnitude 4 and is discarded here because the amount of data for medium to low magnitude events in the Cuban catalog does not produce any remarkable differences in the computed activity rates. Large earthquakes (magnitude about 7 and above) did occur in the Cuban region (e.g.: $M=7.2$ in 1562, $M=7.3$ in 1852, $M=8.1$ in 1946, and $M=6.9$ in 1992), but no evidence of characteristic earthquake behaviour has yet been found; consequently, the additional seismicity model of Frankel (1995), which considers the characteristic earthquakes, is not elaborated here.

The second node (N2 in Fig. 2) refers to the zonation models. More precisely, the different models define the regions where the b -value and M_{max} are considered constant. We define four different zonations (see Figure 3), on the basis of the regional seismotectonic features.

The third node (N3 in Fig. 2) considers the attenuation models. In the absence of PGA attenuation relationships valid for the Cuban region, we decided to consider the two recent PGA soil-dependent attenuation relationships of Dahle et al. (1995) and Ambraseys et al. (1996).

Twenty-four branches constitute, then, the logic tree used here: three seismicity models, four seismicity parametrisations, and two attenuation relations.

4.2. Seismicity models

As said before, three seismicity models were considered here (see Node N1 in Figure 2): these seismicity models consist of the threshold magnitude used in the elaboration and its completeness period, and the suitable correlation distance for the magnitude range. Models S1 and S3 refer to a threshold magnitude of 3, while Model S2 to a threshold value of 5. The catalog completeness for each magnitude class was obtained by means of plots of the cumulative number of events vs. time (Stepp, 1972). Many tests were carried out in order to determine the proper correlation distance c , for each seismicity model. Values of 10, 25, 30, 50, and 100 km were tried for c and, by comparing the relative activity rate maps, we found that a c -value of 30 km can be well applied to the seismicity models S1 and S3, while a value of 50 km is more suitable for the seismicity model S2. A very fragmented pattern related to small clusters of earthquakes was found using a c -value smaller than 25 km.

Seismicity model S1 considers earthquakes with magnitude greater than, or equal to, 3.0; the completeness period for this magnitude is 20 years but a longer period of 60 years can be used for some parts of Cuba (see Table 1). The activity rate was counted in every cell using a correlation distance c of 30 km.

Seismicity model S2 considers events with magnitude 5 and above; the completeness period for this magnitude is 100 years but the longer period of 150 years can be used for several parts of Cuba (see Table 1). The activity rate was counted in every cell using a correlation distance c of 50 km.

In seismicity model S3, the seismic activity was computed using the whole catalog span with different completeness periods (see Table 2) for the different magnitude classes. The activity rate was counted in every cell using a correlation distance c of 30 km.

4.3. Zonation models

The assumption that the seismicity parameters (b -value and M_{max}) are uniform throughout the whole investigated area is requested by the Frankel (1995) method. As the studied region is characterised by different types of seismicity, we have identified some seismotectonically homogeneous sectors, where the seismicity parameters are constant (Fig. 3).

The b -value for each zone was obtained by fitting the cumulative number of earthquakes in each magnitude class to the Gutenberg – Richter relation by the maximum likelihood method (Weichert, 1980). The maximum magnitude for each zone was assigned by increasing the maximum observed magnitude by one unit step (0.5 in our case, taking into account the central values of the magnitude classes) when referred to a return period shorter than the earthquake catalog length (one step beyond” technique, Slejko et al., 1998). In addition, as already said, also the completeness period for the threshold magnitude was computed. All values are reported in Tables 1 and 2.

Zonation model Z1 (Fig. 3a) considers a unique, homogeneous zone (Caribbean) over the entire study area. The maximum magnitude (8.5) is obtained from the maximum observed magnitude 8.2 of the 1946 Hispaniola earthquake and the b -value is 0.71.

In zonation model Z2 (Fig. 3b) the study region was divided into two parts, taking into account the two different global tectonic environments that exist in the area. The northern intraplate region is related to a moderate to low seismicity, the M 6.2, 1914 Gibara earthquake represents the maximum observed event and the calculated b -value is 0.90. In this region, the earthquakes occur along tectonic faults with long periods of quiescence. In the southern interplate region the earthquakes occur mainly on the plate boundary (northern and southern limits of the Gonave microplate), the M 8.2, 1946 Hispaniola earthquake is the maximum observed event and the calculated b -value is 0.71.

The interplate region was divided into two (northern and southern) zones in zonation model Z3 (Fig. 3c), to emphasize the role of the active plate boundary. The M 8.2, 1946 Hispaniola earthquake is the extreme event in the northern plate boundary area and the computed b -value is 0.76. The M 7.8, 1692 Port Royal, Jamaica earthquake represents the major event in the southern plate boundary area and the computed b -value is 0.70.

In zonation model Z4 (Fig. 3d), the plate boundary is restricted to the Cuban sector, where seismicity appears different (larger number of moderate earthquakes, perhaps due to the presence of the Cuban seismometric network) from the rest of the region (Fig. 1). For this area, the maximum observed event is the M 7.5, 1766 Santiago de Cuba earthquake and the computed b -value is 0.80. The b -value decreases to 0.66 in the rest of the interplate region.

In addition to the described zones, a background zone was added to all zonations, except Z1. This background zone covers the remaining area of the study region: the M 6.2, 1900 Cayman Islands earthquake is the extreme event and the calculated b -value is 0.75.

4.4. Attenuation models

The strong-motion relationship used in seismic hazard assessment has a great influence on the hazard results. General relations valid over very large regions can be found in literature and used when local relations are not available. This is the case of the Cuban region, where no strong-motion data were available before 1998, when the first accelerometers were installed, and, consequently, PGA attenuation relations have not been calibrated yet.

For the present study, we selected two attenuation models. The first model A1 is the Ambraseys et al. (1996) relation, which was calibrated on European earthquakes, and the second model A2 is the Dahle et al. (1995) one, which was calibrated on earthquakes in Central America. The Dahle et al. (1995) relation seems adequate for our needs as the records from subduction zones are a marginal part of the data set used for its calibration. Actually, the Ambraseys et al. (1996) attenuation relation was calibrated considering epicentral distances for earthquakes with magnitude M_s smaller than 6 and fault distances for the larger events. In our catalog, the earthquakes with magnitude 6 and larger form a very small part of the data (in any data sets used in the computation they are less than 3%) and, consequently, we consider that approximating the fault distance to the epicentral one does not influence the final results.

4.5. Results

Following the methodology previously described, twenty-four hazard maps were computed considering three seismicity models, four zonation models, and two PGA attenuation models (Figs. 4 and 5). The hazard estimates were computed for rock and refer to a 475-year return period, which corresponds to the 90% non-exceedance probability in 50 years. The aleatory uncertainty is given by the standard deviation of the attenuation relations and is taken into account in the hazard computation.

Fig. 4 shows the results obtained using the Ambraseys et al. (1996) PGA attenuation relation for the different seismicity and zonation models. The general features of the maps are obviously similar and show the highest hazard located in correspondence to the plate boundary. More precisely, two seismic spots can be seen on the southern coast of Cuba in most maps: the main one around Santiago and the second offshore Cabo Cruz. Other areas with an expected high PGA can be seen in Jamaica and along the northern coast of Hispaniola. The influence of the seismicity models is evident because model S1 (threshold magnitude 3) leads to the highest hazard while model S2 (threshold magnitude 5) to the lowest. The influence of the zonation models, on the contrary, is very limited. The maximum PGA exceeds 0.34 g along the southern Cuban coast with seismicity model

S1, regardless of the zonation models used, and seismicity model S3, with the exception of zonation model Z4. In the other cases, it remains below 0.34 g.

Fig. 5 shows the results obtained using the Dahle et al. (1995) PGA attenuation relation for the different seismicity and zonation models. A good general agreement can be seen with the maps showing the results obtained by the Ambraseys et al. (1996) attenuation relation (Fig. 4), although the areas with low hazard (PGA larger than 0.10 g) are now wider. The maximum hazard is again concentrated along the plate boundary but it exceeds 0.34 g only with seismicity model S1 (threshold magnitude 3) and the first three zonation models.

The final aggregate map (Fig. 6) was obtained by weighting the results from the three seismicity models, the four zonation models, and the two attenuation models. The weights assigned to each branch of the logic tree are reported in Fig. 2. It can be seen that, in general, the branches have been weighted evenly, a preference was given to the seismicity model S3, because it is based on a larger part of the catalog than the other models, and to the attenuation model A2, because it is based also on local data. To quantify the aleatory uncertainty, one standard deviation of the attenuation relations used (Dahle et al., 1995; Ambraseys et al., 1996) has been added.

The map in Fig. 6a shows the median value of the PGA with a 475-year return period. It points out the features already seen in the maps of the individual results (Figs. 4 and 5) with the highest hazard along the plate boundary, especially along the Cuban southern coast, where PGA values exceeding 0.26 g are expected.

To quantify the epistemic uncertainty related to the hazard estimates, the map with the hazard values at the 84% percentile was computed as well (Fig. 6b). In this map, the aleatory uncertainty is represented by one standard deviation of the Gaussian distribution of the estimates from the different branches of the logic tree. This map is, obviously, very similar to the map with the median PGA values (Fig. 6a) with a general increase in the PGA values. More precisely, five spots of high hazard can now be seen offshore Santiago de Cuba (PGA larger than 0.34 g), offshore southwestern Cuba, in central Jamaica, in northwestern Hispaniola, and offshore eastern Hispaniola (all with PGA larger than 0.26 g).

5. Comparison between the hazard maps obtained with the zone approach and the spatially smoothed seismicity method

In a recent paper (Garcia et al., 2003), the PSHA for Cuba and the surrounding region was computed for an average soil following the standard Cornell (1968) approach. A detailed seismogenic zonation with 36 SZs was used in that work. The results of the same approach are presented here for rock, considering the Ambraseys et al. (1996) and Dahle et al. (1995) attenuation relations (Figs. 7b and 8b, respectively). The different behaviour of the two relations is clearly pointed out by the individual results obtained: the areas with maximum PGA values, reached along the plate boundary, are larger when the Ambraseys et al. (1996) relation is considered, while, outside the high seismicity region, higher values are obtained with the Dahle et al. (1995) relation.

In the comparison between the results obtained following the zoning and the smoothed seismicity approaches, it could be extremely interesting to point out where the seismogenic zonation is not well supported by seismological evidence and, viceversa, where seismicity indicates the presence of an SZ not considered in the seismogenic zonation used for the hazard assessment. The difference between the PGA estimates for a 475-year return period obtained with the spatially smoothed seismicity and the zoning approaches is presented in Figs. 7 and 8, considering respectively the Ambraseys et al. (1996) and the Dahle et al. (1995) attenuation relations. All maps show the median value of the PGA with a 475-year return period with the standard deviation of the attenuation relations. In the case of the smoothed seismicity approach, the maps (Fig. 7a and 8a) are derived from the aggregate results of the branches of the logic tree, weighted as explained in Fig. 2,

referred to the specific attenuation model, but in this case the epistemic uncertainty has not been added to facilitate the comparison with the usual hazard maps in literature (Figs. 7b and 8b).

Fig. 7 clearly shows the different pattern of the maps obtained with the two different approaches, when the Ambraseys et al. (1996) attenuation model is considered. The one from the smoothed seismicity approach (Fig. 7a) is more detailed, while the one from the zoning approach (Fig. 7b) averages the hazard over the SZs considered. In such a way, a PGA, with the smoothed seismicity approach (Fig. 7a), higher than 0.34 g is expected around Santiago, while the northern coast of Hispaniola is more hazardous (PGA values larger than 0.26 g) with the zoning approach (Fig. 7b). Fig. 7c shows the difference between the results given by the two approaches (estimates with the smoothed seismicity approach minus estimates with the zoning approach). Rarerly does this difference exceed, in absolute value, 0.10 g and this occurs in two small spots along the southern Cuban coast, with opposite tendencies, and along the whole northern and eastern coasts of Hispaniola, where the estimates from the zoning approach are also larger by more than 0.15 g than those from the smoothed seismicity approach. The explanation in the case of the Cuban coast is easy: the concentration of reported seismicity around Santiago de Cuba is distributed over a wider SZ. In the case of Hispaniola, the definition of the SZs external, but close, to the studied region play an important role because they contribute to the hazard computation. The SZ along the northern Hispaniola coast was also defined eastwards, outside the area shown in the maps of the present work. Several earthquakes occurred there and those events are averaged over the whole SZ, thus increasing the hazard inside the SZ itself. This SZ, moreover, was not subdivided into several sectors as the seismicity would suggest.

Fig. 8c shows the comparison for the Dahle et al. (1995) attenuation model. Similar features as those described in the case of the Ambraseys et al. (1996) attenuation model can be seen again but in this case the differences are smaller. These are, in fact, larger than 0.10 g only in the case of small areas around Hispaniola.

6. Conclusions

The smoothed seismicity approach (Frankel, 1995) has been applied for seismic hazard assessment of the Cuban region. A few modifications with respect to the standard application (Frankel, 1995) were introduced in the computation: the first refers to the methodology of counting the earthquakes exceeding the threshold magnitude and the second applies a zonation where the seismicity parameters b -value and M_{max} are computed. A secondary aspect of this study is given by the comparison with the seismic hazard estimates obtained according to seismotectonic probabilism. The comparison highlights the areas where the seismicity alone and the seismotectonic interpretation are in agreement and the areas where they are not.

Three seismicity models, four zonation models, and two attenuation models were considered for the epistemic uncertainties in the seismicity pattern characterisation. The results are influenced by the combinations of the different models used. In particular, those coming from seismicity models S1 and S2 can be considered less robust than those from model S3 because fixing a time interval to count earthquakes of all magnitudes implies that the completeness period is the shortest and information about large earthquakes of the past is lost. The separation of the intraplate from the interplate earthquakes is supported by the computed seismicity parameters (see Tables 1 and 2); zonation models Z2 and Z3 seem, then, the most suitable but the difference they produce are very limited. Moreover, the A2 attenuation model (Dahle et al., 1995) propagates the ground shaking over larger areas than the A1 attenuation model (Ambraseys et al., 1996).

The final hazard map (Fig. 6) points out the high hazard of the southern Cuban coast, and especially the Santago area, with PGA values ranging from 0.26 g and 0.40 g according to the uncertainty level considered.

The results from the application of the smoothed seismicity approach were compared with those from standard approaches (Figs. 7 and 8). From this analysis, the possible mislocation of the events around Santiago de Cuba is evident, as well as the influence of the geometry used to model the seismogenesis of the northern coast of Hispaniola.

Acknowledgements

This research has been developed with financial contributions of the "ICTP Programme for Training and Research in Italian Laboratories" of the International Centre for Theoretical Physics, Miramare, Trieste, Italy.

References

- Alvarez, L., T. Chuy, and M. Cotilla (1991). Peligrosidad sísmica de Cuba. Una aproximación a la regionalización sísmica del territorio nacional, *Revista Geofísica* **35**, 125-150.
- Alvarez, L., T. Chuy, J. García, B. Moreno, H. Alvarez, M. Blanco, O. Exposito, O. Gonzalez, and A.I. Fernandez (1999), *An earthquake catalogue of Cuba and neighbouring areas*, ICTP Internal Report IC/IR/99/1, Miramare, Trieste, Italy, 1-60.
- Ambraseys, N.N., K.A. Simpson, and J.J. Bommer (1996). Prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, **25**, 371-400.
- Cornell, C.A. (1968). Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.* **58**, 1583-1606.
- Dahle, A., A. Climent, W. Taylor, H. Bungum, P. Santos, M. Ciudad Real, C. Linholm, W. Strauch, and F. Segura (1995). New spectral strong motion attenuation models for Central America, in: *Proc. of the Fifth International Conference on Seismic Zonation*, Nice, France, vol. II, 1005-1012.
- Frankel, A. (1995). Mapping seismic hazard in the Central and Eastern United States, *Seism. Res. Letts.* **66**, no. 4, 8-21.
- Frankel, A., C. Mueller, S. Harmsen, R. Wesson, E. Leyendecker, F. Klein, T. Barnhard, D. Perkins, N. Dickman, S. Hanson, and M. Hopper (2000) USGS National Seismic Hazard Maps, *Earthquake Spectra* **16**, 1-20.
- García, J., D. Slejko, L. Alvarez, L. Peruzza, and A. Rebez. (2003). Seismic hazard assessment for Cuba and the surrounding areas, *Bull. Seism. Soc. Am.* **93**, 2563-2590.
- Gardner, J. K. and L. Knopoff (1974). Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bull. Seism. Soc. Am.* **64**, 1363-1367.
- Giardini D. (1999). The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP): 1992/1999, *Ann. Geofis.* **42**, 957-974.
- Herrman, R. B. (1977). Recurrence relations, *Earthquake Notes* **48**, 47-49.
- Jacob, K., J. Armbruster, N. Barstow, and S. Horton (1994). Probabilistic ground motion estimates for New York: comparison with design ground motions in national and local codes, in *Proceedings of Fifth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Chicago, iii, 119-128.
- Kijko, A., and G. Graham (1998). Parametric-historic procedure for probabilistic seismic hazard analysis. Part I: Estimation of maximum regional magnitude m_{\max} , *Pure Appl. Geophys.* **152**, 413-442.

- Kijko, A., and G. Graham (1999). Parametric–historic procedure for probabilistic seismic hazard analysis. Part II: Assessment of seismic hazard at specified site, *Pure Appl. Geophys.* **154**, 1–22.
- Lapajne, J.K. (2000). Some features of the spatially smoothed seismicity approach, in *Proc. of the Workshop Seismicity Modeling in Seismic Hazard Mapping*, Poljce, Slovenia, 22–24 May, 27–33.
- Lapajne, J.K., B. Sket Motnikar, B. Zabukovec, and P. Zupancic (1997). Spatially smoothed seismicity modelling of seismic hazard in Slovenia, *J. Seism.* **1**, 73–85.
- Lapajne, J.K., B. Sket Motnikar, and P. Zupancic (2003). Probabilistic Seismic Hazard Assessment Methodology for Distributed Seismicity, *Bull. Seism. Soc. Am.* **93**, 2502–2515.
- McGuire, R.K. (1977). Effects of uncertainties in seismicity on estimates of seismic hazard for the east coast of the United States, *Bull. Seism. Soc. Am.* **67**, 827–848.
- McGuire, R.K., and K.M. Shedlock (1981). Statistical uncertainties in seismic hazard evaluations in the United States, *Bull. Seism. Soc. Am.* **71**, 1287–1308.
- Moreno, B., M. Grandison, and K. Atakan (2002). Crustal velocity model along the southern Cuban margin: implications for the tectonic regime at an active plate boundary, *Geophys. J. Int.* **151**, 632–645.
- Muir-Wood, R. (1993). From global seismotectonics to global seismic hazard, *Ann. Geofis.* **36**, 153–168.
- Poljak, M., P. Zupancic, J.K. Lapajne, and B. Sket Motnikar (2000). Seismotectonic input for spatially smoothed seismicity approach, in *Proc. of the Workshop Seismicity Modelling in Seismic Hazard Mapping*, Poljče, Slovenia, 22–24 May, 117–124.
- Rautian, T.G. (1964). *On the determination of earthquake energy for distances lower than 3000 km*, in *Experimental seismicity*. Moscow, Nauka Publ. 88–93 (in Russian).
- Riznichenko, Yu.V. (1959). On quantitative determination and mapping of seismic activity. *Ann. Geofis.* **XII**, X-1862, 227–237.
- Riznichenko, Yu.V. (Editor) (1960) In: *Methods of the detailed study of seismicity* (in Russian, Izd. AN SSSR, Moscow, 176pp
- Riznichenko, Yu.V. (1965) From the activity of earthquake foci to shakeability of Earth's surface (in Russian), *Fizika Zemli* **11**, 1–12 (715–721 of the English edition of the A.G.U.)
- Riznichenko, Yu.V. (1966): Calculus of the shakeability of points in Earth's surface from earthquakes in the nearby region. *Fizika Zemli*, **1**, 16–32, (in Russian)
- Riznichenko, Yu.V. (Editor) (1979). *Seismic Hazard in the Territory of the U.S.S.R.*, Nauka, Moscow, 1–184 (in Russian).
- Riznichenko, Yu.V. and I.V. Gorbunova (1968) On methods to prepare maps of seismic activity, in: *Seismicheskoe Raionirovanie SSSR*, Nauka, Moscow (in Russian).
- Rosencrantz, E., and P. Mann (1991). SeaMARC II mapping of transform faults in the Cayman Through, Caribbean sea. *Geology* **19**, 690– 693.
- Shedlock, K.M. (1999). Seismic hazard map of North and Central America and the Caribbean, *Ann. Geofis.* **42**, 977–999.
- Shedlock, K.M., and J.G. Tanner (1999). Seismic hazard map of the western hemisphere, *Ann. Geofis.* **42**, 1199–1214.

- Shepherd, J.B., J.G. Tanner, C.M. McQueen, and L.L. Lynch (1997). Seismic hazard in Latin America and the Caribbean, in *Seismic Hazard Maps for the Caribbean*, IRDC, Ottawa, Vol. 5, 15.
- Sket Motnikar, B., J.K. Lapajne, P. Zupancic, and B. Zabukovec (2000). Application of the spatially smoothed seismicity approach for Slovenia, in *Proc. of Workshop Seismicity modeling in seismic hazard mapping*, Poljce, Slovenia, May 22-24 May, 125-133.
- Slejko, D., L. Peruzza and A. Rebez (1998). Seismic hazard maps of Italy, *Annali di Geofisica* **41**, 183-214.
- Speed, R.C., and D.K. Larue (1991). Extension and transtension in the plate boundary zone of northeastern Caribbean, *Geophys. Res. Lett.* **18**, 573–576.
- Stepp, J.C. (1972). Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard, in *Proc. of the 1st Int. Conf. on Microzonation*, Seattle Washington, Vol. 2, 897-910.
- Toro G.R., N.A. Abrahamson and J.F. Schneider (1997) Model of strong motions from earthquakes in central and eastern North America: best estimates and uncertainties. *Seismol. Res. Lett.*, **68**, 41-57.
- Veneziano, D.C., A. Cornell, and T. O’Hara (1984). Historical method of seismic hazard analysis, Rep. NP-3428, Palo Alto, California.
- Weichert, D.H. (1980). Estimation of earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes, *Bull. Seism. Soc. Am.* **70**, 1337-1356.
- Woo, G. (1996). Kernel estimation method for seismic hazard area source modeling, *Bull. Seism. Soc. Am.* **86**, 353–362.
- Zabukovec, B. (2000). OHAZ: A computer program for spatially smoothed seismicity approach, in *Proc. of the Workshop Seismicity Modeling in Seismic Hazard Mapping*, Poljce, Slovenia, 22–24 May, 135–140.
- Zakharova, A.I. (1986) *Estimation of seismicity parameters using a computer*. Russian Translations Series, No. 46. A. A. Balkema/ Rotterdam, 1-150 (original papers in Russian from: Fan Publishers, Tashkent, 1972).

Table and figure captions

Table 1 – Completeness periods and seismicity parameters for the different zonation models of seismicity models S1 and S2.

Table 2 – Completeness periods and seismicity parameters for the different zonation models of seismicity model S3.

Figure 1 – Seismotectonic framework of the Cuban region. The epicenters of the earthquakes with $M \geq 3.0$ are shown together with the main tectonic features of the plate boundary. See text for the acronyms.

Figure 2 – Logic tree and weights used in the present work. The star indicates that the activity rate was computed with different completeness periods for the different magnitude classes (see Eq. (2)).

Figure 3 – Zonation models. The b -value and M_{max} are considered homogeneous in each zone: a) zonation model Z1 considers the whole region as homogeneous; b) zonation model Z2

separates the southern interplate region from the less seismic northern intraplate region; c) zonation model Z3 separates the northern plate boundary region from the southern plate boundary region; d) zonation model Z4 separates the most seismic Cuban sector of the plate boundary area from the rest of the plate boundary.

Figure 4 – PGA on rock with a 475-year return period computed with the Ambraseys et al. (1996) attenuation model (with its standard deviation) for the three seismicity models and the four zonation models.

Figure 5 – PGA on rock with a 475-year return period computed with the Dahle et al. (1995) attenuation model (with its standard deviation) for the 3 seismicity models and the four zonation models.

Figure 6 – Final hazard map for Cuba in terms of PGA on rock with a 475-year return period, with standard deviation of the attenuation relations used (Dahle et al., 1995; Ambraseys et al., 1996), computed by aggregating the results of the logic tree: a) median PGA ; b) 84% percentile PGA.

Figure 7 – Comparison between the median PGA on rock with a 475-year return period, with standard deviation of the attenuation relation, obtained by the zoneless and zoning approaches and the Ambraseys et al. (1996) attenuation model: a) computed by the smoothed seismicity approach; b) computed by the Cornell (1968) approach, the SZs used in the computation are drawn as boxes; c) difference between the PGA estimates with the smoothed seismicity and Cornell (1968) approaches.

Figure 8 – Comparison between the median PGA on rock with a 475-year return period, with standard deviation of the attenuation relation, obtained by the zoneless and zoning approaches and the Dahle et al. (1995) attenuation model: a) computed by the smoothed seismicity approach; b) computed by the Cornell (1968) approach, the SZs used in the computation are drawn as boxes; c) difference between the PGA estimates with the smoothed seismicity and Cornell (1968) approaches.

Anexo 2

Seismic Hazard Maps for Cuba and Surrounding Areas

by Julio García, Dario Slejko, Leonardo Alvarez, Laura Peruzza, and Alessandro Rebez

Abstract A seismic hazard assessment for Cuba and the surrounding areas has been performed in response to a possible revision of the national building code. The hazard assessment has been done according to the standard methodology adopted by the Global Seismic Hazard Assessment Program and by introducing some computational techniques used for the seismic hazard map of Italy. Problems of earthquake catalog treatment, attenuation of peak ground acceleration and macroseismic intensity, as well as seismic source definition have been rigorously analyzed. Thirty-six seismogenic zones have been identified and characterized from a seismicity point of view. The present study offers a picture of the seismic hazard on Cuban territory based on historical seismicity and the benefits drawn from the most recent international investigations on the subject, such as the logic-tree approach used to represent the inevitable uncertainties encountered through the choice of attenuation relation. The final results are maps of the expected shaking with a 475-year return period in terms of peak ground acceleration and macroseismic intensity, which point out the high hazard along the southern coast of Cuba, where the expected ground motion, without the aleatoric uncertainty in the attenuation relations, is between 0.20g and 0.30g. The rest of the island is characterized by values representing less severe shaking.

Introduction

Cuba is located on the North American plate, north of the boundary with the Caribbean plate, where an approximately sinistral transcurrent motion takes place. The largest earthquakes (Fig. 1) have affected the southernmost part of the island, causing heavy damage in Santiago de Cuba (e.g., the earthquakes of 1578 with magnitude M [corresponding to or calibrated on M_s], 6.75, of 1766 with M 7.5, of 1852 with M 7.3, and of 1932 with M 6.75 [Cotilla, 1998; Chuy, 1999]).

The first attempt to obtain a seismic hazard map of Cuba was based on historical macroseismic data, which have been collected systematically since the early 1960s. A quantitative analysis of the seismological data that took into account the number of events and their recurrence and the maximum intensities reported from 1524 to 1976, including both historical and instrumental data, led to a map of the seismic intensity of Cuba (Chuy and Rodriguez, 1980; revised in Chuy *et al.*, 1983). That study lacked detailed analyses on seismicity and seismogenesis; in addition, no ground-motion attenuation was applied to the intensity data and the maps simply represented the maximum observed shaking.

Seismic hazard estimates for the whole country were computed using the Cornell (1968) probabilistic approach, in McGuire's (1976) formulation, by Rubio (1985). Alvarez and Bune (1985a,b) assessed the seismic hazard for eastern Cuba by using a modified version of the Riznichenko (1979)

method to obtain probabilistic estimates with a Poissonian occurrence model. With the same methodology, Alvarez *et al.* (1991) undertook a new study devoted to the whole Cuban region in terms of macroseismic intensity, published in the *Nuevo Atlas Nacional de Cuba* (1989). There, attenuation was considered by the elliptical isoseismal model proposed by Alvarez and Chuy (1985).

For the present Cuban building code, Chuy and Alvarez (1995) presented a map that shows the horizontal peak ground acceleration (PGA) with an 85% nonexceedence probability in 50 years for an average soil (without classification of the site geology); the PGA was calculated from macroseismic intensity using the Trifunac and Brady (1975) relationship. The Chuy and Alvarez (1995) map was constructed from the results by Orbera *et al.* (1990), Chuy *et al.* (1992), and Gonzalez *et al.* (1993), for different regions of Cuba. This decision caused a nonuniform treatment of the information, as the basic works did not use the same methodology.

More recently, probabilistic seismic hazard estimates for the whole of Cuba were prepared by Rodriguez *et al.* (1997) in terms of macroseismic intensity, then translated into PGA. They employed the Cornell (1968) approach, in the McGuire (1976) formulation, using the computer program SACUDIDA (Alvarez, 1995). The results were presented as a set of curves and maps, and the estimates ob-

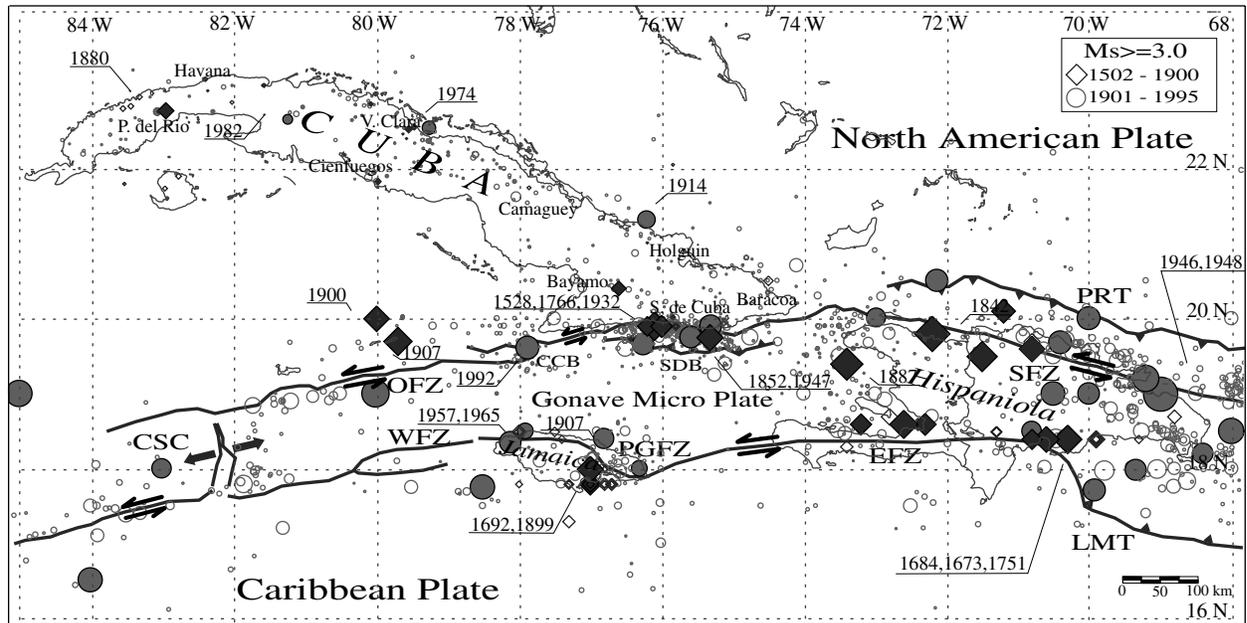


Figure 1. Independent earthquakes (1502–1995, $M_s \geq 3$) in the vicinity of Cuba: diamonds indicate historical events (pre-1900), circles show events of the twentieth century, and solid symbols pinpoint the most important earthquakes. The major faults are indicated with the following abbreviations: CSC, Cayman spreading center; WFZ, Walton fault zone; OFZ, Oriente fault zone; PGFZ, Plantain Garden fault zone; EFZ, Enriquillo fault zone; SFZ, Septentrional fault zone; PRT, Puerto Rico trench; LMT, Los Muertos trench; CCB, Cabo Cruz basin; SDB, Santiago deformed belt.

tained were lower than the previously obtained ones in the western region and similar in the east-central zone.

In the context of the International Decade for Natural Disasters Reduction, the Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) (Giardini and Basham, 1993; Giardini, 1999) implemented a regionalized strategy for the assessment of seismic hazard based on a mosaic of multinational test areas and regions. In the GSHAP project, the results by Shepherd *et al.* (1997) for the Caribbean, based on the historical parametric method (Veneziano *et al.*, 1984), were taken and inserted into the hazard map of North and Central America (Shedlock, 1999; Shedlock and Tanner, 1999). The results can be considered preliminary, as the applied method (Veneziano *et al.*, 1984) used incomplete data and information about Cuban seismicity.

Our general comments on the state of the art of seismic hazard assessment for Cuba are as follows:

- Estimates for both the central and the western regions of the island show a certain degree of subjectivity due to the scarcity of events in some seismicity zones;
- Source zonation is a problem not yet resolved, as each map (Alvarez *et al.*, 1991; Chuy and Alvarez, 1995; Rodriguez *et al.*, 1997) presents only a partial view of the seismotectonics of the area and not within a general kinematic framework;
- The use of ground-motion parameter values (PGA, velocity, or displacement) computed from intensity (Trifunac

and Brady, 1975), instead of using proper attenuation relations, makes the calculated hazard in terms of those parameters less reliable.

The aim of the present study is to propose new probabilistic seismic hazard estimates for the Cuban territory and the surrounding region (the islands of Jamaica and Hispaniola), using a standard probabilistic approach (Cornell, 1968) and importing some of the procedures adopted by other nations dealing with the problem of revising and updating their national building codes. The present work benefits from the Italian experience matured in the Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti activities (Slejko *et al.*, 1998) and applied to the GSHAP test area ADRIA (Slejko *et al.*, 1999), a project that involved many European countries. Estimates in terms of PGA and macroseismic intensity have been considered; the computation was done by the computer code SEIS-RISK III (Bender and Perkins, 1987), and a complete revision of the attenuation relationships for macroseismic intensity is proposed here. In order to represent the uncertainties produced by the choice of the attenuation relation adopted, the logic-tree methodology has been applied.

Seismicity

Documented Cuban seismic history began in the sixteenth century, when several great earthquakes (Chuy *et al.*, 1983) occurred in the Greater Antilles (Cuba, Jamaica, His-

paniola, and Puerto Rico) (see Fig. 1). The city of Santiago de Cuba, in the southeastern part of the island, was partially destroyed by some of these strong earthquakes: according to Chuy (1999), they happened in 1766 and 1852, when the maximum observed intensity (I_{max}) reached IX Medvedev–Sponheuer–Karnik (MSK) (Sponheuer, 1960). The MSK intensity scale is similar to the modified Mercalli scale (Richter, 1958) with the main differences related to weak ground shaking (Fig. 2) (Murphy and O’Brian, 1977). The remaining territory has been affected by less frequent intraplate seismicity associated with minor tectonic structures, and during the documented period only one earthquake (the 1880 San Cristobal–Candelaria earthquake, $I_{max} = VIII$ MSK) occurred in the northwestern part of the island, causing damage similar to that described for Santiago de Cuba.

Seismological Data Collection and Earthquake Catalog

Several kinds of data are available for Cuba and the neighboring regions: macroseismic for the sixteenth to nineteenth and part of the twentieth centuries (Chuy, 1999), instrumental from international seismological agencies (International Seismological Centre [ISC] and U.S. Geological Survey [USGS]) during the twentieth century, and instrumental from the Cuban local network since 1964 (Servicio Sismológico Nacional, 1964–1995).

For systematic storage and processing of data to be used in the present hazard assessment, we decided to create a new database where each earthquake could be characterized by several entries, one for each source of information available. The database was prepared by merging all previously cited data sources (British Association Seismology Committee, 1918, 1919, 1921; International Seismological Summary, 1918–1963; ISC, 1964–1995; Preliminary Determination of Epicenters, 1968–1995; Servicio Sismológico Nacional, 1964–1995; Chuy, 1999). This main data set was used to prepare a catalog characterized by only one entry for each event, selecting the most reliable data. This selection was done in two steps, the first with the aid of the computer program EDCAT (Gabrielov *et al.*, 1986), which allowed us to discard the evident duplicated entries, the second by visual checking of the data set. The final catalog contains 9241 earthquakes from 1502 to 1995 (Table 1), which describes Cuban seismicity better than the GSHAP catalog (Tanner and Shepherd, 1997; Shedlock, 1999). For our study area, the Tanner and Shepherd (1997) catalog contains only 15% of the events of the catalog used in this study for the period before 1900 and 25% after that. Most of the events of our new catalog have an estimate of magnitude (Table 2). In the case of macroseismic data, the magnitude M_1 was taken from Chuy (1999), who computed M_1 by fitting the isoseismals according to the Fedotov and Shumilina (1971) attenuation model:

$$M_1 = 0.6667I_s + 1.7533 \log r + 0.0058r - 1.6667, \quad (1)$$

MM	MSK
I	I
II	II
III	III
IV	IV
V	V
VI	VI
VII	VII
VIII	VIII
IX	IX
X	X
XI	XI
XII	XII

Figure 2. Comparison between the modified Mercalli (MM) and Medvedev–Sponheuer–Karnik (MSK) macroseismic scales (from Murphy and O’Brian, 1977).

Table 1
General Characteristics of the Earthquake Catalog

Time window	1502 to 30 December 1995
Latitude range	16.00°–24.00° N
Longitude range	67.00°–86.00° W
Depth range (km)	0–300
Intensity range (MSK)	II–X

Table 2
Quantification of Earthquake Size in the Catalog

Reported Magnitude	Events	%	Interval
M_s	289	3.13	1.4–8.1
M_1	1045	11.31	2.0–8.2
m_b	411	4.45	2.2–6.7
M_1	137	1.48	1.8–7.1
M_{SD}	1122	12.14	0.1–6.7
M_{SKD}	2953	31.96	0.1–6.6
M_{SKR}	2456	26.58	0.4–5.8
Without M	829	8.97	—
M (total)	9241	100.00	0.1–8.2

M_s and m_b refer to surface and body wave magnitudes, M_1 is the local magnitude coming from international agencies, and M_1 represents the magnitude obtained by macroseismic data inversion. M_{SD} , M_{SKD} , and M_{SKR} refer to the surface-wave magnitude obtained by the Alvarez *et al.* (1990) regression relationships (equations 4, 5, and 6, respectively).

where I_S is the intensity at the study site and r is its epicentral distance.

The size of the recent earthquakes recorded by the Cuban seismographic network is given in the bulletins by two energetic parameters, K_r and K_D (Rautian, 1964; Alvarez *et al.*, 1990):

$$K_r = 1.8 \log [(A_P + A_S)/2] + 2.1 \log (8 T_{SP}) + 0.7 \quad (2)$$

$$K_D = 4.7 \log D - 1.2, \quad (3)$$

where A_P and A_S are the maximum amplitudes of the P and S waves, respectively, T_{SP} is the interval between the P - and S -wave arrival times, and D is the total duration of the recording.

M_s was computed by the Alvarez *et al.* (1990) formulae:

$$M_s = 3.2 \log D - 4.5 \quad (4)$$

$$M_s = 0.68 K_D - 3.68 \quad (5)$$

$$M_s = 0.48 K_r - 1.5 . \quad (6)$$

A new relation to compute M_s from m_b , valid in the interval $4.0 < m_b < 6.0$ and $3.1 < M_s < 6.7$, was obtained by linear regression and used (see Garcia [2001] for details)

$$M_s = 1.37 m_b - 2.34 . \quad (7)$$

No substantial difference was recognized between M_s , M_I , and M_L , as both M_I and M_L were originally calibrated on M_s data.

The most common hypothesis in probabilistic seismic hazard assessment is that the earthquake occurrences form a Poisson process, that is, a process stationary in time of independent and nonmultiple events. With this in mind, it is necessary to identify, as clearly as possible, the foreshocks and aftershocks and to eliminate them from the catalog in order to work only with a catalog of the mainshocks that can be considered independent.

In the Gardner and Knopoff (1974) declustering approach, an event is considered an aftershock if (1) its magnitude does not exceed that of the mainshock, (2) the distance between its epicenter and that of the mainshock is smaller than $L(M)$, and (3) the difference between its origin time and that of the mainshock is smaller than $T(M)$, where $T(M)$ and $L(M)$ are empirical functions of magnitude M :

$$\log T(M) = a_1 M + b_1 \quad (8)$$

$$\log L(M) = a_2 M + b_2. \quad (9)$$

We identified 35 seismic sequences in the Greater Antilles (main events in the M 3–8 range) and computed, by visual

evaluation, the distance $L(M)_i$ between the main event and the farthest aftershock and the time interval $T(M)_i$ between the main event and the last aftershock, for each i of the 35 studied sequences. Contrary to Gardner and Knopoff (1974), who took the envelope of the maximum $T(M)_i$'s and $L(M)_i$'s only, we removed all $T(M)_i$'s and $L(M)_i$'s largely below their average populations (open symbols in Fig. 3) and computed the a_i and b_i ($i = 1,2$) coefficients in equations (8) and (9) by linear regression. The reason we followed this approach is that most events do not have a well-constrained location and, therefore, it seemed reasonable to average the data.

As shown on Figure 3, our $T(M)_i$ values are lower than those given by Gardner and Knopoff (1974) for California, while the $L(M)_i$ values are similar to those obtained by Gardner and Knopoff (1974) for events larger than M 6. Below that magnitude, our values show a great dispersion, because there is no uniformity in the event detection for the entire region, it being better in southeastern Cuba. In fact, weak ($M < 3.0$) aftershocks in south Jamaica or Hispaniola are missing in our catalog because they were not reported by international agencies, such USGS or ISC, while the recent southeastern Cuban earthquakes were well documented. For the period preceding the installation of stations on the Cuban territory (i.e., before 1968), when most of the information is macroseismic or a mixture of instrumental and macroseismic data, it was necessary to pay special attention to the epicentral data. In fact, some events offshore Cuba have the epicentral coordinates of the mainshock computed instrumentally, while the aftershock coordinates are associated to the inland location with the highest macroseismic intensity. The $L(M)$ value in these cases is very uncertain and was not used in our elaborations.

As can be seen in Figure 3 the data for Jamaica, Hispaniola, and Puerto Rico are almost always lower than those for Cuba: two separate regressions were then computed. The obtained values of the parameters in equations (8) and (9) and the correlation coefficient R are $a_1 = 0.41$ and $b_1 = -0.40$ with $R = 0.99$ and $a_2 = 0.36$ and $b_2 = 0.21$ with $R = 0.90$ for Cuba and $a_1 = 0.17$ and $b_1 = 0.86$ with $R = 0.75$ and $a_2 = 0.09$ and $b_2 = 1.08$ with $R = 0.67$ for Jamaica, Hispaniola, and Puerto Rico.

After the removal of all outliers from the population of the maxima for each magnitude class [data with short $T(M)$ or $L(M)$ with respect to their magnitude], the data [both $T(M)_i$'s and $L(M)_i$'s] referring to Jamaica, Hispaniola, and Puerto Rico also show a large dispersion. Because the relative fit is not well constrained, it was decided to use the a - and b -values calculated for Cuba for the whole study region. A data set of 6733 independent events with magnitude determination was obtained, which is judged suitable for hazard assessment.

The time distribution of the seismicity in the study region is presented in Figure 4. The occurrence of large-magnitude ($M \geq 7$) events with a recurrence of about 100 years can be clearly seen (Fig. 4a). From 1900, the number of small- and moderate-magnitude ($3 < M < 6$) earthquakes

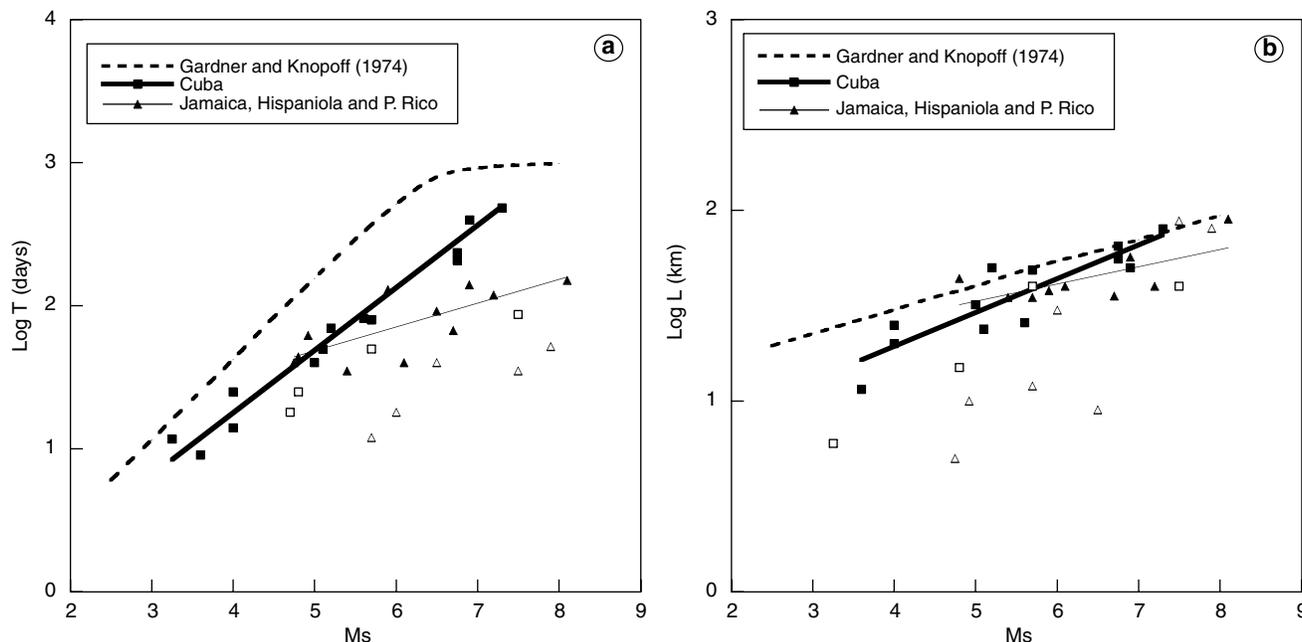


Figure 3. Time (a) and space (b) declustering: two different relations are computed, respectively, for Cuban earthquakes (squares) and earthquakes on the other islands (triangles). Open symbols indicate data not used in the regressions. The dashed lines show the Gardner and Knopoff (1974) relations.

increases, but a sort of small gap can be seen between 1910 and 1930, soon before the occurrence of the large earthquake in 1932 (M_s 6.75) offshore Santiago de Cuba (Fig. 4b). The period 1900–1970 represents a very seismically active interval, while no large earthquakes have occurred recently.

Spatial Characteristics of the Regional Seismicity

The Caribbean seismotectonics are governed by the interaction of the Caribbean plate with the North American plate. The Caribbean–North American plate boundary zone (Fig. 1) comprises the Polochic–Motagua and the Swam Islands fault zones (not presented in Fig. 1) and the mid-Cayman spreading center (CSC). Eastward, the plate boundary splays into two branches: The northern one consists of the upper extremity of the CSC, the Oriente fault zone (OFZ), the Septentrional fault zone (SFZ), and the “19° fault” (Speed and Larue, 1991); this last one is located on the northern Puerto Rico margin (outside Fig. 1). The southern branch begins at the lower end of the CSC and comprises the Walton fault zone (WFZ), the Enriquillo fault zone (EFZ), the Plantain Garden fault zone (PGFZ), the Muertos Trough, and the Anegada Passage fault zone. Both branches meet each other to the east, in the Lesser Antilles subduction zone. The eastward motion of the Caribbean plate produces left-lateral deformation (Moreno *et al.*, 2002) along the EFZ, the WFZ, and the OFZ.

The northeastern Caribbean plate is characterized by complex tectonics, with several subduction zones. Different authors have hinted at the existence of several microplates in the eastern Caribbean: Rozencrantz and Mann (1991)

identified the region delimited by the OFZ, the WFZ, and the EFZ/PGFZ as one of them, and they named it the Gonave Microplate.

The seismicity in the vicinity of Cuba (Fig. 1) clearly indicates the capability of the boundary between the North American and Caribbean plates to produce strong events: from the CSC, which generates normal-faulting earthquakes, to the OFZ and the SFZ, where very large transpressive and strike-slip earthquakes have occurred. South of the OFZ, the southern edge of the plate boundary zone is defined by the left-lateral strike-slip WFZ, where some large events have been reported near Kingston City.

Cuban seismicity can be divided into two types (Alvarez *et al.*, 1991): intraplate and interplate. Interplate seismicity affects the southeastern region, where the earthquakes occur mainly in the OFZ. The first historical earthquake was reported at Baracoa, the first villa founded in Cuba by the Spaniards in 1511, located on the northern coast of eastern Cuba. Seismic activity in southern Cuba is located along the coast and mainly offshore. The strongest concentration of seismicity can be seen around Santiago de Cuba, where the largest earthquakes in Cuba were felt (1766 and 1852, both with $I_{\text{max}} = \text{IX MSK}$). The intraplate seismicity affects the rest of the country, the events occurring in the vicinity of some tectonic structures (e.g., Pinar and La Trocha faults; see Fig. 5). During the documented period only one earthquake causing strong damage (the 1880 San Cristobal–Candelaria earthquake, M 6.0 and $I_{\text{max}} = \text{VIII MSK}$) occurred in the Pinar del Rio region (northwestern Cuba).

Small- to moderate-magnitude seismicity, recorded by

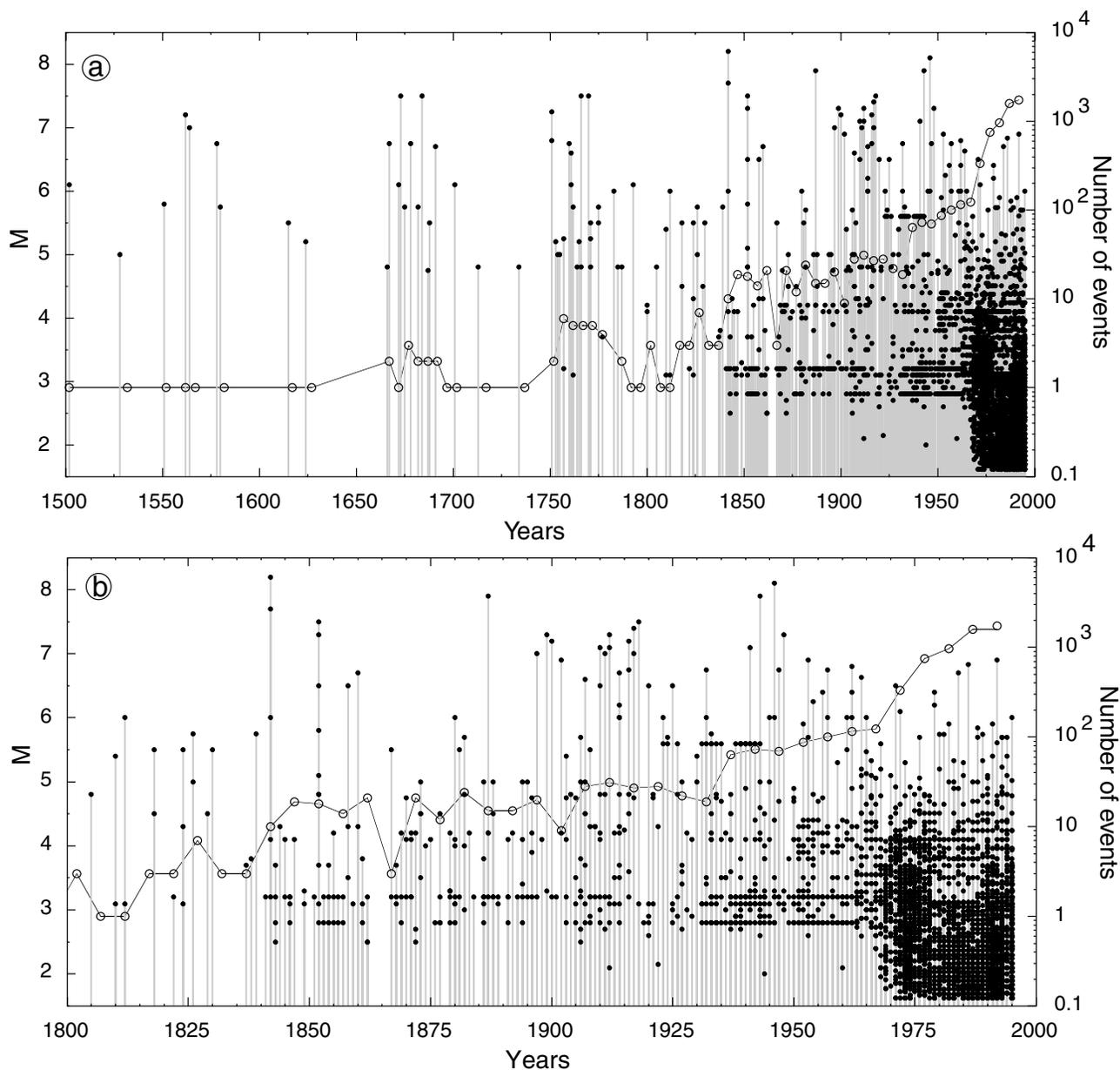


Figure 4. Time distribution of seismicity for the study region: (a) time period 1500–1995, (b) time period 1800–1995. The solid dots indicate the magnitude of the earthquakes. The open dots represent the number of events in 5 years.

the Cuban National Network, is located in the eastern region, and some events have occurred in the westernmost part of the island, such as those of December 1982 ($I_{\max} = \text{VI MSK}$; $M_s 4.9$) and March 1995 ($I_{\max} = \text{V}$) (MSK, $M_s 2.5$).

Seismotectonics and Seismogenic Zoning for Cuba

According to Iturralde-Vinent (1996), Cuba consists of two separate geological units: a foldbelt and a neautochthon. The foldbelt can be subdivided into continental units and oceanic units. The continental units comprise the Mesozoic Bahamian platform and slope deposits, which are overlaid by a Paleocene–Late Eocene foreland basin, and the

Cuban Southwestern Terranes, which were probably originally attached to the Yucatan Platform. The oceanic units are the northern ophiolite belt, the Cretaceous volcanic arc, which is overlaid by the latest Cretaceous–Late Eocene piggyback basins, and the Paleocene Middle–latest Eocene piggyback basin. The neautochthon encompasses latest Eocene to Holocene slightly deformed sedimentary rocks, which represent the true evolution of Cuba up to its present-day shape.

Seismotectonic studies in Cuba started during the 1970s (Belousov *et al.*, 1983) with a methodology based on the representation of the neotectonic history of the study region

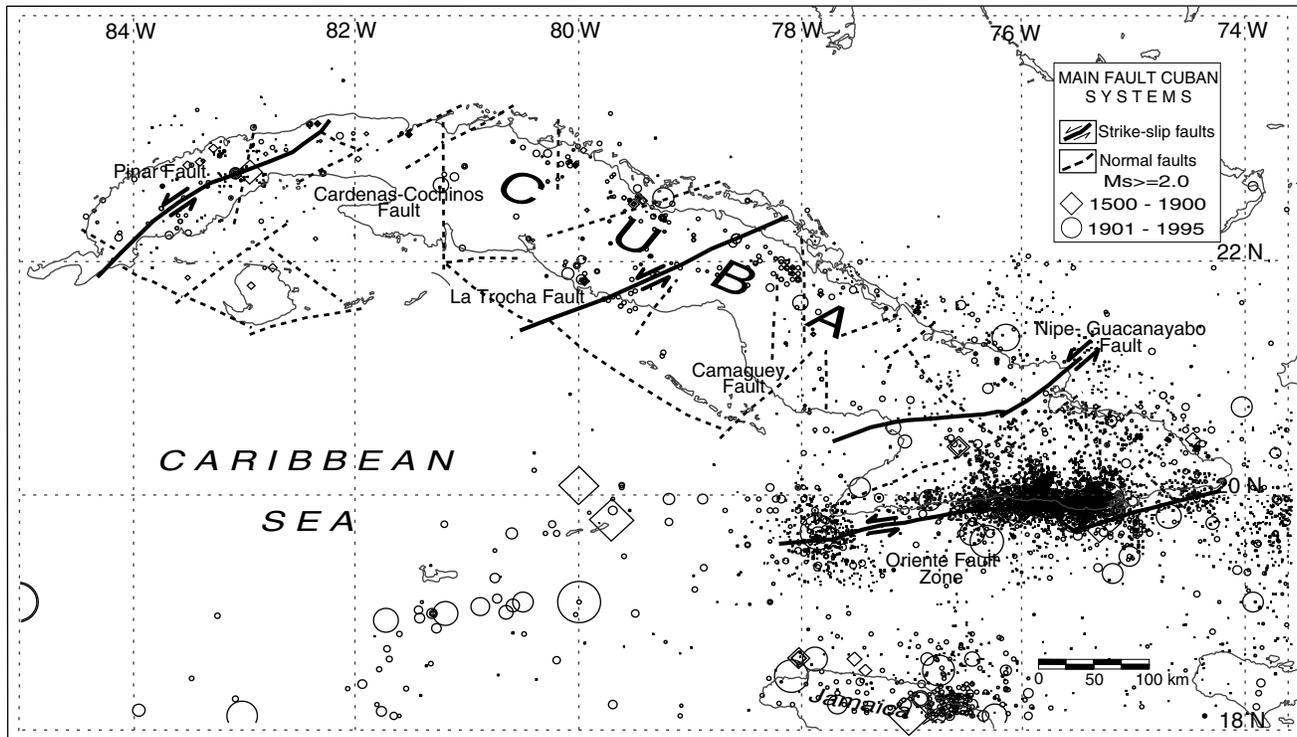


Figure 5. Map of the principal faults in Cuba (modified from Iturralde-Vinent, 1996). Solid lines show strike-slip faults; dashed lines represent normal faults. The epicenters of earthquakes (diamond, pre-1900; circles, during the twentieth century) with magnitude larger than, or equal to, 2 are reported.

widely applied in the former Soviet Union: the amplitudes and velocities of vertical movements in the Neogene–Quaternary, Pliocene, and Holocene are associated with the fault systems, and the seismogenic zones (SZs) are evaluated according to their morphological and seismological characteristics.

In eastern Cuba, various local studies have been made since then. All of them used the same methodology proposed by Belousov *et al.* (1983) or combined it with other geophysical results (Orbera *et al.*, 1989, 1990).

Cotilla *et al.* (1991) prepared a seismotectonic map on the basis of plate tectonic theory. The delineation of the SZs was based on the main alignments from remote sensing, integrated with the results obtained from geology, neotectonics, geophysics, and seismicity. This approach considered the possibility of earthquake occurrences on blind faults for the first time.

The differences between the Cotilla *et al.* (1991) map and those prepared previously, and used by Chuy and Alvarez (1995) for hazard computation, are mainly in the definition of minor SZs and their maximum magnitude. While Cotilla *et al.* (1991) eliminated some SZs (whose seismicity is treated as background seismicity), Chuy and Alvarez (1995) decided to consider all the SZs known, assuming that those with similar seismicity, seismotectonic conditions, and maximum magnitude can be combined.

Seismogenic Zonation for Hazard Purposes

Without a complete instrumental data set over a significant time period and detailed geological investigations devoted to recognizing possible seismogenic sources, it is difficult to improve our seismotectonic knowledge. Knowledge of crustal kinematics can help, and some methodological examples do exist (e.g., Meletti *et al.*, 2000) where the seismogenic zonation is based on an adequate kinematic model in which there must exist a logical link between the areas under stress conditions and the balance of space (the consumed one has to be compensated by the created one), under some established boundary conditions.

Taking into account the complexity of the Cuban tectonic environment (Iturralde-Vinent, 1996), the poor knowledge about the kinematic evolution of the principal fault systems, and the uncertainty in the hypocentral location of historical events (uncertainty of 15–20 km or more in the horizontal coordinates is reasonable), it is impossible to associate earthquakes with individual faults. This fact is even more relevant in an intraplate region like Cuba, where, for some zones, both geology and tectonics are better known than seismicity, due to the scarcity of large earthquakes.

In regions where the seismicity is low or poorly documented (this is the case for the intraplate Cuban region), the geological and tectonic information, described hereafter, is

very important to identify the seismic sources (especially those with a long return period) that can produce future earthquakes and, therefore, contribute to seismic hazard.

The basis of the present seismogenic zonation is the map proposed by Cotilla *et al.* (1991), also recently used by Rodríguez *et al.* (1997). It was modified during the present study for a more robust application of the seismotectonic probabilism approach (Muir-Wood, 1993) with the following criteria:

- Each SZ must contain enough earthquakes to construct a magnitude–frequency graph;
- Considering the selected scale of the work (1:1,000,000), short or long faults, only a few kilometers apart, were grouped together.

The seismogenic zonation obtained consists of 36 SZs (Fig. 6), where each SZ represents the surficial projection of one or more seismogenic structures having similar behavior and rupture mechanism. Three main SZ classes are identified: (1) SZs with a dominant left-lateral (transpressive) faulting, probably related to the northern margin of the Caribbean plate (SZ25–SZ36); (2) SZs with mainly vertical movements (SZ1–SZ7, SZ10, SZ11, SZ13–SZ15, SZ18, and SZ20–SZ24); and (3) SZs with pre-Eocene faults roughly parallel to the OFZ, with a less than 50-km left-lateral wrench displacement and minor deformation along very narrow stripes (SZ8, SZ9, SZ12, SZ16, SZ17, and SZ19).

Uncertainties in SZ location are taken into account and used later in the computation of seismic hazard (this is one

of the advantages of the code SEISRISK III [Bender and Perkins, 1987]), as most of the SZs are adjacent polygons. The boundary variation is applied inward, leaving a source of similar shape but smaller in size. In Figure 6, the SZ border uncertainties are marked with a symbol after the SZ name and gray areas indicate the intensity attenuation relationship for the SZ. The seismicity that remains outside the proposed zonation has been collected into three wide background zones for hazard computation.

The 36 SZs are grouped into 19 seismic regions from the tectonic point of view, which are briefly described in the following.

Seismic Region Norte Cubana (SZ1–SZ6). These SZs represent segments of the North Cuban fault (NCF), which extends for more than 1000 km along the whole north coast of the island. Vertical displacements as large as 300 m are documented in many transverse seismic profiles along the Cuban north slope (Orbera *et al.*, 1990). The structure is presented in the form of blocks displaced by faults with a southwest–northeast Cayman direction. This structure constitutes the limit of the interplate tectonic system, presenting a significant contrast between the northeastern border of the Cuban megablocks and the submarine depression of suture of the Old Channel of the Bahamas. The seismicity is concentrated at the intersection of the NCF with the major southwest–northeast–oriented faults that cut it.

Seismic Region Consolacion del Norte (SZ7). The Consolación del Norte fault is a deep fault of regional character,

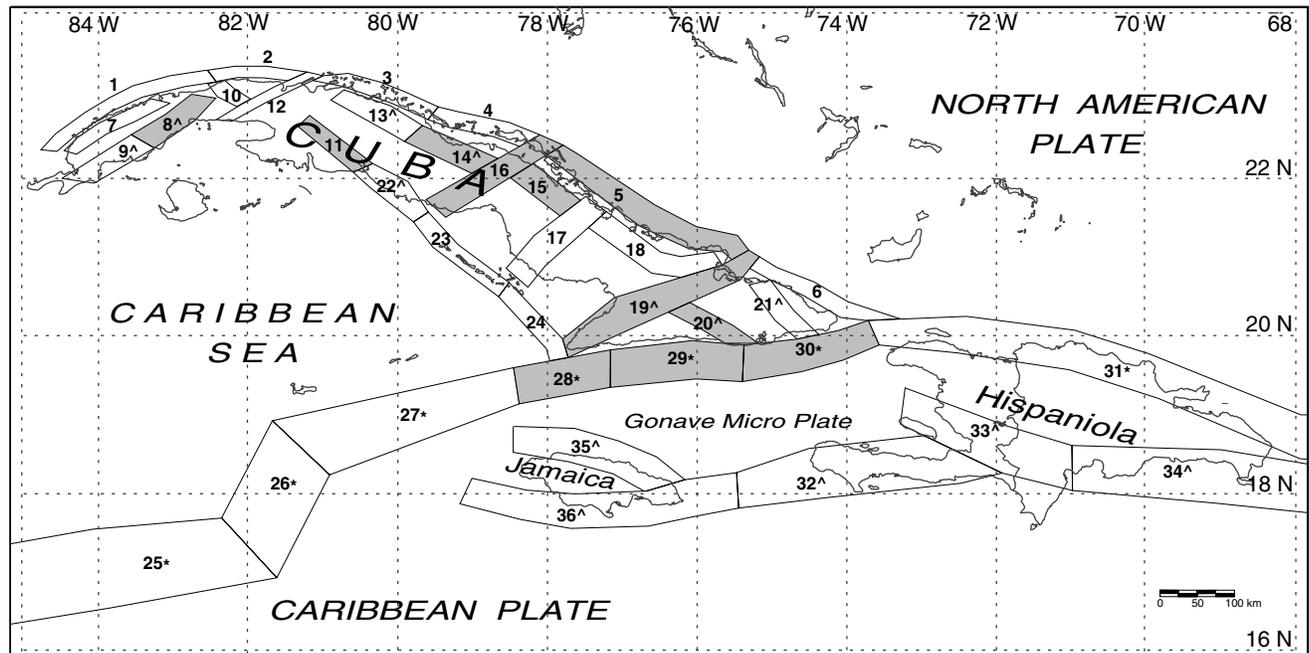


Figure 6. SZs in the vicinity of Cuba. The numbers indicate the SZ code. The symbol after the numbers represents the border uncertainty introduced in the seismic hazard computation: *, 15–20 km, ^, 5–10 km; none, 1 km. Gray SZs indicate that an individual intensity attenuation relationship was used.

with recent seismicity. It has an extension of 115 km and an average depth of 25 km.

Seismic Region Pinar (SZ8, SZ9). The Pinar faults constitute a system whose planes dip to the south, submerging under a 3-km-thick layer of Neogene–Quaternary silts (Pucharovsky *et al.*, 1989). It is the most important fault system in western Cuba, with a length of 180 km approximately in the southwest–northeast direction, a depth of 25 km, and a width of 5 km (Pucharovsky *et al.*, 1989; Iturralde-Vinent, 1994). It can be clearly observed from satellite images (Orbera *et al.*, 1990; Cotilla *et al.*, 1991) with a vertical displacement of around 2000 m in the Neogene–Quaternary terrains. According to the geological data (Pucharovsky *et al.*, 1989), its development initiated in the preorogenic stage and was reactivated in the Neogene–Quaternary. The most intense movements (more than 3 km) took place in SZ8, where the M 6.0 22 January 1880 earthquake (VIII MSK in San Cristobal and Candelaria) occurred.

Seismic Region Havana (SZ10). This region is associated with the fault system with the same name, which has an approximate extension of 100 km and a total neotectonic displacement of 0.2 km (Orbera *et al.*, 1989). Although the earthquakes reported in Havana and some locations of its province cannot be attributed to the western portion of the Norte Cubana seismic region, the seismic activity of the Havana fault system is still under debate.

Seismic Region Jagüey–Cienfuegos (SZ11). Although it coincides with a deep fault located under younger tectonic sequences, it does not have a well-defined character. The earthquakes in the Torriente–Jagüey Grande and Cienfuegos Bay areas can be associated with this fault, as well as the 9 March 1995 earthquake in San José de las Lajas (Cotilla and Alvarez, 2001).

Seismic Region Hicacos (SZ12). It is associated with a deep fault (Iturralde-Vinent, 1994) above Paleocene–Quaternary formations, splitting the ophiolites sequence that makes the main Cuban watershed deviate abruptly, causing different types of fluvial networks. The earthquakes reported in Matanzas and more recently in the Varadero–Cardenas area are associated with this structure.

Seismic Region Las Villas (SZ13, SZ14). Associated with a deep fault that divides the younger coastal formations of the north from the older ones of the south, it appears as a negative anomaly in the gravimetric map (Cuevas, 1994) and with positive and negative anomalies in the magnetic field. Medium-magnitude seismicity is associated with this fault.

Seismic Region Trocha (SZ16). This structure is associated with a deep fault more than 180 km long, with neotectonic transcurrent activity, documented by geological data (Iturralde-Vinent, 1996), which represents the limit of the central Cuban basin. It constitutes an area of anomalous gradients of the geophysical fields with negative values (Gonzalez *et*

al., 1993). Its seismicity is documented by the earthquakes reported in the Santi Spiritus region.

Seismic Region Camagüey (SZ17). Associated with a regional transverse fault with lateral displacement that affects the whole crust and constitutes the boundary between two megablocks, this deep fault, which cuts young as well as old sequences, is 140 km long and intersects the Cubitas fault. Consequently, the earthquakes in Camagüey and Vertientes are associated with it. The gravimetric and magnetic fields show apparent inflections (Gonzalez *et al.*, 1993; Cuevas, 1994).

Seismic Region Cubitas (SZ15, SZ18). It is associated with a northwest–southeast–oriented deep fault that constitutes a portion of the Cuban marginal suture and is considered to be the main structure in central Cuba. It is cut by the Camagüey and the Trocha traverse faults, where seismicity is documented. The 1974 Esmeralda earthquake (M_s 4.5, I_{max} = VII MSK) is linked to this zone as well.

Seismic Region Cauto–Nipe (SZ19). This structure is associated with a southwest–northeast–oriented fault system, where the Nipe–Guacanayabo and Cauto Norte faults are the principal ones. The latter is, according to the geophysical data, a 210-km-long and 30-km-deep fault. The most significant earthquakes occurred in Bayamo in 1551 (VIII MSK), 1624 (VII MSK), and 1987 and 1988 (both V MSK).

Seismic Region Baconao (SZ20). It is associated with a fault that is better defined in its eastern part, where it has a clear expression mainly in relief and significant seismic activity at the intersection with the Bartlett–Cayman fault (SZ29 and SZ30).

Seismic Region Purial (SZ21). This seismic region is associated with deep strike-slip faults that do not have a clear expression on the relief, but are pinpointed very well in the gravimetric map (Chuy *et al.*, 1992; Cuevas, 1994). The epicenters of small-magnitude ($M \leq 3$) events are aligned along the fault.

Seismic Region Sur-Cubana (SZ22–SZ24). The Sur-Cubana seismic region is associated with new deep faults that extend for over 300 km all along the major part of the Cuban southern coast. Only moderate ($M < 5$, $I_{max} \leq VI$ MSK) earthquakes occurred there in the past.

Seismic Region Swan Islands (SZ25). It is associated with a strike-slip fault evidenced by recent marine geophysical studies (Lundren and Russo, 1996), with the exception of one small part of overstepping splays, according to Rosencrantz and Mann (1991).

Seismic Region Cayman Spreading Center (SZ26, SZ27). This region is characterized by earthquakes associated with normal faults and magnetic anomalies in the Cayman Trough (Rosencrantz *et al.*, 1988). The northern end of the CSC

terminates against the OFZ. Here, seismicity is caused by a pure left-lateral strike-slip motion.

Seismic Region Oriente (SZ28–SZ30). It is associated with the Bartlett–Cayman fault system, which is more than 1600 km long, 50 to 100 km wide, and more than 50 km deep. It presents a predominant east–west direction and constitutes the southern limit of the North American plate, to which Cuba belongs. This structure also constitutes a limit of morphostructures of the global tectonic system and presents a notable topographical contrast (+8000 m) between the megablocks of the crests and valleys of Cayman (Calais *et al.*, 1991). The high neotectonic activity of this region was documented by Lundgren and Russo (1996); the highest level of seismicity of the whole of Cuba occurs in this area. In fact, 22 out of 28 catastrophic earthquakes in the Cuban archipelago have occurred here, 20 of them in the Santiago de Cuba area (M_s 7.6 in 1766 and M_s 7.3 in 1852, both with IX MSK) and two in the Cabo Cruz–Pilon area. In the Pilon area, the strongest earthquake happened on 25 May 1992 (M 6.8), producing a VII MSK intensity. More than 3000 small to moderate ($M < 5$) earthquakes have been recorded during the last 20 years.

Seismic Region Hispaniola (SZ31–SZ34). Several faults are active in a restraining bend in its northern part (SZ31) (Mann *et al.*, 1984; Russo and Villaseñor, 1995). In particular, the SFZ (Fig. 1) is the principal structure of the Hispaniola restraining bend and was the locus of very large earthquakes in the past (Russo and Villaseñor, 1995). The seismic region is associated with the EFZ (Fig. 1) located in Hispaniola’s southern peninsula in its southern part (SZ32–SZ34). A zone of northwest–southeast–trending thrust faults lies between the eastern end of the EFZ and the western portion of the SFZ (Mann *et al.*, 1995; Lundgren and Russo, 1996).

Seismic Region Jamaica (SZ35, SZ36). It is associated with the left-lateral strike-slip Walton fault in its northern part, which extends from the southeastern margin of the CSC to PGFZ. The strong earthquakes of Jamaica in 1692 (M 7.75) and 1907 (M 6.6) were located on the northern side of the island, on the southern slope of the Bartlett Trough. The southern part of this seismic region constitutes the northern margin of the Caribbean plate (Mann *et al.*, 1995). Onshore in southeastern Jamaica, the east–west–striking Plantain Garden fault has a slip rate of 5–7 mm/yr along its length.

Seismicity Rates

The seismicity rate of each magnitude or intensity class (both are 0.5 units) within each SZ is given as the number of earthquakes counted in a time interval for which the catalog is complete for that magnitude or intensity. Using discrete seismicity rates, instead of interpolating the data with the Gutenberg–Richter relation, leads to two main advantages (see more discussion in Rebez and Slejko, 2000):

1. If different return periods are considered, the hazard assessment changes significantly as a function of the different seismic energy release in time, while, using the Gutenberg–Richter relation, different return periods produce only a homogeneous raising (or lowering) of hazard;
2. It is possible to adequately describe those SZs with a characteristic earthquake behavior.

The catalog completeness was evaluated for three subcatalogs: east-central Cuba; western Cuba; and Jamaica, Hispaniola, and Puerto Rico. For each subcatalog, the completeness periods were identified roughly by a historical analysis, that is, identifying periods when the data collection of natural phenomena was homogeneous (because of the presence of convent archives, installation of seismographic stations, etc.). In this framework, a statistical analysis was performed by investigating the total number of events in time (Stepp [1972] plots) to precisely identify the completeness period for each magnitude class. The completeness periods calculated are similar for the three subcatalogs, with the exception of east-central Cuba, where large ($M > 6.0$) earthquakes are missing (Table 3; Fig. 7).

For each magnitude or intensity class, the completeness period was used to compute the seismicity rates by counting the earthquake number in each class during those time periods and then normalizing the number to 100 years. The procedure for adequately determining the seismicity rates was established on an objective basis (see Slejko *et al.* [1998] for more details). In fact, the completeness period of each class identifies the preliminary seismicity rate and, consequently, its related return period ($T = 100 \text{ years/seismicity rate}$). If a higher seismicity rate that is related to a time period not shorter than the return period of the preliminary seismicity rate exists, this higher value is chosen. If a higher seismicity rate that is related to a period shorter than the completeness period but longer than the return period of the class exists, this higher value is taken.

Table 3
Completeness

M	All catalog	Zone A	Zone B	Zone C
2.0	1980	1980	1970	1980
2.5	1970	1980	1970	1980
3.0	1970	1940	1940	1970
3.5	1960	1940	1940	1970
4.0	1940	1940	1900	1940
4.5	1900	1900	1900	1900
5.0	1850	1900	1850	1800
5.5	1800	1850	1700	1800
6.0	1760	1800	1700	1700
6.5	1700		1500	1600
7.0	1500		1500	1500
7.5	1500		1500	1500
8.0	1500		1500	

Zone A, east-central Cuba; Zone B, western Cuba; Zone C, Jamaica, Hispaniola, and Puerto Rico.

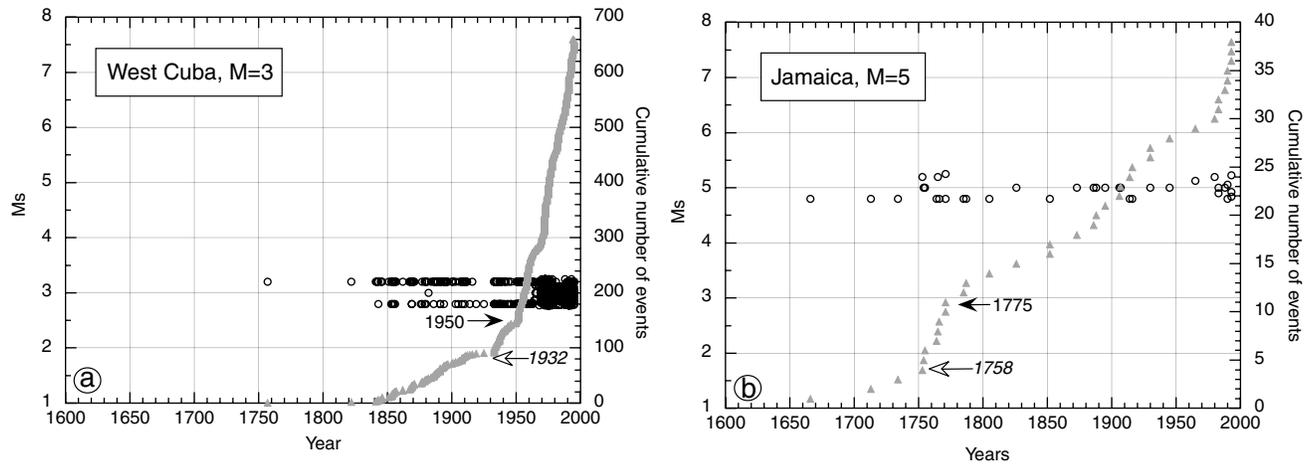


Figure 7. Examples of two Stepp (1972) plots: (a) M class 3 ($2.8 \leq M \leq 3.2$) for western Cuba; (b) M class 5 ($4.8 \leq M \leq 5.2$) for Jamaica, Hispaniola, and Puerto Rico. The open dots represent the earthquake magnitude and the triangles the annual cumulative number of events. The white arrows show the beginning of the complete period according to the historical information, and the black arrows indicate the complete period chosen in this study.

Magnitude Seismicity Rates

Figure 8a shows the contributions of small- ($M < 3.8$), moderate- ($3.8 \leq M \leq 5.8$), and large-magnitude ($M > 5.8$) earthquakes to the seismicity rates (number of events normalized to 100 years) for each SZ. The values were obtained by simple summation of the individual rates. This picture clearly shows two different behaviors, the first regarding the intraplate seismicity (from SZ1 to SZ25), the second related to the more active interplate seismicity (from SZ26 to SZ36). The behavior of the intraplate SZs is characterized by a general, similar pattern in the magnitude ranges: SZ8 has an abundance of small-, moderate-, and large-magnitude earthquakes, whereas SZ2 does not; SZ5 abounds in large- and small-magnitude earthquakes but misses moderate-magnitude ones, perhaps because of an incorrect magnitude evaluation. A unusual behavior can be seen in some neighboring SZs, such as SZ16 and SZ17, where the first abounds in moderate-magnitude earthquakes but the second has small ones. Again, an incorrect magnitude estimation or an epicenter mislocation can be invoked. A better agreement among the number of events in the three magnitude ranges can be seen in the interplate SZs, where SZ31 is the most active. Inconsistencies in the relative numbers of large and small earthquakes can be explained by incomplete event detection and the shortness of the historical record.

An important parameter for the SZ seismicity definition is the maximum magnitude value (M_{max}). The geological complexity of the Caribbean region and the incomplete knowledge of seismotectonic processes sometimes prevent a clear assignment of seismicity to specific tectonic structures. For this reason, it was decided to introduce an M_{max} following two procedures. Where the number of earthquakes is large, the rates were fitted by the Gutenberg–Richter re-

lationship, and the extrapolated rate for a magnitude greater than the maximum observed value by one step unit (0.5 in our case: one-step-beyond technique [Slejko *et al.*, 1998]) was considered if it involved a mean return period of between 500 and 1500 years, that is, larger than the time window of the catalog. This 500- to 1500-year return period, in fact, might involve events missing in the catalog, but it is not too long to account for events with a very low rate. In such a way it was possible to assign the M_{max} to 15 SZs, marked by asterisks in Table 4. For the other SZs, where it was not possible to obtain an M_{max} on a seismological basis, the value suggested by various authors (Cotilla *et al.*, 1991; Gonzalez *et al.*, 1993; Chuy and Alvarez, 1995; Rodriguez *et al.*, 1997) from tectonic/geologic evidence was considered and a value in between was taken. In such a way, the M_{max} was assigned to 15 SZs, marked by double daggers in Table 4. For a few SZs with a low maximum observed magnitude, the seismotectonic/geologic-based M_{max} seems to overestimate the actual capability of the seismogenic structures involved. This is due to the fact that the geological M_{max} was estimated by Cuban geologists on the basis of the total fault lengths without considering their segmentations. An M_{max} lower than the minimum seismotectonic/geologic-based M_{max} was taken in these cases for six SZs marked with daggers in Table 4.

Intensity Seismicity Rates

The same procedure used for defining the SZ seismicity rates in terms of magnitude was followed for defining the seismicity rates in macroseismic intensity. All our catalog's entries coming from the Chuy (1999) catalog have an intensity value; for the remaining events without intensity, this parameter was calculated from magnitude using the empirical relation by Fedotov and Shumilina (1971).

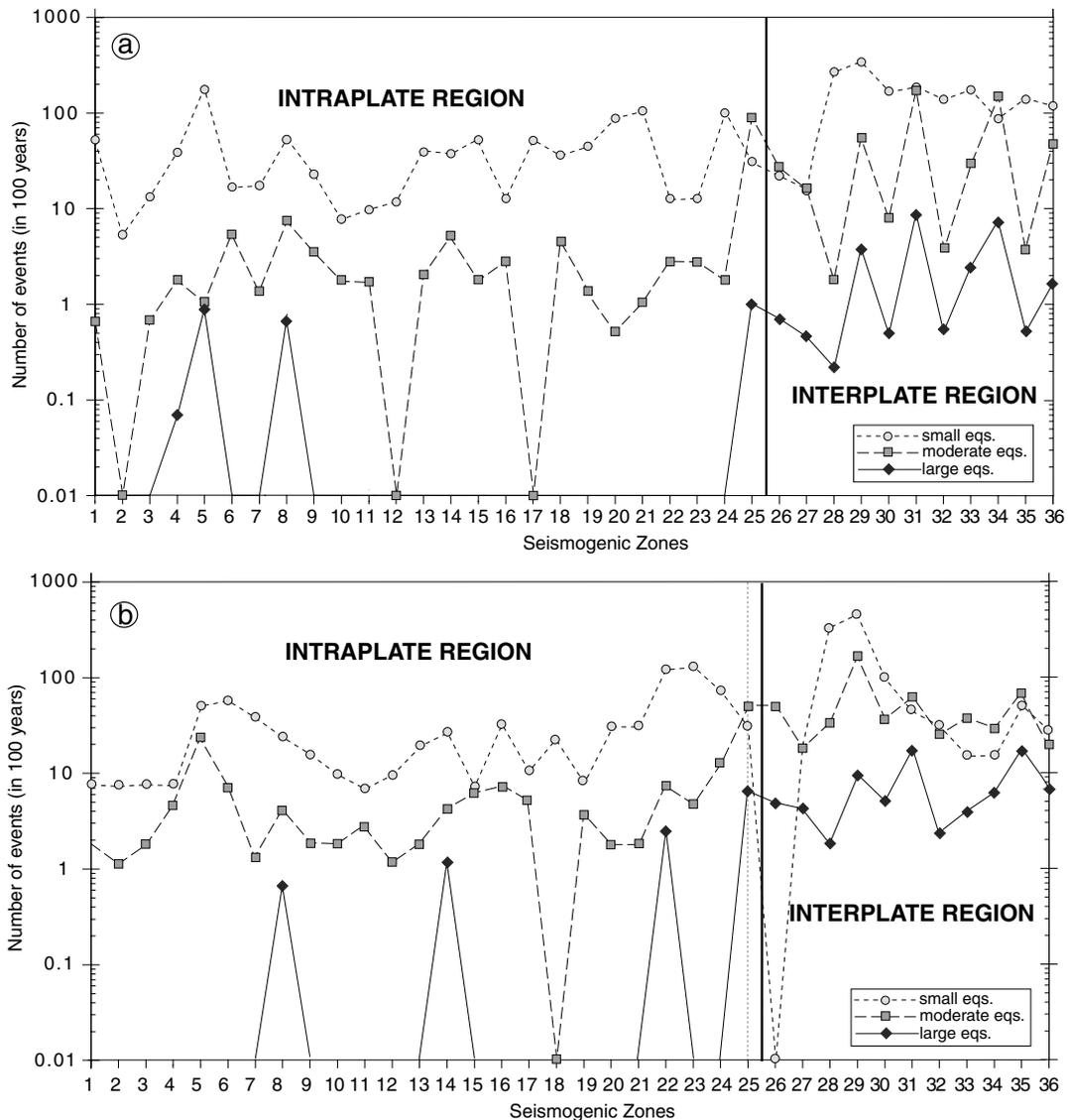


Figure 8. SZ seismicity rates (number of earthquakes in a 100 years) for small earthquakes (short-dashed line: $M < 3.8$, $I_0 \leq IV-V$), moderate earthquakes (dashed line: $3.8 \leq M \leq 5.7$, $V \leq I_0 \leq VI-VII$), and large earthquakes (solid line: $M > 5.7$, $I_0 \geq VII$): (a) for magnitude classes; (b) for intensity classes.

No maximum intensity values were added to the intensity rates, because it is impossible to predict that an hypothetical, future, larger earthquake will produce more severe damage than the damage already undergone, considering the improvement of building design with time. Moreover, caution has driven the choice of the intensity attenuation relation, as described in the following section.

The intensity rates (Fig. 8b) show remarkable differences with respect to those for magnitude (Fig. 8a), although the higher seismicity of the interplate SZs clearly appears again. These differences can be explained by the possible poorer correlation between magnitude and intensity for offshore earthquakes. Nonetheless, SZ8 is again one of the most active among the intraplate SZs and SZ31 among the interplate ones.

Attenuation Relationships

Macroseismic intensity (I_s), in the MSK scale, was the commonly used parameter for seismic hazard assessment and seismic building code definition in Cuba (Chuy *et al.*, 1983). Those results were converted into PGA values (in centimeters per second squared) through the use of the Trifunac and Brady (1975) empirical relationship:

$$\log(\text{PGA}) = 0.30 I_s + 0.014. \quad (10)$$

The disadvantage of transforming intensity into PGA by a general relationship is that linear relationships linking PGA to I_s are characterized by large uncertainties (Reiter, 1990). More detailed studies (Murphy and O'Brien, 1977) on PGA-

Table 4
 M_{max} Values for the SZs

SZ	M_{obs}	M_A	M_B	M_C	M_D	ΔM	M_{max}
1*	4.5	7.0	5.3	5.5	7.0	5.3–7.0	5.0
2†	4.0	7.0	6.0	7.0	7.0	6.0–7.0	5.0
3‡	4.0	7.0	5.6	5.2	7.0	5.2–7.0	5.2
4‡	5.5	7.0	6.5	7.0	7.0	6.5–7.0	6.5
5*	6.0	6.5		6.5	7.0	6.5–7.0	6.5
6‡	5.0	7.0		7.0	6.5	6.5–7.0	6.5
7†	4.0	6.0		5.5	6.0	5.5–6.0	5.0
8‡	6.0	7.0		6.3	7.0	6.3–7.0	7.0
9‡	4.0	6.0		5.0	6.5	5.0–6.5	5.0
10‡	4.0	6.0		5.2	6.0	5.2–6.0	5.5
11*	5.0	6.5	5.5	5.5	6.5	5.5–6.5	5.5
12†	3.5	6.0	5.5	5.5	6.0	5.5–6.0	5.0
13‡	4.0	6.5	5.5	5.8	6.5	5.5–6.5	5.5
14†	4.5	7.0	5.8	5.8	7.0	5.8–7.0	5.5
15‡	4.5	6.5	6.0	6.0	6.5	6.0–6.5	6.0
16‡	5.0	6.5	5.5	5.5	6.5	5.5–6.5	6.0
17‡	3.0	6.5	5.0	5.0	6.0	5.0–6.5	5.0
18‡	4.5	6.5		5.5	6.0	5.5–6.5	6.0
19‡	6.0	6.5		7.0	7.0	6.5–7.0	7.0
20*	6.5	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
21†	4.5	6.5		6.5	6.5	6.5	6.0
22‡	4.5	6.5	6.0	6.5	5.0	5.0–6.5	6.0
23‡	4.5	6.5		6.5	6.0	6.0–6.5	6.0
24†	4.0	6.5		6.5	6.0	6.0–6.5	5.5
25*	6.5				8.0	8.0	7.0
26*	6.5				8.0	8.0	7.0
27*	7.2				8.0	8.0	7.5
28‡	7.0	8.0		8.0	7.5	7.5–8.0	8.0
29*	7.5	8.0		8.0	8.0	8.0	8.0
30*	7.5	8.0		7.6	7.5	7.5–8.0	8.0
31*	8.2			8.3	8.3	8.3	8.5
32*	7.0			6.0	7.6	6.0–7.6	7.5
33*	7.7			8.0	7.6	7.6–8.0	8.0
34*	7.5			7.6	7.6	7.6	8.0
35*	7.0			7.0	7.0	7.0	7.5
36*	7.5			7.6	7.6	7.6	8.0

* M_{max} chosen on seismological basis.

† M_{max} chosen on specific considerations (see text).

‡ M_{max} chosen on tectonic/geologic basis.

The SZ code refers to Figure 6; the other columns are M_{obs} , maximum observed magnitude in the catalog; from M_A to M_D , maximum magnitude on tectonic/geologic basis from the literature (A, Cotilla *et al.*, 1991; B, Gonzalez *et al.*, 1993; C, Chuy and Alvarez, 1995; D, Rodriguez *et al.*, 1997); ΔM , range of the tectonic/geologic M_{max} estimates; M_{max} , maximum magnitude used in this work.

intensity relationships led to multivariate relationships, $PGA = f(I_s, D, M)$, as magnitude, epicentral distance, and site conditions strongly influence the level of peak ground motion predicted for a given intensity.

Although PGA does not represent the complete ground shaking, being a single point that does not consider important factors such as the number of cycles, duration, frequency, and energy content, it is still used worldwide for establishing design criteria. Macroseismic intensity also remains a useful parameter for loss estimates. In the present work, we decided to follow the standard probabilistic approach, which consists of using PGA attenuation relations, in spite of the fact that none of them has been tested for the

Caribbean region. In addition, seismic hazard estimates in terms of macroseismic intensity were computed for two main reasons. The first is the need to compare the PGA estimates with those based on intensity, where specific intensity attenuation relations have been calibrated on Cuban data. A second reason was the need to also consider local attenuation relations among those used for the final hazard map. To accomplish this, the hazard results in terms of intensity have been simply translated into PGA values by the Trifunac and Brady (1975) relation, as in previous Cuban works. The map thus obtained can be compared directly to that for PGA, the differences being due to the individual intensity attenuation relations used, which were calibrated

on macroseismic data actually observed on Cuban territory. For these reasons, great emphasis is given to the problem of PGA and intensity attenuation in the present work.

PGA Attenuation Relations

Strong motion relationships to be used in seismic hazard assessment form an essential input and have a strong influence on the results. General relations valid over very large regions can be found in the literature when local relations are not available. Such attenuation relationships for Cuba, as well as for the eastern Caribbean, do not exist. For this reason we decided to consider three PGA attenuation relationships for average soil: Joyner and Boore (1981), Quijada *et al.* (1993), and Ambraseys (1995). Average soil conditions are motivated by the unavailability of soil-type maps of the study area, and the choice of the relations is also based on their direct applicability to SEISRISK III (Bender and Perkins, 1987), the computer code we use for seismic hazard assessment.

The Joyner and Boore (1981) and Ambraseys (1995) relationships are commonly used in North America and Europe, respectively. The Quijada *et al.* (1993) relation (see Dimaté *et al.*, 1999) refers to Venezuela, where tectonic regimes similar to those in the Caribbean can be found. All the relations are azimuth independent and do not consider the intrinsic differences of the SZ tectonic regime (compressional, tensile, transcurrent, volcanic, etc.).

Joyner and Boore (1981) derived an equation using recordings generated by earthquakes in western North America. It is defined for moment magnitude, in the range $5.0 \leq M_w \leq 7.7$:

$$\log \text{PGA} = -1.02 + 0.249M_w - \log(R^2 + 7.32)^{1/2} - 0.000255(R^2 + 7.32)^{1/2}, \quad (11)$$

where PGA is in gravitational acceleration (g) and R is the shortest distance to the surface projection of the fault rupture in kilometers. The relation is calibrated in the distance range 0.5–350 km, but it is applied at distances less than 200 km (<http://geohazards.cr.usgs.gov/eq>) and has a standard deviation (σ) of 0.26. The M_s values in our catalog were transformed into M_w values using the relations obtained by Tanner and Shepherd (1997) for the Caribbean region (see Shedlock, 1999).

Quijada *et al.* (1993) used the following relation for crustal sources in the seismic hazard assessment of the northern Andes (Dimaté *et al.*, 1999) under the GSHAP project:

$$\ln \text{PGA} = 5.40 + 0.36M_s - 0.86 \ln(R + 10), \quad (12)$$

where PGA is in centimeters per second squared and R is the epicentral distance in kilometers. The relationship has a σ of 0.66.

Ambraseys (1995) used an extensive data set (1260 records for 619 European earthquakes) obtained in the free field or from the base of buildings with no more than three

stories. The relation was calibrated in the range $2.0 \leq M_s \leq 7.3$ and in the distance range 1–310 km:

$$\begin{aligned} \log \text{PGA} = & -1.43 + 0.245M_s \\ & - 0.786 \log(R^2 + 2.72)^{1/2} \\ & - 0.001(R^2 + 2.72)^{1/2}, \end{aligned} \quad (13)$$

where PGA is in gravitational acceleration and R is the distance from the fault in kilometers, which for small earthquakes corresponds to epicentral distance. The σ is 0.24.

In Figure 9 the behavior of the previous attenuation relations (with and without σ) for two classes of magnitude ($M_s = 5.0$ and $M_s = 7.0$) is shown. As our seismic sources are wide zones rather than individual faults, the three different distances are identified as similar. The highest PGA values in both cases are given by the Joyner and Boore (1981) relation in the near field, while for distances greater than 100 km the Quijada *et al.* (1993) relation gives higher values. All three relations, equally weighted, were used in a logic-tree approach (McGuire, 1977; McGuire and Shedlock, 1981; Kulkarni *et al.*, 1984; Coppersmith and Youngs, 1986).

Intensity Attenuation Relations

For this study attenuation relationships have been developed for macroseismic intensity. The attenuation curves were derived from the most important earthquakes, following formulations of intensity decay proposed by different authors (von Kovesligethy, 1907; Blake, 1941; Grandori *et al.*, 1987; Berardi *et al.*, 1994).

The macroseismic intensity relationships proposed here are strictly for the purpose of seismic hazard evaluation and are not intended to describe either the physical properties of the crust or the seismogenic processes involved. The final attenuation relationships will be linked to the proposed seismogenic zonation (Fig. 6).

Database

The database of macroseismic observations was collected by Chuy (1999) and partially revised and georeferenced during this work. Intensity data points have been compiled using information contained in chronicles, the press, and technical reports of damage, according to the MSK scale. The macroseismic catalog proposed by Chuy (1999) contains 1513 perceptible events for the Cuban region from 1528 (the first historical earthquake reported in the Spanish chronicles) to October 1996.

Keeping in mind the number of intensity points reported for each earthquake and the existence or nonexistence of an isoseismal map, we made a preliminary selection of 121 events for which the macroseismic parameters (epicentral coordinates, magnitude, $I_0 = I_{\max}$, and depth) exist. Due to the small number of observed intensities, it was necessary to reduce the population to 69 events (Table 5), so that each

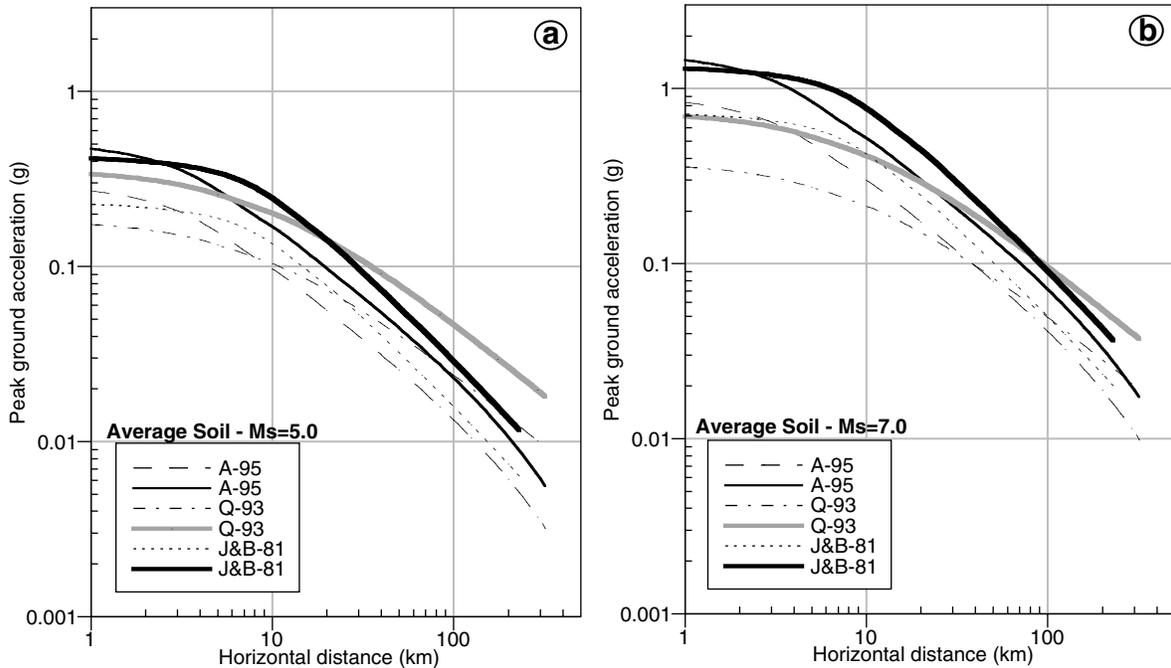


Figure 9. Comparison among the PGA attenuation relations considered in the present study (A-95, Ambraseys; 1995; Q-93, Quijada *et al.*, 1993; J&B-81, Joyner and Boore, 1981) with (solid lines) and without (dashed lines) σ : (a) for M_s 5.0; (b) for M_s 7.0.

earthquake has at least three intensity classes, each with at least three data points.

We next analyzed the macroseismic data set, which consists of a list of localities with given coordinates and intensity related to an earthquake. The macroseismic epicenter and epicentral intensity correspond to the values reported in the earthquake catalog (Chuy, 1999). Ranges in intensity assessment (i.e., uncertain determination), usually given by the minimum and maximum intensity values (e.g., V-VI; see Table 5), are treated by assigning one sample to both the intensity classes with an associated weighting factor that will be described later.

Table 5 contains the main information regarding the 69 selected events. The SZ codes refer to Figure 6; the date, epicentral coordinates, and maximum intensity were taken from previous works (Chuy, 1999). The N value is the number of intensity points per event, and N^* is the number of samples in each intensity class. Not all these data may be analyzed (Fig. 10), as a significant amount of intensity points do not have the locality coordinates or refer to sites where the earthquake was not felt ($I_s < II$ MSK). On average each SZ has about 100 usable intensity points, with a minimum of less than 10 points in SZ9 and a maximum of more than 700 observations in SZ29.

From Data Points to Attenuation

After an analysis of different attenuation models, we decided to follow the Italian experience (Peruzza, 1995, 1996, 2000) of calibrating attenuation relationships for each

SZ to a single well-documented earthquake. We adopted, therefore, some different well-known formulations and a semiautomatic procedure in order to derive the unknown coefficients of each relationship.

The selected models are as follows:

1. The von Kovesligethy (1907) relationship:

$$I_0 - I_i = 3 \log \frac{\sqrt{D_i^2 + h^2}}{h} + m \left(\sqrt{D_i^2 + h^2} - h \right), \quad (14)$$

where I_0 indicates the epicentral intensity, I_i the intensity at the i th site, and D_i its epicentral distance; h and m are parameters to be estimated from experimental data.

2. The Blake (1941) model:

$$I_0 - I_i = a \log \sqrt{\frac{D_i^2 + h^2}{h}}, \quad (15)$$

where a and h are the unknown coefficients; usually h is intended as the hypocentral depth.

3. The relationship proposed by Grandori *et al.* (1987):

$$I_0 - I_i = \frac{1}{\ln \psi} \ln \left[1 + \frac{\psi - 1}{\psi_0} \left(\frac{D_i}{D_0} - 1 \right) \right], \quad (16)$$

where ψ , ψ_0 and D_0 are unknown coefficients.

4. The formula proposed by Berardi *et al.* (1994):

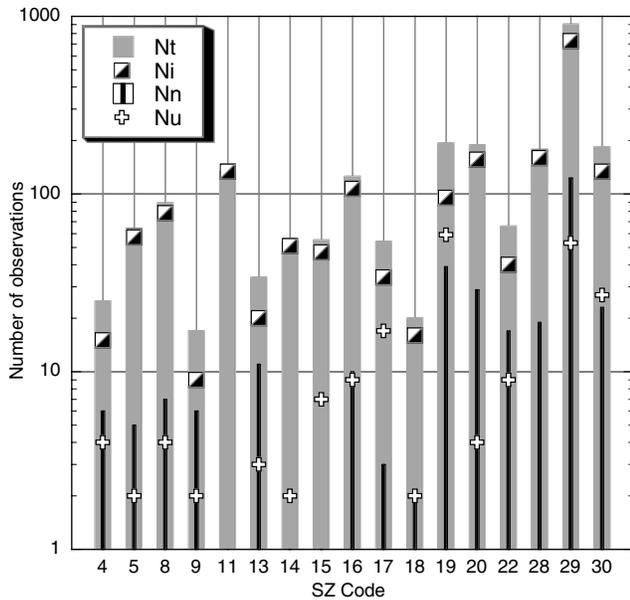


Figure 10. Number of intensity data points in the SZs. N_t represents the total number (for all earthquakes in the SZ) of points with intensity \geq II MSK, N_u indicates the number of points with unknown coordinates, N_n shows the number of points where the earthquakes were not felt, and N_i is the number of usable points: $N_t = N_i + N_n + N_u$.

$$I_0 - I_i = \alpha + \beta^3 \sqrt{D_i}, \quad (17)$$

where α and β are unknown coefficients, and I_0 , I_i , and D_i have the same meaning as before.

The procedure applied here computes the unknown coefficients directly from the actual intensity points of the selected earthquake without using isoseismal maps. Four main steps follow:

1. Computation of epicentral distance for each locality where the observed intensity value is available.
2. Construction of the sample cumulative curve of distances corresponding to the same macroseismic value; intensity ranges (i.e., uncertain estimates, such as VI–VII for example) are split into two classes using the weighting factor

$$w_{\text{obs}} = 1/[(I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) + 1]. \quad (18)$$

Figure 11 illustrates these curves for two well-documented earthquakes.

3. Computation of the distance not expected to be exceeded at a 50% probability for each intensity class, associated with its intensity decay ($I_0 - I_i$). This application utilizes the median value (50% empirical sample percentile) compatible with the rounding that transforms real values of intensity into integers.

4. Application of a nonlinear least-squares regression to the distance–intensity decay pairs, to derive the unknown coefficients of equation (14) to equation (17).

The proposed method has the advantage of being completely transparent and reproducible, establishing some rules for attenuation-curve fitting using macroseismic data that can be applied to any attenuation model.

Two of the models (equations 16 and 17) were selected following the Italian experience: in particular in the Grandori *et al.* (1987) formula the presence of the D_0 parameter determines intensity values greater than I_0 (i.e., negative intensity decay) near the source, an important peculiarity in the group of intensity attenuation relations. Common practice truncates the curve with a flat step of zero decay, for distances smaller than D_0 introducing a circular model of extended source that gives a better approximation than the point source model. The formulation with three coefficients makes the relation very flexible, even if quite unstable; the curve may simulate a logarithmic-shaped curve, linear decay of intensity with distance, and also an unusual increase of the decay rate. The two other models (equations 14 and 15) are frequently used; the von Koveslighety (1907) formula in particular has been widely adopted in many Cuban studies (Alvarez and Bune, 1977; Chuy and Alvarez, 1995; Rodriguez *et al.*, 1997).

Data Analysis

Figure 12a shows some examples of curve fitting for earthquakes in SZ29; the different attenuation relations are compared for two earthquakes. Note that the curves are very similar at distances greater than 30–40 km, as in the case of the 1932 earthquake, which is the best documented one. The major differences between models are in the near fields, as the Berardi *et al.* (1994) and Grandori *et al.* (1987) formulations permit negative values of intensity decay. The agreement among the fits, with the different attenuation models, testifies to the good quality of the data as well as to the robustness of the fitting. Figure 12b shows the behavior of six earthquakes in SZ29 (Table 5), all modeled by the Berardi *et al.* (1994) formulation. The attenuation of the 1932 earthquake is the slowest and, consequently, represents the most conservative choice for the attenuation of SZ29. These two aspects were considered as guidelines in the choice of the representative earthquake for each SZ.

From the 69 initially selected earthquakes, only the representative one for each SZ was kept. As the data available for SZ4, SZ9, SZ13, SZ17, and SZ18 did not give an acceptable fit, we finally selected only 12 good intensity maps that represent the attenuation in 12 SZs (Table 6).

The coefficients obtained according to the four models are reported in Table 7: the formulation selected is the one that best fits the data and appears in bold. The statistical errors of the unknown coefficients are not reported in the table, as they are not representative of the actual error in the attenuation relationship (see more discussion later).

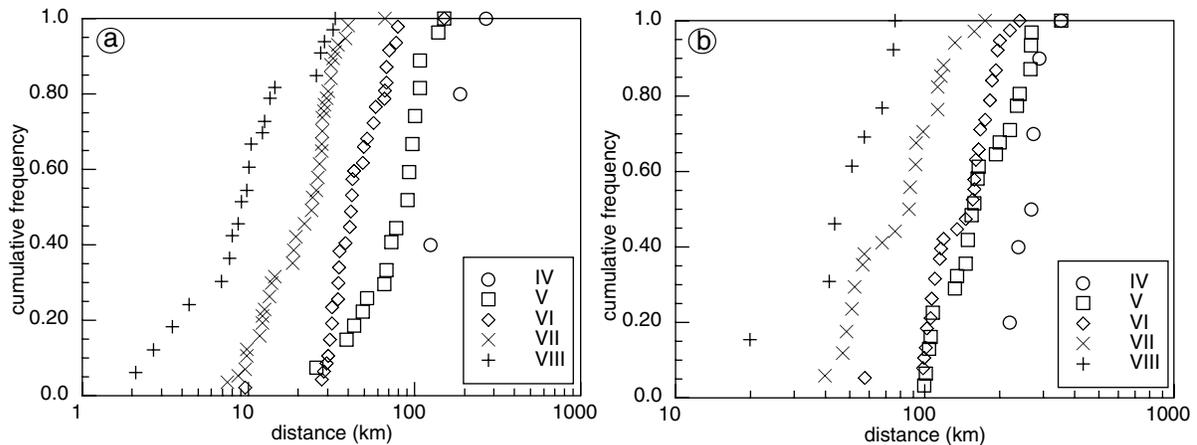


Figure 11. Sample cumulative curve of epicentral distances for two main Cuban earthquakes: (a) event of 23 January 1880 in SZ8; (b) event of 3 February 1932 in SZ29.

An average attenuation relation for the whole study region was also obtained, considering only the simpler formulations (equations 15 and 17) and using all the observations with intensity larger than, or equal to, III MSK. The best fit was reached for the Berardi *et al.* (1994) formulation, whose coefficients are shown in Table 7; the related curve is reported in Figure 12b for comparison.

The one-source/one-attenuation relationship was the ultimate solution; the average relation was used only when data for establishing a specific relationship were not sufficient. The choice of one relation for each SZ was motivated by several facts. One is that inside many SZs, the ground motion exhibits different attenuation properties. Another is based on the fact that we are not able to ascertain the source, path, and site effects. Furthermore, we are not able to evaluate either the bias, due to insufficient spatial sampling, or the influence related to different data set compilers. The earthquake used to model the attenuation is usually the strongest event that occurred in the SZ. In other cases, we have only one well-documented earthquake in the SZ; in this situation, our only choice is to use it. In such a way, the final attenuation coefficients were associated with the seismogenic zonation proposed in Figure 6, where gray areas indicate the 12 SZs that have their own intensity attenuation relationship.

Reliability

The reliability of the attenuation relationships previously obtained cannot be simply expressed in terms of statistical errors of the fitted curve, because the use of the 50% fractile distance artificially reduces the variance of observed data. This is the reason that the statistical errors obtained in the minimization procedure for the unknown coefficients are not reported.

Therefore, the quality of the attenuation curves has been evaluated in terms of residuals with respect to the observations. The mean residual (MR) is defined as

$$MR = \frac{\sum_{i=1}^N |I_{obs_i} - I_{cal_i}|}{\sum_{i=1}^N w_i}, \quad (19)$$

where w_i indicates the weight given to each observation and N is the total number of intensity points. As the modulus of the residual is considered, the MR represents the most conservative error evaluation. The MR can be computed for the data for one earthquake or for data for each intensity class.

Figure 13 plots the MRs obtained for the 12 representative earthquakes, for each intensity class; small dots indicate the MR values obtained using the best-fitting attenuation relationships (type and coefficients enhanced in bold in Table 7), while the open squares are the MR values obtained considering the average attenuation relationship.

The MRs of the SZ-specific attenuation relationships oscillate around the value of 1.0, a value that is comparable with the reliability of the intensity data. Three cases exhibit an MR greater than 2, and they always refer to very few data points, where the 50% fractile distance loses its meaning and the local high residuals (for example due to site response) cannot be smoothed by other observations (small $\sum w_i$ in equation 19).

On the other hand, the MR values obtained considering the average attenuation relationship (whose parameters have been obtained by fitting all intensity decay–distance pairs) are higher and increase on average from 2.5 to 3.5 with intensity class. The poorer reproduction of the highest shaking, using an average attenuation relationship, has also been recognized in the Italian data set (see Peruzza, 2000).

We may argue that using multiple attenuation coefficients significantly improves the macroseismic predicted values, unlike when employing a single average relationship. In fact, the use of different coefficients in the Grandori *et al.* (1987) formulation, which provides a zero decay for distances smaller than D_0 , better simulates the near-field behavior, while the Berardi *et al.* (1994) average relationship

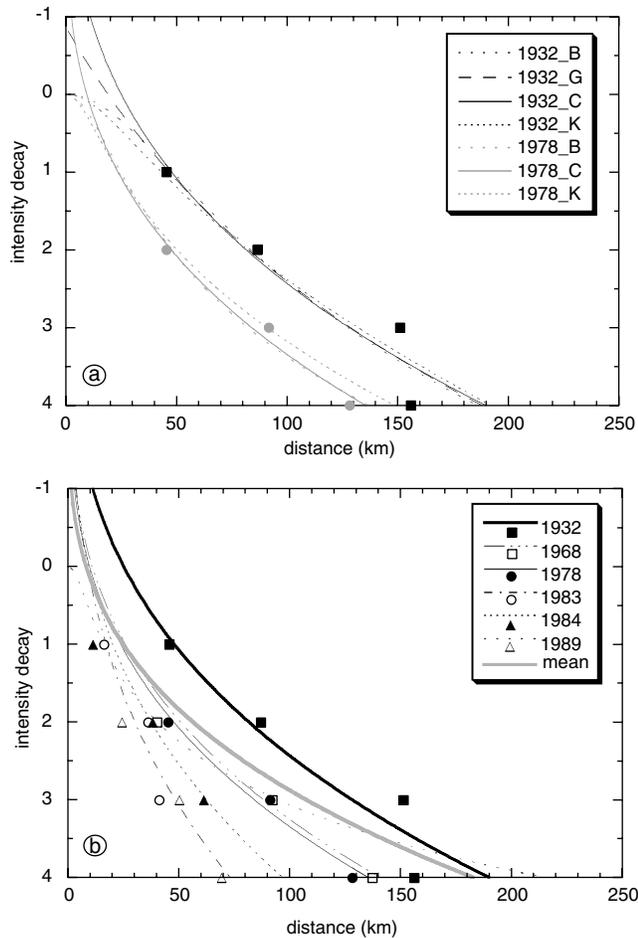


Figure 12. Curve fitting for earthquakes in SZ29: (a) the von Kovesligethy (1907) (K), the Blake (1941) (B), the Grandori *et al.* (1985) (G), and the Berardi *et al.* (1994) (C) attenuation relations are applied to the 1932 and 1978 earthquakes; the filled squares and circles show the data points. (b) The intensity points of six earthquakes are fitted by the Berardi *et al.* (1994) attenuation relation. The gray solid line represents the average general relation obtained for the whole study region.

systematically underestimates the intensities near the epicenter.

A complete statistical analysis of the residuals, earthquake by earthquake, is not presented here. It will be investigated in a separate article, since a proper approach to attenuation reliability should consider both local soil conditions and a quality factor of each macroseismic data point.

The standard deviations of each intensity class for each representative earthquake have no practical use; a σ of about 0.9 intensity units may be considered a reasonable average of all the MRs obtained and can be used to estimate the attenuation uncertainty when the relationships proposed here are entered into seismic hazard assessment. This value is comparable to the intrinsic uncertainties of intensity estimates.

Seismic Hazard Assessment

The methodology used in most probabilistic seismic hazard analyses was originally proposed by Cornell (1968), and implemented in different computer codes (e.g., Algrmissen *et al.*, 1976; McGuire, 1976; Bender and Perkins, 1987).

Computing seismic hazard consists of applying the total probability theorem,

$$\iiint f(M, D, T) f_M f_D f_T, \quad (20)$$

where M , D , and T are the random magnitude, distance, and time variables and f_M , f_D , and f_T are their probability density functions.

The Cornell (1968) approach, in the Bender and Perkins (1987) formulation, computes the hazard at each site of the study region by discrete summation of the individual contributions from the mass center of the concentric circular sectors in which the SZs are subdivided. This distance is rigorously neither the epicentral distance nor that from the causative fault as spatially uniform seismicity is assumed in each SZ, but in practice it can be approximated to both.

Computation of the hazard maps was done over an approximately $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ regular grid, using the software SEISRISK III (Bender and Perkins, 1987). The PGA is given in gravitational acceleration; the intensity maps are expressed in the MSK scale. Soft boundaries of variable width (Fig. 6) have been applied. All results are for a 475-year return period, which corresponds to a 90% nonexceedance probability in 50 years. This is a standard reference value in seismic design for ordinary buildings. In order to reduce the inevitable uncertainties introduced by the choice of the attenuation relations, the logic-tree methodology has been applied to the PGA results. Figure 14 illustrates the structure of the logic tree used to obtain the hazard curves (see the example of Santiago de Cuba), taking into account four attenuation relations (three for PGA and one for intensity transformed into PGA).

Hazard Results in PGA

The PGA results for a 475-year return period are presented in Figures 15 and 16; they refer respectively to the PGA mean value and to that computed taking into account the σ of the attenuation relation. The results obtained are considered to be robust for Cuba, Jamaica, and Hispaniola, with the exception of its easternmost sector, where the seismicity of SZs not considered in the present zonation could influence the hazard estimates. The most hazardous areas are consistent in all maps and depend on the seismogenic zonation used. In fact, the previous discussion of seismicity data has clearly pointed out that the earthquakes are concentrated along the southern coast of Cuba (OFZ) and eastward along the northern coast of Hispaniola (SFZ).

The first map uses the Ambraseys (1995) attenuation

Table 6
Earthquakes Selected for the Calibration of the Intensity Attenuation Relations

SZ	Date (yyyy mm dd)	I_{max}	I_0	Latitude (°N)	Longitude (°W)	N_f	N_s
5	1914 08 25	VII	VIII	21.22	76.17	43	54
8	1880 01 23	VIII	VIII	22.70	83.00	82	105
11	1982 12 16	VI	VI-VII	22.60	81.40	134	178
14	1939 08 15	VII	VII	22.51	79.58	42	56
15	1953 01 01	VI	VI	22.15	78.60	54	81
16	1974 04 08	VI	VI-VII	21.82	77.10	63	63
19	1962 07 19	VI	VI	20.52	77.20	13	17
20	1985 09 01	V	V-VI	19.86	75.39	54	65
22	1943 07 30	VI	VI	21.85	80.10	31	39
28	1992 05 25	VII	VIII	19.93	77.51	111	132
29	1932 02 03	VIII	IX	19.50	75.50	64	85
30	1947 08 07	VII	VIII	19.75	75.70	32	41

The SZ code refers to Figure 6; I_0 and coordinates derive from our elaborations. N_f is the number of intensity points with $I_s \geq II$ MSK, N_s is the number of intensity points where the uncertain data are counted twice because they are subdivided into other possible intensity classes.

Table 7
Coefficients of the Attenuation Relations According to the Different Selected Models

Model Date (yyyy mm dd)	Grandori <i>et al.</i> (1987)			Berardi <i>et al.</i> (1994)		Blake (1941)		von Kovesligethy (1907)		
	ψ	ψ_0	D_0	α	β	a	h	k	h	m
1914 08 25	2.140	1.753	12.987	-1.65	0.802	3.012	19.209	3.0	19.18	0.0006
1880 01 23	1.655	1.491	9.112	-2.616	1.277	4.311	16.968	3.0	13.018	7.0
1982 12 16	3.359	0.182	11.865	-3.126	1.69	4.68	11.132	4.01	10.04	0.0007
1939 08 15	2.13	1.038	11.796	-2.582	1.202	3.805	16.835	3.0	14.21	4.00
1953 01 01	1.445	2.305	6.766	-2.507	1.278	4.50	17.211	3.0	14.104	1.20
1974 04 08	1.528	2.848	2.645	-2.421	1.591	3.997	7.039	3.0	5.831	0.0014
1962 07 19				-1.968	0.916	2.965	17.762	3.0	17.482	0.0008
1985 09 01				-2.273	0.934	3.563	27.11	3.0	24.48	0.002
1943 07 30	1.233	3.336	6.547	-2.469	1.198	4.525	20.645	3.0	17.654	0.001
1992 05 25	1.046	7.458	7.122	-4.759	1.42	8.839	86.48	3.0	48.86	0.001
1932 02 03	1.288	1.466	18.974	-4.149	1.421	6.689	48.586	3.0	28.053	0.0089
1947 08 07	1.134	6.168	5.928	-3.783	1.348	6.391	45.84	3.0	29.795	0.001
Mean				-0.206	1.112	1.790	3.080			

relation (Fig. 15a). It shows the highest PGA values (larger than 0.25g) along the northern coast of Hispaniola, followed by those offshore the coast of Santiago de Cuba (larger than 0.20g). Additional hazard is located along the southern part of Hispaniola, along both coasts of Jamaica, and in two sectors of northern Cuba (Pinar del Rio and Villa Clara provinces, respectively, to the west and east).

The PGA values obtained using the Quijada *et al.* (1993) attenuation relation (Fig. 15b) are lower than those obtained with the Ambraseys (1995) relation. The maximum PGA (larger than 0.15g) is located along the northern coast of Hispaniola and offshore the Santiago de Cuba coast; values between 0.10g and 0.15g can be seen offshore Villa Clara and in the Pinar del Río region.

Even higher PGA values are obtained when the Joyner and Boore (1981) attenuation relation is considered (Fig. 15c), but exactly the same areas emphasized by the Ambraseys (1995) relation map stand out. Northern Hispaniola exceeds 0.40g, and the same value is expected offshore San-

tiago de Cuba. In addition to the seismic spots previously seen, high values also appear in the Camagüey Province and south of Cienfuegos.

Results increase notably when the attenuation σ is taken into account. The map from the Ambraseys (1995) attenuation relation (Fig. 16a) is rather similar to that without σ (Fig. 15a) and shows that high values (larger than 0.30g) are found in southern Cuba, near Santiago de Cuba, but all southeastern Cuba shows PGA values from 0.20g to 0.30g. In western Cuba, the PGA values do not exceed 0.25g (between 0.10g and 0.20g in Havana), and in central Cuba they are under 0.10g in some regions. The most seismic area is located east of Cuba along the northern coast of Hispaniola.

A different pattern is shown by the map obtained with the Quijada *et al.* (1993) attenuation relation (Fig. 16b) because it gives higher PGA values at greater distances (Fig. 9). The maximum values (larger than 0.40g) are located offshore Santiago de Cuba and along the northern coast of Hispaniola, while areas with values larger than 0.20g now ap-

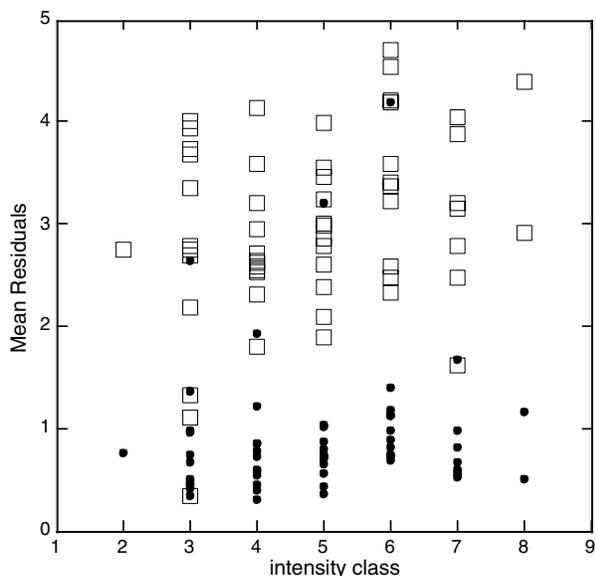


Figure 13. Mean residuals (MRs) for the 12 representative earthquakes: small dots indicate the MR values obtained using the best fitting attenuation relationship (type and coefficients enhanced in bold, in Table 7), while the open squares are the MR values obtained considering the average attenuation relationship.

pear along both the northern and the southern Cuban coasts and in the western region (including Havana). The northern coast of Jamaica shows a limited area with values larger than 0.30g.

The map from the Joyner and Boore (1981) attenuation relation (Fig. 16c) reflects the pattern of the one obtained by the Ambraseys (1995) relations. The maximum values, in the Santiago de Cuba region and along the northern coast of Hispaniola, now exceed 0.80g.

Hazard Results in Macroseismic Intensity

The computation of intensity seismic hazard maps using many attenuation relationships does not differ from the ones for PGA, except that individual source contributions have to be separately calculated and added. Figure 17a shows the macroseismic intensity not expected to be exceeded at a 90% probability level in 50 years for the whole region, using the different intensity attenuation relationships previously described. From this picture we see that most of Cuba exhibits moderate intensity (V–VI MSK), with the highest values (VIII MSK) along its southern coast. Intensities around VII MSK are expected to affect a narrow strip along the eastern coast and the area of Pinar del Rio. At a wider scale, values close to IX MSK are expected along the northern coast of Hispaniola and intensity VIII MSK throughout Jamaica and almost all of Hispaniola.

The results obtained using only the average attenuation relationship are shown in Figure 17b. The relevance of this map is that it is obtained by the use of a single attenuation

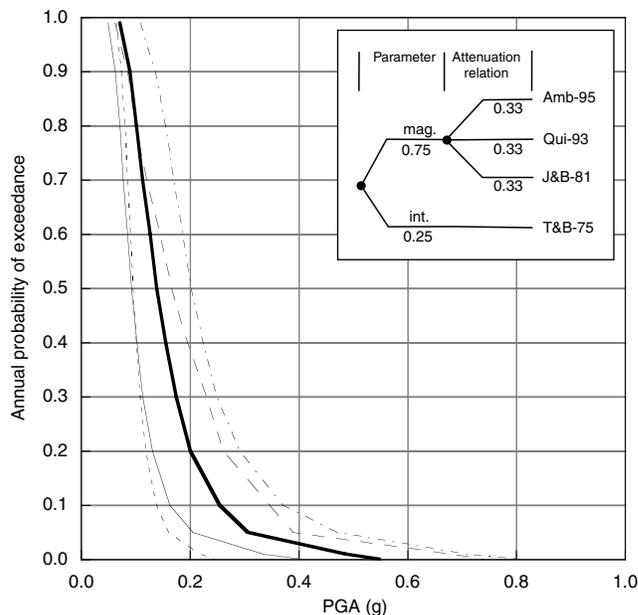


Figure 14. Seismic hazard curves (annual exceedance probability) for Santiago de Cuba according to different attenuation relations: thin solid line, Ambraseys (1995) (Amb-95); dotted line, Quijada *et al.* (1993) (Qui-93); dot-dashed line, Joyner and Boore (1981) (J&B-81); dashed line, differentiated intensity attenuation relations (intensity values converted into PGA values by the Trifunac and Brady [1975] relation) (T&B-75); thick solid line, final estimate (average value of the previous estimates). Two branches appear for seismicity because the magnitude and intensity rates were computed from the respective values in the catalog.

relation and can be compared with the previous one to pinpoint the main differences. This average map is similar to that of Figure 17a, except the southern coast of Cuba, where intensity VIII MSK is expected, is much smaller and is limited to a narrow strip along the coast. Consequently, the central part of the island also shows slightly lower values. No remarkable differences can be seen outside Cuba, as a mean attenuation relation was used in both maps.

It is worth mentioning that the results shown are mean values, and they do not take into consideration the attenuation uncertainty, as is usually done for PGA maps. One intensity unit of uncertainty can be considered, and in this case the expected shakings would be more severe on Cuba.

Comparing the present results (Fig. 17a) with those obtained by Rodriguez *et al.* (1997), our area of maximum intensity is larger and covers the whole southern coast of Cuba, instead of only the easternmost part as in the Rodriguez *et al.* (1997) map. Both maps show similar values with the exception of the Pinar del Rio area, where our area of intensity VII MSK is larger than that of Rodriguez *et al.* (1997). The values of Rodriguez *et al.* (1997) in the central part of the island are slightly higher than those we obtained.

The intensity estimates (Fig. 17a) have been converted

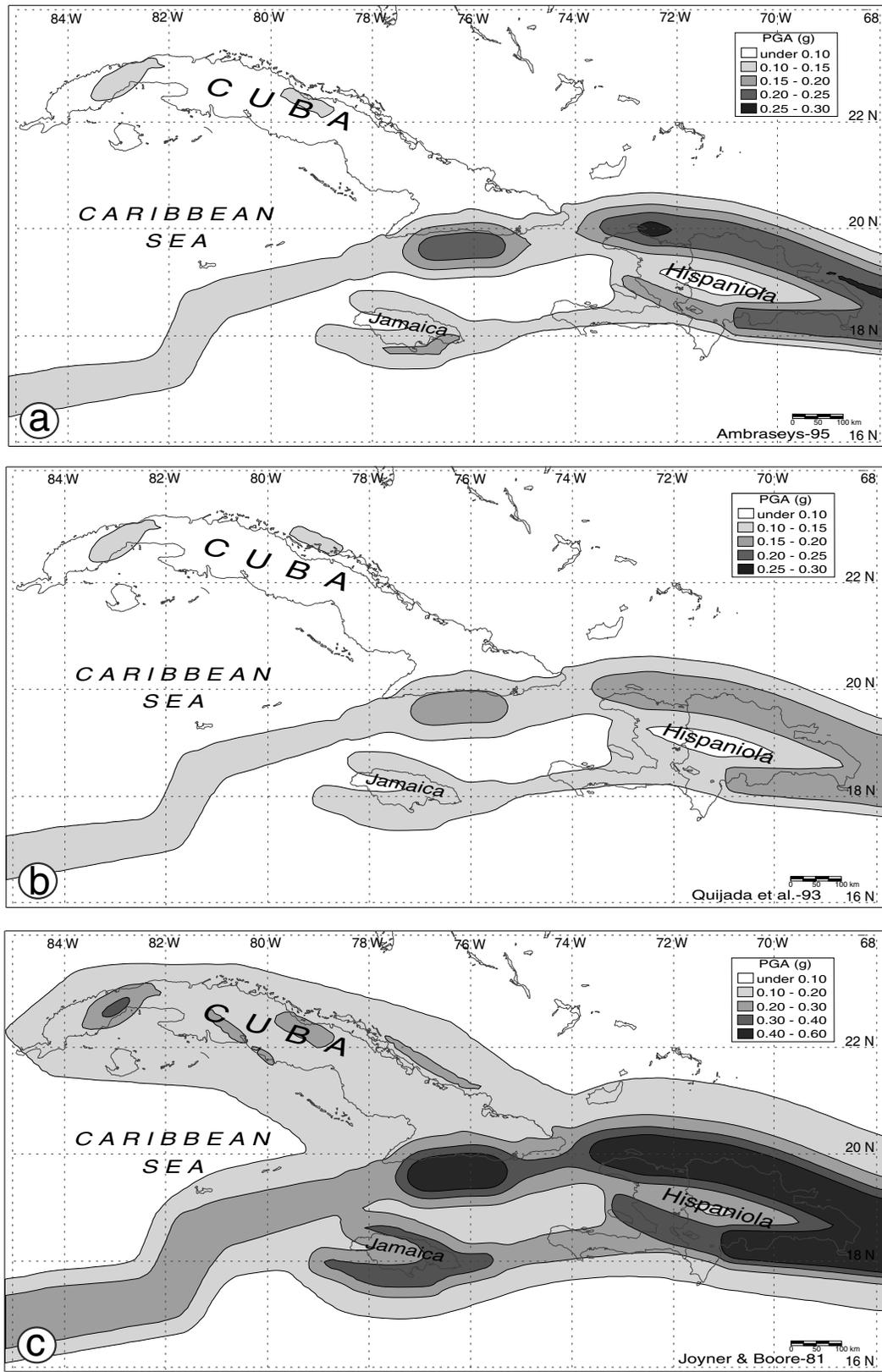


Figure 15. Horizontal PGA (in gravitational acceleration) with a 475-year return period considering (a) the Ambraseys (1995), (b) the Quijada *et al.* (1993), and (c) Joyner and Boore (1981) attenuation relations for average soil without σ .

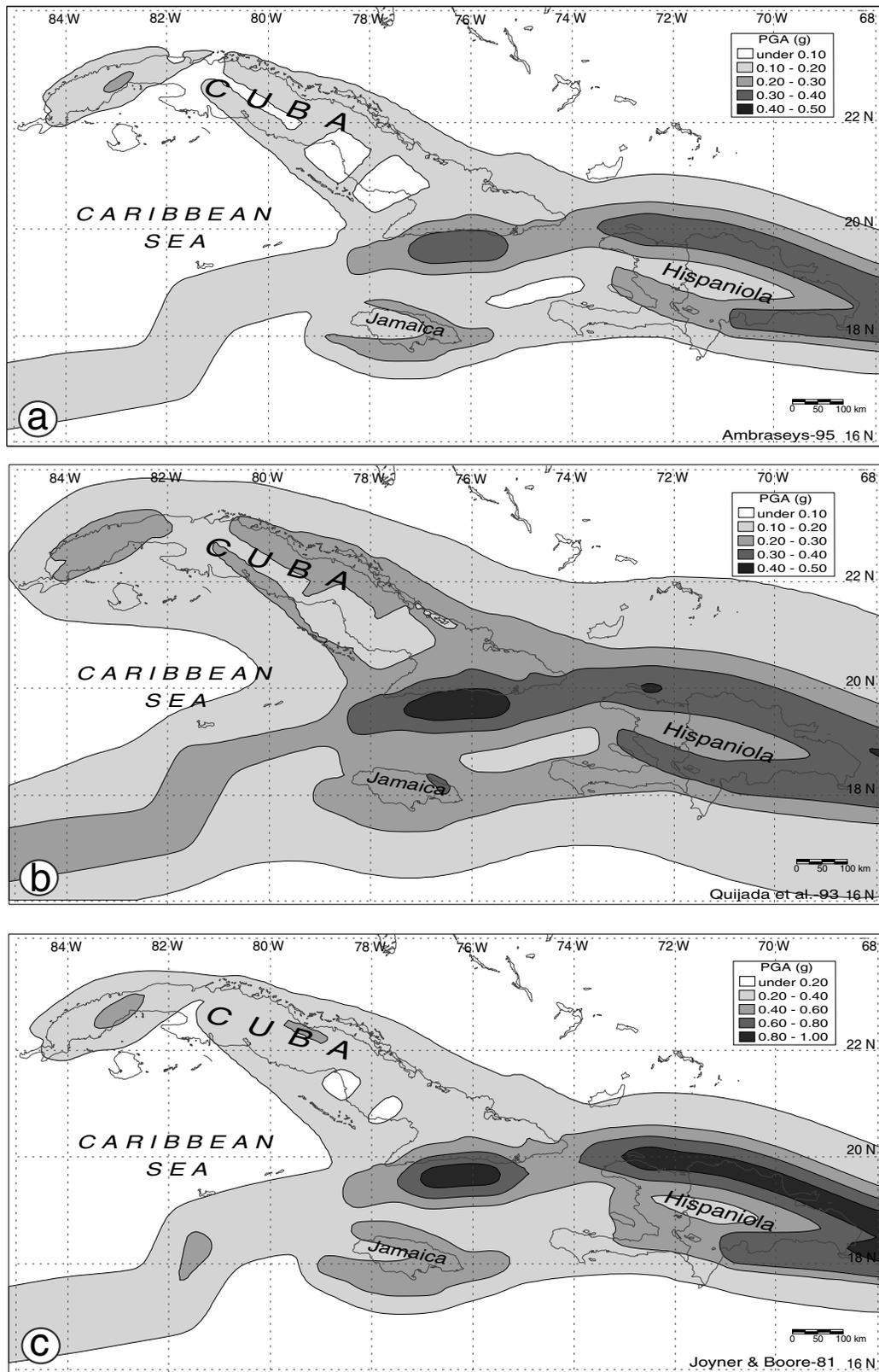


Figure 16. Horizontal PGA (in gravitational acceleration) with a 475-year return period considering (a) the Ambraseys (1995), (b) the Quijada *et al.* (1993), and (c) Joyner and Boore (1981) attenuation relations for average soil with σ .

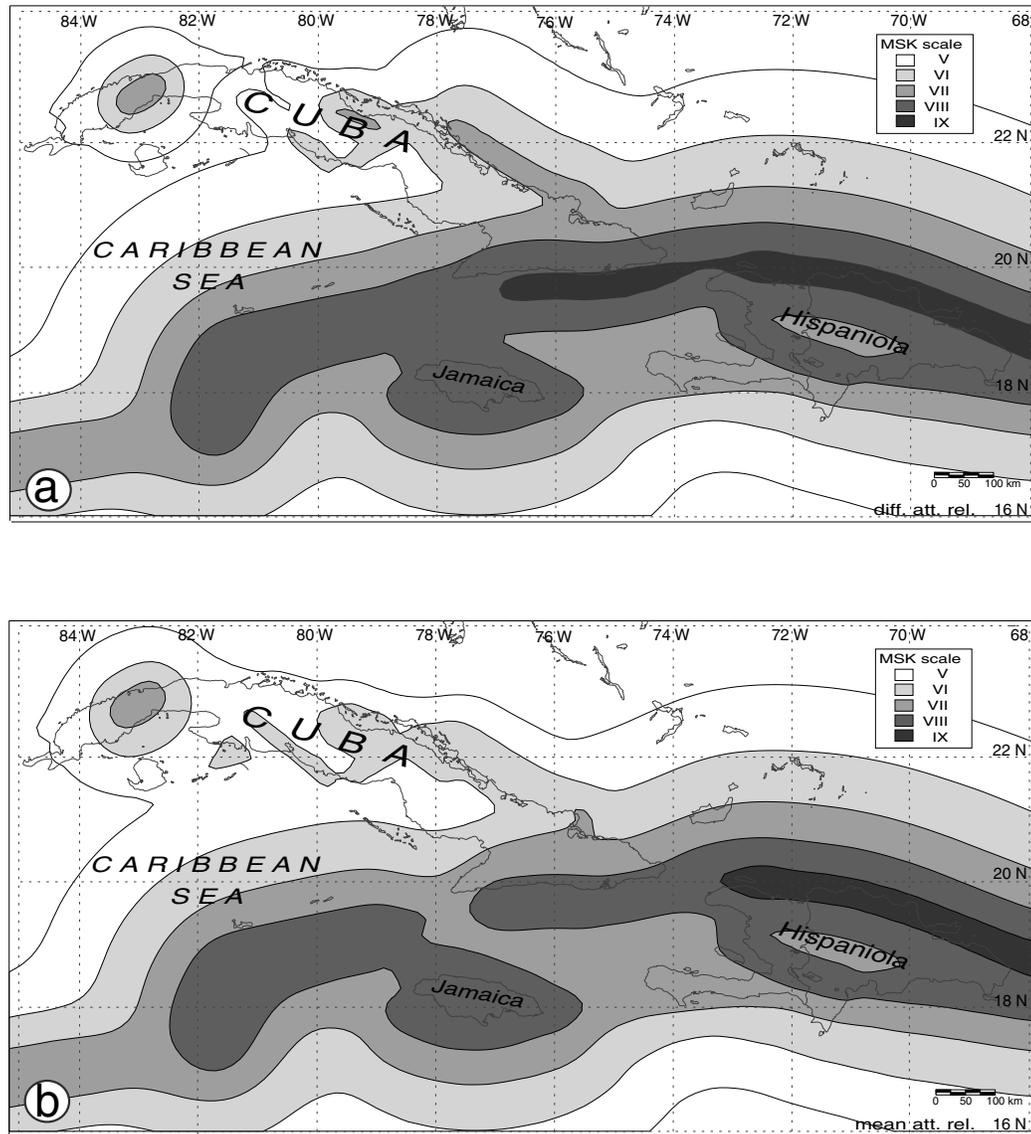


Figure 17. Macroseismic intensity with a 475-year return period using (a) different attenuation relations and (b) the average attenuation relation. No σ in the attenuation has been considered. Half degrees are rounded up in the graphical representation.

into PGA values (Fig. 18) by the Trifunac and Brady (1975) relation, the relation most used in previous Cuban studies, for a direct comparison with the direct PGA estimates (Fig. 15). The PGA from the intensity map (Fig. 18) shows obvious similarities to the direct PGA maps (Fig. 15), with the maximum hazard along the northern coast of Hispaniola and the southern coast of Cuba. The PGA values along the southern coast of Cuba do not differ much from those obtained considering the Joyner and Boore (1981) attenuation relation (Fig. 15c), but much lower hazard is expected on the rest of the Cuban territory.

Hazard Results Following the Logic-Tree Approach

Following a logic-tree approach (McGuire, 1977; McGuire and Shedlock, 1981; Kulkarni *et al.*, 1984; Copper-

smith and Youngs, 1986), a map has been computed averaging the values of the individual maps presented before. This map can be considered more robust as it is less dependent on the specific choice of attenuation.

All the PGA results (Figs. 15 and 18) were merged with the same weight (0.25) and an average hazard curve obtained. This hazard curve is reported here only for Santiago de Cuba (Fig. 14): it can be seen that the results considering the Ambraseys (1995) and the Quijada *et al.* (1993) relations are similar, while those considering the Joyner and Boore (1981), as well as those considering intensity, are higher.

Figure 19 shows the average PGA values for the whole study region. It is interesting to note that some peculiarities of the previous maps are reflected on this final map as well. For example, in southern Cuba the influence of the Bartlett-

Cayman fault (OFZ) is clear all along the southern coast of the island, where the PGA reaches 0.30g and decreases rapidly to the north. This high hazard strip continues eastward along the northern coast of Hispaniola, with values only slightly larger. In central Cuba, the northern coast, especially the Pinar del Rio region, represents the more hazardous area, with PGA values larger than 0.10g.

Comparing the results of our final map (Fig. 19) to those obtained by Rodriguez *et al.* (1997), similar values (larger than 0.30g) are encountered along the southern coast of Cuba, but our maximum is shifted toward Santiago. The high spots around the Guantanamo and Pinar del Rio regions do

not appear so evidently in the Rodriguez *et al.* (1997) map, and they do not appear in the Shepherd *et al.* (1997) map either, but this last map has the maximum for Cuba (PGA larger than 0.24g) exactly around Santiago, where our maximum is also located.

The GSHAP map for the Caribbean (Shedlock, 1999) refers to rock and shows PGAs larger than 0.32g in the Santiago de Cuba area; this value is lower than those displayed in Figure 16 (with the exception of the map obtained by the Ambraseys [1995] attenuation relation, which is similar) because our results refer to an average soil. The westernmost part of the island is characterized by very low values in the

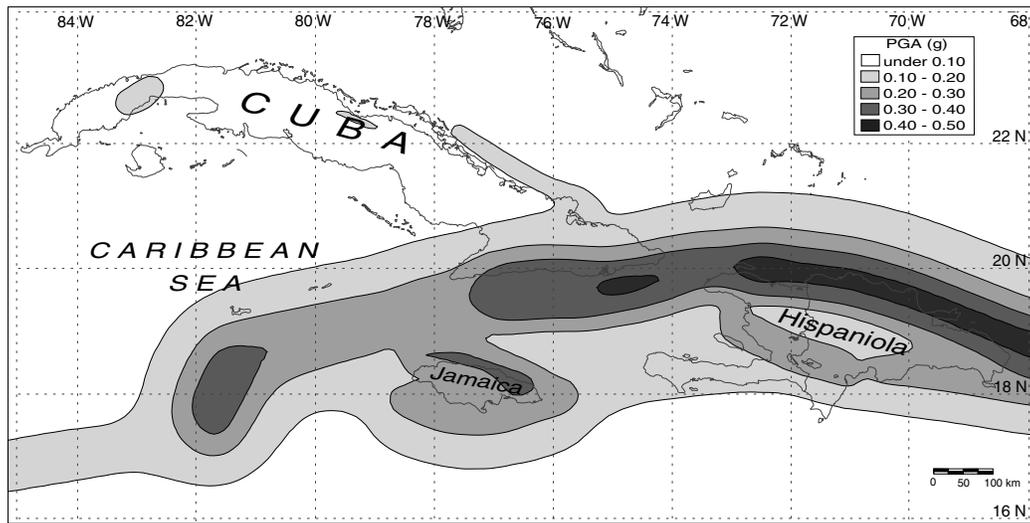


Figure 18. Horizontal PGA (in gravitational acceleration) with a 475-year return period obtained transforming the intensity values (Fig. 17a) into PGA values by the Trifunac and Brady (1975) relation.

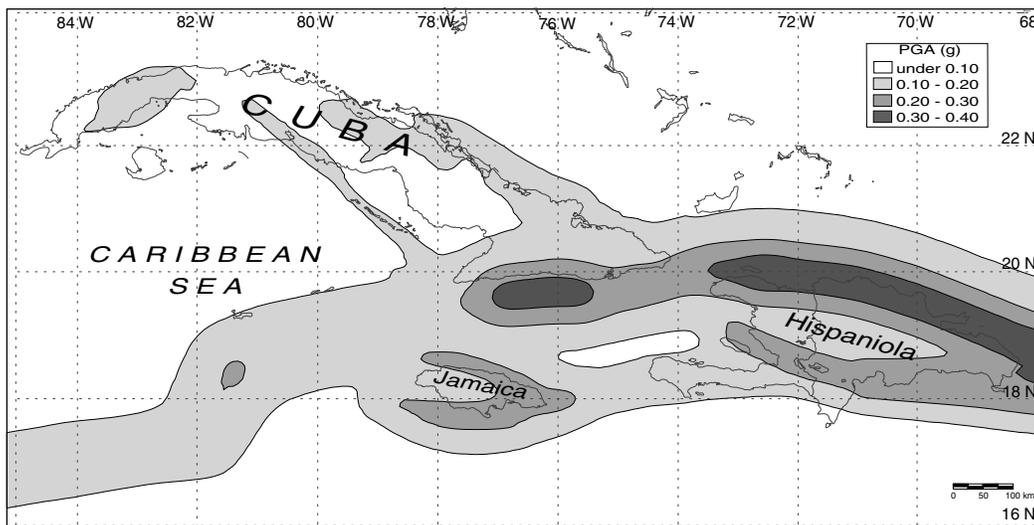


Figure 19. Average horizontal PGA (in gravitational acceleration) with a 475-year return period for average soil, following the logic-tree approach. No σ in the attenuation has been considered.

GSHAP map (Shedlock, 1999). All our results, in contrast, show higher PGA values along the northern and southern coasts and the seismic spot in the Pinar del Rio region, caused by the influence of SZ8 (Fig. 6). A direct comparison with our final results cannot be made, as our map in Figure 19 does not consider the aleatory uncertainty of attenuation, while the GSHAP map (Shedlock, 1999) does.

The seismic hazard map for Latin America and the Caribbean prepared by Tanner and Shepherd (1997) shows only that the maximum PGA in Cuba is located offshore Santiago (values larger than 0.25g on rock), with no further details.

Conclusions

The present study offers a new, comprehensive view of seismic hazard on Cuban territory, using the most recent international investigations on the subject. In the present study, some aspects of seismic hazard calculation have been treated specifically, as follows:

- A data set, where each earthquake is characterized by several entries coming from different sources, has been created for systematic storage and analysis. The earthquake catalog of Cuba and neighboring areas is hazard oriented, where a specific processing method (magnitude values, filtering techniques, location and epicentral intensity of offshore events) was applied to the data set.
- All the available macroseismic data for Cuba were analyzed to investigate the problem of intensity attenuation relationships. Four models were considered, including the von Kovesligethy (1907) relation that has been traditionally used in Cuba. As the seismic hazard results depend critically on the chosen attenuation relation, our choice was to prefer different relations for the different SZs, so that the most severe event that occurred in the past is taken as representative of the attenuation properties.
- Three different PGA attenuation relationships from the literature have been considered, as a local attenuation relation is not available for the Caribbean region. Hazard estimates are referred to an average soil type, as the association of simplified local conditions (e.g., rock, stiff, and soft soil) is not currently feasible. Moreover, the use of a logic-tree approach, where estimates in intensity are also included, automatically excludes any possible evaluation of local effects. The final hazard map has been computed by weighting the individual results obtained by the application of the cited PGA relations and those of the hazard map in terms of macroseismic intensity. In such a way, the importance of the choice of the attenuation relation is minimized.
- The final results, both in terms of PGA and intensity, indicate a high hazard along the southern coast of Cuba, where Santiago de Cuba is located. The rest of the island is characterized by moderate values that do not represent the possibility of very severe damage at the specified annual probability level.

Acknowledgments

This research has been developed in the framework of the ICTP Programme for Training and Research in Italian Laboratories of the International Centre for Theoretical Physics, Miramare, Trieste, Italy. Many thanks are due to the associate editor of the *Bulletin*, Ivan Wong, URS Corporation Oakland, Charles Mueller, U.S. Geological Survey, Denver, and an anonymous reviewer for their very useful comments and improvements and to Muzio Bobbio, OGS Trieste, for his cooperation and support.

References

- Algermissen, S. T., D. M. Perkins, W. Isherwood, D. Gordon, G. Reagor, and C. Howard (1976). Seismic risk evaluation of the Balkan region, in *Proc. of the Seminar on Seismic Zoning Maps*, V. Karnik and C. Radu (Editors), Vol. 2, Unesco, Skopje, 172–240.
- Alvarez, L. (1995). SACUDIDA: versión 2.0—*Un Programa para la Estimación de la Peligrosidad Sísmica*, Editorial Academia, La Habana, Cuba, 1–59.
- Alvarez, L., and V. I. Bune (1977). Evaluating the seismic hazard for the southeastern part of Cuba, *Izv. Akad. Nauk SSSR Fiz. Zemli* **10**, 54–67 (in Russian).
- Alvarez, L., and V. I. Bune (1985a). Seismic hazard in eastern Cuba, *Izv. Earth Phys.* **21**, 733–741.
- Alvarez, L., and V. I. Bune (1985b). A computer program for seismic hazard estimation, in *Proc. 3rd Int. Symp. Analysis of Seismicity and Seismic Risk*, Czechoslovak Academy of Sciences, Prague, 432–439.
- Alvarez, L., and T. Chuy (1985). Isoseismal model for Greater Antilles, in *Proc. 3rd Int. Symp. Analysis of Seismicity and Seismic Risk*, Czechoslovak Academy of Sciences, Prague, 134–141.
- Alvarez, L., R. S. Mijailova, E. O. Vorobiova, T. Chuy, G. N. Zhakirzhanova, E. R. Perez, L. M. Rodionova, H. Alvarez, and K. M. Mirzoev (1990). Terremotos de Cuba y áreas aledañas, Internal report, Fondos del CENAI, 1–78.
- Alvarez, L., T. Chuy, and M. Cotilla (1991). Peligrosidad sísmica de Cuba: una aproximación a la regionalización sísmica del territorio nacional, *Rev. Geofis.* **35**, 125–150.
- Ambraseys, N. N. (1995). Reappraisal of the prediction of ground accelerations in Europe: EAEE Working Group report, in *10th European Conf. on Earthquake Engineering*, G. Duma (Editor), Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 3041–3048.
- Belousov, T. P., V. N. Krestnikov, and N. V. Shebalin (1983). Seismic source zones delimitation and estimation of maximum magnitudes from Central Cuba, in *Research of the Seismicity of Low Activity Seismic Zones (Central Cuba)*, Nauka, Moscow, 81–85.
- Bender, B., and D. M. Perkins (1987). SEISRISK III: a computer program for seismic hazard estimation, *U.S. Geol. Surv. Bull.* **1772**, Denver, Colorado, 1–48.
- Berardi, R., L. Magri, M. Mucciarelli, C. Petrongaro, and L. Zanetti (1994). Mapped di sismicità per l'area italiana, ENEL, Roma, 1–60.
- Blake, A. (1941). On the estimation of focal depth from macroseismic data, *Bull. Seism. Soc. Am.* **31**, 225–231.
- British Association Seismology Committee (1918). *Bulletin 1913–1915*, Earthquake Observatory, Shide, United Kingdom.
- British Association Seismology Committee (1919). *The Large Earthquakes of 1916*, University Observatory, Oxford, United Kingdom.
- British Association Seismology Committee (1921). *Bulletin 1917*, University Observatory, Oxford, United Kingdom.
- Calais, E., B. Mercier, and M. de Lepinay (1991). From transtension to transpression along the northern Caribbean plate boundary of Cuba: implications for the recent motion of the Caribbean plate, *Tectonophysics* **186**, 329–350.
- Chuy, T. (1999). Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de peligrosidad sísmica y microzonación sísmica, *Ph.D. Thesis*, CENAI, Santiago de Cuba, Cuba, 1–95.
- Chuy, T., and M. Rodríguez (1980). La actividad sísmica de Cuba por datos históricos, *Investigaciones Sismológicas en Cuba* **1**, 5–17.

- Chuy, T., B. Gonzalez, and L. Alvarez (1983). Sobre la peligrosidad sísmica en Cuba, *Investigaciones Sismológicas en Cuba* **4**, 37–52.
- Chuy, T., L. Alvarez, J. Zapata, and B. Gonzalez. (1992). Investigaciones sismológicas complejas para el Complejo Hidroenergético Toa-Duaba, Reporte de Investigación, Fondos del CENAI, 1–745.
- Chuy, T., and L. Alvarez (1995). Seismic hazard map of Cuba for the new building code of the Republic of Cuba, Ministry of Construction, Havana, 1–21, scale 1:1,000,000 (in Spanish).
- Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.* **58**, 1583–1606.
- Cotilla, M. O. (1998). An overview on the seismicity of Cuba, *J. Seism.* **2**, 323–335.
- Cotilla, M., and L. Alvarez (2001). Seismogenic regularities of the Cuban western seismotectonic unit, *Geol. J. Chile* **28**, 3–24 (in Spanish).
- Cotilla, M., P. Bankwitz, A. Franzke, L. Alvarez, E. Gonzalez, J. Diaz, G. Gruenthal, J. Pilarski, and F. Arteaga (1991). Mapa sismotectónico de Cuba Escala 1:1000000, *Comunicaciones Científicas sobre Geofísica y Astronomía* **23**, 1–49, 1er anexo.
- Cuevas, J. L. (1994). Estudios de isostasia en Cuba: una caracterización y delimitación de zonas potencialmente sísmicas, *Bol. Geol. Minero* **109**, 265–278.
- Coppersmith, K. J., and R. R. Youngs (1986). Capturing uncertainty in probabilistic seismic hazard assessments within intraplate environments, in *Proc. of the 3rd U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, 24–28 August 1986, Charleston, South Carolina, Vol. 1, 301–312.
- Dimaté, C., L. Drake, H. Yopez, L. Ocola, H. Rendon, G. Gruenthal, and D. Giardini (1999). Seismic hazard assessment of the Northern Andes (PILOTO Project), *Ann. Geofis.* **42**, 1039–1055.
- Fedotov, S. A., and L. S. Shumilina (1971). Seismic hazard of Kamchatka, *Izv. Akad. Nauk S.S.S.R. Fiz. Zemli* **9**, 3–15 (in Russian).
- García, J. A. (2001). Seismic hazard assessment for Cuba and the surrounding area, Research Report, ICTP, Trieste, Italy, 1–80.
- Gardner, J. K. and L. Knopoff (1974). Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bull. Seism. Soc. Am.* **64**, 1363–1367.
- Giardini D. (1999). The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP): 1992/1999, *Ann. Geofis.* **42**, 957–974.
- Giardini, D., and P. Basham (1993). The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP), *Ann. Geofis.* **36**, 3–13.
- Gonzalez, B. E., T. Chuy, L. Alvarez, and M. F. Rubio (1993). Estudios sismológicos complejos de Cuba centro oriental para el emplazamiento de objetivos nucleares, Reporte de Investigación, Fondos del CENAI, 1–357.
- Gabrielov, A. M., O. E. Dmitrieva, V. I. Keilis-borok, V. G. Kossobokov, I. V. Kutznetsov, T. A. Levshina, K. M. Mirzoev, G. M. Molchan, S. Kh. Negmatullaev, V. F. Pisarenko, A. G. Prozorov, W. Rinheart, I. M. Rotwain, P. N. Shebalin, M. G. Shnirman, and S. Yu. Schreider (1986). Algorithms of long-term earthquakes' prediction, Software and Data Handling, International School for Research Oriented to Earthquake Prediction-algorithms, Lima, Perú, 1–61.
- Grandori, G., F. Perotti, and A. Tagliani (1987). On the attenuation of macroseismic intensity with epicentral distance, in *Ground Motion and Engineering Seismology*, A. S. Cakmak (Editor), Elsevier, Amsterdam, 581–594.
- International Seismological Summary (1918–1963). The International Seismological Summary 1918–1963, University Observatory/I.S.C., Oxford.
- International Seismological Centre (ISC) (1964–1995). *Regional Catalogue of Earthquakes, 1964–1995*, Edinburgh.
- Iturralde-Vinent, M. (1994). Cuban geology: a new plate tectonic synthesis, *J. Petrol. Geol.* **17**, 39–70.
- Iturralde-Vinent, M. (Editor) (1996). Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba, First Contribution of IGCP Project 364, Geological Correlation of Ophiolites and Volcanic Arc Terrains in the Circum Caribbean Region, Miami, U.S.A., 1–265.
- Joyner, W. B., and D. M. Boore (1981). Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.* **71**, 2011–2038.
- Kulkarni, R. B., R. R. Youngs, and K. J. Coppersmith (1984). Assessment of confidence intervals for results of seismic hazard analysis, in *Proc. of the 8th World Conference on Earthquake Engineering*, 21–28 July 1984, San Francisco, Vol. 1, 263–270.
- Lundgren, P. R., and R. M. Russo (1996). Finite element modeling of crustal deformation in the North America-Caribbean plate boundary zone, *J. Geophys. Res.* **101**, 11,317–11,327.
- Mann, P., K. Burke, and T. Matumoto (1984). Neotectonics of Hispaniola: plate motion, sedimentation, and seismicity at a restraining bend, *Earth Planet. Sci. Lett.* **70**, 311–324.
- Mann, P., F. W. Taylor, R. L. Edwards, and T. L. Ku (1995). Actively evolving microplate formation by oblique collision and sideways motions along strike-slip faults: an example from the northeastern Caribbean plate margin, *Tectonophysics* **246**, 1–69.
- McGuire, R. K. (1976). Fortran computer program for seismic risk analysis, *U.S. Geol. Surv. Open-File Rept.* 76-67, 1–92.
- McGuire, R. K. (1977). Effects of uncertainties in seismicity on estimates of seismic hazard for the east coast of the United States, *Bull. Seism. Soc. Am.* **67**, 827–848.
- McGuire, R. K., and K. M. Shedlock (1981). Statistical uncertainties in seismic hazard evaluations in the United States, *Bull. Seism. Soc. Am.* **71**, 1287–1308.
- Meletti, C., E. Patacca, and P. Scandone (2000). Construction of a seismotectonic model: the case of Italy, *Pure Appl. Geophys.* **157**, 11–35.
- Moreno, B., M. Grandison, and K. Atakan (2002). Crustal velocity model along the southern Cuban margin: implications for the tectonic regime at an active plate boundary, *Geophys. J. Int.* **151**, 632–645.
- Murphy, J. R., and L. J. O'Brien (1977). The correlation of peak ground acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters, *Bull. Seism. Soc. Am.* **67**, 877–915.
- Muir-Wood, R. (1993). From global seismotectonics to global seismic hazard, *Ann. Geofis.* **36**, 153–168.
- Nuevo Atlas Nacional de Cuba* (1989). Sección III: Características geofísicas, Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de Cuba, Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía y Instituto de Geografía Nacional (Madrid, España), II.3.3.
- Orbera, L., B. Gonzalez, T. Chuy, and J. Oro (1990). Investigación sísmica en la región de emplazamiento del Centro de Investigaciones Nucleares, Reporte de Investigación, Fondos del CENAI y la SEAN, 1–344.
- Orbera, L., J. Rodríguez, B. Pena, A. Arias, M. Marqueti, and T. Lombardero (1989). Estudio sismotectónico para el emplazamiento del Complejo Hidroenergético Toa-Duaba, Reporte de Investigación, Fondos del E.I.P.I.B., MINBAS, 1–180.
- Peruzza, L. (1995). Macroseismic intensity versus distance: constraints to the attenuation model, in *Soil Dynamics and Earthquake Engineering VII*, A. S. Cakmak and C. A. Brebbia (Editors), Computational Mechanics Publications, Southampton, England, 215–222.
- Peruzza, L. (1996). Attenuating intensities, *Ann. di Geofis.* **39**, 1079–1093.
- Peruzza, L. (2000). Macroseismic attenuation relationships of Italian earthquakes for seismic hazard assessment purposes, *Boll. Geof. Teor. Appl.* **41**, 31–48.
- Puscharovsky, Y., A. Mossakovsky, G. Nekrasov, S. Sokolov, and M. Iturralde-Vinent (1989). Tectonics of the Republic of Cuba: explanatory note to the tectonic map of Cuba, scale 1: 500,000, Editor Nauka, Moscow, 1–77 (in Russian).
- Quijada, P., E. Gajardo, M. Franke, M. Kozuch, and J. Grases. (1993). Analisis de amenaza sísmica de Venezuela para el nuevo mapa de zonificación con fines de ingeniería, in *Memorias del Octavo Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sísmica-Resistente*, Merida.
- Rautian, T. G. (1964). On the determination of earthquake energy for distances lower than 3000 km, *Trudi Instituta Fizika Zemli* **32**, 88–93 (in Russian).

- Rebez, A., and D. Slejko (2000). Sensitivity analysis on the input parameters in probabilistic seismic hazard assessment, *Soil Dyn. Earthquake Eng.* **20**, 341–351.
- Reiter, L. (1990). Earthquake hazard analysis: issues and insights, Columbia University Press, New York, 1–252.
- Richter, C. F. (1958). *Elementary Seismology*, Freeman, San Francisco.
- Riznichenko, Yu. V. (Editor) (1979). *Seismic Hazard in the Territory of the U.S.S.R.*, Nauka, Moscow, 1–184 (in Russian).
- Rodriguez Farrat, M., L. Alvarez, and J. Garcia (1997). Estimaciones probabilísticas de la peligrosidad sísmica en Cuba, *Rev. Geofis.* **47**, 46–77.
- Rosencrantz, E., M. I. Ross, and J. G. Sclater (1988). Age and spreading history of the Cayman trough as determination from depth heat flow, and magnetic anomalies, *J. Geophys. Res.* **93**, 2141–2157.
- Rosencrantz, E., and P. Mann (1991). SeaMARC II mapping of transform faults in the Cayman Trough, Caribbean Sea, *Geology* **19**, 690–693.
- Rubio, M. (1985). The assessment of seismic hazard for the Republic of Cuba, in *Proc. 3rd Int. Symp. Analysis of Seismicity and Seismic Risk*, Czechoslovak Academy of Sciences, Prague, 424–431.
- Russo, R. M., and A. Villaseñor (1995). The 1946 Hispaniola earthquakes and the tectonics of the North America–Caribbean plate boundary zone, northeastern Hispaniola, *J. Geophys. Res.* **100**, 6265–6280.
- Servicio Sismológico Nacional (1964–1995). Boletines anuales de datos sismológicos, Fondos del CENAIAS.
- Shedlock, K. M. (1999). Seismic hazard map of North and Central America and the Caribbean, *Ann. Geofis.* **42**, 977–999.
- Shedlock, K. M., and J. G. Tanner (1999). Seismic hazard map of the western hemisphere, *Ann. Geofis.* **42**, 1199–1214.
- Shepherd, J. B., J. G. Tanner, C. M. McQueen, and L. L. Lynch (1997). Seismic hazard in Latin America and the Caribbean, in *Seismic Hazard Maps for the Caribbean*, IRDC, Ottawa, Vol. 5, 15.
- Slejko, D., L. Peruzza, and A. Rebez (1998). Seismic hazard maps of Italy, *Ann. Geofis.* **41**, 183–214.
- Slejko, D., R. Camassi, I. Cecic, D. Herak, M. Herak, S. Kociu, V. Kouskouna, J. Lapajne, K. Makropoulos, C. Meletti, B. Muco, C. Papaioannou, L. Peruzza, A. Rebez, P. Scandone, E. Sulstarova, N. Voulgaris, M. Zivcic, and P. Zupancic (1999). Seismic hazard assessment for Adria, *Ann. Geofis.* **42**, 1085–1107.
- Speed, R. C., and D. K. Larue (1991). Extension and transtension in the plate boundary zone of northeastern Caribbean, *Geophys. Res. Lett.* **18**, 573–576.
- Sponheuer, W. (1960). Berachnungverfahren mit Schrittweiser Nahorung, in *Methoden zur Herdtiefen Bestimmung in der Makroseismic*, W. Sponheuer (Editor), Freiburger Forschungshefte C88, Akademie Verlag, Berlin, 16–32.
- Stepp, J. C. (1972). Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard, in *Proc. of the 1st Int. Conf. on Microzonation*, Seattle, Vol. 2, 897–910.
- Tanner J. G., and J. B. Shepherd (1997). Seismic hazard in Latin America and the Caribbean, in *Project Catalog and Seismic Hazard Maps*, IRDC, Ottawa, Vol. 1, 143.
- Trifunac, M. D., and A. G. Brady (1975). On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of ground motion records, *Bull. Seism. Soc. Am.* **65**, 139–162.
- Veneziano, D. C., A. Cornell, and T. O’Hara (1984). Historical method of seismic hazard analysis, Rep. NP-3428, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.
- von Kovesligethy, R. (1907). Seismischer Stärkegrad und Intensität der Beben, *Gerlands Beitr. Geophys.* **8**, 363–366.
- Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas
Calle 212 No. 2906, e/29 y 31
La Coronela, La Habana, Cuba
(J.G., L.A.)
- Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale
Borgo Grotta Gigante 42c
34010 Sgonico (Trieste), Italy
(D.S., L.P., A.R.)

Manuscript received 25 June 2002.

Anexo 3

Datos utilizados en el cálculo de la peligrosidad sísmica por el método zonificado

Tabla 1- Frecuencias individuales (IND_RATE) y acumulativas (GRI_RATE) por zona sismogeneradora para el modelo ZONA-A (modificado Chuy y Alvarez, 1995). Se incluyen además las determinaciones de la magnitud máxima y su frecuencias [M_1SB: método “one step beyond”, M_TEC: origen tectónico y M_KIJ: método de Kijko y Graham (1999)].

	SZ01		SZ02		SZ03		SZ04		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0	14.2900	12.0000	28.5700	24.2700	9.5200	11.5600	6.4500	6.9300	2.0
2.5	0.0001	4.6100	4.7000	8.5200	4.7600	4.7100	2.9700	3.0800	2.5
3.0	0.0001	1.7700	3.2200	2.8500	3.3100	1.9200	1.9900	1.2900	3.0
3.5	5.8800	1.1100	1.9600	1.0000	0.6600	0.7700	0.6600	1.0000	3.5
4.0		0.4300	0.2000	0.5100	0.2000	0.5500		0.4200	4.0
4.5		0.1600		0.1800		0.2200		0.1800	4.5
5.0		0.0067		0.0600		0.0900		0.0790	5.0
5.5									5.5
6.0									6.0
6.5									6.5
7.0									7.0
7.5									7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	4.00	0.4260	4.50	0.1770	4.50	0.2180	4.00	0.4200	M_1SB
M_TEC	5.50	0.0250	5.50	0.0210	5.25	0.0570	5.50	0.0350	M_TEC
M_KIJ									M_KIJ

	SZ05		SZ06		SZ08A		SZ08B		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0	19.0000	5.0800					15.7400	9.0300	2.0
2.5	14.2000	2.1200	15.6900	19.0900	1.0000	1.0900	5.8400	3.8300	2.5
3.0	6.9000	0.8800	7.9200	8.1800	0.6600	0.4500	3.1900	1.5600	3.0
3.5	2.9000	0.3700	5.9600	3.7200	0.0001	0.1900	1.2000	0.6400	3.5
4.0	1.1000	0.2600	1.4900	1.6000	0.2000	0.1400	0.2000	0.4400	4.0
4.5		0.1100	0.6600	0.7300		0.0600		0.1800	4.5
5.0		0.0450	0.0001	0.3100				0.0720	5.0
5.5		0.0180	0.0001	0.1400					5.5
6.0			0.2000	0.1100					6.0
6.5									6.5
7.0									7.0
7.5									7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	4.50	0.1070	6.50	0.0500	4.50	0.0600	4.50	0.1780	M_1SB
M_TEC	5.50	0.0180	6.25	0.0720	5.00	0.0250	5.25	0.0400	M_TEC
M_KIJ			6.05	0.1000					M_KIJ

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

MAG	SZ09		SZ10		SZ11		SZ12		MAG
	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	
2.0			5.9400	5.9500	27.2700	21.6400	16.1200	12.7700	2.0
2.5			2.6500	2.6700	4.7600	7.0800	0.0001	5.1400	2.5
3.0	3.2000	3.9200	1.4900	1.2700	0.0001	2.4300	3.9200	2.0700	3.0
3.5	1.9600	1.6000	0.2000	0.5700	1.9600	0.8000	0.0001	0.8300	3.5
4.0	0.9900	0.6500	0.6600	0.5000	0.6600	0.4000	1.4900	0.3400	4.0
4.5	0.0010	0.2700		0.2200		0.1400	0.6600	0.2300	4.5
5.0	0.2000	0.1800							5.0
5.5									5.5
6.0									6.0
6.5									6.5
7.0									7.0
7.5									7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	5.50	0.0690	4.50	0.2200	4.50	0.1380	5.00	0.0930	M_1SB
M_TEC	5.50	0.0690	5.00	0.1000	5.50	0.0510	5.00	0.0930	M_TEC
M_KIJ	5.03	0.1790					4.53	0.2180	M_KIJ

MAG	SZ13		SZ14A		SZ14B		SZ15		MAG
	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	
2.0	3.3100	3.2800			36.3600	48.1100			2.0
2.5	0.6600	1.3200	14.2800	19.7400	19.0500	18.5500	18.1800	21.7800	2.5
3.0	1.4900	0.5300	10.8900	6.5400	12.9000	6.8900	9.8000	6.4900	3.0
3.5	0.2000	0.3600	1.4900	2.1600	3.9600	2.5200	0.9900	1.8500	3.5
4.0		0.1500	0.6600	1.0700	0.6600	0.9700	0.6600	0.7800	4.0
4.5		0.0600		0.3300	0.0001	0.3600		0.2400	4.5
5.0				0.1000	0.0001	0.1300			5.0
5.5				0.0380	0.2000	0.0800			5.5
6.0				0.0120		0.0600			6.0
6.5				0.0040		0.0280			6.5
7.0									7.0
7.5									7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	4.00	0.1500	4.50	0.3300	6.00	0.0600	4.50	0.2390	M_1SB
M_TEC	5.00	0.0230	7.00	0.0010	7.00	0.0110	5.00	0.0720	M_TEC
M_KIJ					5.54	0.1500			M_KIJ

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

	SZ16		SZ17		SZ18		SZ19		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0	5.9400	6.5500					21.5700	21.6400	2.0
2.5	1.4900	1.8600	7.8400	7.1000			6.9300	7.0800	2.5
3.0	3.3100	0.5100	3.2400	2.8600	19.6100	21.3900	2.6500	2.4300	3.0
3.5	0.3300	0.1900	0.0001	1.1500	8.9100	7.3300	0.6600	0.8000	3.5
4.0		0.0500	0.9900	0.7800	2.6500	2.4000	0.2000	0.2600	4.0
4.5		0.0150		0.3200	0.0001	0.8200	0.2000	0.1300	4.5
5.0				0.1200	0.6600	0.4100		0.0500	5.0
5.5								0.0150	5.5
6.0								0.0050	6.0
6.5									6.5
7.0									7.0
7.5									7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	4.00	0.0500	4.50	0.3200	5.50	0.1300	5.00	0.0470	M_1SB
M_TEC	5.00	0.0039	5.50	0.0540	5.50	0.1300	6.50	0.0016	M_TEC
M_KIJ					5.01	0.4200	4.53	0.1400	M_KIJ

	SZ20		SZ21		SZ22		SZ23		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0							3227.2700	3298.2300	2.0
2.5			12.9200	16.6100			1245.4500	1225.4100	2.5
3.0	13.7300	13.3000	8.9100	5.6300	30.6900	28.9000	461.2900	455.2800	3.0
3.5	3.9200	4.0200	1.4900	1.9100	5.3000	7.4300	187.1000	169.1500	3.5
4.0	0.9900	1.2100	0.6600	0.9800	2.6500	1.8900	48.3900	62.8500	4.0
4.5	0.6600	0.5200		0.3300	0.6600	0.6800	13.7300	23.3500	4.5
5.0		0.1600		0.1100		0.1900	10.8900	8.6800	5.0
5.5		0.0480		0.0390		0.0480	3.9600	3.2200	5.5
6.0						0.0120	1.5000	1.2000	6.0
6.5							0.6600	0.4400	6.5
7.0							0.7500	0.1700	7.0
7.5							0.2200	0.1000	7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	5.00	0.1600	4.50	0.3300	5.00	0.1860			M_1SB
M_TEC	6.00	0.0140	6.00	0.0140	6.50	0.0030	8.00	0.0350	M_TEC
M_KIJ	4.51	0.4900			4.51	0.6400	7.55	0.0800	M_KIJ

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

	SZ25		SZ27		SZ28		SZ29		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0			1109.0900	1378.6700	142.8600	125.9800	52.3800	48.3900	2.0
2.5	600.0000	162.0000	563.6400	421.6100	32.2500	42.6900	14.2900	22.1200	2.5
3.0	174.0000	65.4600	171.4300	133.3200	13.7200	14.6300	12.5800	10.1100	3.0
3.5	23.5300	25.0900	25.4900	42.1600	5.9400	4.7900	7.8400	4.6200	3.5
4.0	6.9300	9.9900	4.9500	13.4700	1.9800	1.6200	1.9800	2.1500	4.0
4.5	0.9900	4.0400	0.9900	4.1200	0.0001	0.5500	0.0001	0.9400	4.5
5.0	0.6600	1.5500	0.6600	1.3000	0.2000	0.1900	0.6600	0.7900	5.0
5.5	0.0001	0.6200	0.3300	0.4100	0.2000	0.0600		0.3500	5.5
6.0	0.3300	0.2500	0.2000	0.1900	0.2000	0.0300		0.1900	6.0
6.5	0.0001	0.1000		0.0180		0.0270			6.5
7.0	0.2000	0.0600							7.0
7.5		0.0250							7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB			6.50	0.0600			5.50	0.3500	M_1SB
M_TEC	7.60	0.0190	7.60	0.0040	7.00	0.0040	6.50	0.0800	M_TEC
M_KIJ	7.03	0.0500	6.03	0.1600	6.14	0.0170	5.01	0.7900	M_KIJ

	SZ30		SZ31		SZ32		SZ33		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0	386.3600	452.2100	128.5700	166.0700	31.3700	40.2800	64.5200	77.1700	2.0
2.5	195.2400	148.0100	70.9700	56.2700	17.6400	13.7900	31.3700	20.1300	2.5
3.0	48.3900	50.1500	31.3700	19.0700	7.9200	4.9600	2.6500	5.4600	3.0
3.5	8.9100	17.1900	0.0001	6.4600	0.0001	1.7200	1.4900	1.9500	3.5
4.0	7.9200	5.6300	1.3000	2.1900	0.6600	0.9100		0.7500	4.0
4.5	0.6600	1.9100	0.4900	0.7400		0.3200		0.1400	4.5
5.0	0.4000	0.6500	0.0001	0.2500		0.1170		0.0380	5.0
5.5	0.6600	0.3200	0.0001	0.0900		0.0410		0.0100	5.5
6.0		0.1100	0.2000	0.0400				0.0020	6.0
6.5		0.0350							6.5
7.0									7.0
7.5									7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	6.00	0.1070			4.50	0.3160	4.00	0.4500	M_1SB
M_TEC	7.00	0.0120	6.50	0.0015	6.00	0.0140	6.50	0.0007	M_TEC
M_KIJ	5.51	0.3200	6.11	0.0330					M_KIJ

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

	SZ34		SZ35		SZ36		SZ37		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0	185.7100	195.4200	47.6100	47.6700	14.2800	20.0800	67.7400	68.4800	2.0
2.5	54.8400	50.6300	9.6700	9.9600	9.8000	8.1800	15.8000	14.7300	2.5
3.0	13.7200	12.6200	1.9600	2.0800	5.9400	3.2800	2.9700	3.0800	3.0
3.5	2.9700	3.2400	0.6600	0.5500	0.6600	1.3900	0.6600	0.8100	3.5
4.0	0.4900	1.1200		0.1300	0.0001	0.5700		0.1800	4.0
4.5		0.3000		0.0250	0.2000	0.2300		0.0350	4.5
5.0					0.2000	0.1600		0.0070	5.0
5.5									5.5
6.0									6.0
6.5									6.5
7.0									7.0
7.5									7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	4.50	0.3000	4.00	0.1250	5.50	0.0750	4.00	0.1770	M_1SB
M_TEC	5.00	0.0750	5.00	0.0050	5.50	0.0750	5.50	0.0016	M_TEC
M_KIJ					5.03	0.1400			M_KIJ

	SZ38		SZ39		SZ40-41		SZ42		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0	281.6000	267.3000	157.1400	184.9300	36.3000	37.1300	19.9000	19.9700	2.0
2.5	51.6100	61.2400	64.5200	42.6500	14.2000	13.1700	6.9300	6.8400	2.5
3.0	12.9000	14.0300	6.4500	9.4800	6.4000	4.6700	2.4800	2.2700	3.0
3.5	5.9400	3.2100	0.0001	2.1700	0.0001	1.6600	0.9900	1.1200	3.5
4.0	0.6600	0.9500	0.6600	0.6500	0.0001	0.5900		0.3500	4.0
4.5		0.2200		0.1500	0.9900	0.3200		0.1400	4.5
5.0		0.0530		0.0350		0.1200		0.0450	5.0
5.5		0.0117				0.0430			5.5
6.0		0.0025							6.0
6.5									6.5
7.0									7.0
7.5									7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	4.50	0.2180	4.50	0.1540	5.00	0.1200	4.00	0.3500	M_1SB
M_TEC	6.50	0.0006	5.50	0.0079	6.00	0.0150	5.50	0.0150	M_TEC
M_KIJ									M_KIJ

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

	SZ43		SZ44		SZ45		SZ46		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0	2.6500	3.2100			280.7300	165.8400	1052.3800	1159.0100	2.0
2.5	1.4900	1.2300	48.3800	52.1000	67.7400	59.5800	481.8200	420.8100	2.5
3.0	0.6600	0.4900	29.4100	26.6400	25.4900	20.4000	147.6200	154.7700	3.0
3.5	0.2000	0.3200	8.9100	14.6800	0.6600	7.3300	61.2900	54.2100	3.5
4.0		0.1300	9.9000	7.5100	2.6500	2.5100	25.4900	19.6800	4.0
4.5		0.0500	6.9300	4.1400	0.9900	0.9000	1.9600	7.1500	4.5
5.0		0.0210	1.4900	2.1200	0.3300	0.3100	0.6600	2.6300	5.0
5.5			0.6600	1.1700	0.2000	0.1700	0.0001	0.9200	5.5
6.0			0.6600	0.6000			0.3300	0.3300	6.0
6.5			0.0001	0.3300			0.2000	0.1900	6.5
7.0			0.2000	0.1700					7.0
7.5			0.2000	0.1900					7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	4.00	0.1300	8.00	0.1020	6.00	0.0500	7.00	0.0700	M_1SB
M_TEC	5.50	0.0080	7.75	0.1990	6.00	0.0500	7.60	0.0220	M_TEC
M_KIJ			7.54	0.1700	5.53	0.1620	6.53	0.1700	M_KIJ

	SZ47		SZ48		SZ49		SZ50		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0	863.6400	1036.4600	200.0000	294.0900	281.8200	563.4800			2.0
2.5	518.1800	556.6100	157.1400	127.5800	363.6400	245.9700			2.5
3.0	336.3600	298.9200	77.4200	53.1800	190.4800	107.3700			3.0
3.5	318.1800	160.5300	25.4900	22.1700	27.4500	46.8700	58.0600	33.7000	3.5
4.0	125.8100	86.2100	5.9400	9.2400	7.9200	20.4600	8.9100	17.2800	4.0
4.5	54.8400	46.3000	0.6600	3.8500	2.6500	8.9300	0.6600	8.8600	4.5
5.0	25.4900	24.8600	0.2000	1.6100	1.6600	3.9000	7.8400	4.5500	5.0
5.5	3.3100	13.3500	0.2000	0.6600	1.4900	1.7000	1.9800	2.3300	5.5
6.0	2.6500	7.1700	0.2000	0.2900	1.0000	0.7400	1.9800	1.2000	6.0
6.5	0.2000	3.8500	0.2000	0.2000	0.6600	0.3200	1.0000	0.6100	6.5
7.0	1.9900	2.0700		0.0800	0.2000	0.1400	0.0001	0.3100	7.0
7.5	0.6600	1.1100		0.0200	0.2000	0.1100	0.5000	0.3300	7.5
8.0	0.6600	1.2900							8.0
8.5									8.5

M_1SB			7.00	0.0830	8.00	0.0500	8.00	0.1690	M_1SB
M_TEC	8.30	0.6600	7.60	0.0330	8.00	0.0500	7.60	0.2800	M_TEC
M_KIJ	8.01	1.2900	6.53		7.58	0.1000	7.53	0.3000	M_KIJ

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

	SZ51		SZ52		SZ53		SZ54		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0			123.8100	198.0900					2.0
2.5	204.7600	219.9200	80.6500	103.9600					2.5
3.0	112.9000	83.6100	119.0500	54.5600	545.4500	575.8400	285.7100	307.6900	3.0
3.5	19.6000	31.7900	21.5700	28.6300	214.2900	192.7900	106.4500	90.8100	3.5
4.0	7.8400	12.0900	5.9400	15.0300	61.2900	67.6600	19.3500	26.8000	4.0
4.5	2.9700	4.5300	9.8000	7.8900	27.4500	22.9200	13.2500	7.9100	4.5
5.0	3.3100	1.7900	3.9700	4.1400	6.9600	7.6800	0.6600	2.3100	5.0
5.5	0.2000	0.6800	1.4900	2.1200	1.9800	2.6900	0.2000	0.7000	5.5
6.0	1.4900	0.2600	0.6600	1.1700	0.0001	0.9100	0.0001	0.2100	6.0
6.5	0.2000	0.1600	0.0001	0.6100	0.2000	0.3100	0.2000	0.0900	6.5
7.0			0.5000	0.3200	0.2000	0.1100		0.0240	7.0
7.5			0.2000	0.3500	0.2000	0.0500		0.0070	7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	7.00	0.0580	8.00	0.1770					M_1SB
M_TEC	7.00	0.0580	7.60	0.2950	8.00	0.0200	7.60	0.0050	M_TEC
M_KIJ	6.53	0.1400							M_KIJ

	SZ55		BK01		BK02		BK03		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0	163.6400	189.6400	63.6300	257.2200					2.0
2.5	64.5200	95.0500	57.1400	88.1700	518.1800	965.8500	781.8200	945.7300	2.5
3.0	71.4200	47.6400	48.3900	29.2000	364.7100	302.1400	445.4500	394.2400	3.0
3.5	45.1600	23.8700	21.5700	9.6700	152.3800	97.7700	147.6200	167.0200	3.5
4.0	9.9000	12.2400	5.9400	3.2000	68.6200	31.9800	128.5700	66.9500	4.0
4.5	1.4900	5.8600	0.6600	1.5800	12.9400	10.0000	23.5300	28.3600	4.5
5.0	0.2000	2.9400			3.9200	3.2400	9.9000	11.3700	5.0
5.5	0.6600	1.4700			0.7500	1.5500	9.9000	4.7400	5.5
6.0	0.2000	0.7500					1.4900	2.0100	6.0
6.5	0.2000	0.3600					0.2000	0.8000	6.5
7.0	0.6600	0.1800					0.6600	0.5800	7.0
7.5	0.2000	0.1800							7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	8.00	0.0930							M_1SB
M_TEC	7.60	0.1440							M_TEC
M_KIJ	7.54	0.1690							M_KIJ

Tabla 2- Frecuencias individuales (IND_RATE) y acumulativas (GRI_RATE) por zona sismogeneradora para el modelo ZONA-B [modificado de Garcia et al. (2003)]. Se incluyen además las determinaciones de la magnitud máxima y su frecuencias [M_1SB: método “one step beyond”, M_TEC: origen tectónico y M_KIJ: método de Kijko y Graham (1999)].

	SZ01		SZ03		SZ04		SZ05		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0	25.8000	29.8400	6.9300	6.0300					2.0
2.5	16.1200	13.9000	1.4900	2.0400	23.8000	29.7800	23.8100	18.3700	2.5
3.0	5.8000	6.0900	0.6600	0.7000	14.2800	8.9900	3.2200	6.7600	3.0
3.5	3.9000	2.8400	0.2000	0.2300	1.9800	2.7200	1.9600	2.3700	3.5
4.0	1.4900	2.2900	0.2000	0.1200	0.6600	1.1700	1.9600	0.8700	4.0
4.5		0.9500		0.0650		0.1590	0.0100	0.3100	4.5
5.0		0.4000		0.0120		0.1000	0.0100	0.1100	5.0
5.5		0.1800		0.0040		0.0330	0.2000	0.0600	5.5
6.0		0.0790		0.0010		0.0100		0.0410	6.0
6.5		0.0350				0.0030		0.0079	6.5
7.0									7.0
7.5									7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB			4.50	0.065	4.50	0.159	6.00	0.041	M_1SB
M_TEC	6.750	0.040	6.25	0.001	6.75	0.002	6.75	0.005	M_TEC
M_KIJ							5.53	0.057	M_KIJ

	SZ06		SZ07		SZ08		SZ09		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0	138.1000	150.7600	242.8500	90.3200			38.0900	44.2300	2.0
2.5	67.7400	56.0100	70.9700	38.2600	10.8900	10.7900	19.3500	18.1300	2.5
3.0	23.5300	21.0900	7.9200	15.3400	2.6500	4.8200	9.8000	7.7400	3.0
3.5	0.0000	7.5600	3.3100	6.3900	4.6400	2.1500	3.9600	3.3600	3.5
4.0	5.8000	2.8100	1.4900	2.6700	0.6600	0.9600	1.3000	2.4000	4.0
4.5	0.9900	1.0600	0.6600	1.1100	0.2000	0.4300		0.3210	4.5
5.0	0.0100	0.3800	0.2000	0.4700	0.0100	0.1900		0.2200	5.0
5.5	0.0100	0.1400	0.6600	0.3200	0.0100	0.0900		0.0890	5.5
6.0	0.3300	0.0800		0.1320	0.2000	0.0700		0.0320	6.0
6.5				0.0580		0.0400			6.5
7.0									7.0
7.5									7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	6.50	0.039	6.00	0.132	6.50	0.040			M_1SB
M_TEC	6.25	0.050	6.75	0.033	6.75	0.022	6.25	0.039	M_TEC
M_KIJ	6.02	0.070	5.52	0.300	6.03	0.069			M_KIJ

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

	SZ10		SZ11		SZ12		SZ13		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0			27.2700	31.3400	25.8000	30.7800			2.0
2.5	9.6800	11.3500	14.2800	14.9500	12.9000	11.4400	13.7300	21.3000	2.5
3.0	4.9500	3.9400	9.6800	6.7000	6.4500	4.2500	13.7300	7.8000	3.0
3.5	1.4900	1.3600	2.9700	3.2000	1.3000	1.5800	2.6500	3.0100	3.5
4.0	0.4900	0.7200	1.9800	1.4300	0.3000	0.9300	0.9900	1.7800	4.0
4.5		0.1650	0.0000	0.6800		0.1100		0.3320	4.5
5.0		0.0790	0.4900	0.5800		0.0340		0.2700	5.0
5.5		0.0270		0.1540		0.0100		0.1000	5.5
6.0		0.0090		0.1300		0.0027			6.0
6.5									6.5
7.0									7.0
7.5									7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	4.50	0.165	5.50	0.154	4.50	0.110			M_1SB
M_TEC	6.25	0.005	6.25	0.087	6.25	0.012	5.75	0.056	M_TEC
M_KIJ			5.01	0.600					M_KIJ

	SZ14		SZ15		SZ16		SZ17		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0					27.2800	58.9100			2.0
2.5	23.8000	54.1800			19.0500	18.8500	19.6100	22.6400	2.5
3.0	21.5600	16.3600	19.6100	26.6100	7.8000	6.3100	9.9000	7.2400	3.0
3.5	4.9500	4.9400	13.7200	9.1100	2.9700	2.0400	1.9900	2.2400	3.5
4.0	2.9700	1.5100	3.9600	3.2300	0.9900	0.6500	0.6600	1.0000	4.0
4.5	0.3900	0.6300	0.0000	1.1500	0.2000	0.3200		0.1800	4.5
5.0		0.1900	0.6600	0.6300		0.1060		0.0970	5.0
5.5		0.0560		0.1370		0.0340		0.0300	5.5
6.0		0.0150				0.0190		0.0090	6.0
6.5		0.0040							6.5
7.0									7.0
7.5									7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	5.00	0.191	5.50	0.137	5.00	0.106	4.50	0.18	M_1SB
M_TEC	6.75	0.003	5.75	0.125	5.75	0.019	6.25	0.01	M_TEC
M_KIJ					4.51	0.300			M_KIJ

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

	SZ18		SZ19		SZ20		SZ21		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0	32.2500	42.2700	176.1900	188.8000	542.8600	741.6600	161.9000	179.6300	2.0
2.5	19.6100	16.4400	66.6700	74.5200	381.8200	240.0000	58.0600	45.1200	2.5
3.0	9.9000	6.4000	45.1600	27.9300	80.6500	77.6600	8.9100	11.2500	3.0
3.5	2.6500	2.4900	7.8400	10.8600	8.9100	25.1300	2.6500	2.9100	3.5
4.0	0.0000	0.9500	1.9800	4.2300	7.9200	8.1300	0.0100	0.7300	4.0
4.5	0.3300	0.6300	0.0000	1.6400	0.6600	2.6300	0.2000	0.1900	4.5
5.0		0.2200	1.3000	0.6400	0.2000	0.8500	0.2000	0.0600	5.0
5.5		0.1000	0.4900	0.2500	0.0100	0.2800		0.0150	5.5
6.0		0.0370	0.2000	0.1600	0.0100	0.0900			6.0
6.5				0.0880	0.2000	0.0400			6.5
7.0									7.0
7.5									7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	5.00	0.220	6.50	0.088					M_1SB
M_TEC	6.25	0.020	6.75	0.033	6.75	0.024	5.75	0.009	M_TEC
M_KIJ	4.51	0.580	6.01	0.155	6.51	0.039	5.01	0.058	M_KIJ

	SZ22		SZ23		SZ24		SZ25		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0	54.8400	37.9800							2.0
2.5	0.0100	15.1200					63.6100	86.6800	2.5
3.0	10.8900	6.0200					45.1600	42.4300	3.0
3.5	0.6600	2.4000			32.2500	36.3300	29.0300	21.7600	3.5
4.0	1.9900	0.9500	50.9800	46.7400	15.6800	11.7500	11.7600	11.4300	4.0
4.5	0.6600	0.6300	15.6800	16.5800	2.9700	3.8000	7.9200	5.5900	4.5
5.0		0.1400	3.3100	5.9600	1.3200	1.2300	1.3000	2.9400	5.0
5.5		0.0900	2.6500	2.0400	0.0100	0.4000	0.9900	1.4400	5.5
6.0		0.0400	1.4900	0.7200	0.3300	0.1900	0.3300	0.7500	6.0
6.5			0.0000	0.2600		0.0700	0.0100	0.3700	6.5
7.0			0.2000	0.1400		0.0240	0.3900	0.1900	7.0
7.5				0.0500		0.0060	0.2000	0.2000	7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	5.00	0.14	7.50	0.05	6.50	0.07	8.00	0.99	M_1SB
M_TEC	6.25	0.03	7.75	0.03	7.75	0.04	7.75	0.14	M_TEC
M_KIJ	4.52	0.60	7.01	0.13	6.02	0.18			M_KIJ

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

	SZ26		SZ27		SZ28		SZ29		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0	872.7300	1247.4100	271.4300	250.8800	871.4200	954.3000	2076.1900	2586.8800	2.0
2.5	661.9000	492.3300	64.5200	78.3200	390.9100	338.6000	1263.6400	1053.8400	2.5
3.0	252.3800	184.5100	25.4900	23.6500	114.2900	120.1400	483.8700	422.4400	3.0
3.5	58.0600	71.7800	5.9400	7.0700	54.8400	42.6300	200.0000	178.9700	3.5
4.0	25.4900	28.3300	3.3100	2.2100	9.9000	15.1200	54.5500	72.9100	4.0
4.5	2.9700	10.6200	0.6600	0.6600	2.6500	5.3700	11.8800	29.2300	4.5
5.0	0.3300	4.1900	0.2000	0.2100	1.9800	1.9000	8.9100	12.3800	5.0
5.5	0.0000	1.5700	0.2000	0.0900	0.0000	0.6800	3.9600	5.0400	5.5
6.0	0.2000	0.6100		0.0520	0.3300	0.2400	1.5000	2.0200	6.0
6.5	0.0000	0.2400		0.0079	0.2000	0.1300	0.6600	0.8600	6.5
7.0	0.2000	0.1500					0.8000	0.3400	7.0
7.5							0.6600	0.2500	7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	7.50	0.06	6.00	0.052	7.00	0.050	8.00	0.185	M_1SB
M_TEC	7.25	0.10	6.75	0.004	6.75	0.083	7.75	0.154	M_TEC
M_KIJ	7.07	0.13	5.51	0.085	6.51	0.125			M_KIJ

	SZ30		SZ31		SZ32		SZ33		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0	600.0000	679.6100	718.1800	632.2400			133.3300	170.9900	2.0
2.5	271.4500	254.6900	223.8100	280.8500			77.4200	76.3800	2.5
3.0	138.7100	99.0900	95.2400	117.7300			61.2900	34.1200	3.0
3.5	25.8000	39.1100	74.1900	51.3900			9.9000	15.5200	3.5
4.0	15.6800	14.6600	27.4500	22.8300	51.6100	62.4800	5.9400	6.6500	4.0
4.5	0.0000	5.7000	8.9100	9.5700	38.7100	26.0500	1.4900	2.9700	4.5
5.0	2.6500	2.2500	2.6500	4.1800	7.9200	10.8600	0.0100	1.3300	5.0
5.5	1.3200	0.8400	0.6600	1.8200	2.6500	4.5300	0.6600	0.6000	5.5
6.0	0.3300	0.3300	0.2000	0.8100	2.6500	1.8900	0.6600	0.4700	6.0
6.5	0.0100	0.1300	0.6600	0.3400	0.0000	0.7900		0.1900	6.5
7.0	0.2000	0.0800	0.2000	0.1500	0.6600	0.3300		0.0950	7.0
7.5			0.2000	0.0700	0.2000	0.1400		0.0410	7.5
8.0			0.2000	0.0500	0.2000	0.1000			8.0
8.5									8.5

M_1SB	7.50	0.04			8.500	0.03	6.500	0.19	M_1SB
M_TEC	7.25	0.07	8.25	0.03	8.250	0.06	7.750	0.03	M_TEC
M_KIJ	7.02	0.08			8.020	0.10	6.020	0.46	M_KIJ

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

	SZ34		SZ35		SZ36		SZ37		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0							163.6400	147.1500	2.0
2.5	157.1400	152.3300					61.2900	72.0700	2.5
3.0	70.9700	63.0300			57.1400	60.9200	41.1700	35.3000	3.0
3.5	21.5700	24.7000	19.3400	27.3000	32.2500	27.8400	12.8700	17.2900	3.5
4.0	5.9400	10.0600	16.1200	12.7700	11.7600	12.7300	9.9000	8.4700	4.0
4.5	2.6500	4.1600	7.8000	6.0900	5.8000	5.8200	1.3200	4.1500	4.5
5.0	1.6600	1.6300	2.9700	2.7300	1.9800	2.6600	2.9900	2.0300	5.0
5.5	1.4900	0.6600	0.4900	1.2800	0.9900	1.2200	1.3300	0.9900	5.5
6.0	0.6600	0.2700	0.6600	0.6000	0.0000	0.5400	1.0000	0.4900	6.0
6.5	0.0000	0.1100	0.2000	0.2800	0.7500	0.2600	0.2500	0.2400	6.5
7.0	0.2000	0.0400	0.2000	0.2400	0.4000	0.2200	0.0000	0.1200	7.0
7.5	0.2000	0.0300		0.0850			0.2000	0.1100	7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	8.00	0.048	7.50	0.085	7.50	0.178	8.00	0.056	M_1SB
M_TEC	7.75	0.019	7.75	0.075	7.25	0.145	7.75	0.083	M_TEC
M_KIJ	7.53	0.027	7.02	0.230	7.02	0.200	7.61	0.100	M_KIJ

	SZ38		SZ39		SZ40		SZ41		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0							109.0900	111.0600	2.0
2.5			195.2400	238.9400			57.1400	59.6400	2.5
3.0	8.9100	9.3800	138.1000	88.7700	7.9200	4.9300	32.2600	32.0300	3.0
3.5	3.3100	2.7100	19.3500	32.5300	1.4900	2.2000	22.5800	17.2000	3.5
4.0	0.6600	0.7800	7.8000	12.5400	0.0000	0.9800	5.8800	9.2400	4.0
4.5	0.0000	0.2300	2.9700	4.6600	0.6600	0.4400	5.9600	4.9600	4.5
5.0	0.2000	0.0900	3.3100	1.7300	0.0100	0.2000	3.3100	2.6600	5.0
5.5		0.0390	0.0000	0.6300	0.2000	0.0900	1.4900	1.4300	5.5
6.0		0.0070	0.6600	0.2400	0.2000	0.0700	0.3300	0.7700	6.0
6.5		0.0020	0.2500	0.0900		0.0420	0.0000	0.4100	6.5
7.0		0.0005	0.0100	0.0300			0.5000	0.2200	7.0
7.5			0.2000	0.0200			0.2000	0.2600	7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB			8.00	0.040	6.50	0.042	8.00	0.118	M_1SB
M_TEC	7.25	0.0006	8.00	0.008	6.75	0.021	7.75	0.180	M_TEC
M_KIJ	5.02	0.085	7.53	0.018	6.03	0.068			M_KIJ

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

	SZ42		SZ43		SZ44				
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE			MAG
2.0	31.3700	46.6100							2.0
2.5	27.4500	19.5400							2.5
3.0	9.9000	8.5300	527.2700	575.8400	472.7300	382.1700			3.0
3.5	3.3100	3.7200	223.8100	192.7900	77.4200	145.3000			3.5
4.0	1.4900	1.6300	67.7400	67.6600	7.9200	55.2400			4.0
4.5	0.6600	0.7100	21.5700	22.6500	3.3100	21.3000			4.5
5.0	0.0000	0.3100	6.9300	7.9500	0.6600	7.8000			5.0
5.5	0.0000	0.1400	2.6500	2.6600	0.0100	2.9700			5.5
6.0	0.2000	0.1000	0.0100	0.9300	0.0100	1.1400			6.0
6.5		0.0390	0.2000	0.3100	0.2000	0.6800			6.5
7.0		0.0200	0.2000	0.1100		0.0220			7.0
7.5		0.0070	0.2000	0.0600					7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB									M_1SB
M_TEC	7.75	0.005	7.75	0.030	7.25	0.014			M_TEC
M_KIJ	6.02	0.095	7.51	0.054	6.56	0.061			M_KIJ

	BK01		BK02		BK03				
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE			MAG
2.0	242.8600	692.1600							2.0
2.5	152.3800	221.4800	1600.0000	2537.3000	772.7300	776.4000			2.5
3.0	85.7100	73.3400	590.9100	642.2100	372.7300	213.8400			3.0
3.5	48.3900	24.2900	327.2700	156.4500	67.7400	58.9000			3.5
4.0	15.6800	8.1300	138.1000	39.3000	31.3700	16.0800			4.0
4.5	2.9700	2.6000	8.9100	9.8700	1.4900	4.5700			4.5
5.0	0.6600	1.2900	1.0000	2.4800	0.6600	1.2600			5.0
5.5			0.6600	0.8300	0.6600	0.4800			5.5
6.0									6.0
6.5									6.5
7.0									7.0
7.5									7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB									M_1SB
M_TEC									M_TEC
M_KIJ									M_KIJ

Tabla 3- Frecuencias individuales (IND_RATE) y acumulativas (GRI_RATE) por zona sismogeneradora para el modelo ZONA-C (este trabajo). Se incluyen además las determinaciones de la magnitud máxima y su frecuencias [M_1SB: método "one step beyond", M_TEC: origen tectónico y M_KIJ: método de Kijko y Graham (1999)].

MAG	SZ01		SZ02		SZ03		SZ04		MAG
	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	
2.0	38.7100	35.1600			14.2800	37.1300			2.0
2.5	9.6700	13.6800	15.6900	17.9000	7.8400	13.1700	29.0400	35.0800	2.5
3.0	6.9300	5.3200	5.9400	8.0000	9.9000	4.6700	15.6800	12.1600	3.0
3.5	2.4800	2.0700	6.6200	3.5100	3.3100	1.6600	4.9500	4.1700	3.5
4.0	0.9900	1.3200	1.4900	1.6300	0.4900	0.9100	1.3200	2.2900	4.0
4.5		0.4400	0.6600	0.7300		0.3000		0.4160	4.5
5.0		0.1800	0.0000	0.3200		0.1000		0.1300	5.0
5.5		0.0750	0.0000	0.1500		0.0370		0.0410	5.5
6.0		0.0280	0.2000	0.1200		0.0120		0.0130	6.0
6.5		0.0110		0.0530		0.0040		0.0370	6.5
7.0		0.0040		0.0250		0.0015		0.0120	7.0
7.5									7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	4.50	0.440	6.50	0.053	4.50	0.309	4.50	0.416	M_1SB
M_TEC	7.15	0.003	7.10	0.020	7.05	0.001	7.05	0.001	M_TEC
M_KIJ			6.05	0.110					M_KIJ

MAG	SZ05		SZ06		SZ07		SZ08		MAG
	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	
2.0	28.5700	36.1800	45.9400	70.1700	58.0600	43.2500	76.1900	162.2900	2.0
2.5	19.0400	15.1700	33.3300	32.8200	1.9800	16.8300	21.5700	54.3400	2.5
3.0	6.4500	6.6200	27.1500	15.3500	12.8700	6.4500	39.2200	19.0700	3.0
3.5	3.9200	2.8900	5.3000	7.1800	0.2000	2.6100	9.6100	6.3800	3.5
4.0	0.9900	1.2800	4.9500	3.3600	1.4900	1.0100	3.3100	2.2100	4.0
4.5	0.0000	0.5400	0.6600	1.5700	0.9900	0.6500	0.4900	0.7800	4.5
5.0	0.4900	0.4200	0.0000	0.7300		0.2400	0.3300	0.4000	5.0
5.5		0.1900	0.2000	0.6500		0.0900		0.1400	5.5
6.0		0.0750		0.3000		0.0370		0.0470	6.0
6.5		0.0330		0.1500		0.0140		0.0160	6.5
7.0								0.0058	7.0
7.5									7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	5.50	0.189	6.00	0.300	5.00	0.240	5.50	0.144	M_1SB
M_TEC	6.85	0.019	6.95	0.072	6.75	0.009	7.05	0.005	M_TEC
M_KIJ	5.02	0.038	5.53	0.063	4.51	0.630	5.03	0.360	M_KIJ

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

	SZ09		SZ10		SZ11		SZ12		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0	64.5200	71.2500	80.6500	68.4100	70.9700	64.3100	304.7600	346.9000	2.0
2.5	27.4500	29.4800	6.9300	24.0100	23.5300	23.5600	132.2600	112.2600	2.5
3.0	17.6500	11.5600	17.6500	8.0400	5.9400	9.0800	51.0000	36.3300	3.0
3.5	4.9500	4.7100	1.9800	2.8200	3.3100	3.3300	5.9400	11.7500	3.5
4.0	0.0000	1.9200	0.0000	0.9400	1.0000	1.2800	3.3100	3.8000	4.0
4.5	0.9900	0.7800	0.6600	0.5000	0.2000	0.4700	0.0000	1.2300	4.5
5.0	0.0000	0.3200		0.1650	0.6600	0.1800	0.4000	0.5900	5.0
5.5	0.0000	0.1300		0.0580	0.3300	0.1100		0.1770	5.5
6.0	0.3300	0.0900		0.0200		0.0450		0.0560	6.0
6.5		0.0400		0.0070		0.0130		0.0170	6.5
7.0						0.0048		0.0050	7.0
7.5									7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	6.50	0.040	5.00	0.165	6.00	0.045	5.50	0.177	M_1SB
M_TEC	7.00	0.015	6.95	0.002	7.10	0.004	7.25	0.004	M_TEC
M_KIJ	6.04	0.079	4.51	0.460	5.57	0.080	5.01	0.540	M_KIJ

	SZ13		SZ14		SZ15		SZ16		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0	619.000	790.890	57.140	64.980					2.0
2.5	345.450	231.130	31.370	26.470					2.5
3.0	74.190	70.490	6.930	10.780					3.0
3.5	5.940	20.600	7.920	4.390			23.530	23.350	3.5
4.0	3.310	6.280	2.000	1.790	58.060	44.260	9.900	8.680	4.0
4.5	0.660	1.840	0.000	0.730	8.910	17.220	2.650	3.270	4.5
5.0	0.490	0.550	0.200	0.500	3.310	6.800	0.990	1.170	5.0
5.5	0.660	0.240		0.190	5.940	2.550	0.000	0.430	5.5
6.0		0.070		0.080	1.490	0.990	0.660	0.260	6.0
6.5		0.021		0.030	0.000	0.390		0.090	6.5
7.0		0.007			0.200	0.250		0.030	7.0
7.5						0.089			7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	6.00	0.070	5.50	0.195	7.50	0.089	6.50	0.095	M_1SB
M_TEC	7.25	0.003	7.00	0.014	7.75	0.056	7.40	0.015	M_TEC
M_KIJ	5.52	0.220	5.02	0.470	7.02	0.240	6.03	0.230	M_KIJ

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

	SZ17		SZ18		SZ19		SZ20		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0					2309.0900	2188.8100	5181.8200	5349.1000	2.0
2.5	54.5500	62.6400	833.3300	1008.9200	636.3600	700.3900	2054.5500	2014.1200	2.5
3.0	32.2500	33.7000	427.2700	301.6200	218.1800	234.5400	777.4200	721.5700	3.0
3.5	25.8000	17.2800	80.6500	94.1600	64.5200	75.8900	280.6500	271.7000	3.5
4.0	9.8000	8.6500	27.4500	28.1500	51.6100	24.5600	90.3200	97.3400	4.0
4.5	2.6500	4.6500	3.9200	8.7900	3.2200	7.8600	15.6900	36.6500	4.5
5.0	0.6600	2.3900	0.0000	2.6300	1.9800	2.6300	12.8700	13.1300	5.0
5.5	1.3200	1.2200	0.0000	0.8200	0.6600	0.8500	4.9500	4.9400	5.5
6.0	0.0000	0.6100	0.9900	0.2500	0.0000	0.2700	1.7500	1.7700	6.0
6.5	0.0000	0.3300	0.0000	0.0800	0.3300	0.1300	0.6600	0.6700	6.5
7.0	0.4900	0.1700	0.2000	0.0300		0.0400	1.3200	0.2400	7.0
7.5	0.6600	0.1800					0.6600	0.1400	7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	8.00	0.10			7.00	0.04	8.00	0.05	M_1SB
M_TEC	7.60	0.17	7.10	0.03	7.25	0.03	7.55	0.13	M_TEC
M_KIJ	7.58	0.16	7.13	0.03	6.54	0.12	7.55	0.13	M_KIJ

	SZ21		SZ22		SZ23		SZ24		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0	654.5500	636.9200	754.5500	688.5500					2.0
2.5	233.3300	228.1800	219.0500	337.0200	72.7200	82.7500			2.5
3.0	77.4200	85.9200	161.9000	176.9900	57.1400	40.5300	363.6400	142.1600	3.0
3.5	23.5300	31.2000	133.3300	86.6300	19.6000	19.8500	141.9300	57.9100	3.5
4.0	21.5700	11.3300	77.4200	44.4300	5.8800	9.7200	27.4500	23.5900	4.0
4.5	2.9700	4.1100	12.8700	23.3300	1.9600	4.7600	3.9200	9.6100	4.5
5.0	0.0000	1.4900	8.9100	11.4200	2.9900	2.3300	0.9900	3.9200	5.0
5.5	0.6600	0.5400	1.4900	6.0000	1.0000	1.1400	1.4900	1.6000	5.5
6.0	0.3300	0.2000	2.6500	2.9400	0.7500	0.5600	0.3300	0.6500	6.0
6.5	0.2000	0.1100	0.2000	1.5400	0.2000	0.2700	0.2000	0.2600	6.5
7.0			0.6600	0.7500	0.6600	0.1300	0.0000	0.1100	7.0
7.5			0.2000	0.3900	0.2000	0.1300	0.2000	0.0800	7.5
8.0			0.2000	0.4100					8.0
8.5									8.5

M_1SB	7.00	0.040	8.50	0.190	8.00	0.063			M_1SB
M_TEC	7.00	0.040	8.30	0.275	7.68	0.100	7.63	0.057	M_TEC
M_KIJ	6.56	0.090	8.04	0.380	7.54	0.120	7.54	0.060	M_KIJ

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

	SZ25		SZ26		SZ27		SZ29		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0	200.0000	321.4700					145.0000	125.2100	2.0
2.5	171.4300	153.8700			252.3800	130.9600	61.9000	65.7600	2.5
3.0	119.0500	73.6500	76.1900	58.6100	180.9500	62.6800	25.8000	32.1800	3.0
3.5	48.3900	35.2500	25.4900	30.0400	22.5800	30.0000	19.3500	16.9000	3.5
4.0	6.9300	16.8700	15.6800	14.7100	5.8800	14.0500	5.8800	8.2700	4.0
4.5	3.3100	8.0800	3.9200	7.2100	2.9700	7.0300	4.9500	4.3400	4.5
5.0	1.9900	3.8600	2.6500	3.4500	3.3100	3.3700	3.3100	2.1300	5.0
5.5	1.4900	1.8500	0.9900	1.7700	0.0000	1.6100	1.0000	1.1200	5.5
6.0	0.6600	0.9000	0.6600	0.8700	1.4900	0.7700	0.3300	0.5500	6.0
6.5	0.0000	0.4100	1.9900	0.4200	0.3300	0.3700	0.0000	0.2800	6.5
7.0	0.6600	0.3800	0.0000	0.2100	0.2000	0.1800	0.5000	0.1500	7.0
7.5		0.1800	0.3900	0.2000	0.2000	0.1600	0.2000	0.1500	7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	7.50	0.18	8.00	0.10	8.00	0.08	8.00	0.08	M_1SB
M_TEC	7.90	0.10	7.80	0.13	7.72	0.11	7.63	0.13	M_TEC
M_KIJ	7.03	0.36	7.54	0.17	7.57	0.14	7.54	0.14	M_KIJ

	SZ30		BK01		BK02		BK03		
MAG	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	IND_RATE	GRI_RATE	MAG
2.0									2.0
2.5			409.0900	499.0200	845.4500	769.1500	836.3600	705.4600	2.5
3.0	472.7300	731.2800	190.9100	145.8300	345.4500	303.5700	500.0000	306.0300	3.0
3.5	427.2700	265.5100	58.0600	44.4700	104.7600	113.7700	106.4500	125.4500	3.5
4.0	90.4800	95.1200	6.9300	13.0000	70.9700	44.2600	61.2900	53.5100	4.0
4.5	38.7100	35.8200	1.4900	3.9600	5.9400	17.4700	0.6600	23.2100	4.5
5.0	5.8800	12.8300	0.0000	1.1600	0.0000	6.5500	1.4900	9.5200	5.0
5.5	1.9800	4.8300	0.2000	0.5000	0.6600	4.1700	0.6600	7.0800	5.5
6.0	0.2000	1.7500							6.0
6.5	0.0000	0.6300							6.5
7.0	0.2000	0.2400							7.0
7.5	0.2000	0.1300							7.5
8.0									8.0
8.5									8.5

M_1SB	8.00	0.05							M_1SB
M_TEC	7.75	0.08							M_TEC
M_KIJ	7.51	0.12							M_KIJ

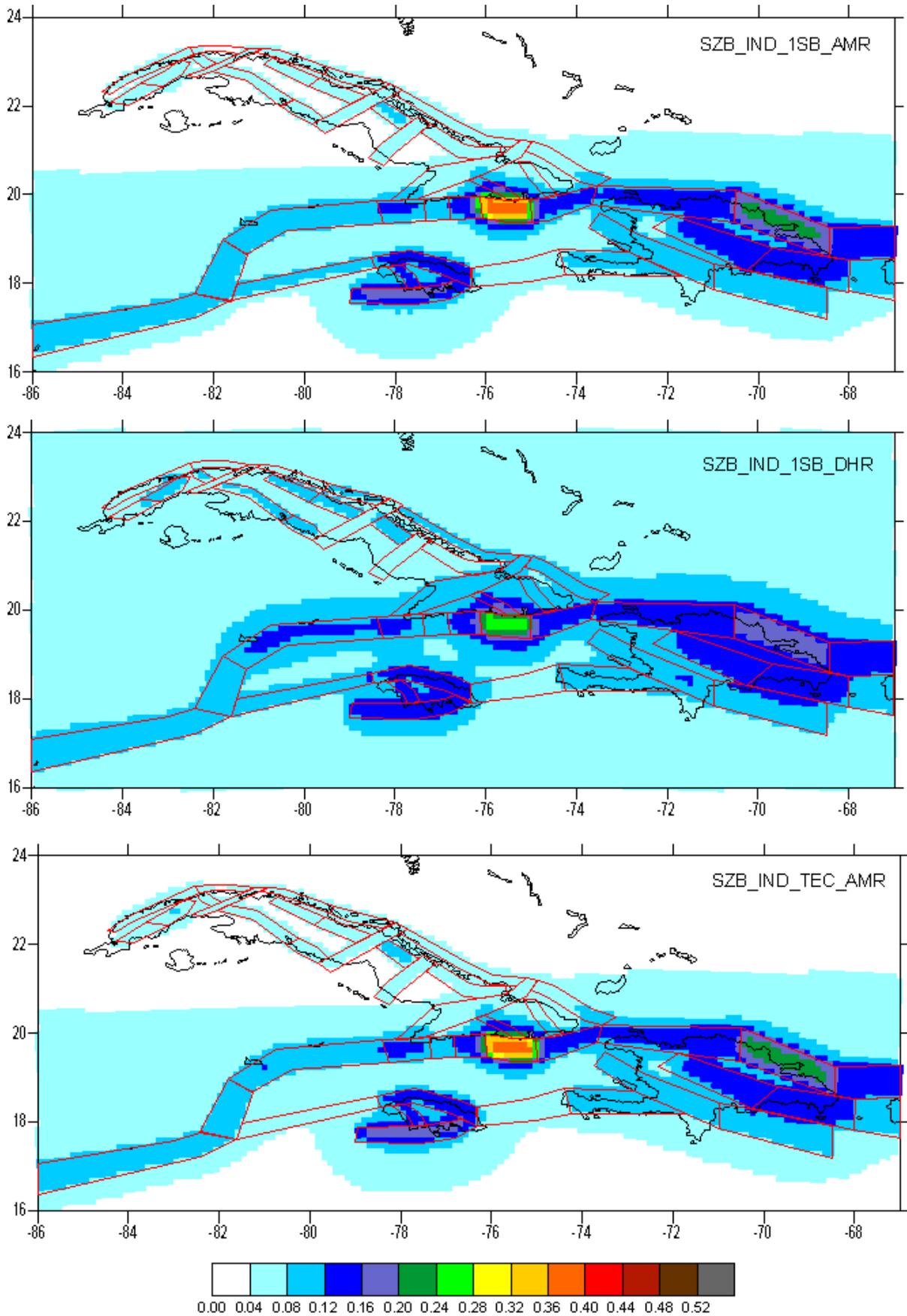
Anexo 4

Mapas de peligrosidad sísmica para cada rama del árbol lógico en el caso del método zonificado

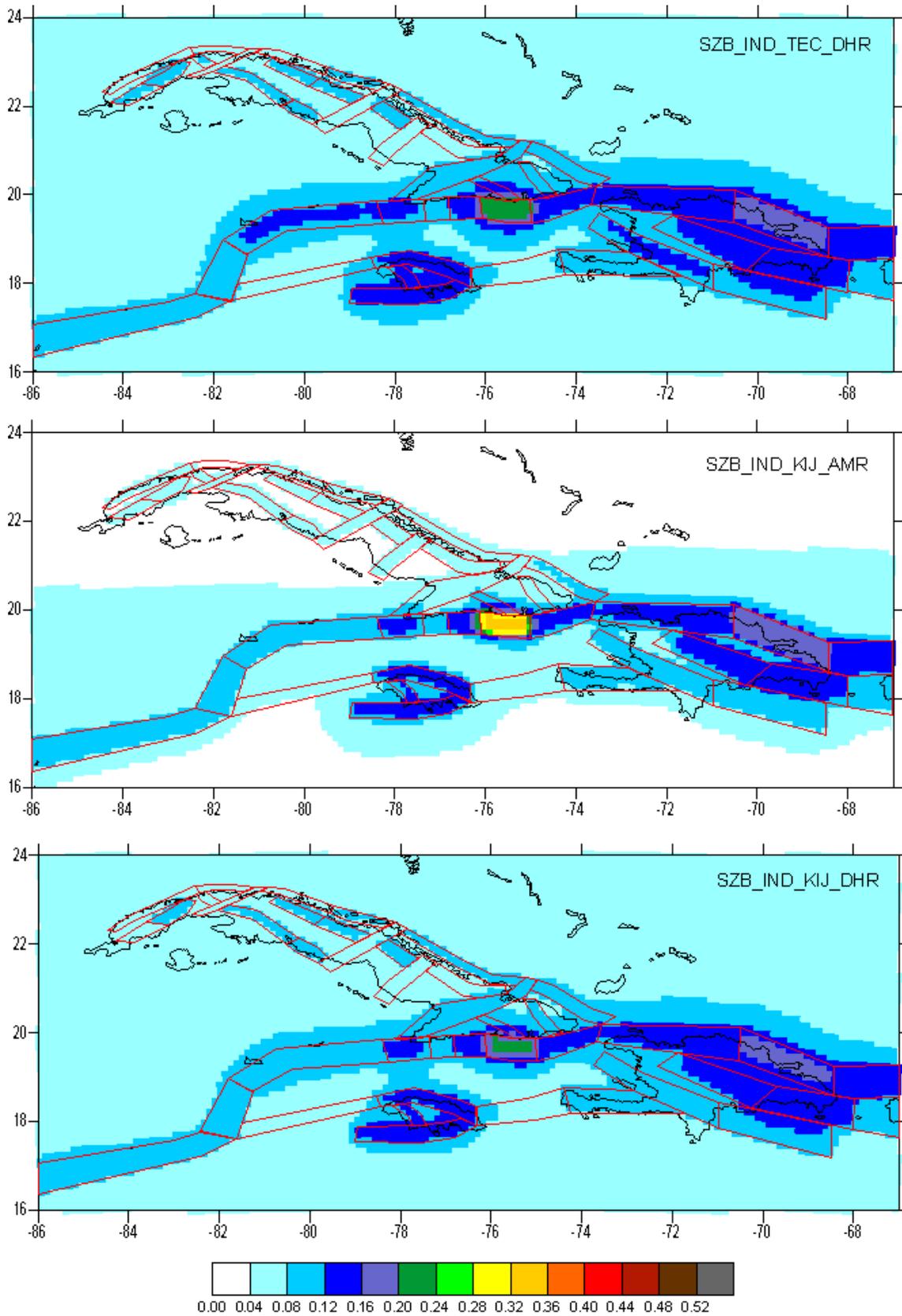
Fig.1. Mapas de PGA en unidades de g para un período de retorno de 475 años sin considerar la desviación estándar de las leyes de atenuación (caso de roca). El código que aparece sobre los mapas representa la opción tomada en cada nodo del árbol lógico (figura 1.10).

- Nodo N5 – modelo de zonas sismogeneradoras (SZA: ZONA-A, SZB: ZONA-B y SZC: ZONA-C)
- Nodo N6 – parámetros del régimen sísmico (IND: frecuencias individuales, GRI: ajuste utilizando la relación Gutenberg – Richter)
- Nodo N7 – estimación de la Mmax [ISB: “one step beyond”, TEC: origen tectónico, KIJ: (Kijko y Graham, 1998)]
- Nodo N8 – modelos de atenuación [AMR: (Ambraseis, 1996) y DHR: (Dhale, 1995)]

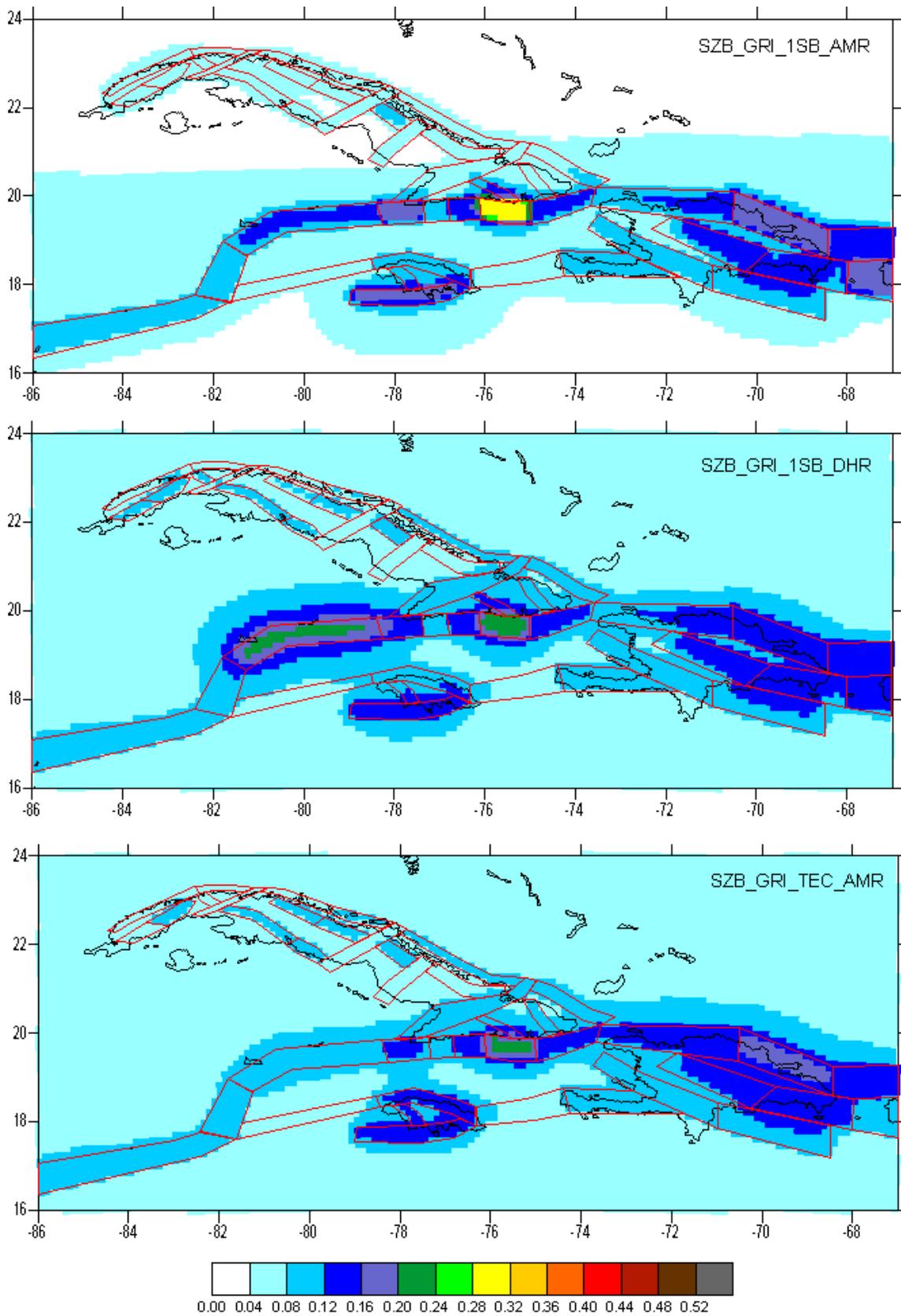
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



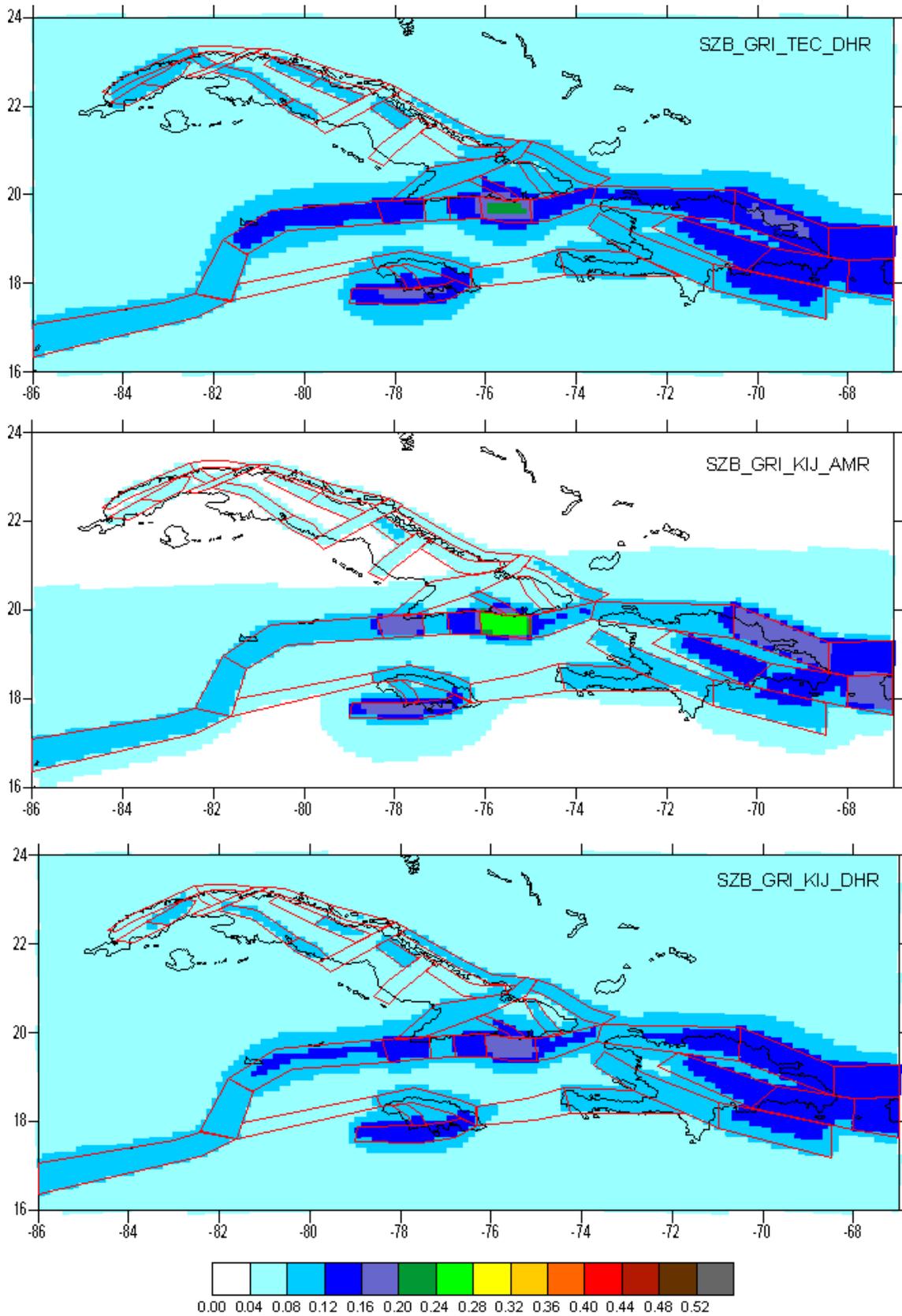
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



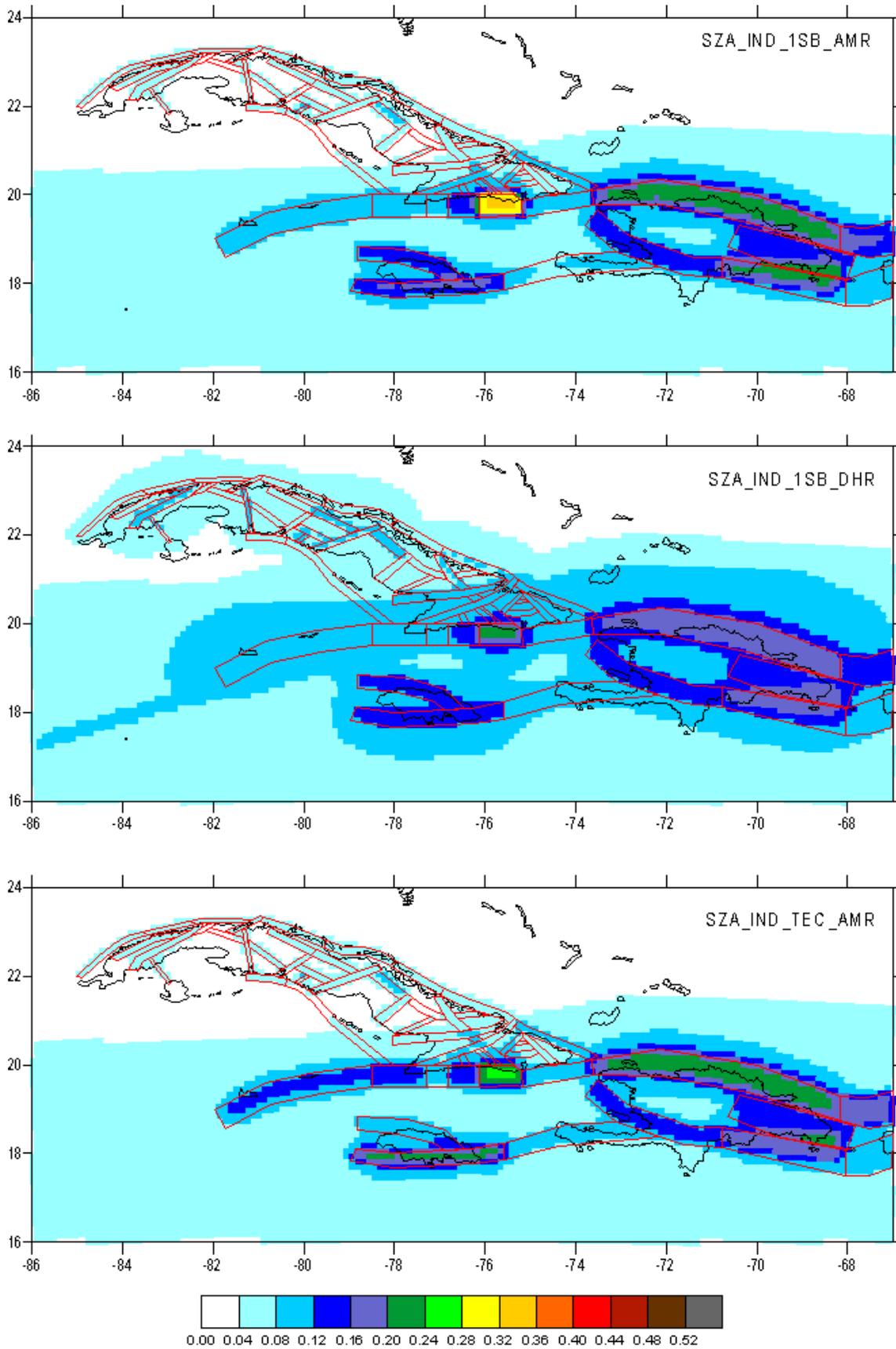
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



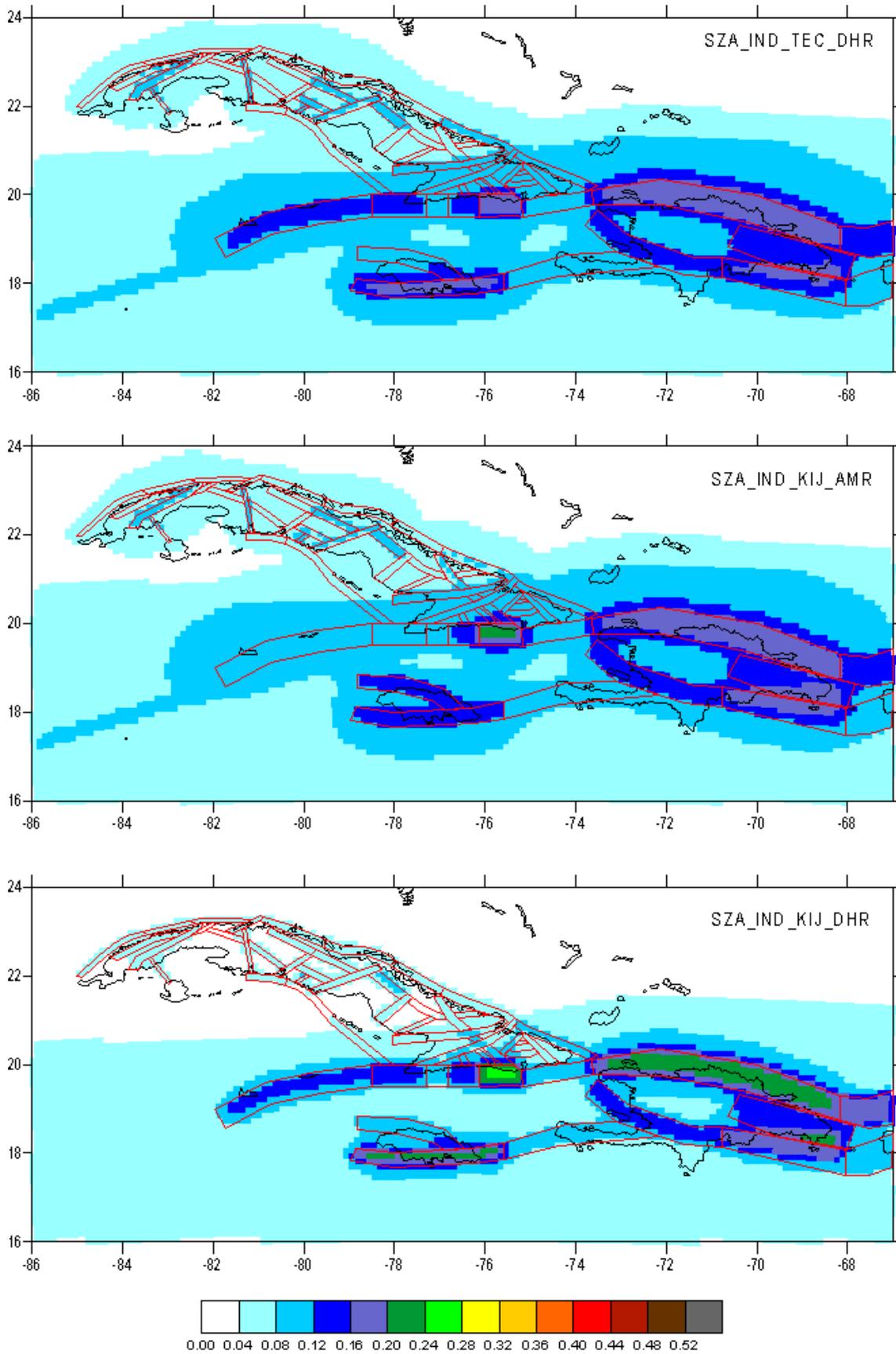
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



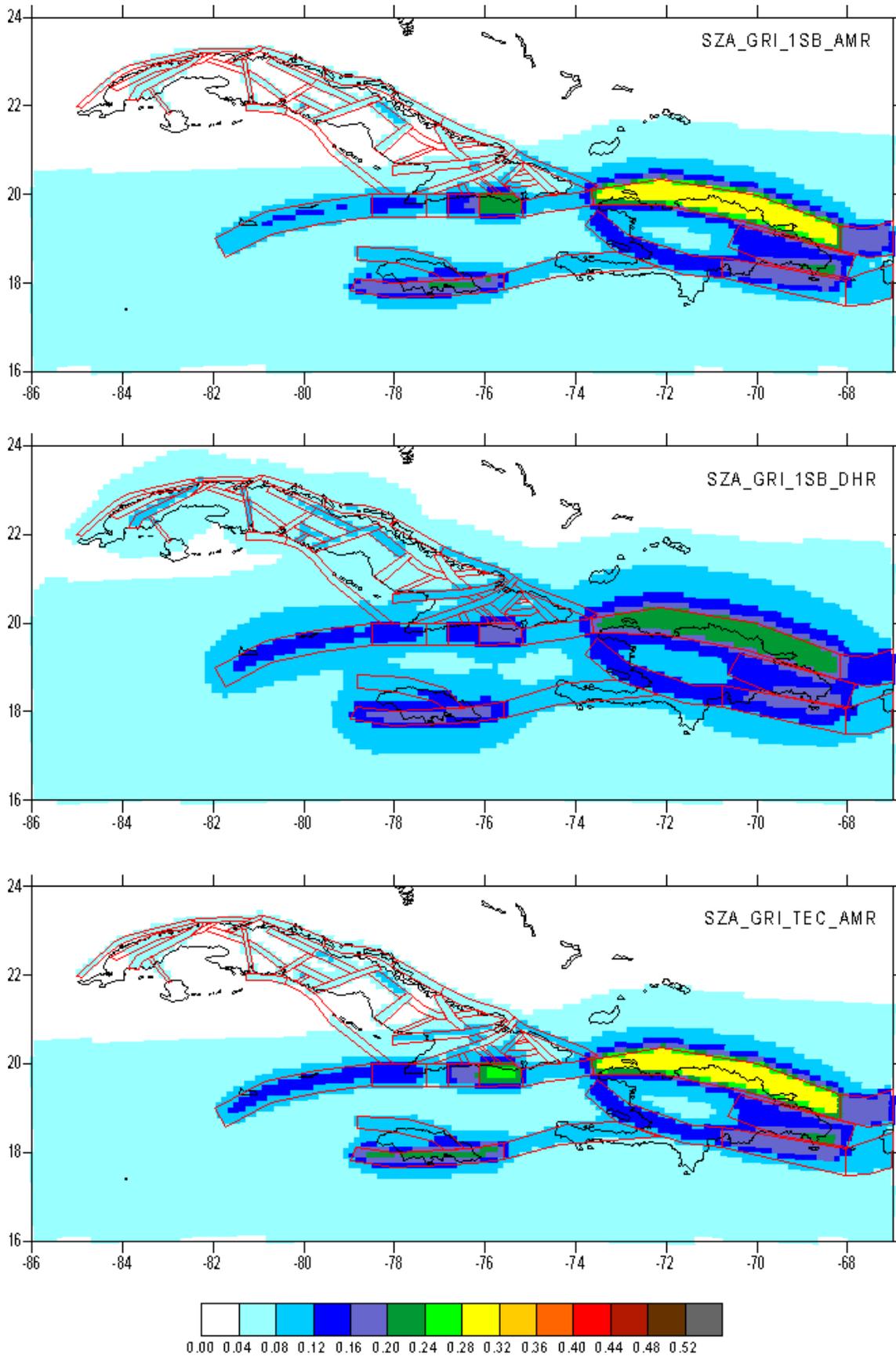
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



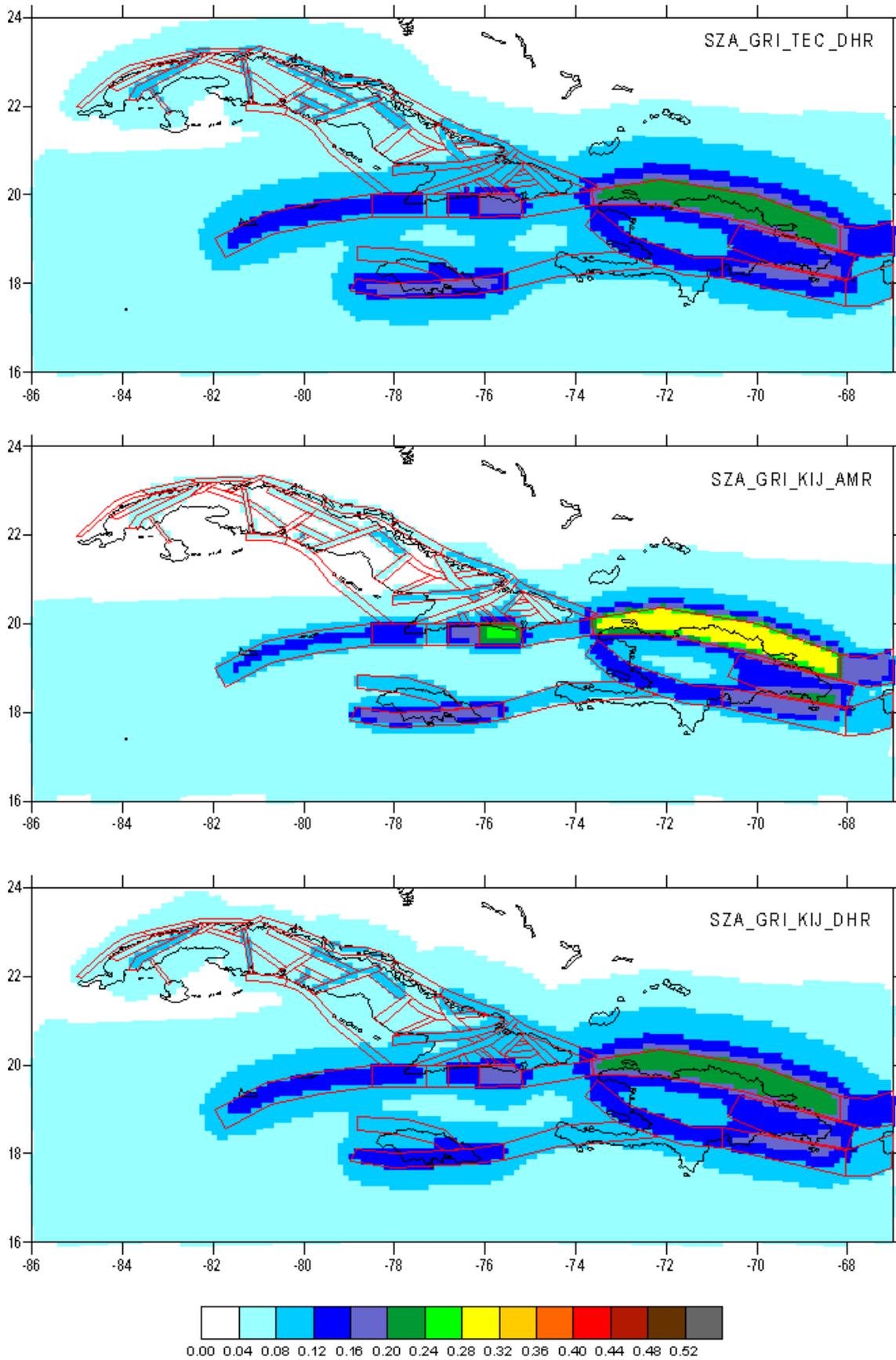
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



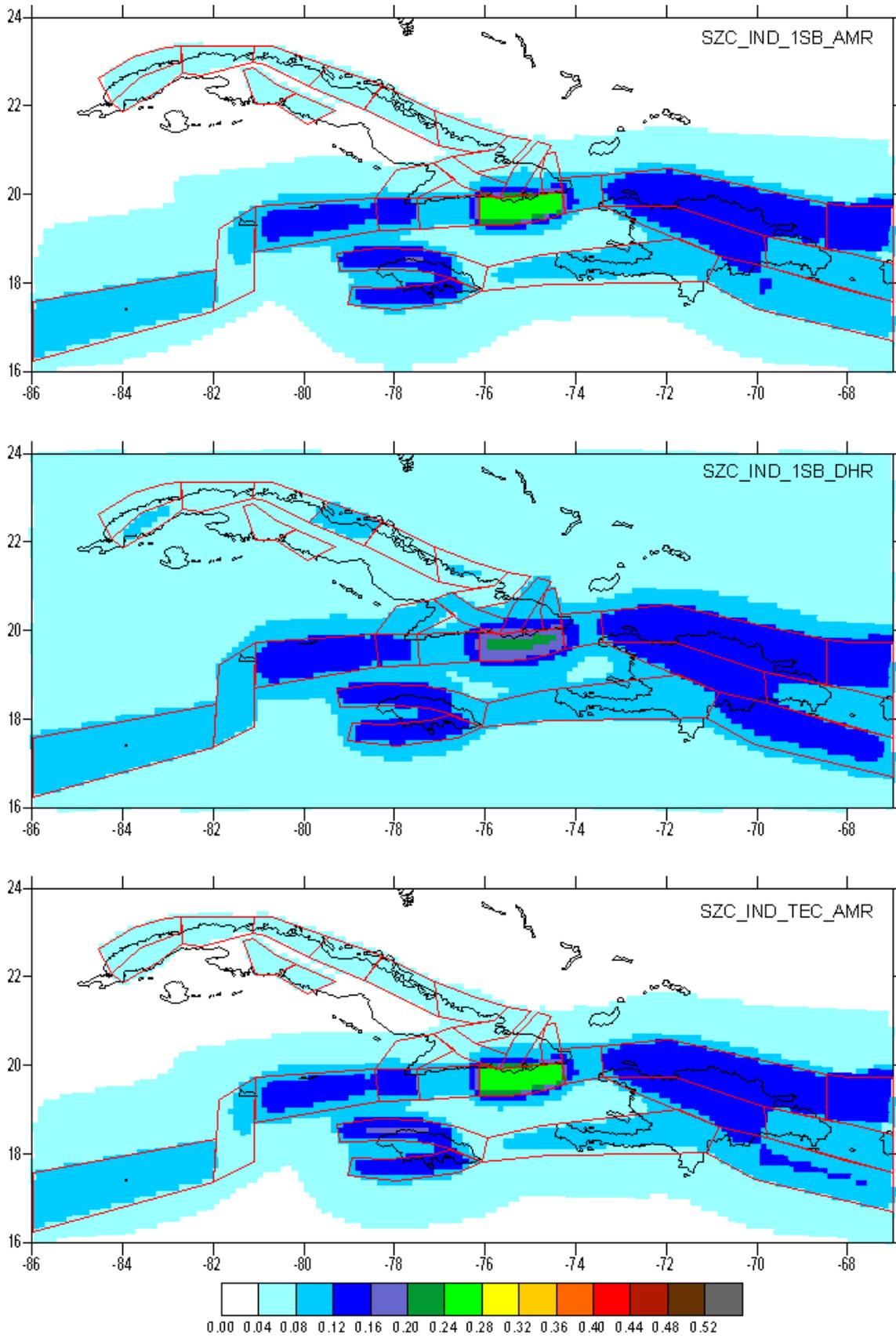
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



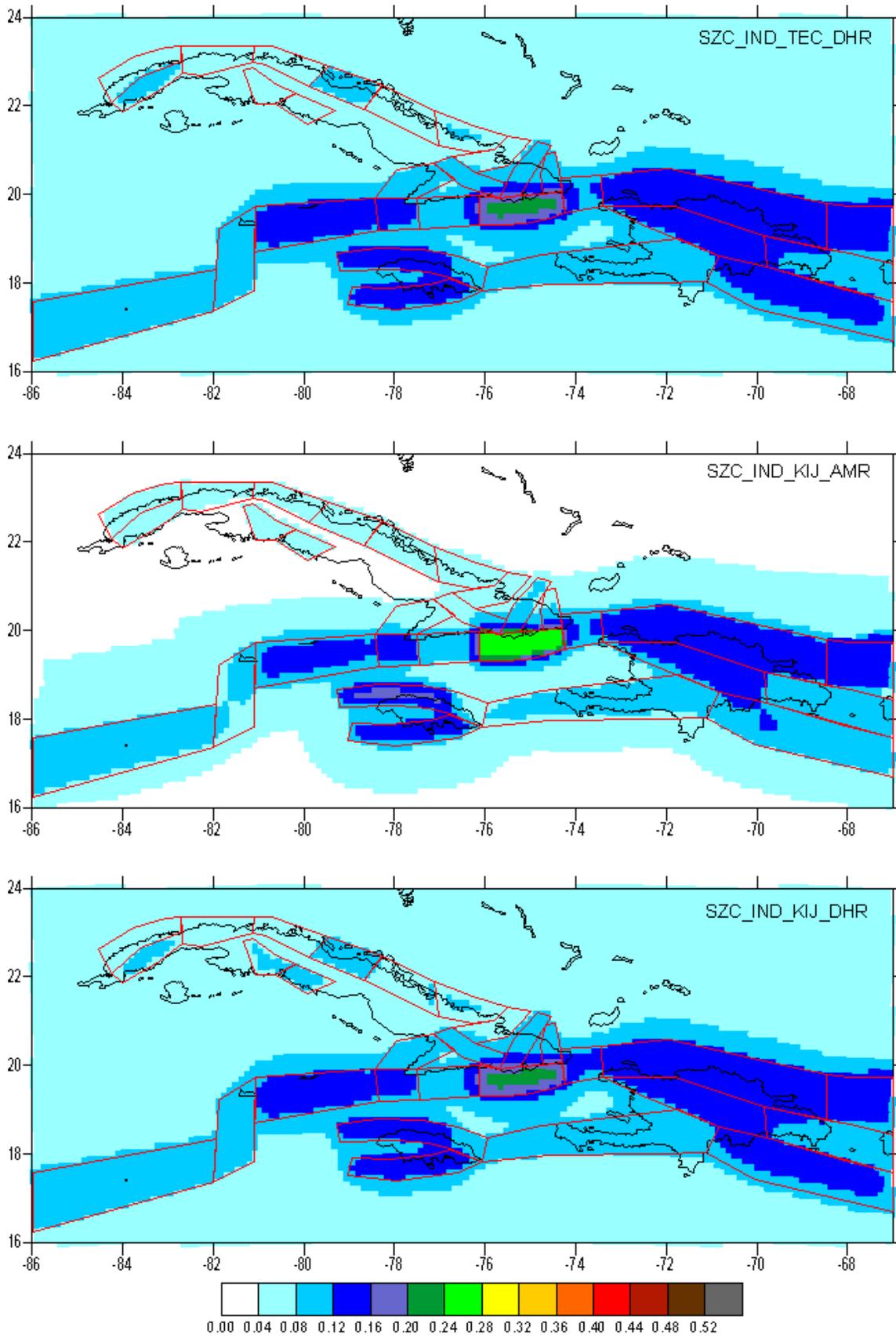
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



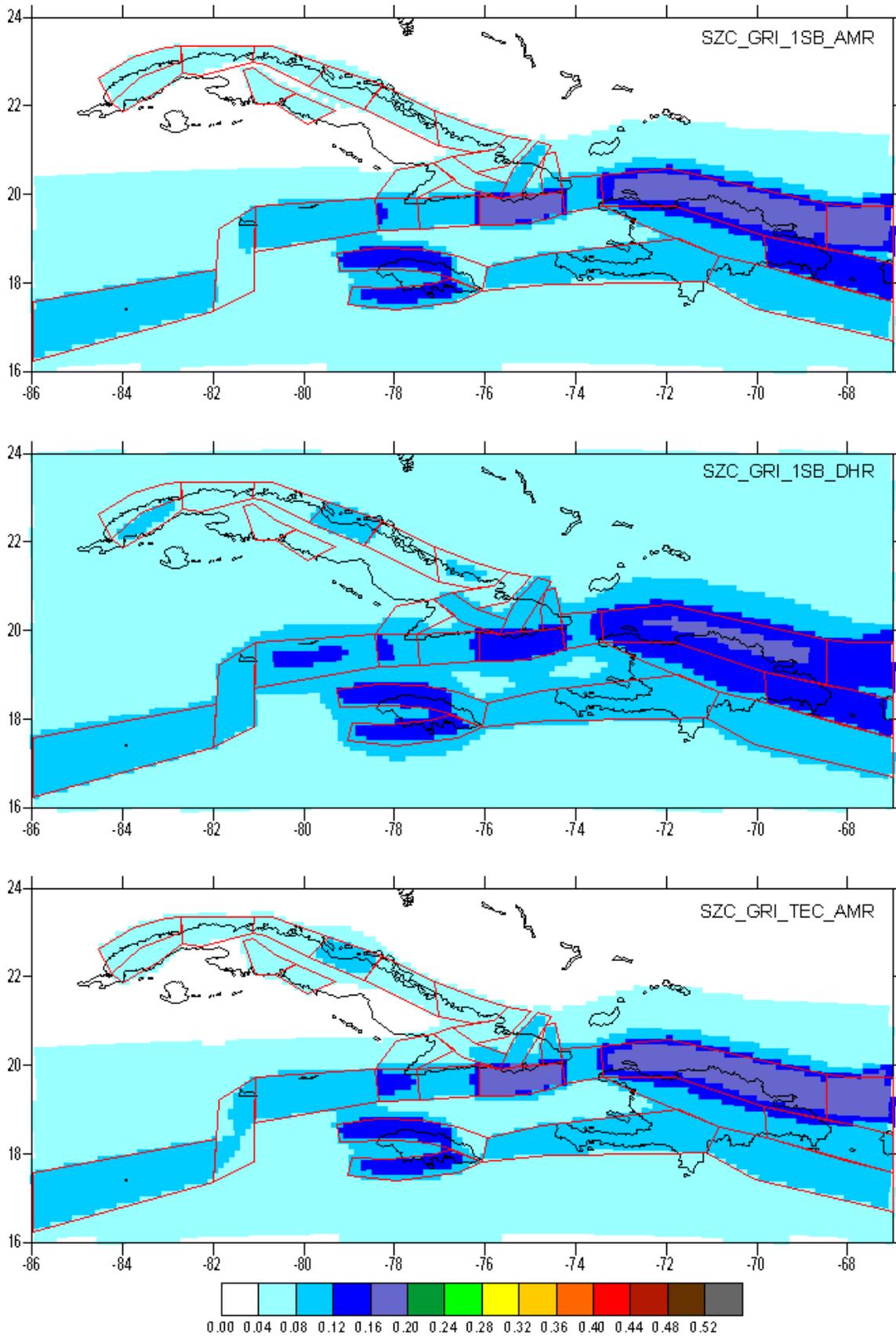
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

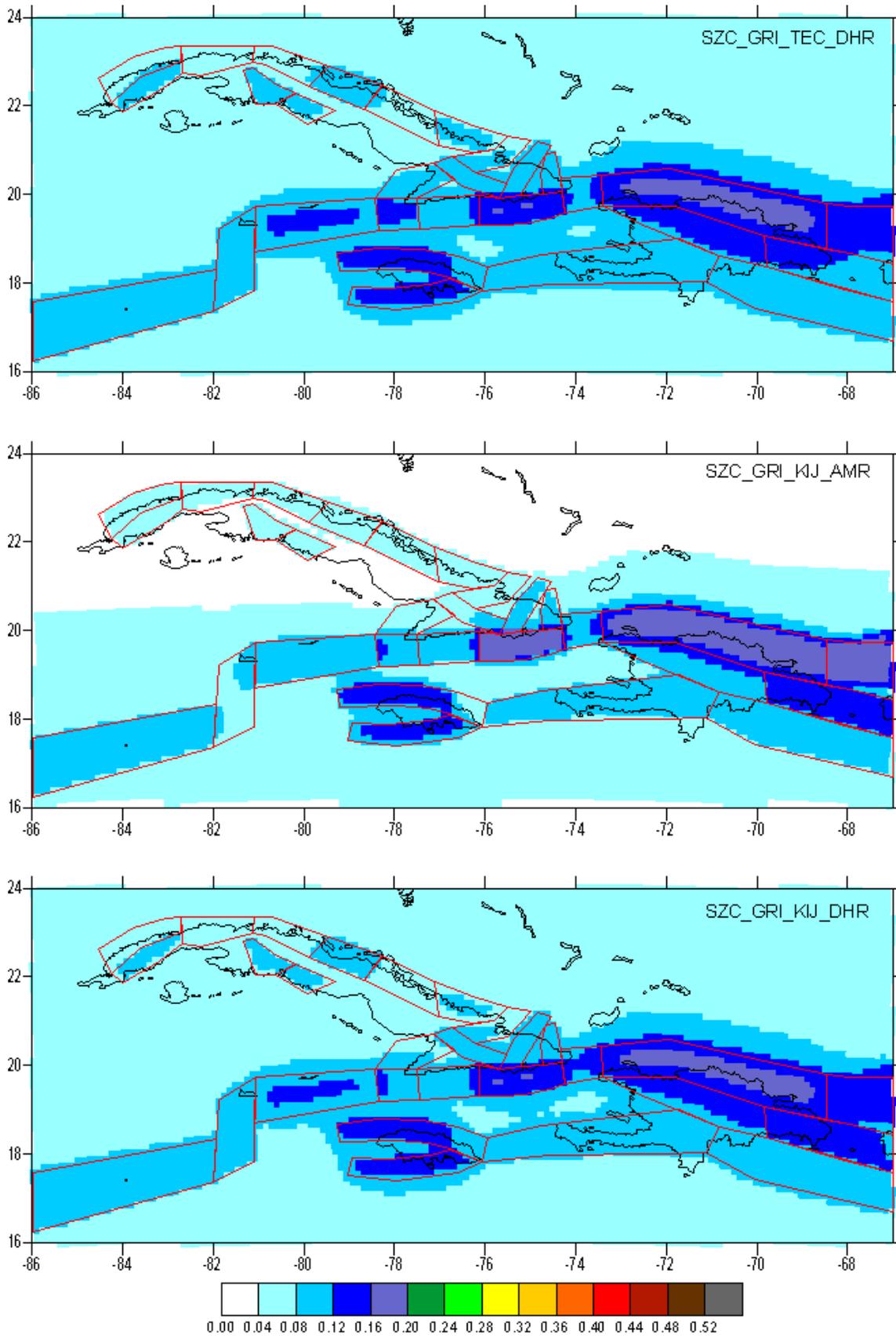
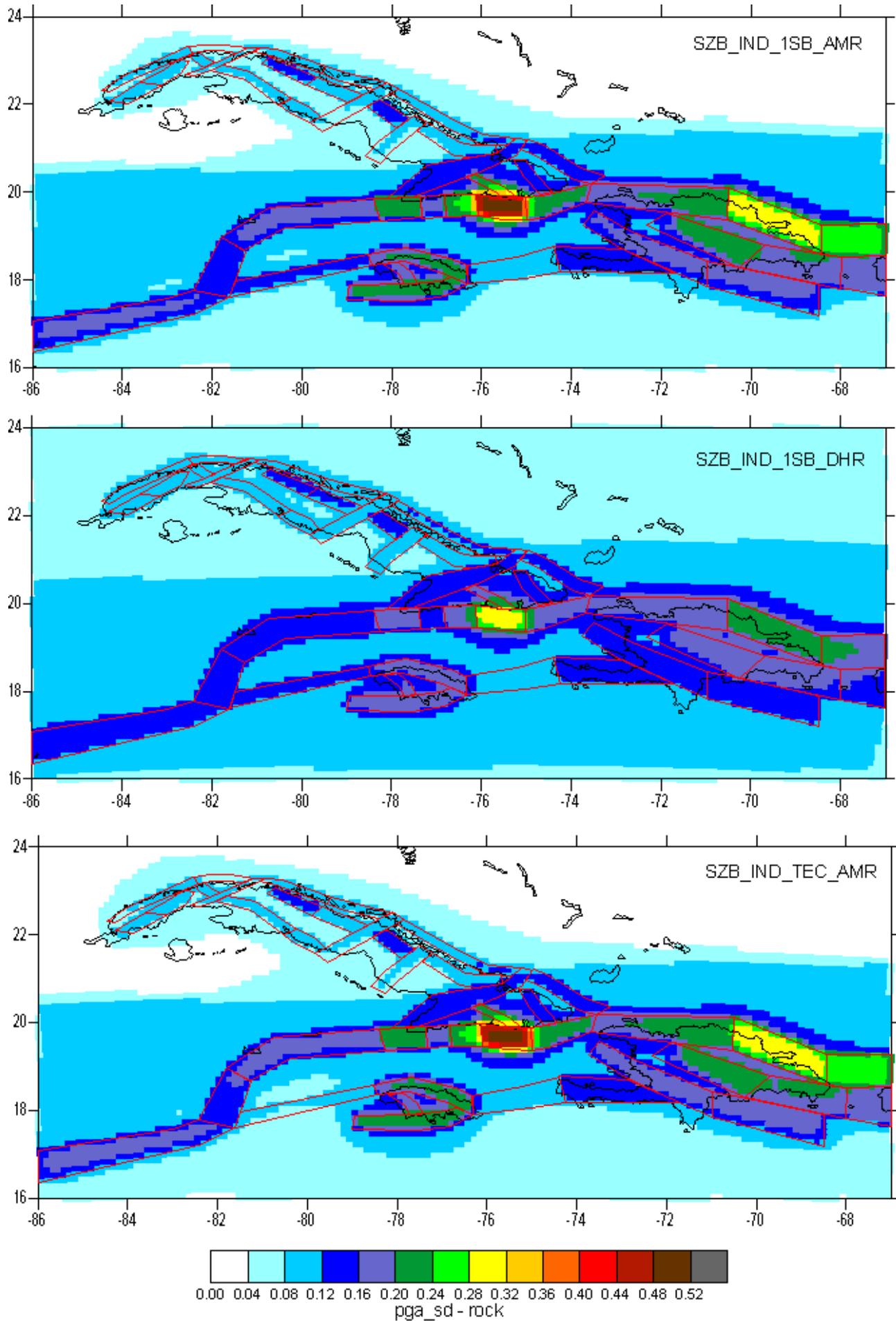


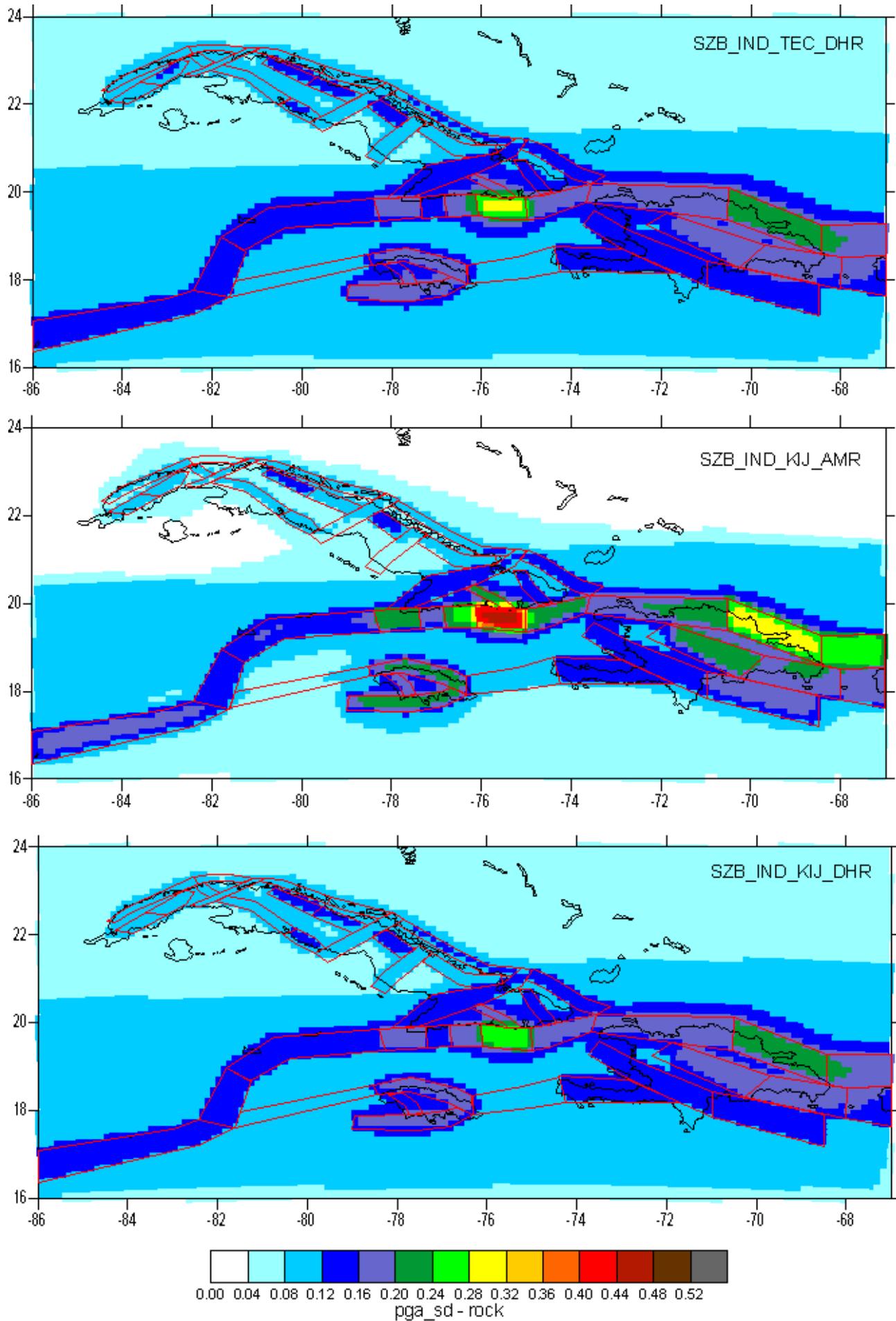
Fig. 2. Mapas de PGA en unidades de g para un período de retorno de 475 años considerando la desviación estándar de las leyes de atenuación (caso de roca). El código que aparece sobre los mapas representa la opción tomada en cada nodo del árbol lógico (figura 1.10).

- Nodo N5 – modelo de zonas sismogeneradoras (SZA: ZONA-A, SZB: ZONA-B y SZC: ZONA-C)
- Nodo N6 – parámetros del régimen sísmico (IND: frecuencias individuales, GRI: ajuste utilizando la relación Gutenberg – Richter)
- Nodo N7 – estimación de la Mmax [1SB: “one step beyond”, TEC: origen tectónico, KIJ: (Kijko y Graham, 1998)]
- Nodo N8 – modelos de atenuación [AMR: (Ambraseis, 1996) y DHR: (Dhale, 1995)]

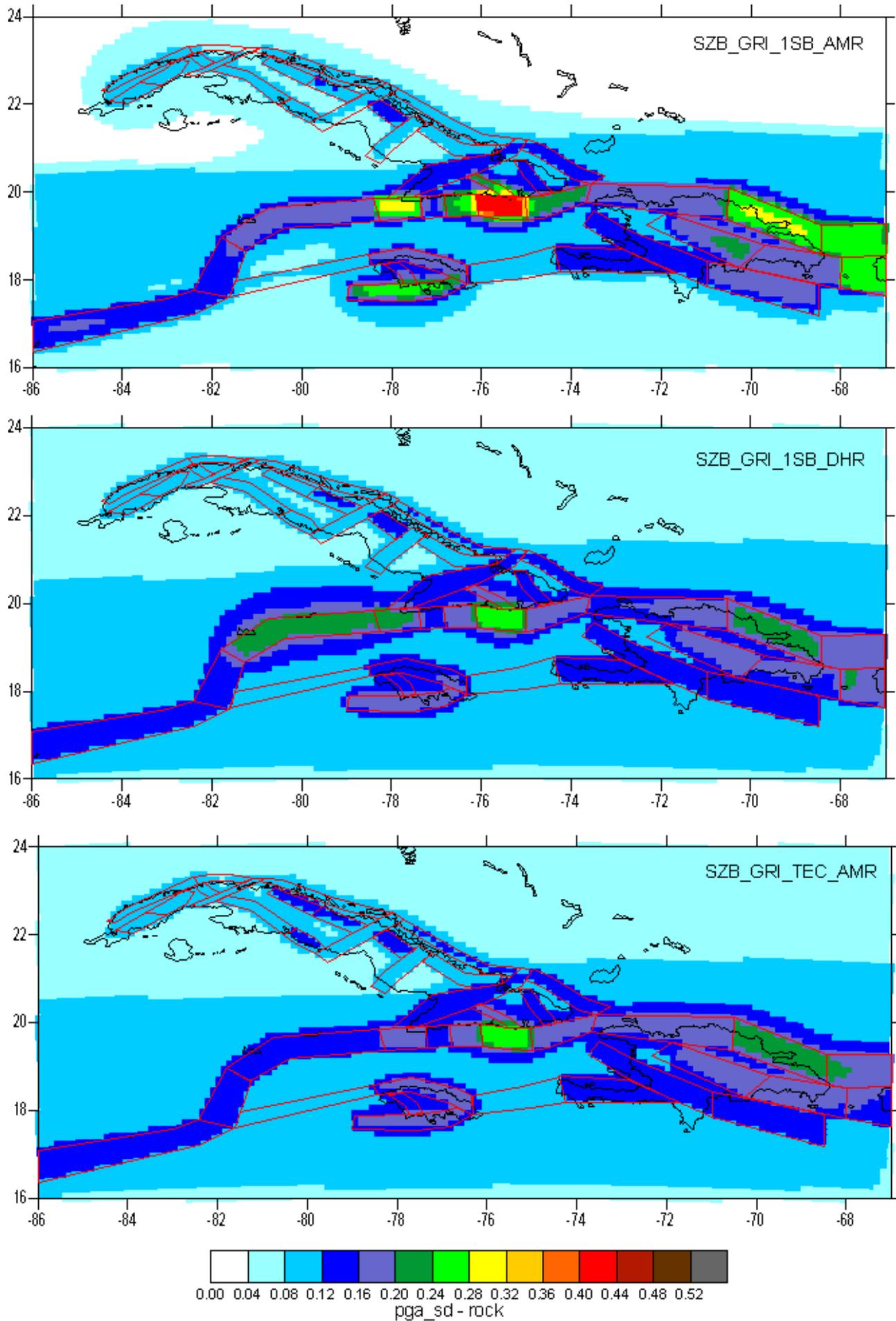
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



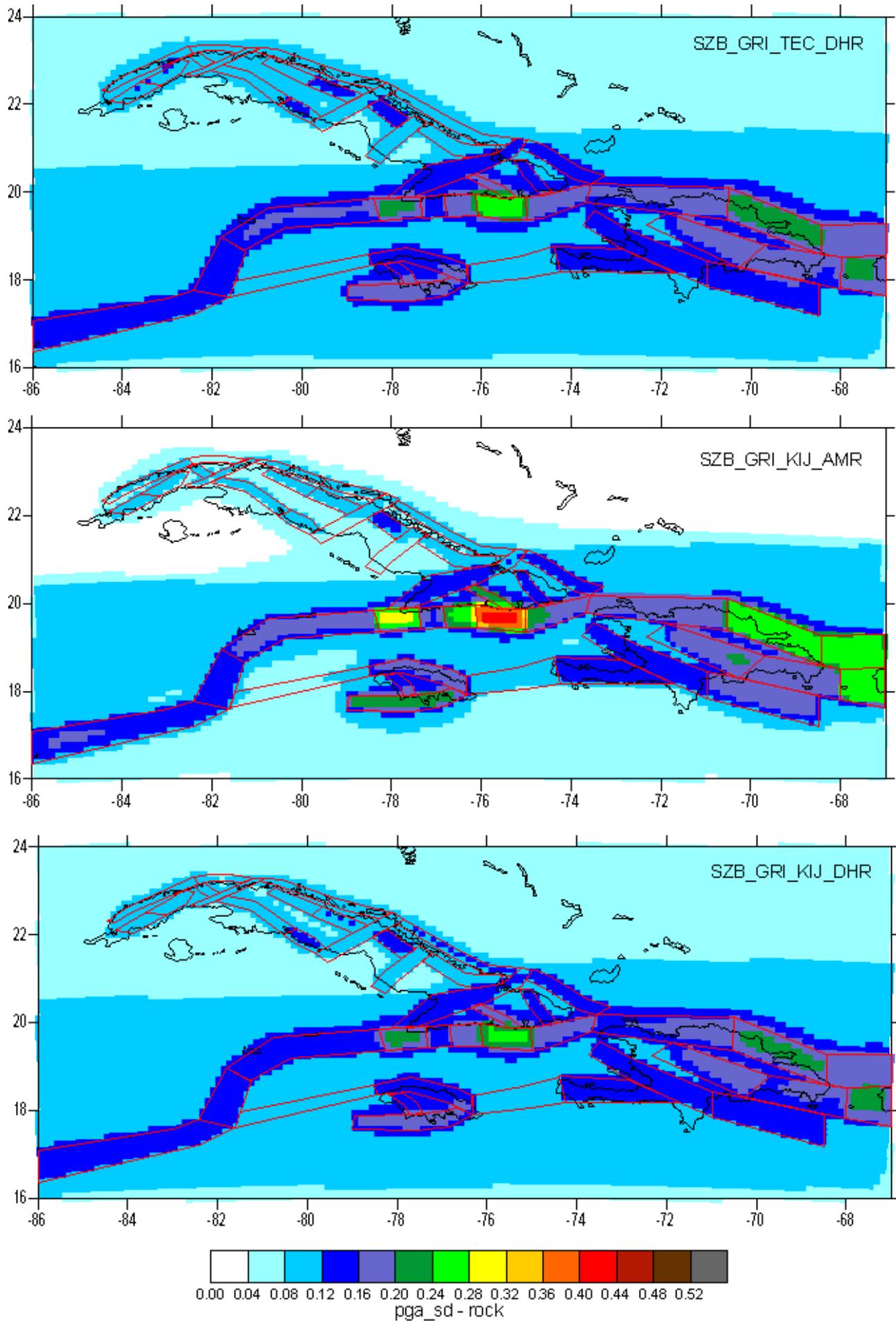
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



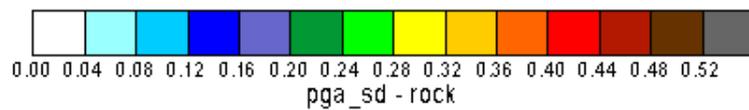
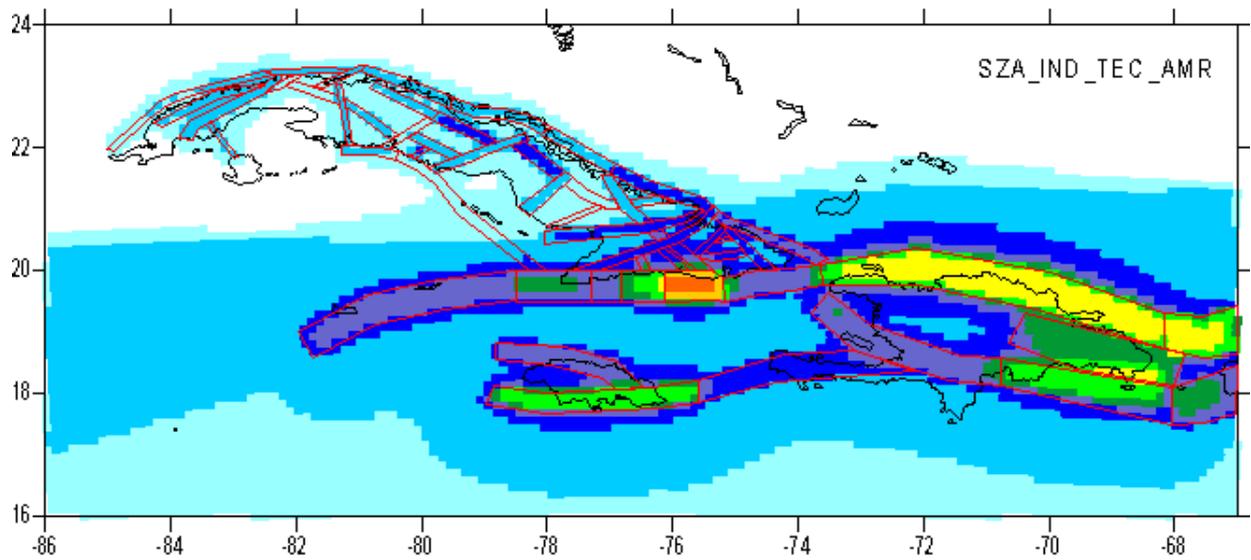
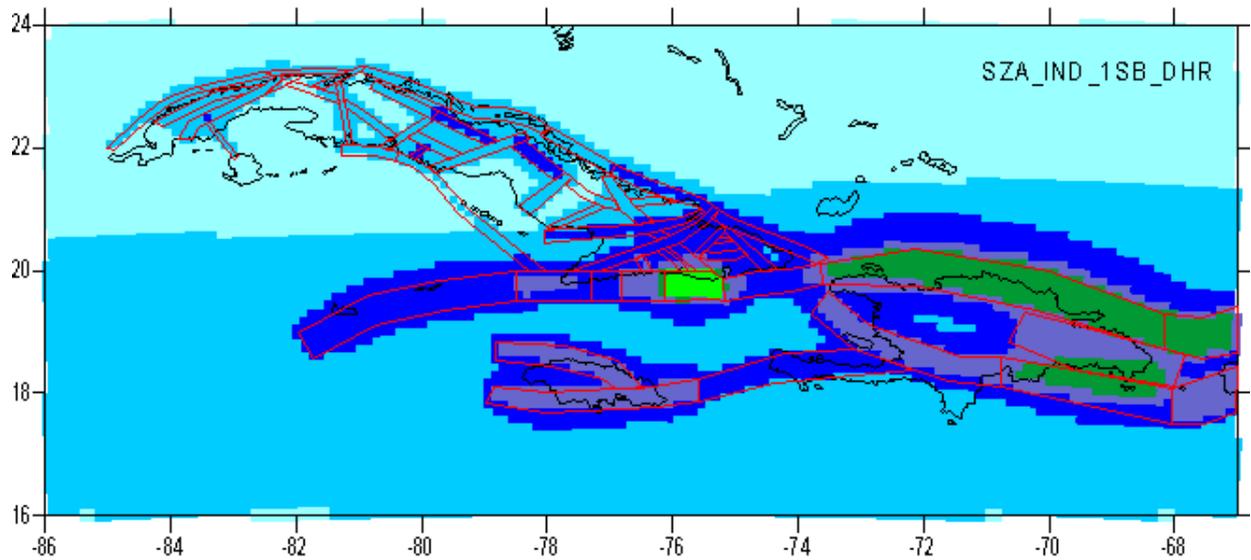
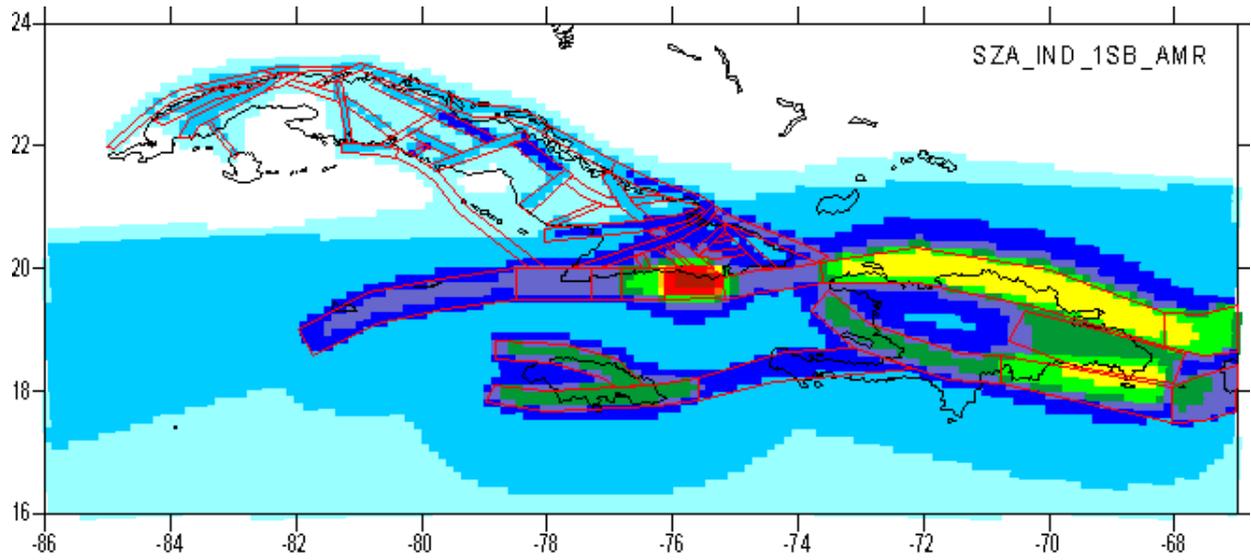
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



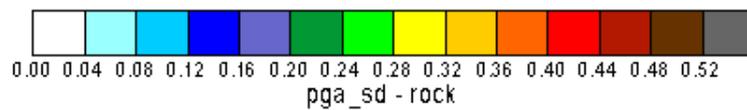
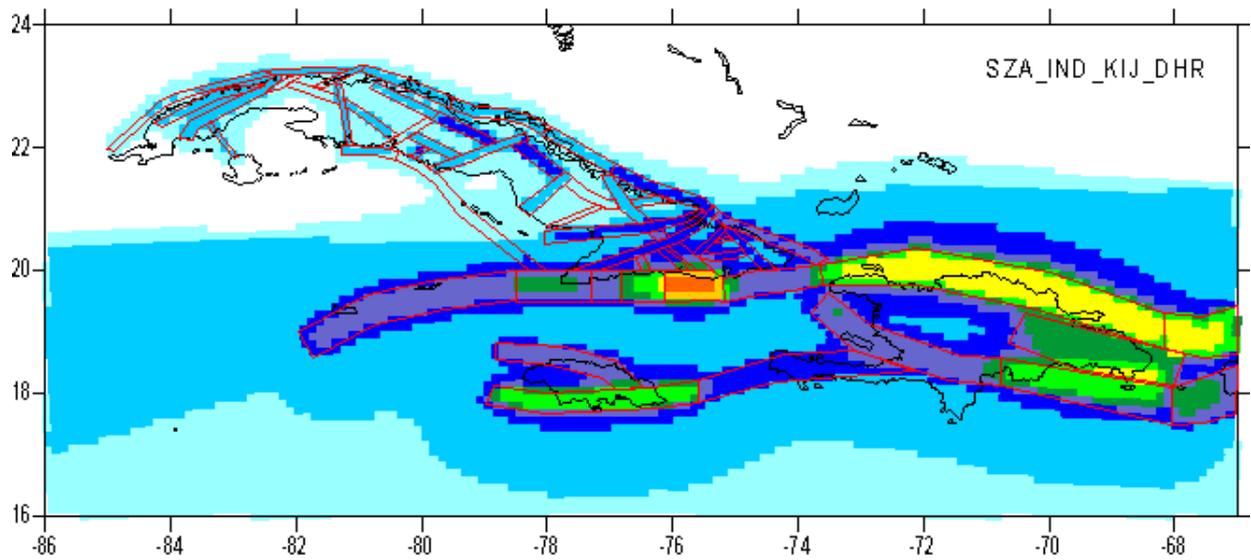
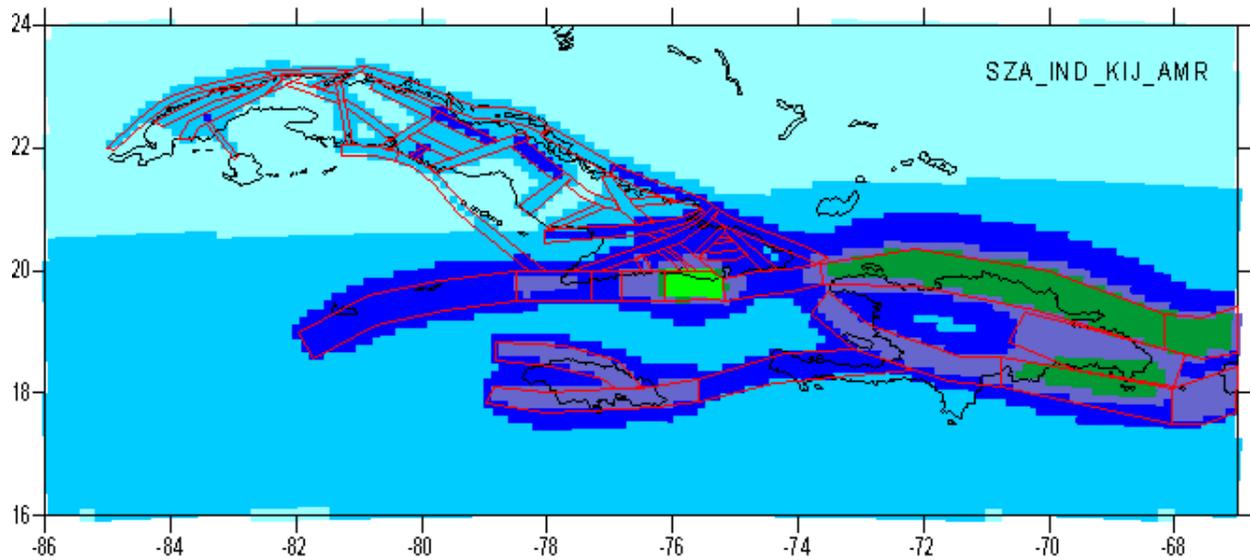
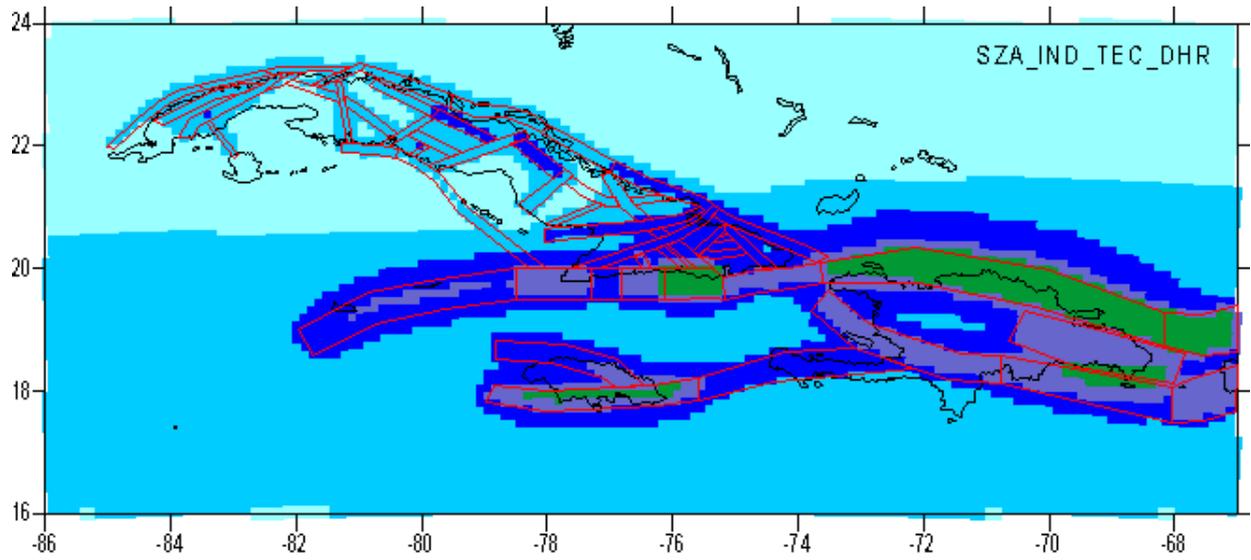
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



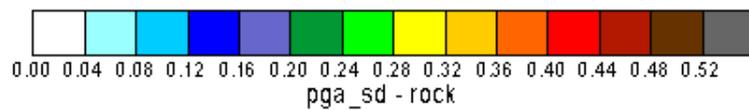
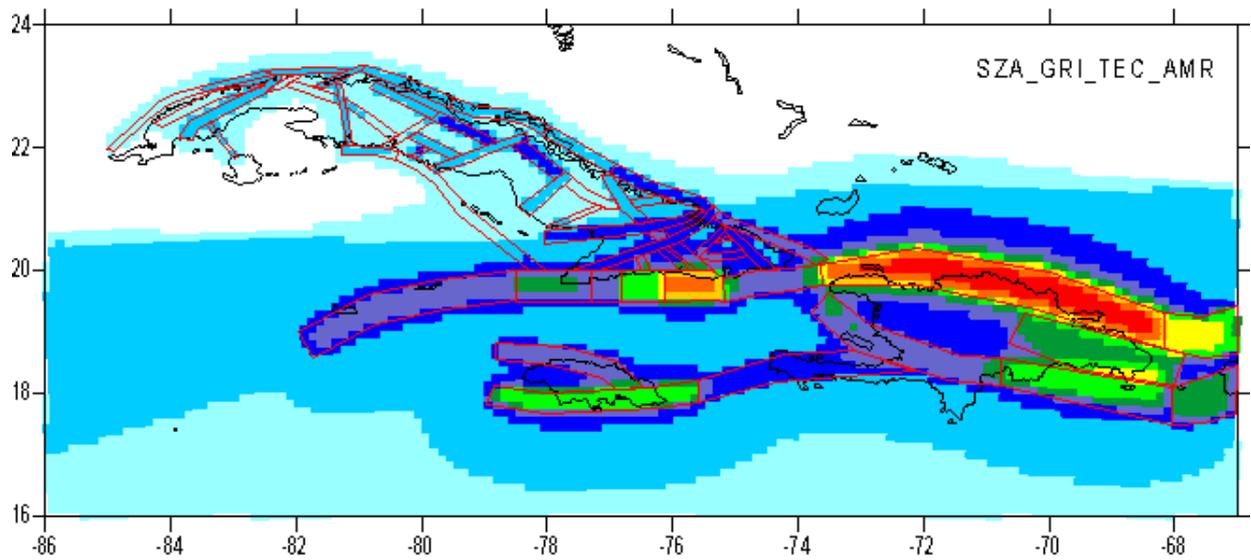
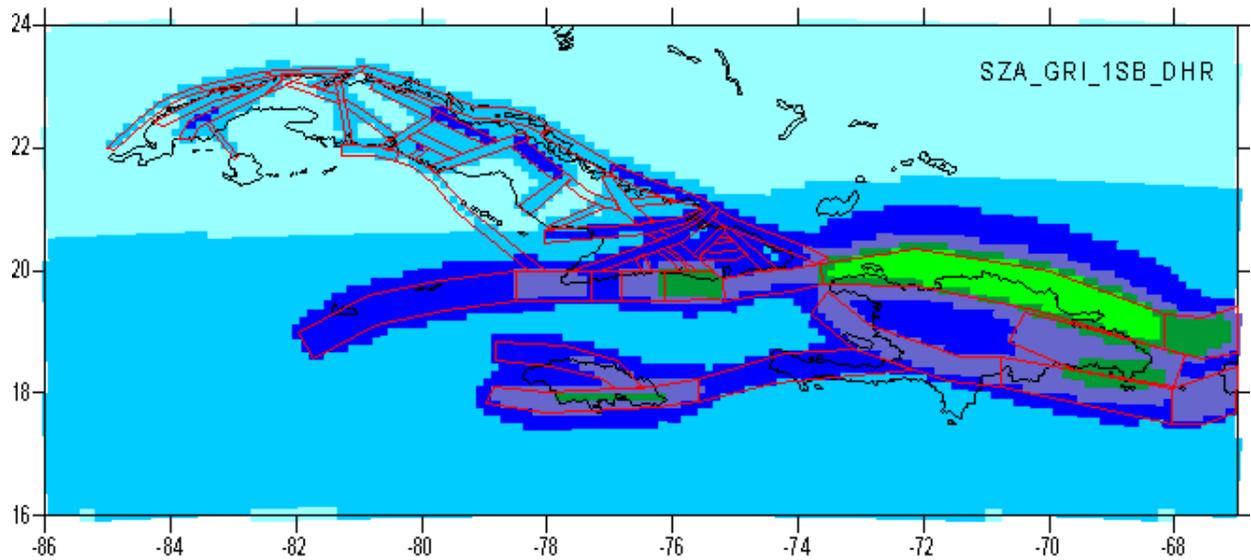
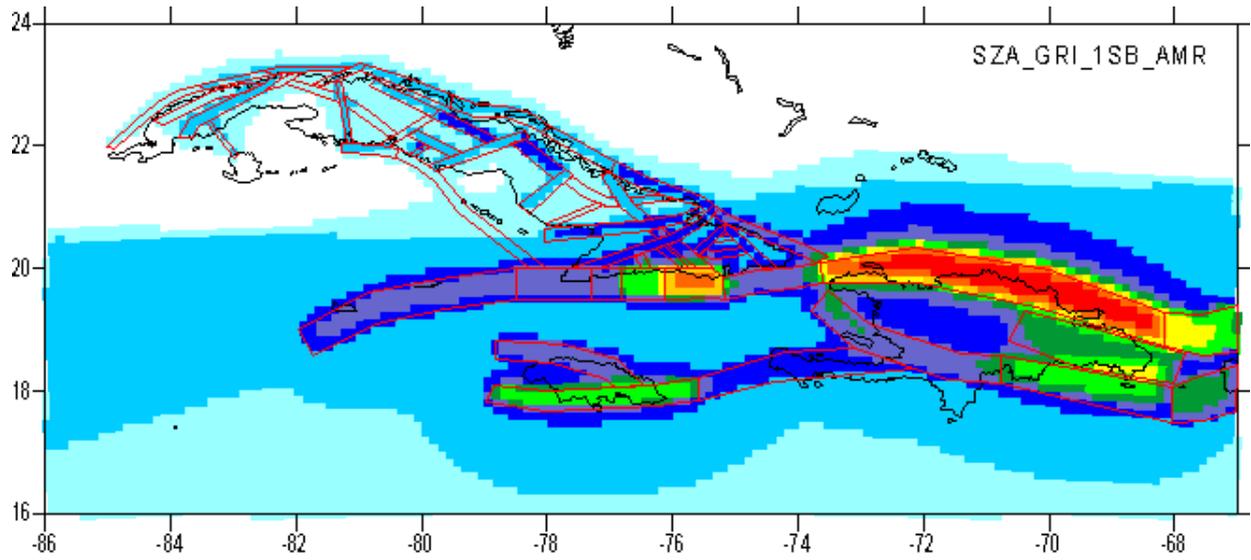
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



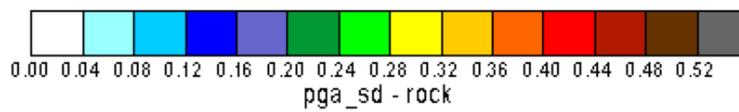
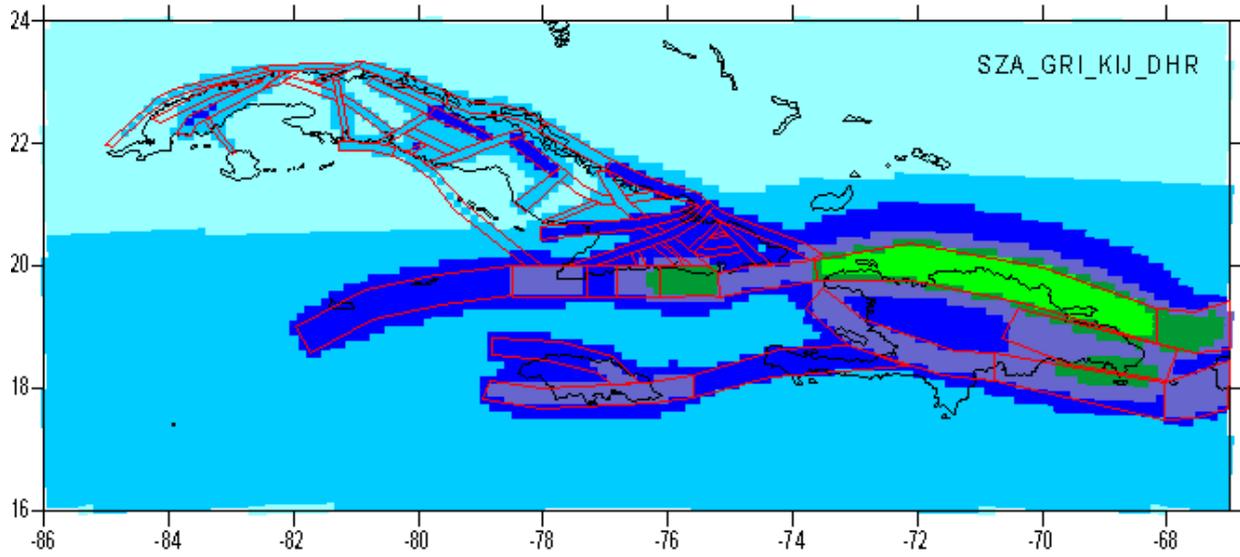
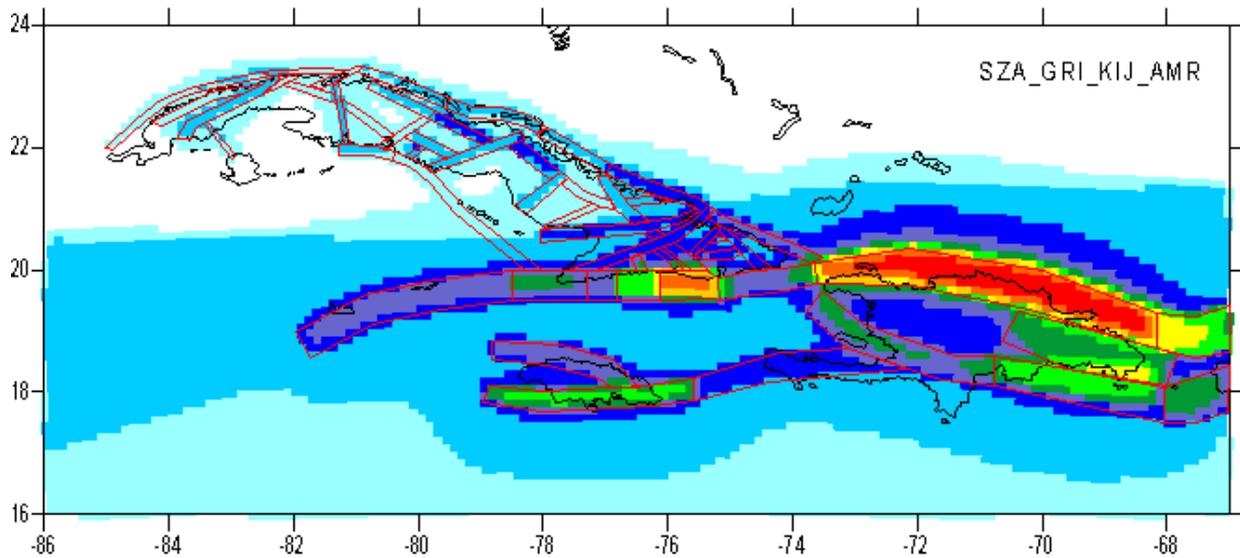
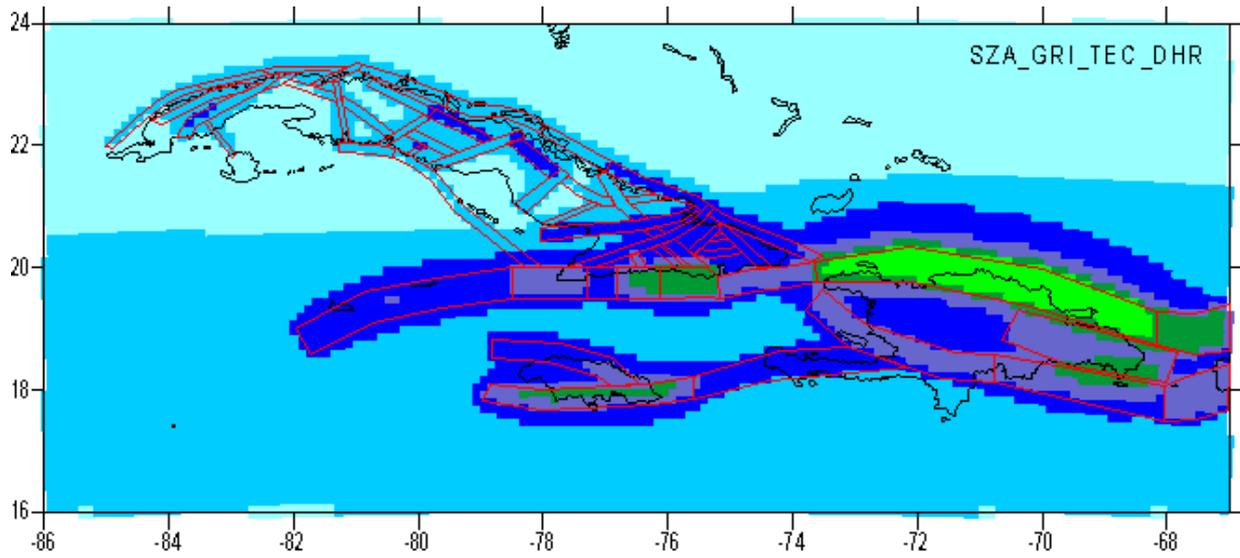
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



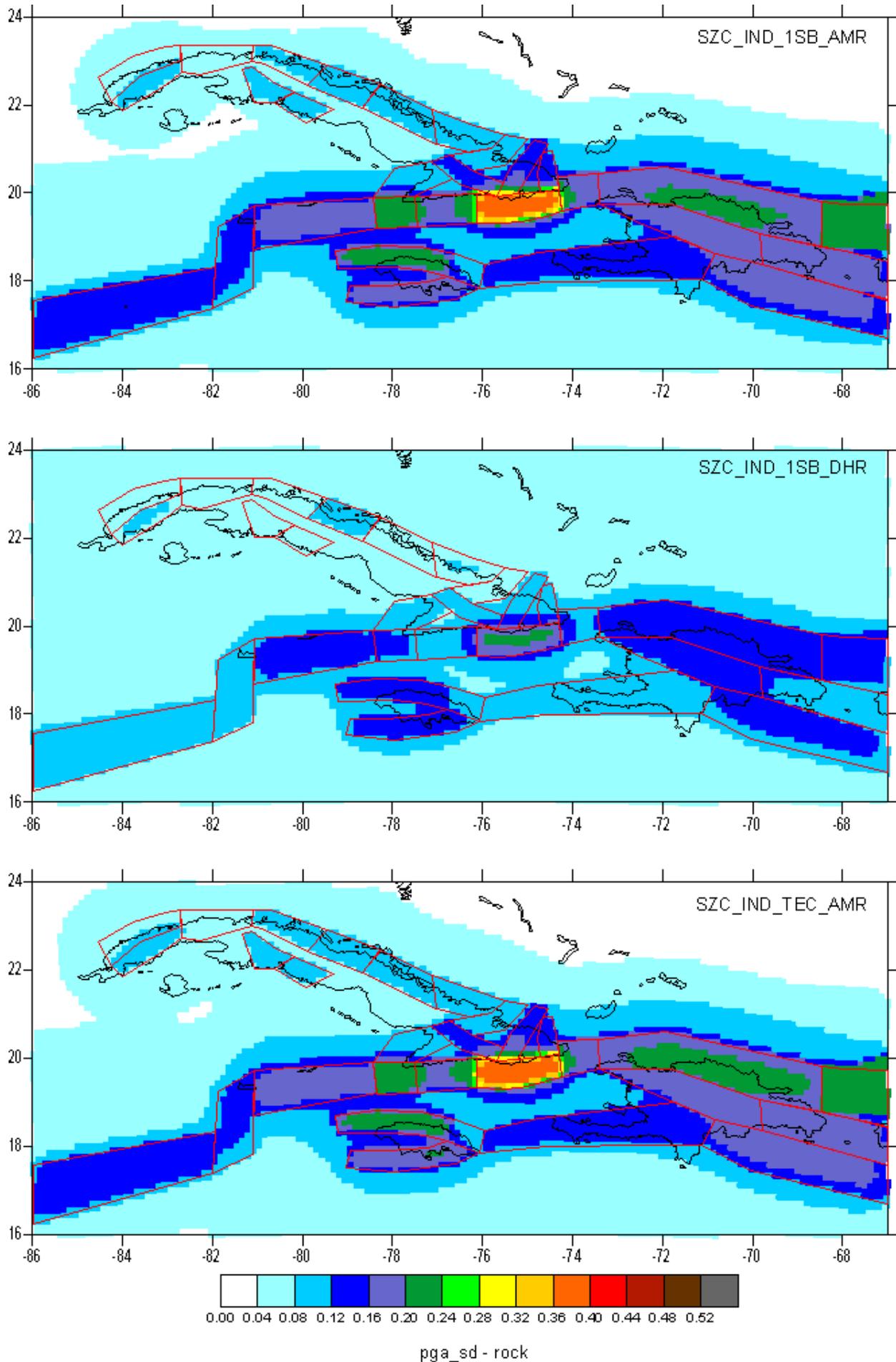
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



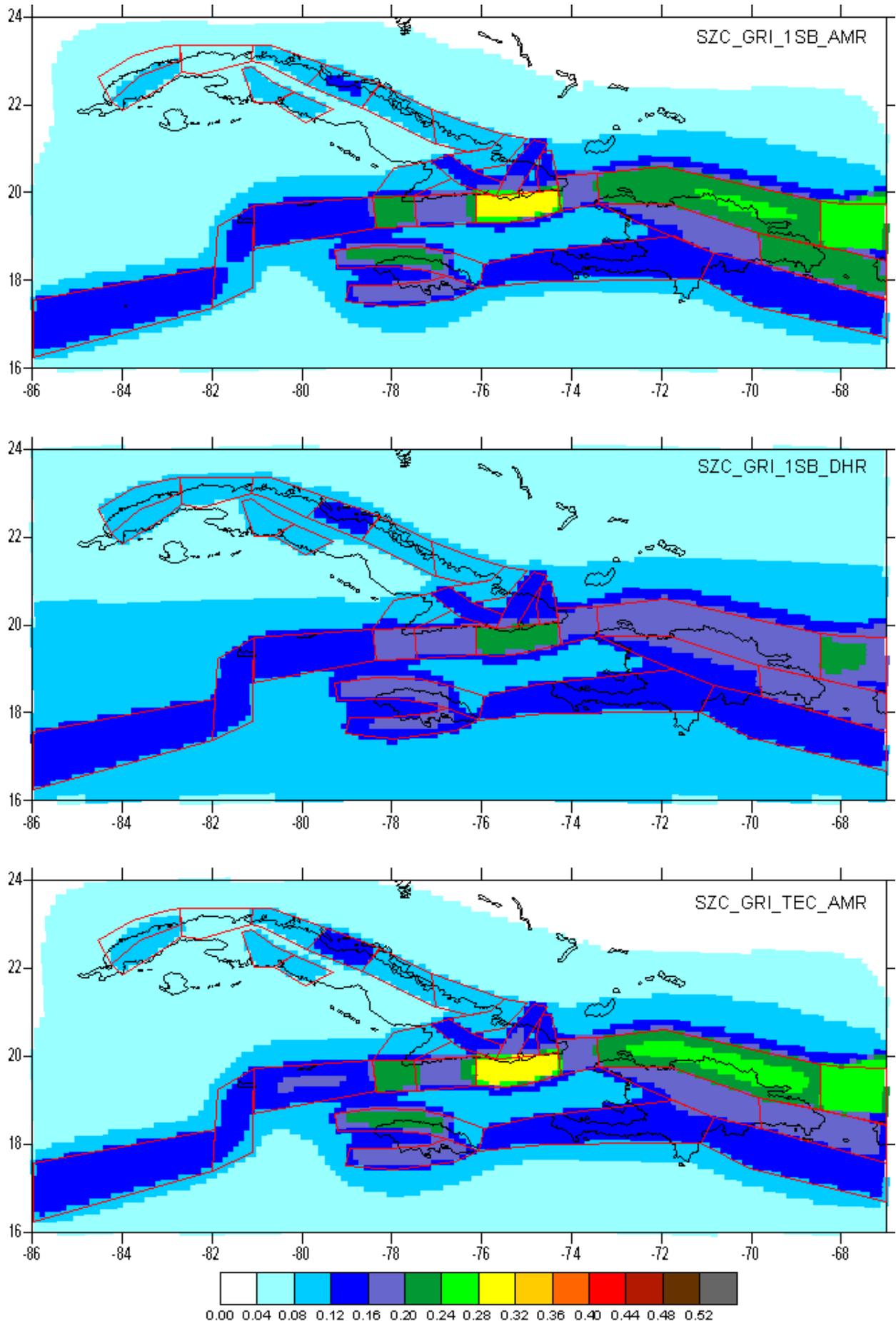
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



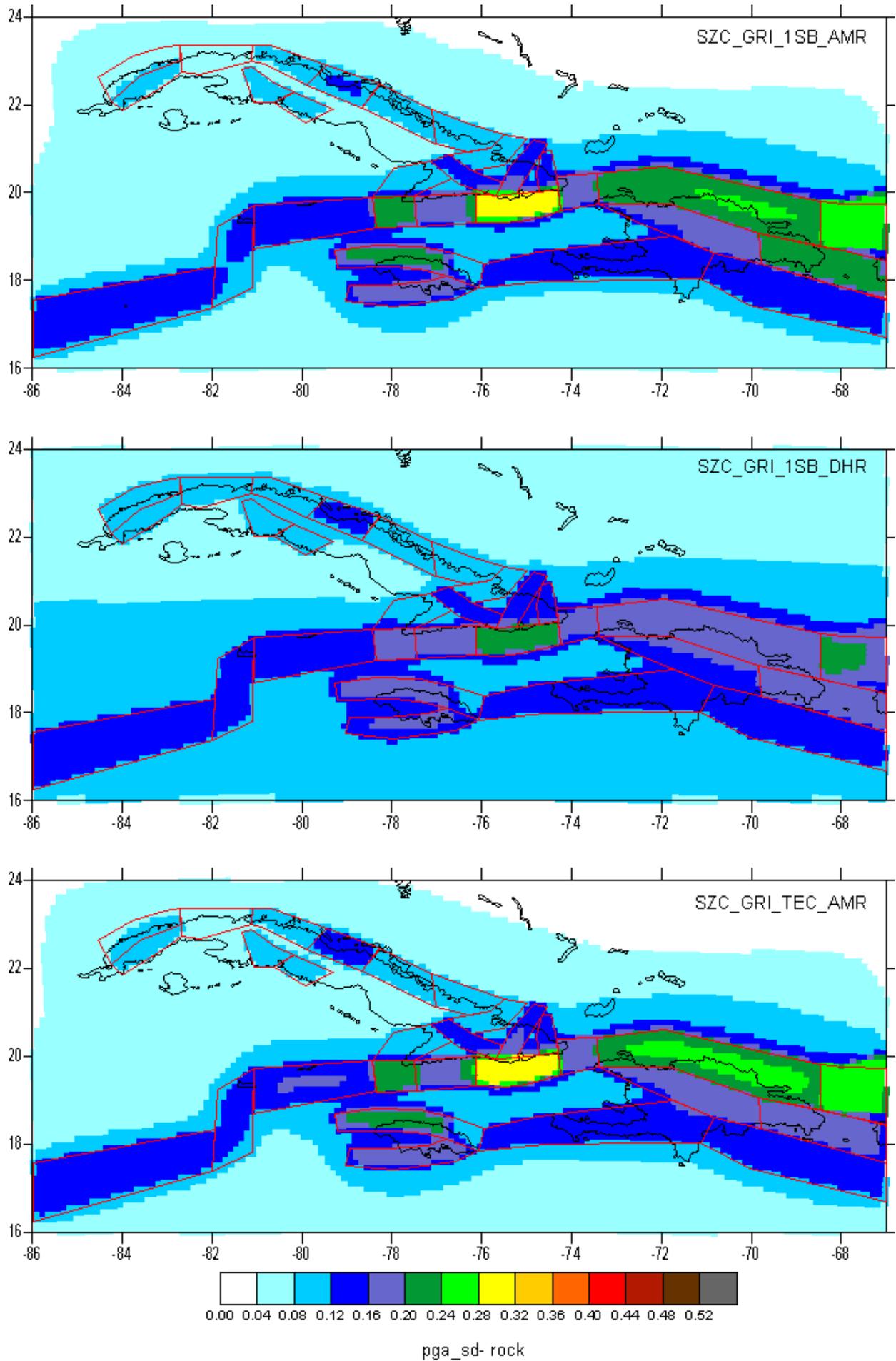
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

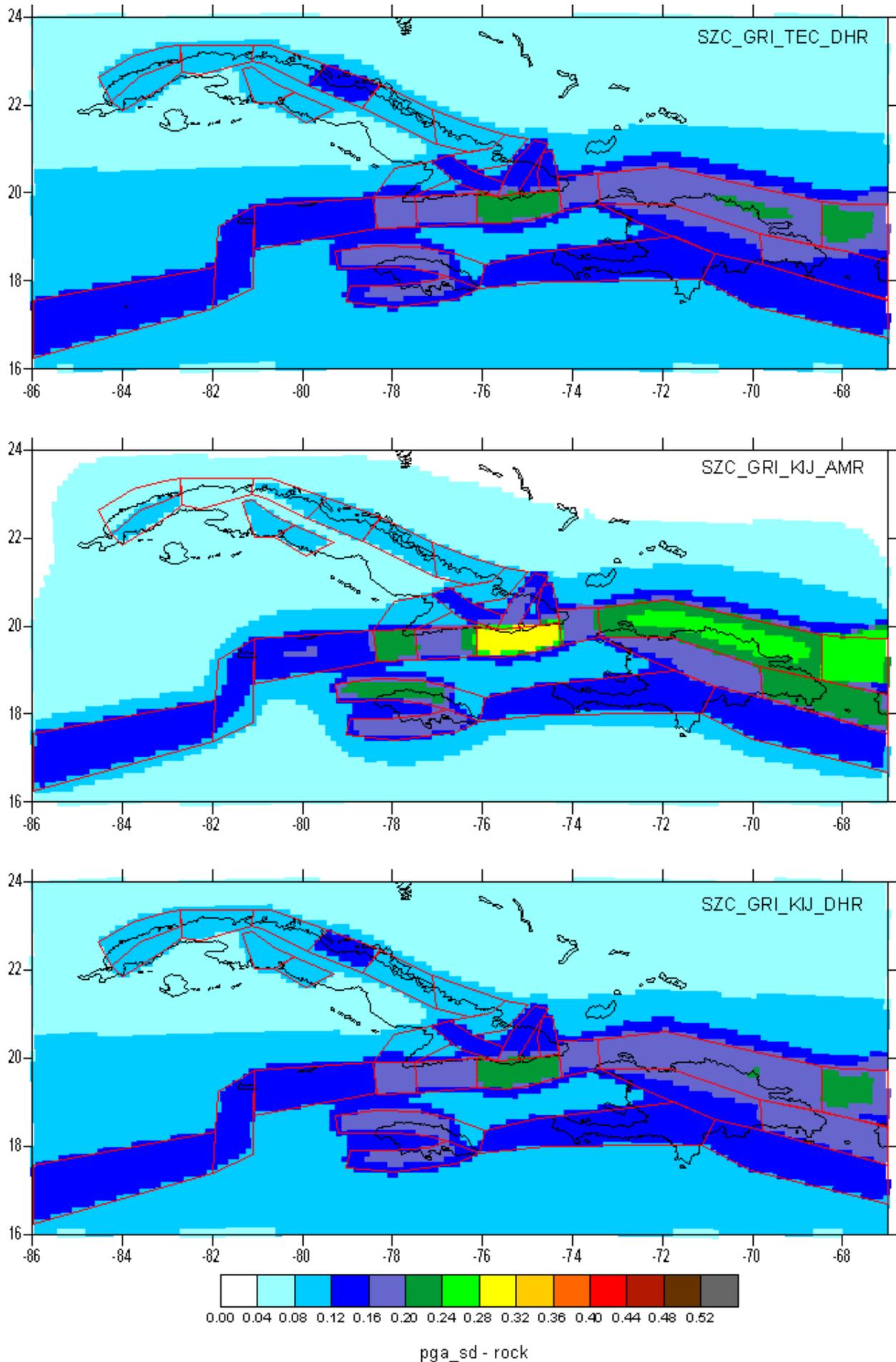
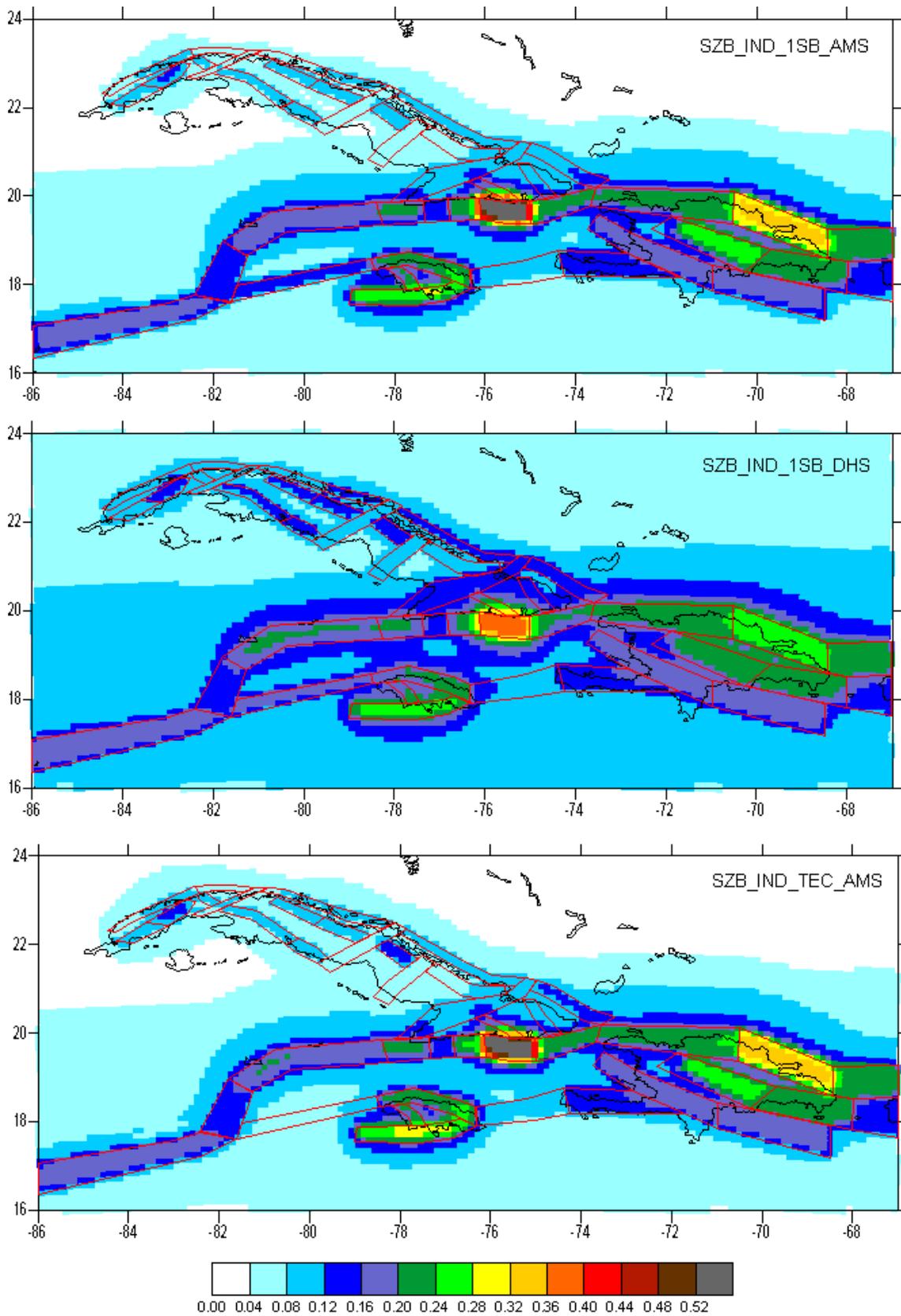


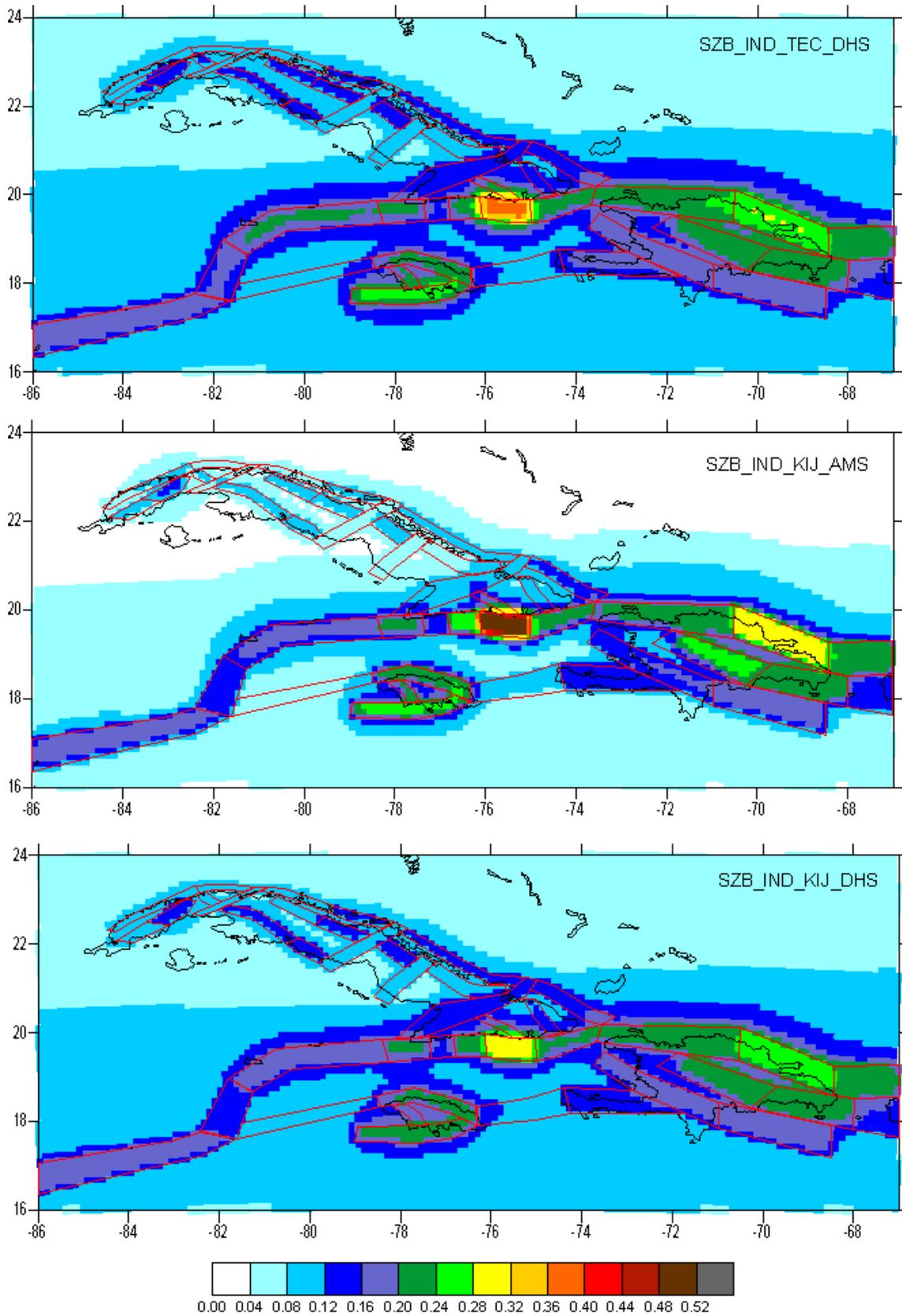
Fig. .3. Mapas de PGA en unidades de g para un período de retorno de 475 años sin considerar la desviación estándar de las leyes de atenuación (caso suelo friable). El código que aparece sobre los mapas representa la opción tomada en cada nodo del árbol lógico (figura 1.10).

- Nodo N5 – modelo de zonas sismogeneradoras (SZA: ZONA-A, SZB: ZONA-B y SZC: ZONA-C)
- Nodo N6 – parámetros del régimen sísmico (IND: frecuencias individuales, GRI: ajuste utilizando la relación Gutenberg – Richter)
- Nodo N7 – estimación de la Mmax [1SB: “one step beyond”, TEC: origen tectónico, KIJ: (Kijko y Graham, 1998)]
- Nodo N8 – modelos de atenuación [AMS: (Ambraseis, 1996) y DHS: (Dhale, 1995)]

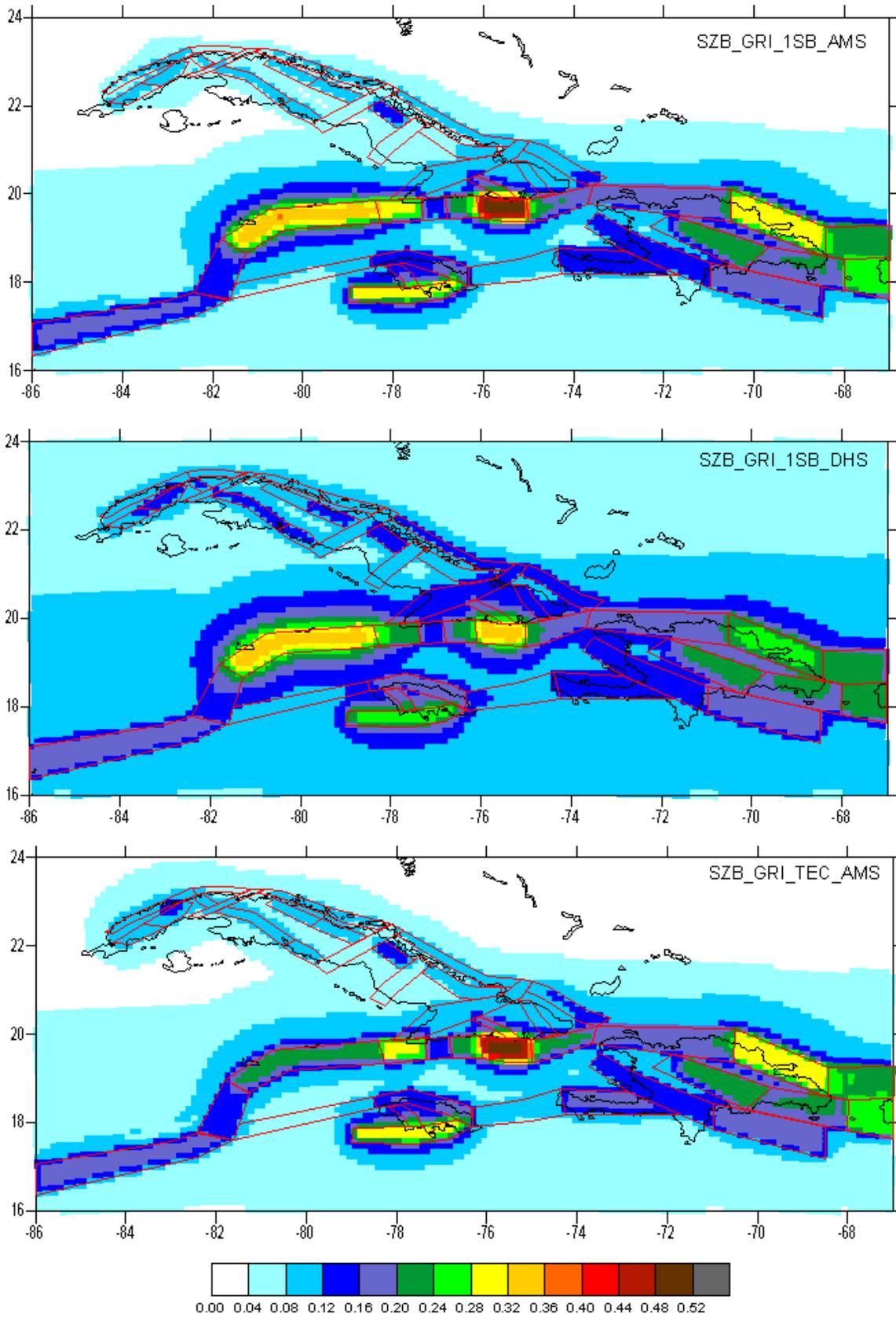
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



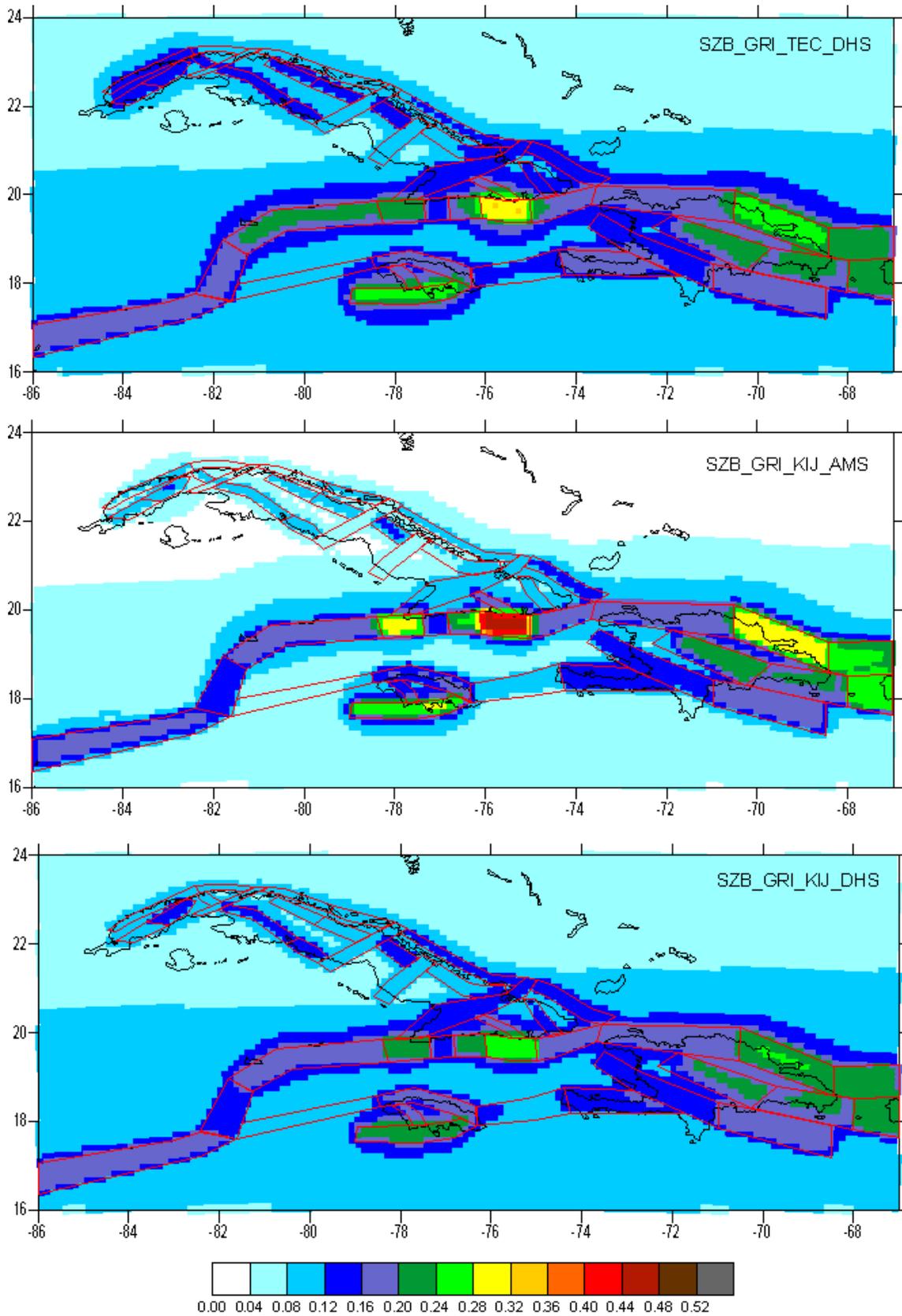
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



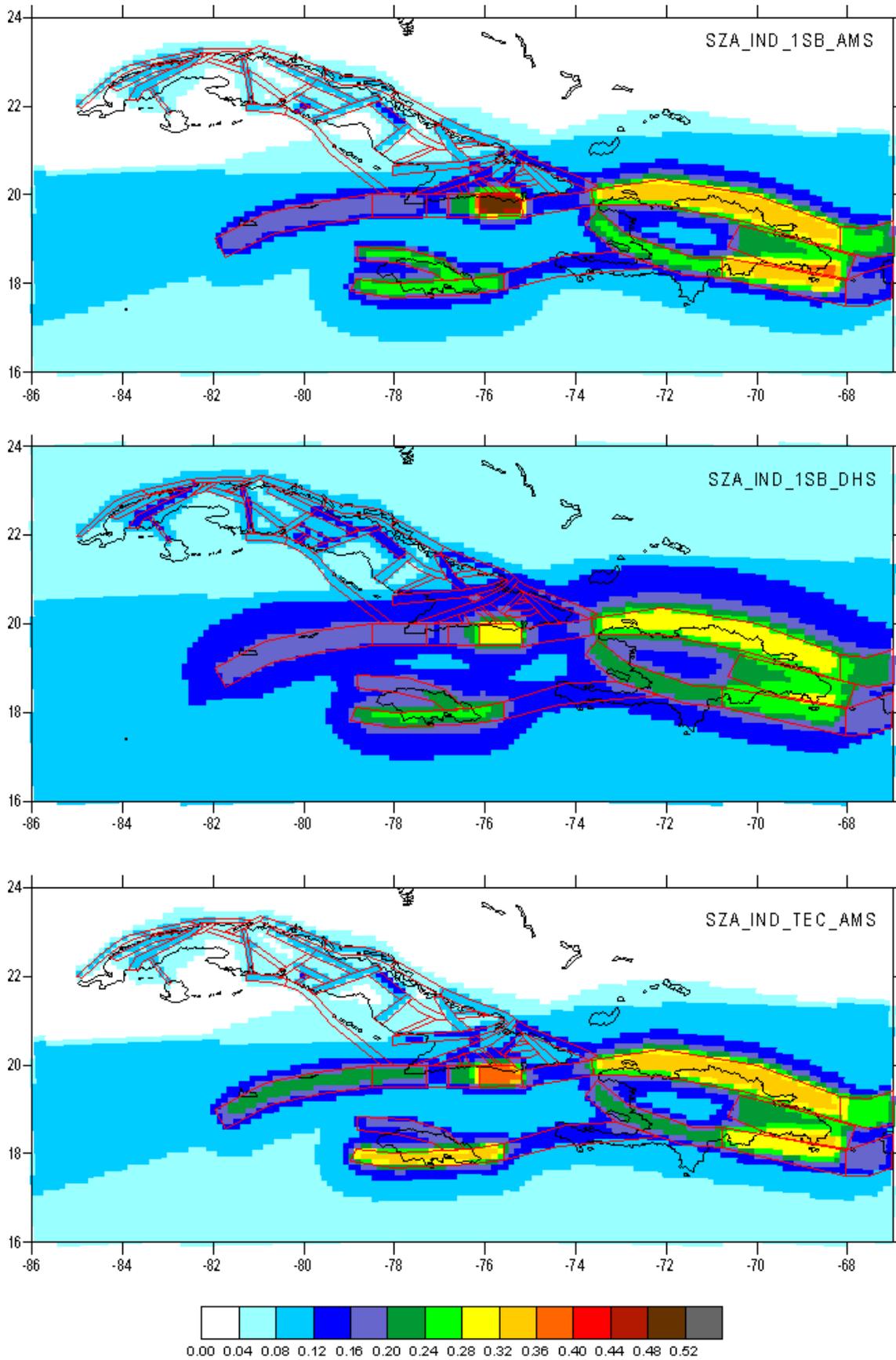
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

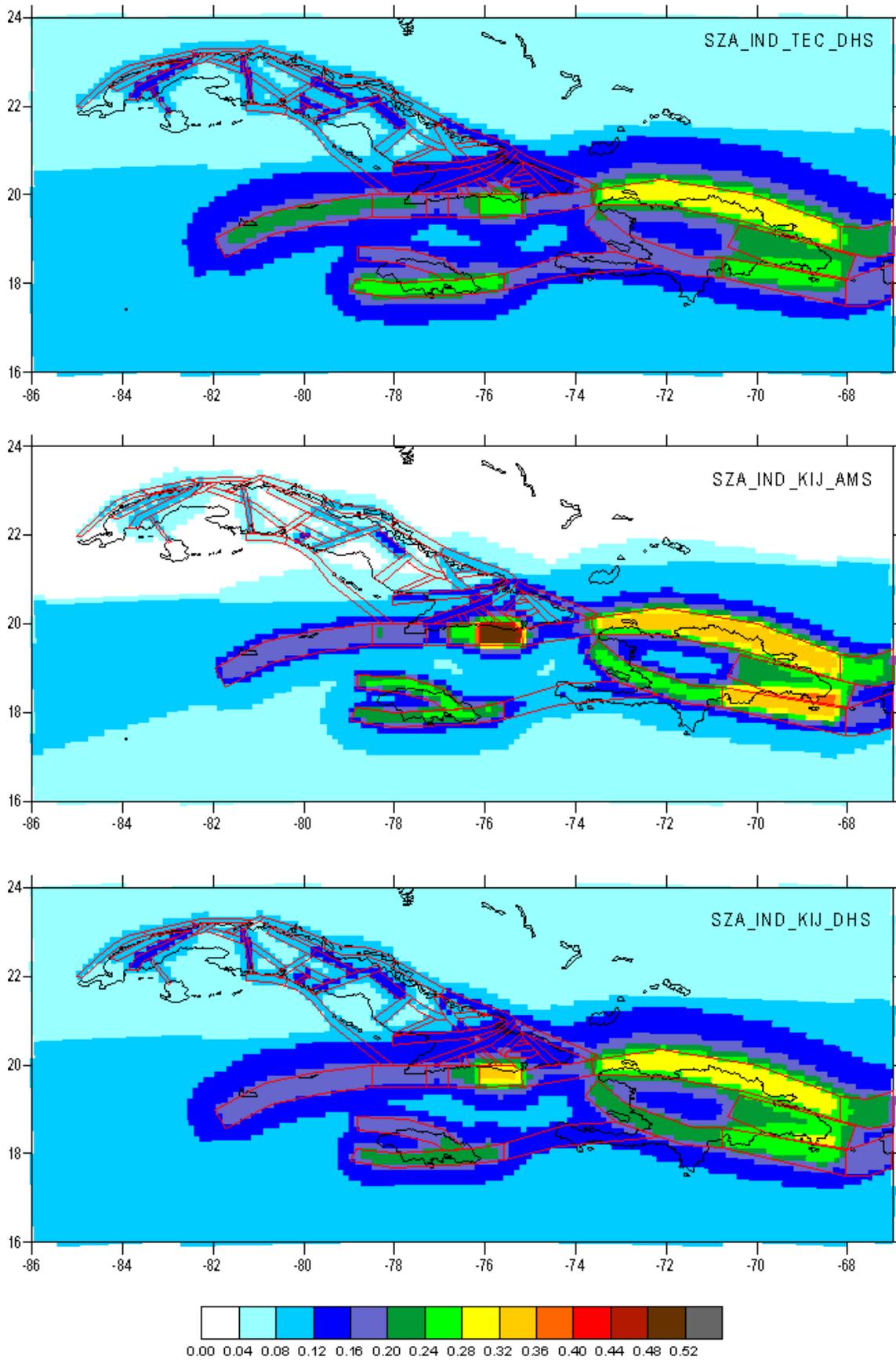


Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

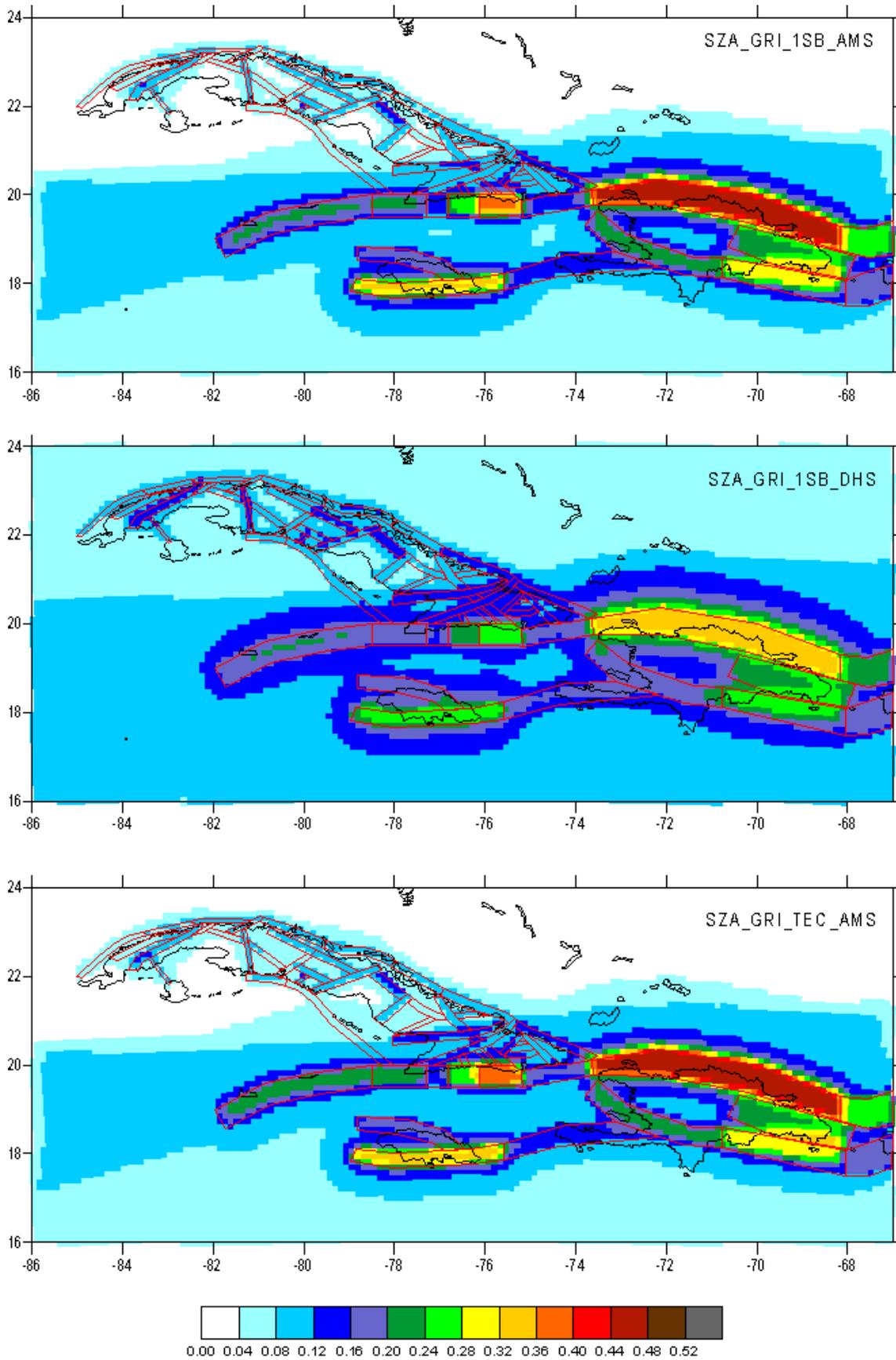


Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

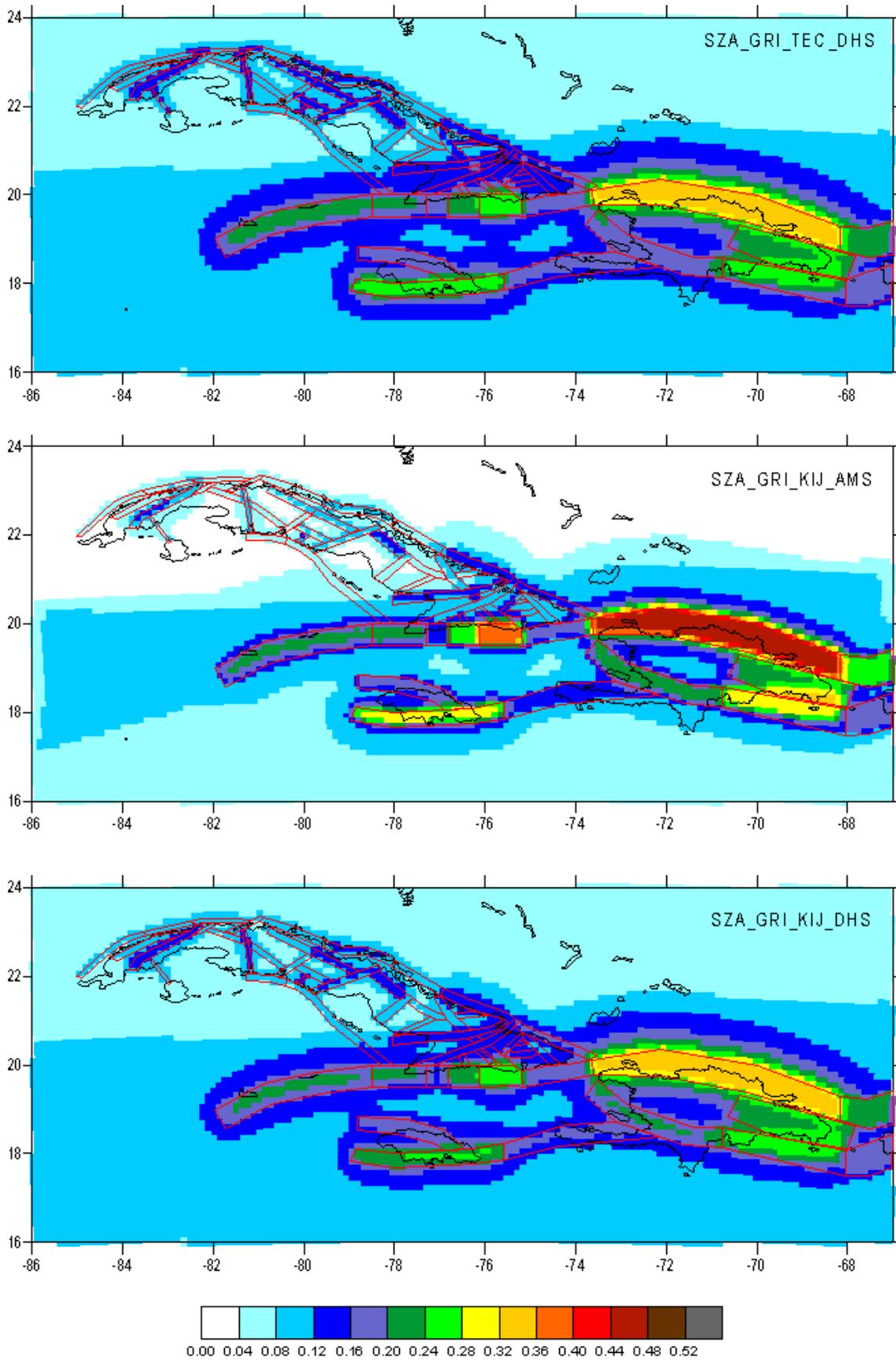




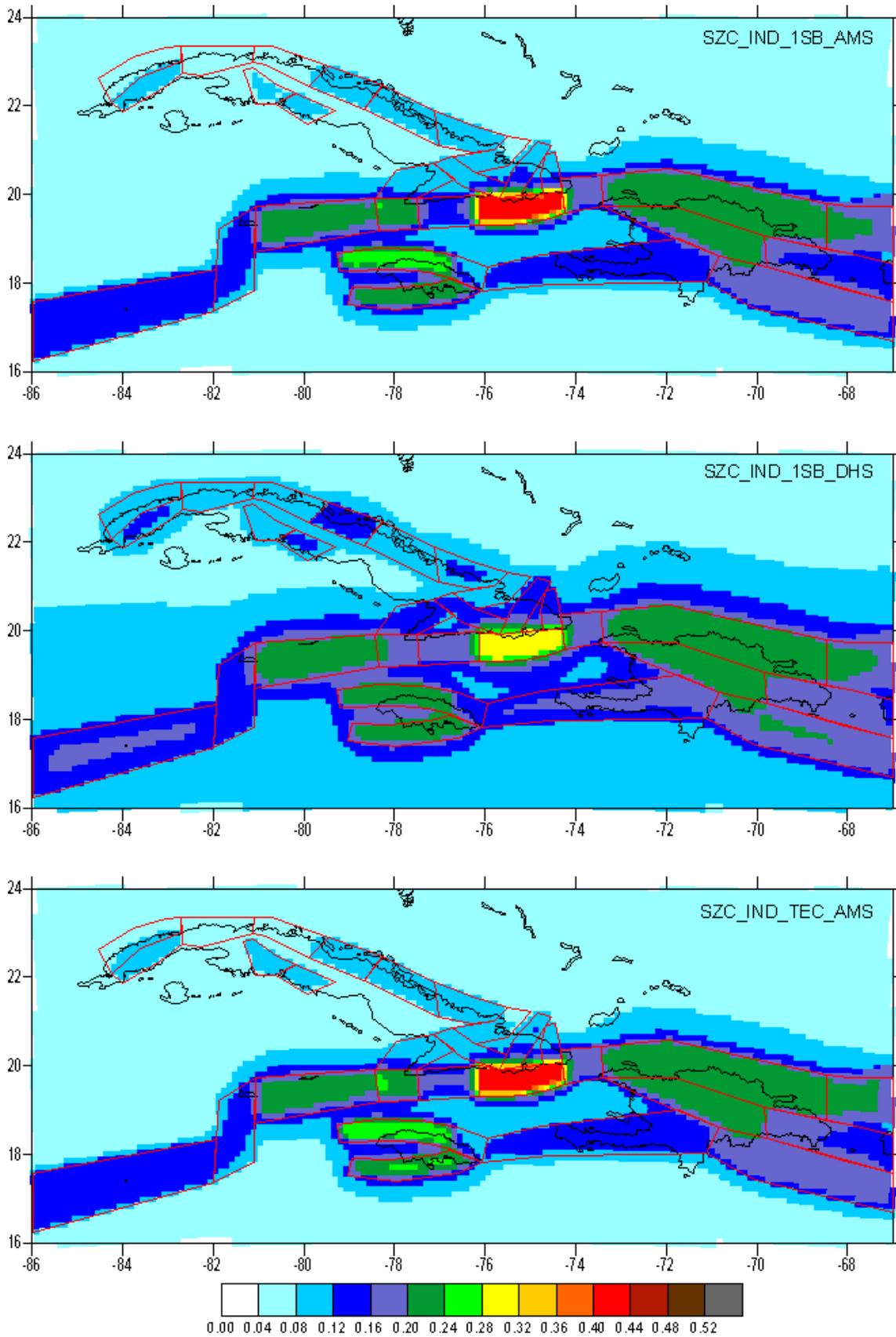
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



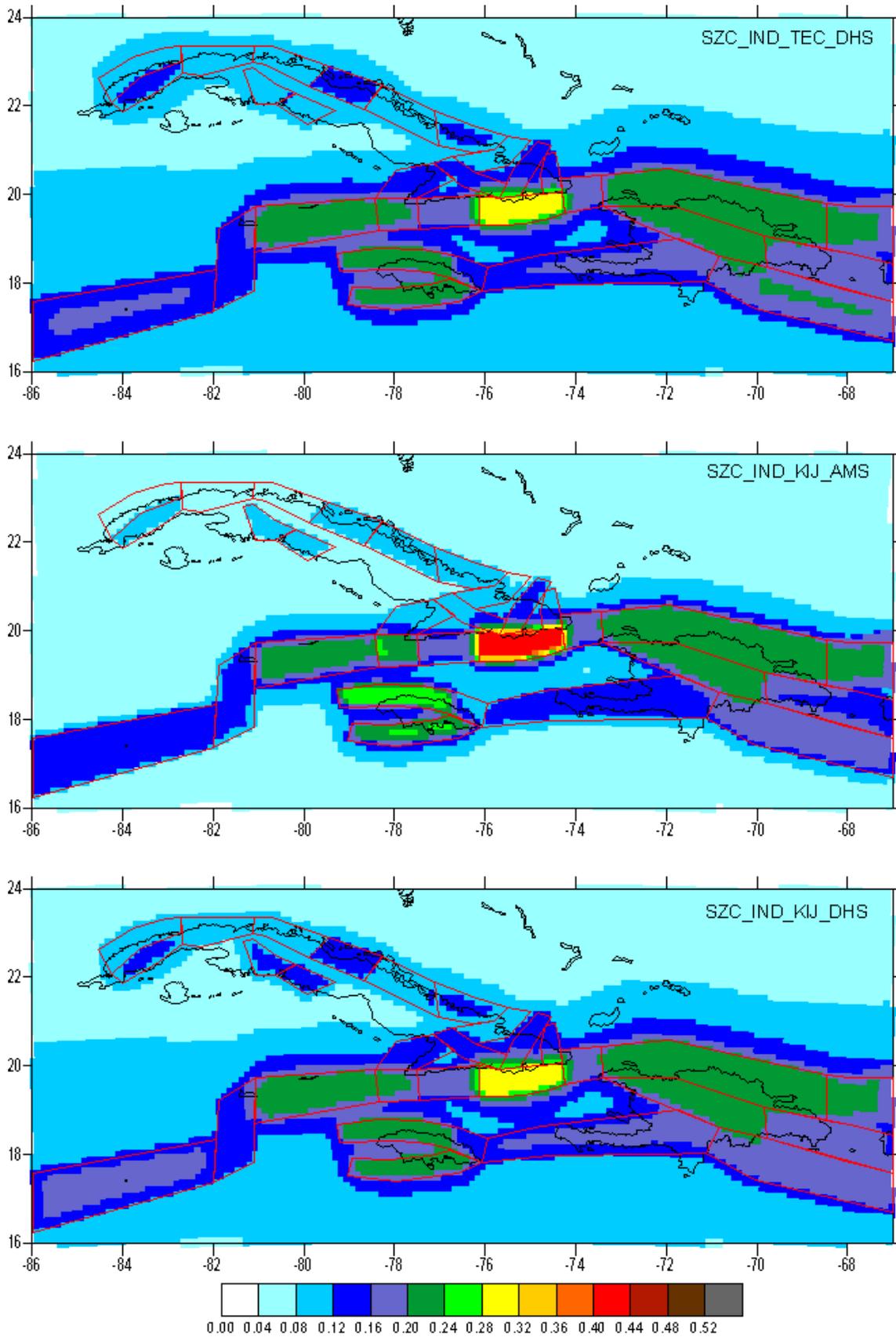
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



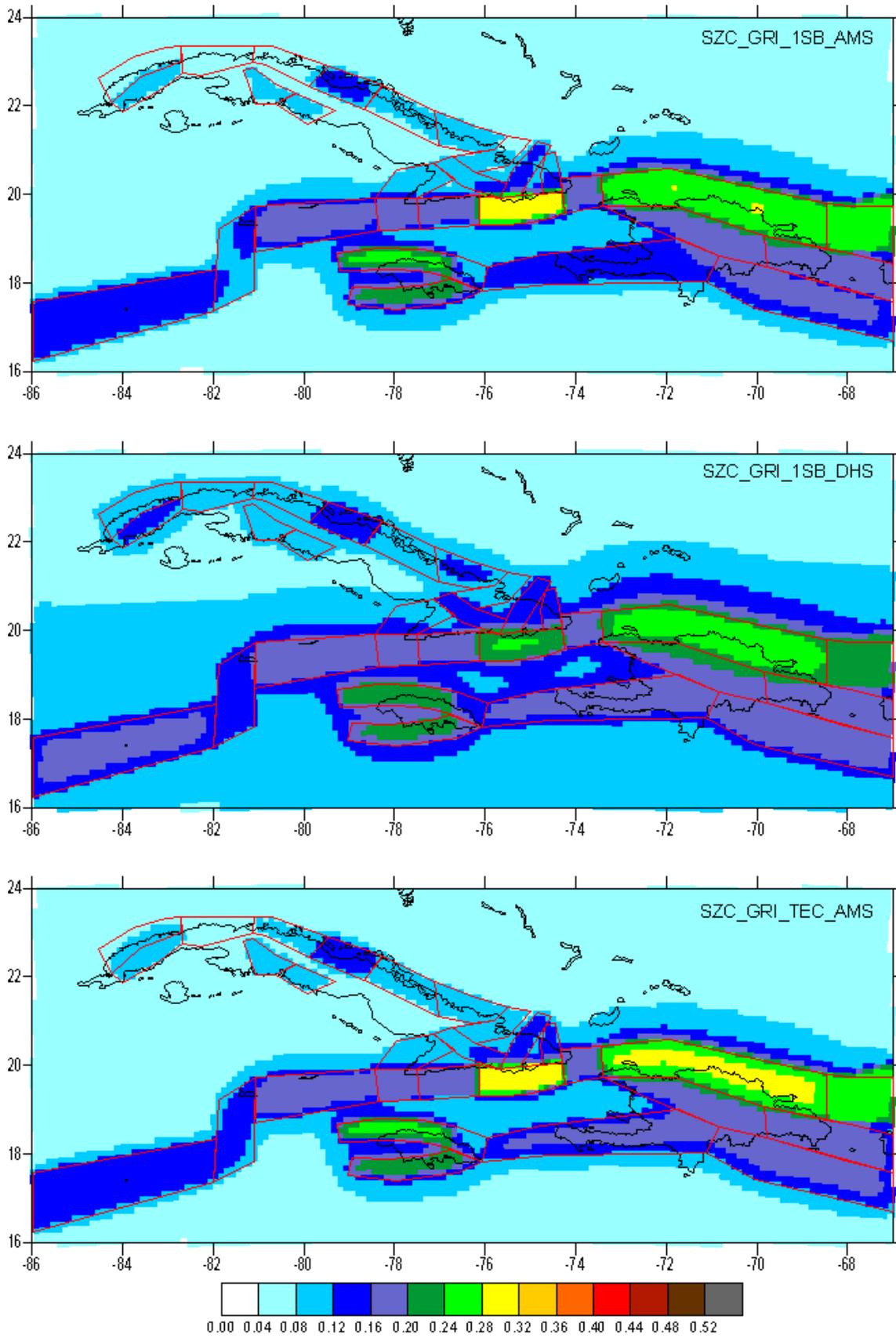
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

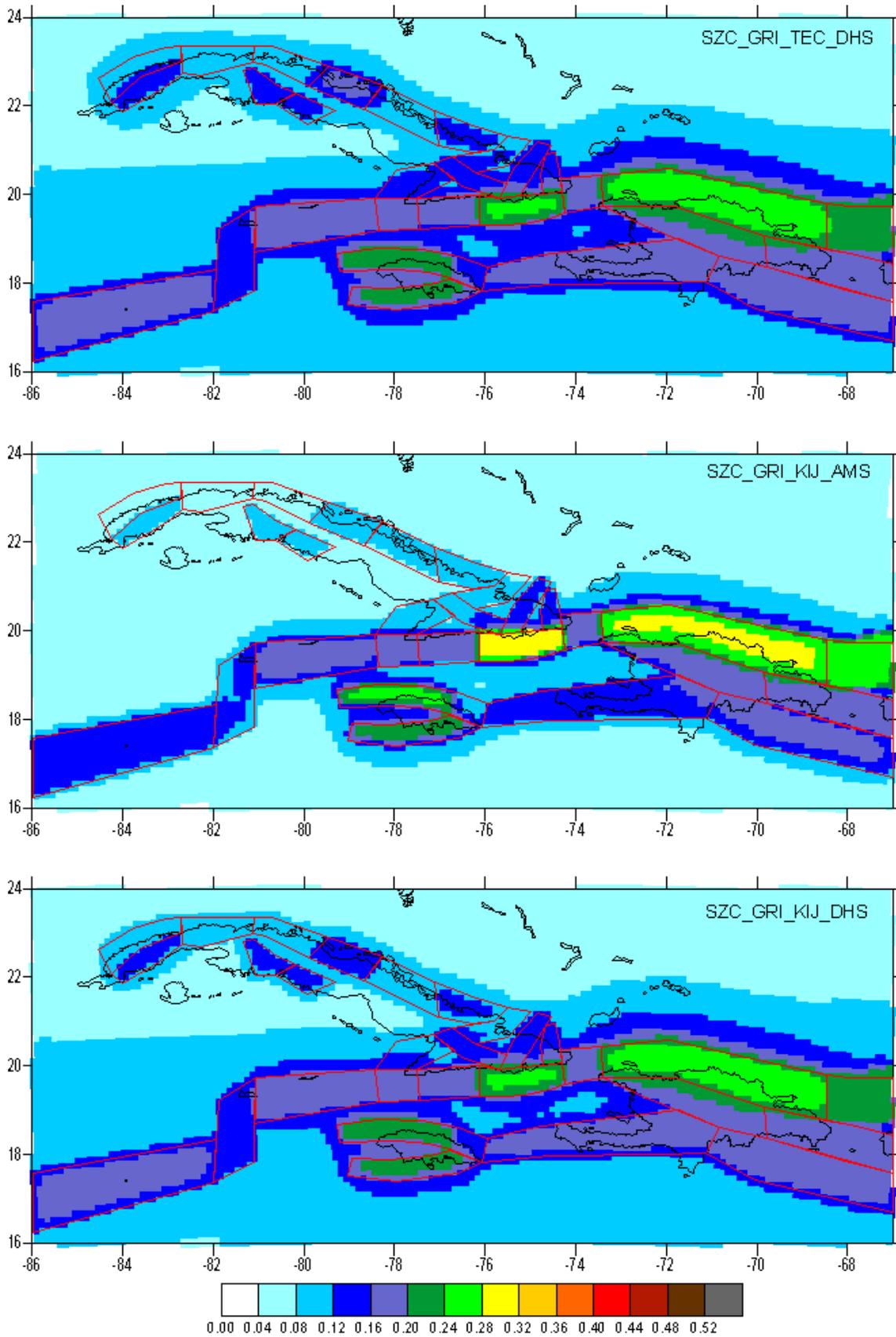
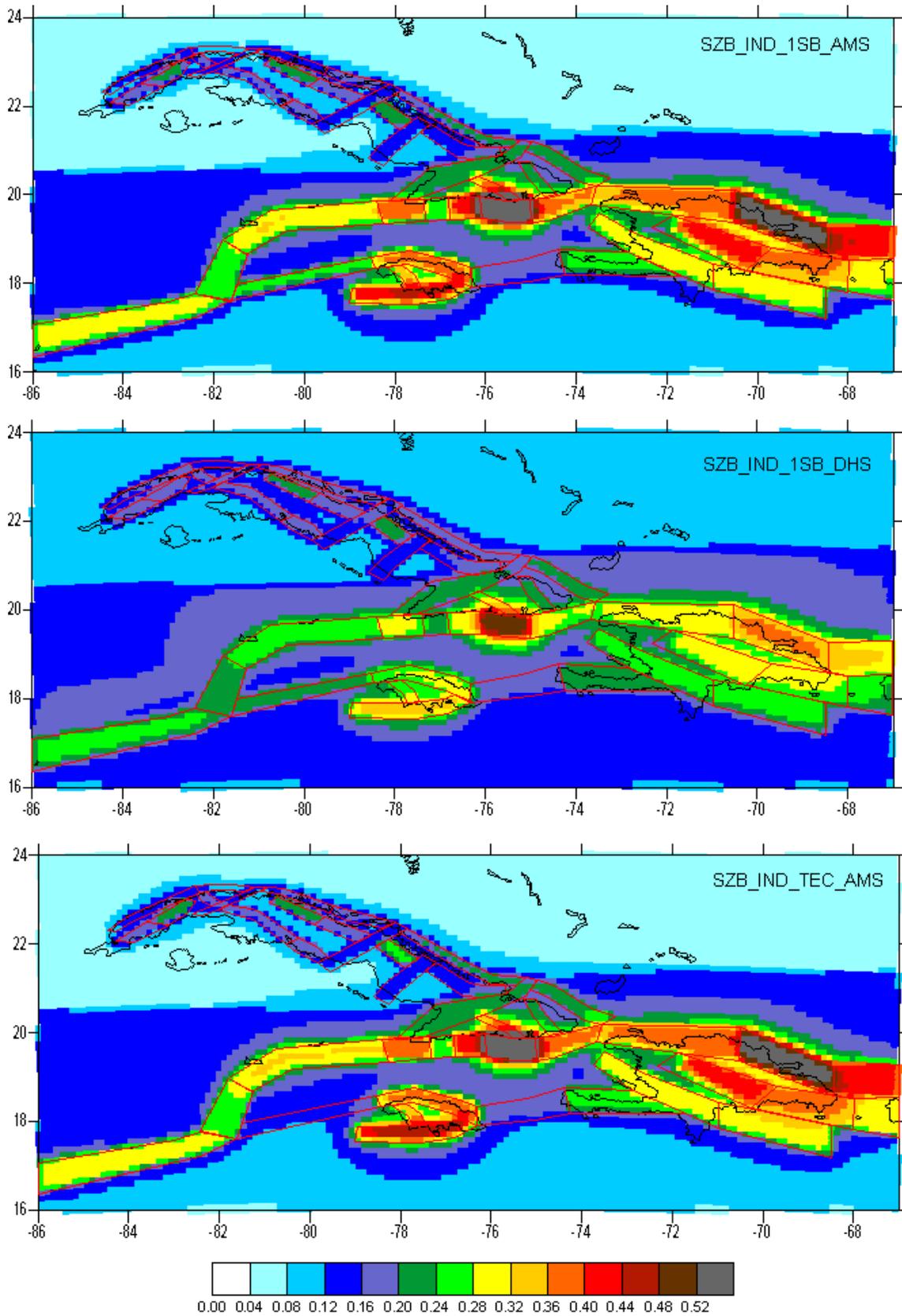


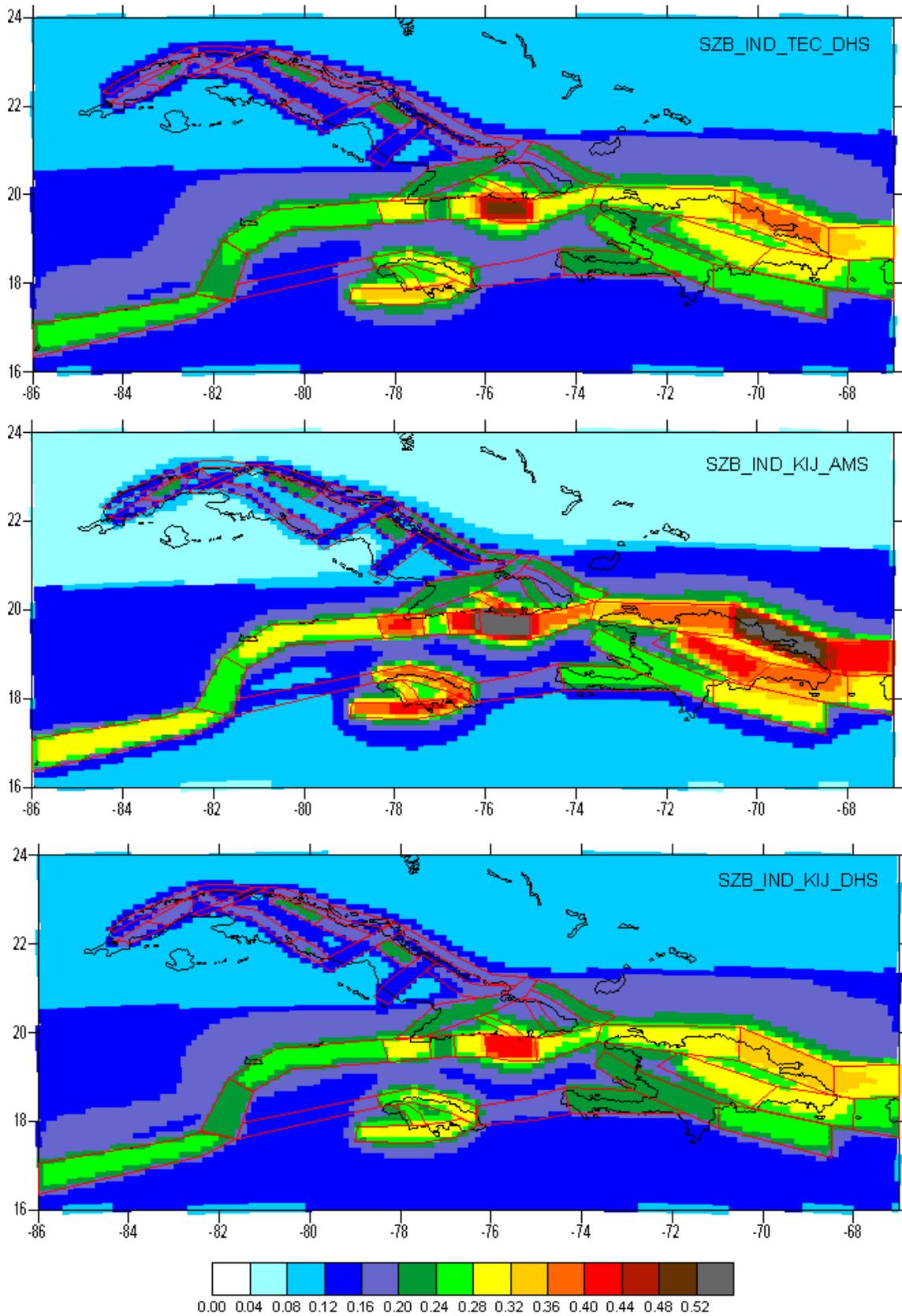
Fig. 4. Mapas de PGA en unidades de g para un período de retorno de 475 años considerando la desviación estándar de las leyes de atenuación (caso de roca). El código que aparece sobre los mapas representa la opción tomada en cada nodo del árbol lógico (figura 1.10).

- Nodo N5 – modelo de zonas sismogeneradoras (SZA: ZONA-A, SZB: ZONA-B y SZC: ZONA-C)
- Nodo N6 – parámetros del régimen sísmico (IND: frecuencias individuales, GRI: ajuste utilizando la relación Gutenberg – Richter)
- Nodo N7 – estimación de la Mmax [1SB: “one step beyond”, TEC: origen tectónico, KIJ: (Kijko y Graham, 1998)]
- Nodo N8 – modelos de atenuación [AMS: (Ambraseis, 1996) y DHS: (Dhale, 1995)]

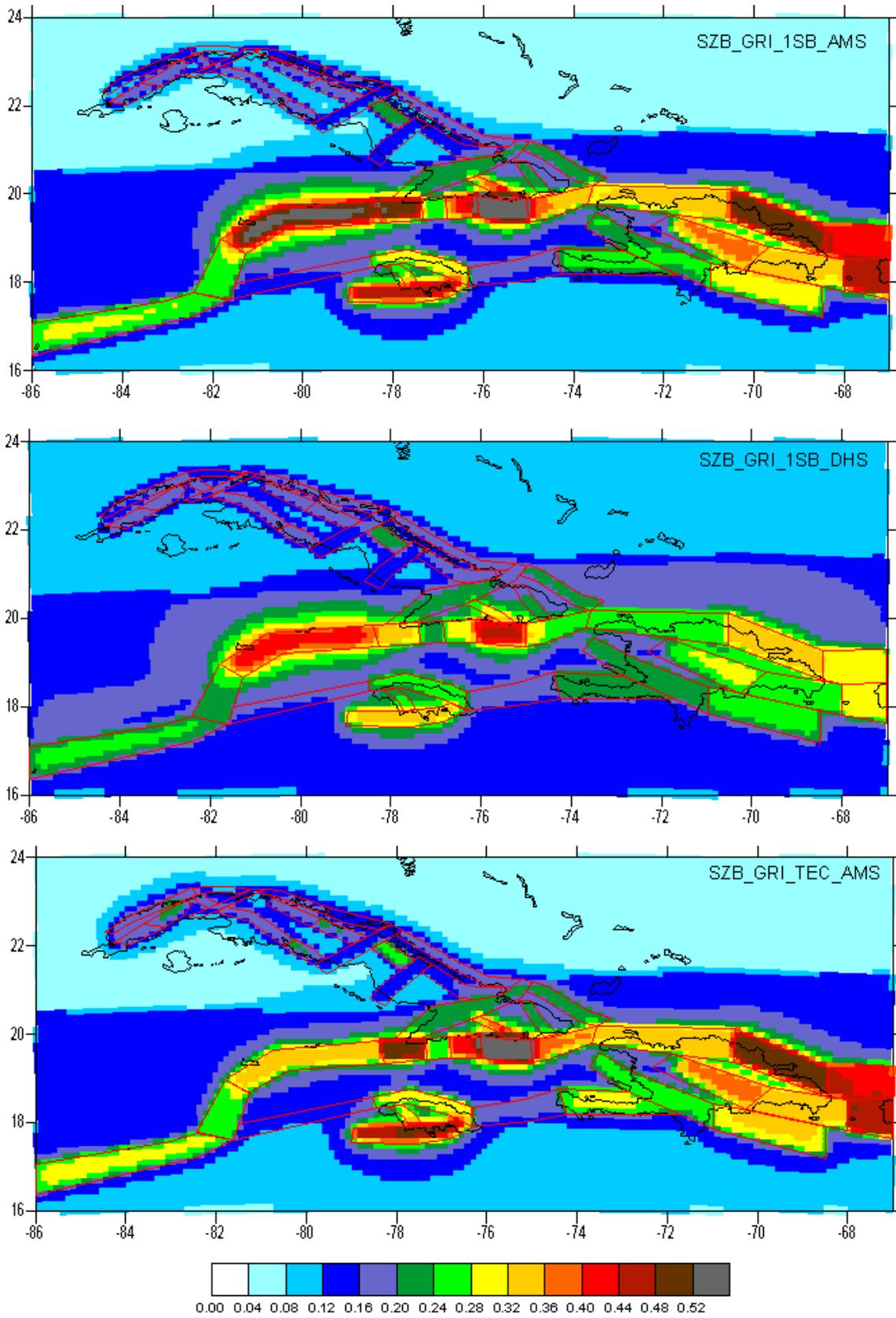
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



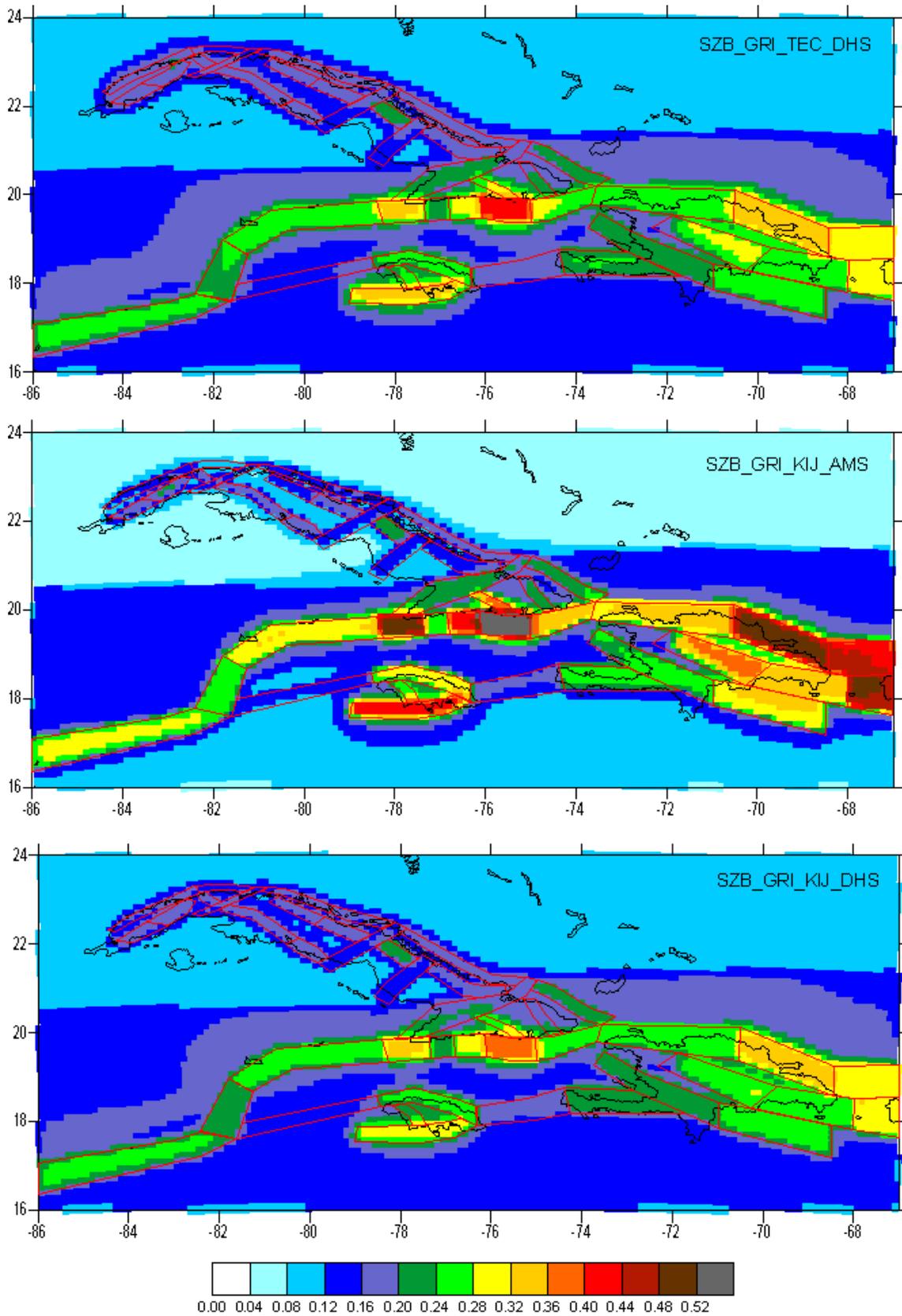
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



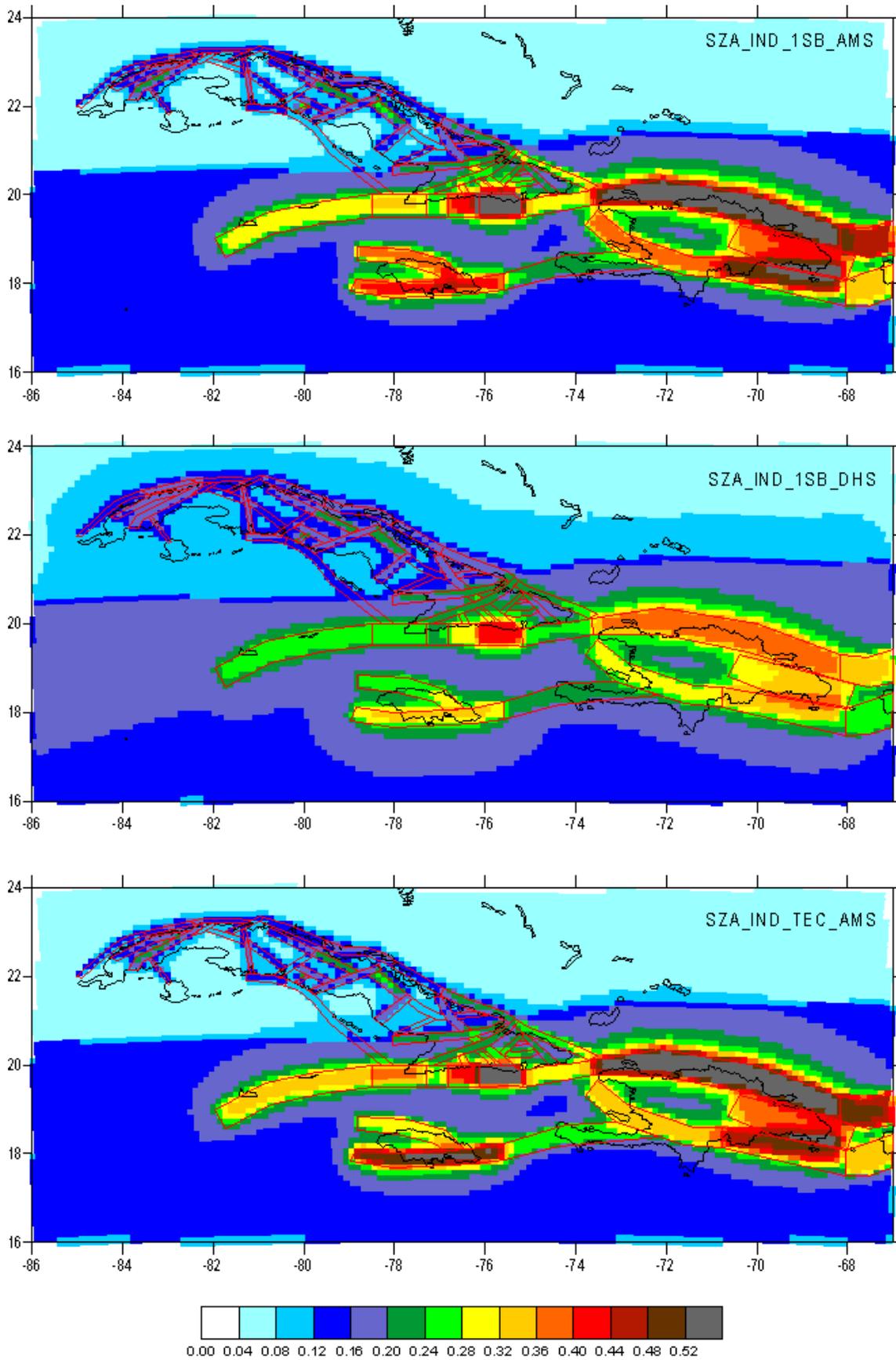
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



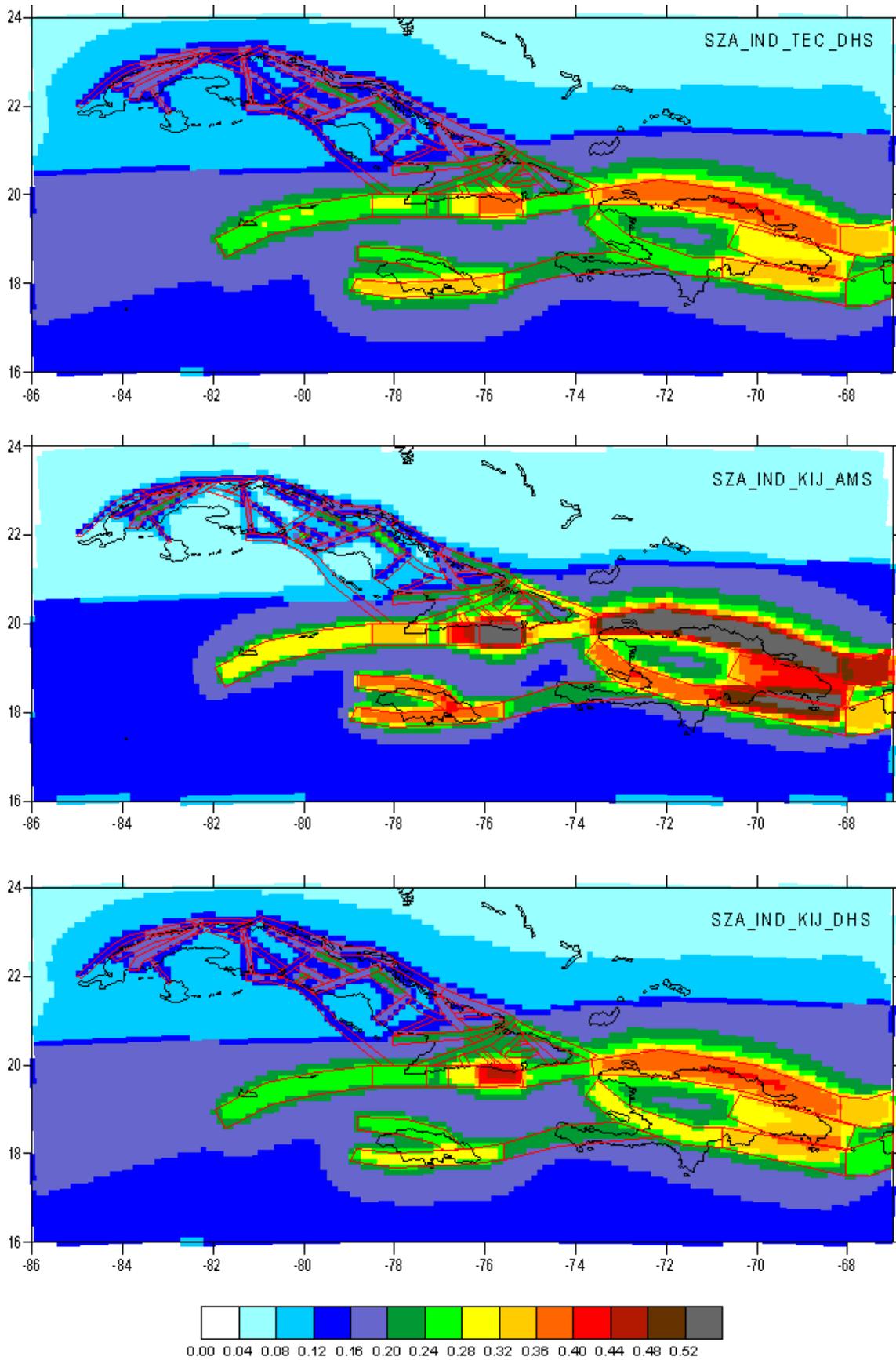
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



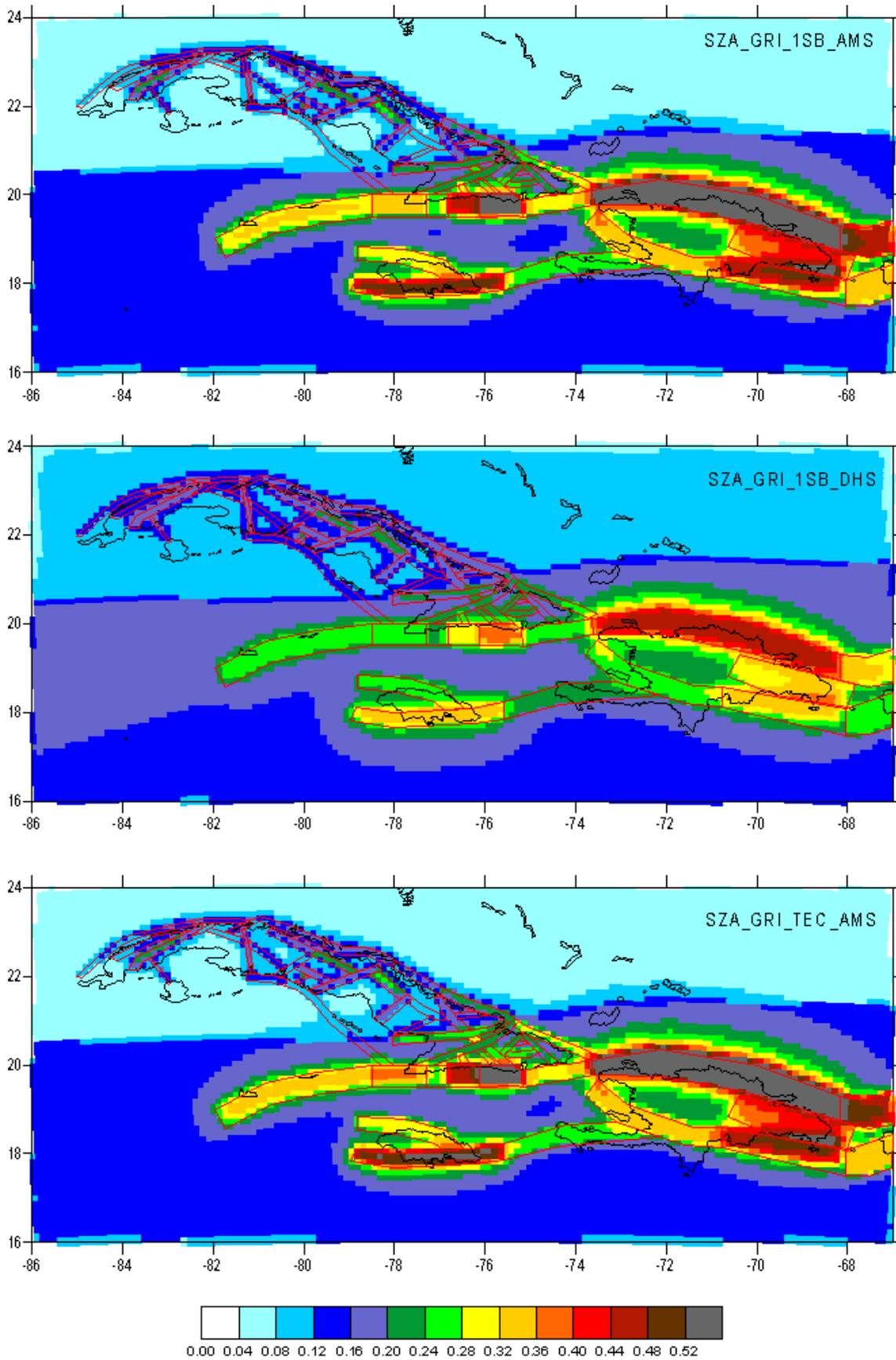
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



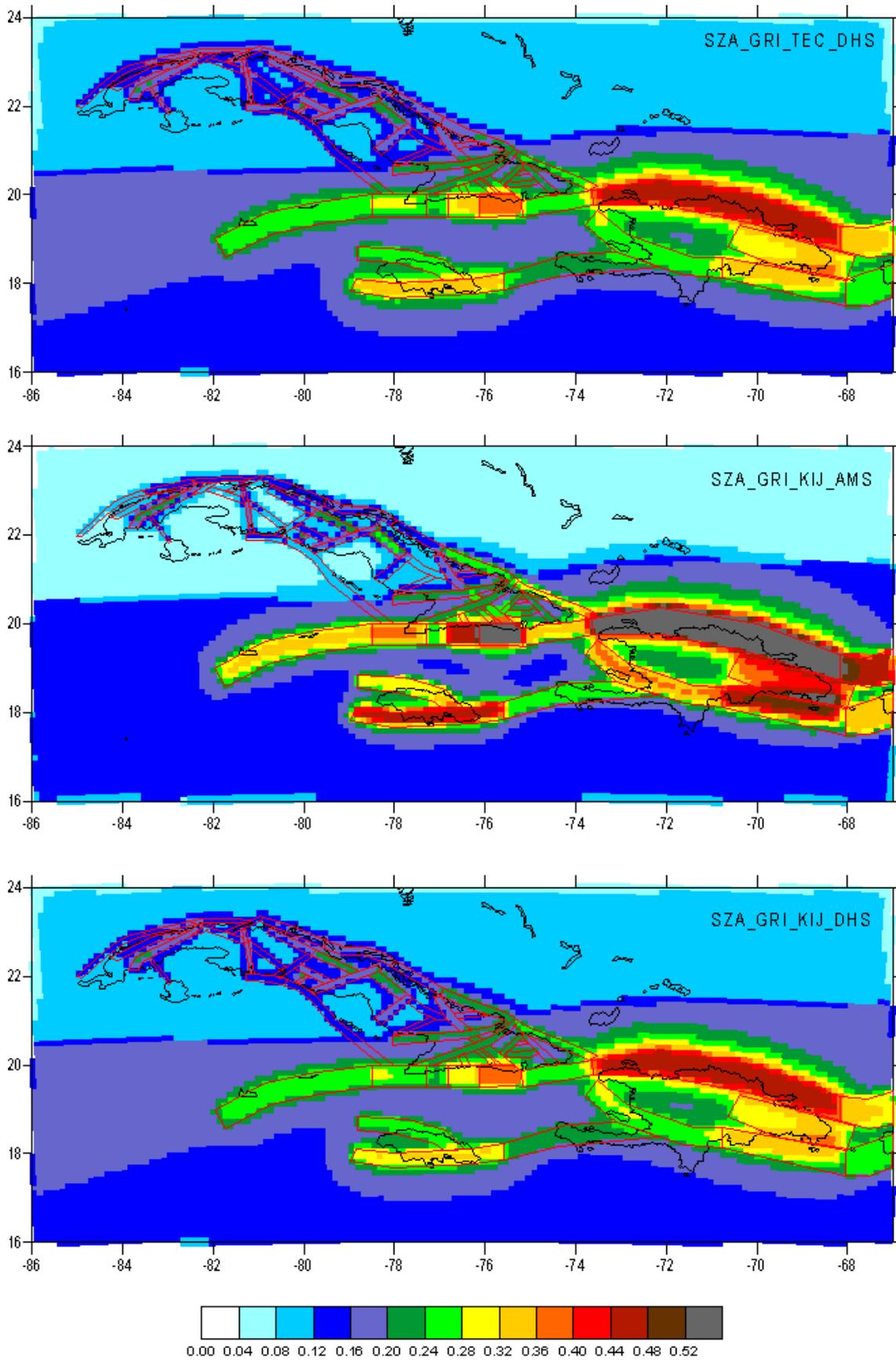
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



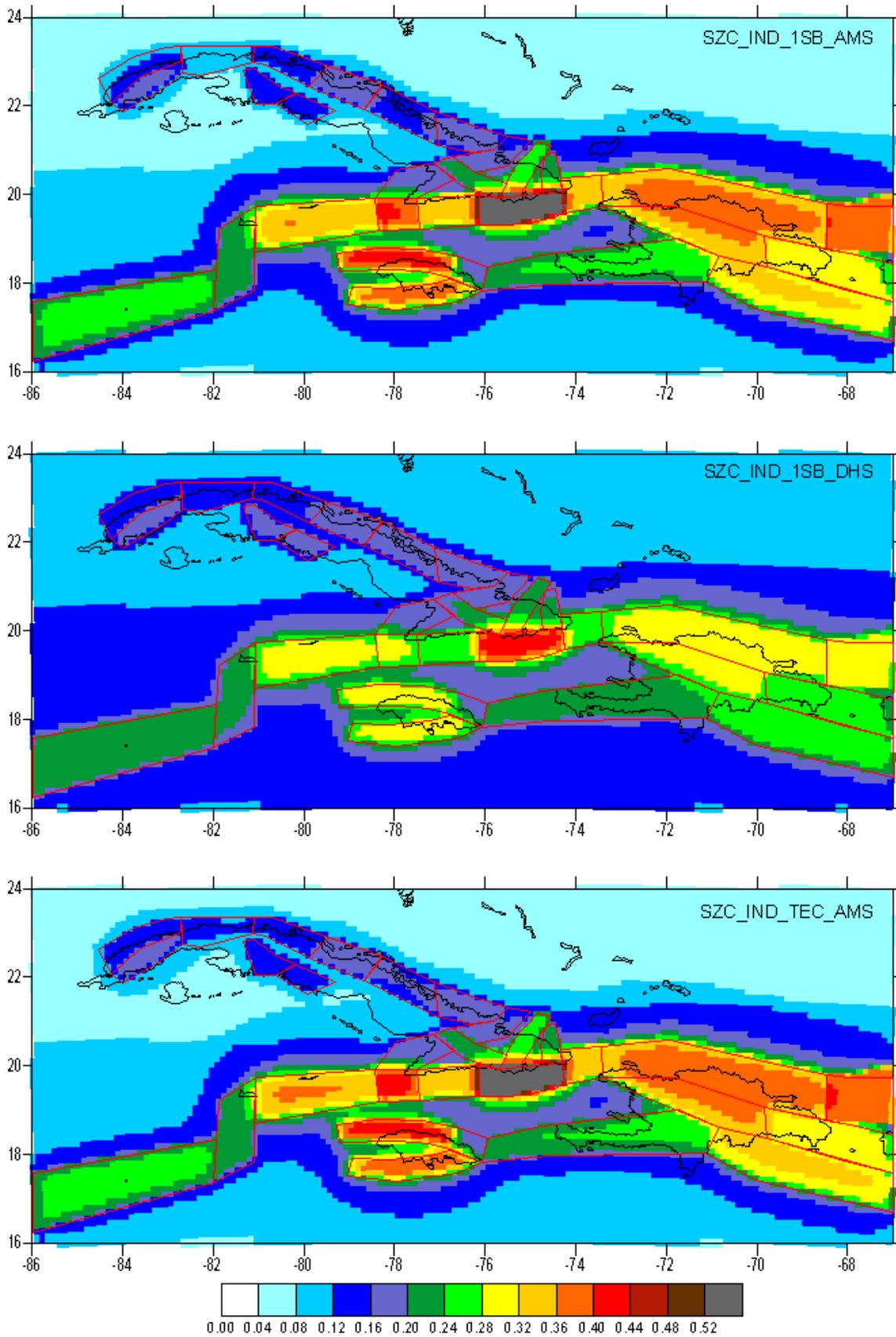
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



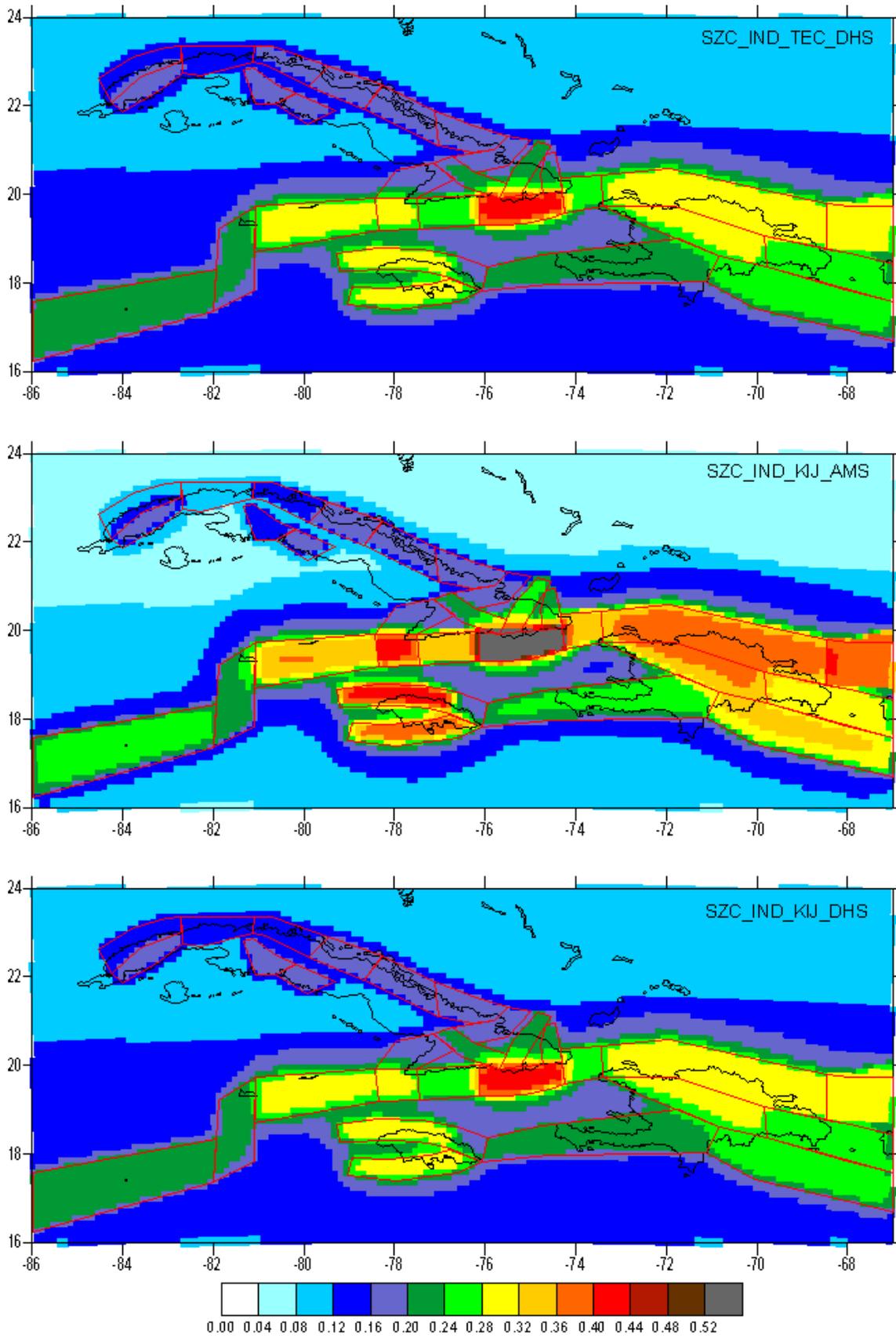
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



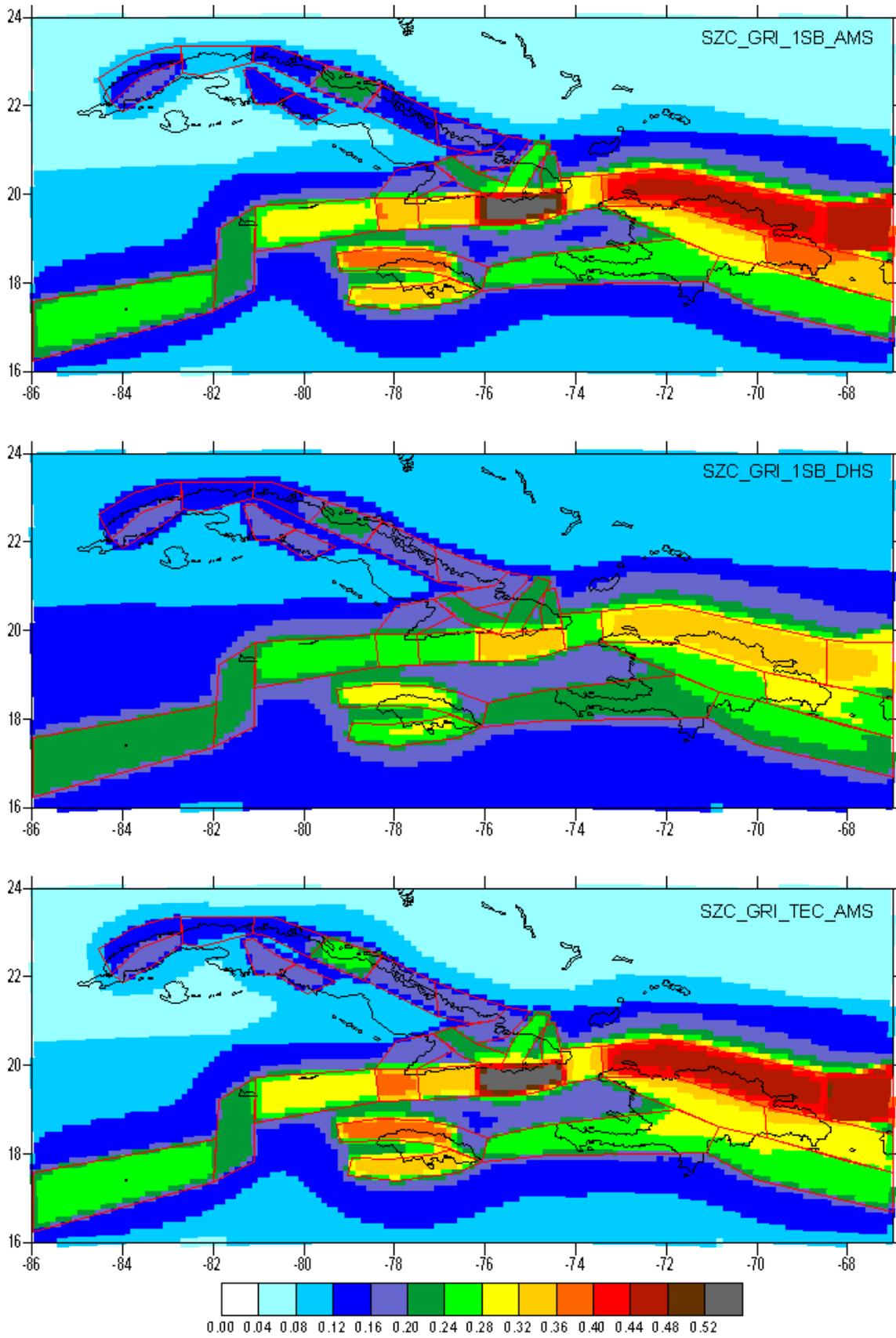
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



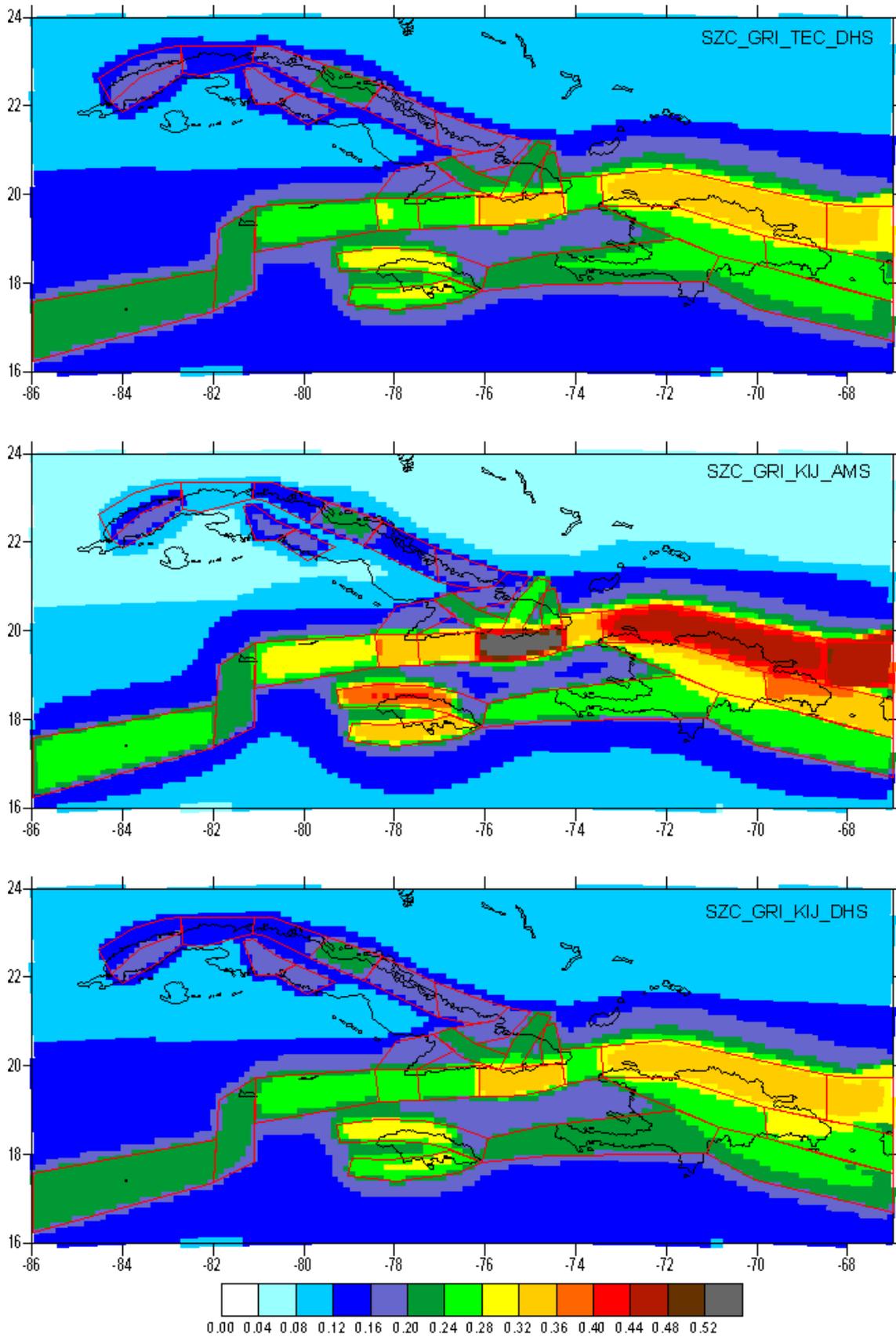
Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...



Anexo 5

Escala de intensidad sísmica MSK (tomada de Medvedev et al., 1965; Ad-hoc Panel, 1981)

Efectos que definen los grados de intensidad MSK

Los fenómenos sentidos por las personas y percibidos en su medio ambiente

Los daños producidos en las construcciones según sus diversos tipos.

Los cambios advertidos en la naturaleza

Tipos de construcciones

Tipo A: Con muros de mampostería en seco o con barro, de adobes, de tapial.

Tipo B: Con muros de fábrica de ladrillo, de bloques de mortero, de mampostería con mortero, de sillarejo, de sillería, entramados de madera.

Tipo C: Con estructura metálica o de hormigón armado.

Términos de cantidad

Los términos de cantidad utilizados en la definición de los grados de intensidad corresponden aproximadamente a los siguientes porcentajes:

Algunos.....5%

Muchos.....50%

La mayoría.....75%

Clasificación de los daños en las construcciones

Clase 1 Daños ligeros: Fisuras en los revestimientos, caída de pequeños trozos de revestimiento.

Clase 2 Daños moderados: Fisuras en los muros, caída de grandes trozos de revestimiento, caída de tejas, caída de pretilas, grietas en las chimeneas e incluso derrumbamientos parciales en las mismas.

Clase 3 Daños graves: Grietas en los muros, caída de chimeneas de fábrica o de otros elementos exteriores.

Clase 4 Destrucción: Brechas en los muros resistentes, derrumbamiento parcial, pérdida del enlace entre distintas partes de la construcción, destrucción de tabiques y muros de cerramiento.

Clase 5 Colapso: Ruina completa de la construcción.

Descripción de los grados de intensidad MSK

Grado I

La sacudida no es percibida por los sentidos humanos, siendo detectada y registrada solamente por los sismógrafos.

Grado II

La sacudida es perceptible solamente por algunas personas en reposo, en particular en los pisos superiores de los edificios.

Grado III

La sacudida es percibida por algunas personas en el interior de los edificios y solo en circunstancias muy favorables en el exterior de los mismos. La vibración percibida es semejante a la causada por

el paso de un camión ligero. Observadores muy atentos pueden notar ligeros balanceos de objetos colgados, mas acentuados en los pisos altos de los edificios.

Grado IV

El sismo es percibido por muchas personas en el interior de los edificios y por algunas en el exterior. Algunas personas que duermen se despiertan, pero nadie se atemoriza. La vibración es comparable a la producida por el paso de un camión pesado con carga. Las ventanas, puertas y vajillas vibran. Los pisos y muros producen chasquidos. El mobiliario comienza a moverse. Los líquidos contenidos en recipientes abiertos se agitan ligeramente. Los objetos colgados se balancean ligeramente.

Grado V

- a) El sismo es percibido en el interior de los edificios por la mayoría de las personas y por muchas en el exterior. Muchas personas que duermen se despiertan y algunas huyen. Los animales se ponen nerviosos. Las construcciones se agitan con una vibración general. Los objetos colgados se balancean ampliamente. Los cuadros golpean sobre los muros o son lanzados fuera de su emplazamiento. En algunos casos los relojes de péndulo se paran. Los objetos ligeros se desplazan o vuelcan. Las puertas o ventanas abiertas batien con violencia. Se vierten en pequeña cantidad los líquidos contenidos en recipientes abiertos y llenos. La vibración se siente en la construcción como la producida por un objeto pesado arrastrándose.
- b) En las construcciones de **tipo A** son posibles ligeros daños (**clase 1**)
- c) En ciertos casos se modifica el caudal de los manantiales.

Grado VI

- a) Lo siente la mayoría de las personas, tanto dentro como fuera de los edificios. Muchas personas salen a la calle atemorizadas. Algunas personas llegan a perder el equilibrio. Los animales domésticos huyen de los establos. En algunas ocasiones, la vajilla y la cristalería se rompen., los libros caen de sus estantes, los cuadros se mueven y los objetos inestables vuelcan. Los muebles pesados pueden llegar a moverse. Las campanas pequeñas de torres y campanarios pueden sonar.
- b) Se producen daños moderados (**clase 2**) en algunas construcciones de **tipo A**. Se producen daños ligeros (**clase 1**) en algunas construcciones de **tipo B** y en muchas de **tipo A**.
- c) En ciertos casos pueden abrirse grietas de hasta un centímetro de ancho en suelos húmedos. Pueden producirse deslizamientos en las montañas. Se observan cambios en el caudal de los manantiales y en el nivel de agua de los pozos.

Grado VII

- a) La mayoría de las personas se aterroriza y corre a la calle. Muchas tienen dificultad para mantenerse en pie. Las vibraciones son sentidas por personas que conducen automóviles. Suenan las campanas grandes.
- b) Muchas construcciones de **tipo A** sufren daños graves (**clase 3**) y algunas incluso destrucción (**clase 4**).
Muchas construcciones de **tipo B** sufren daños moderados (**clase 2**)
Algunas construcciones de **tipo C** experimentan daños ligeros (**clase 1**)
- c) En algunos casos se producen deslizamientos en las carreteras que transcurren sobre laderas con pendientes acusadas, se producen daños en las juntas de las canalizaciones y aparecen fisuras en muros de piedra.
Se aprecia oleaje en las lagunas y el agua se enturbia por remoción del fango. Cambia el nivel del agua de los pozos y el caudal de los manantiales. En algunos casos, vuelven a manar manantiales que estaban secos y se secan otros que manaban. En ciertos casos se producen derrames en taludes de arena o de grava.

Grado VIII

- a) Miedo y pánico general, incluso en las personas que conducen automóviles. En algunos casos se desgajan las ramas de los árboles. Los muebles, incluso los pesados, se desplazan o vuelcan. Las lámparas colgadas sufren daños parciales.
- b) Muchas construcciones de **tipo A** sufren destrucción (**clase 4**) y algunas colapso (**clase 5**). Muchas construcciones de **tipo B** sufren daños graves (**clase 3**) y algunas destrucción (**clase 4**). Muchas construcciones de **tipo C** sufren daños moderados (**clase 2**) y algunas graves (**clase 3**). En ocasiones se produce la rotura de algunas juntas de canalizaciones. Las estatuas y monumentos se mueven y giran. Se derrumban muros de piedra.
- c) Pequeños deslizamientos en las laderas de los barrancos y en las trincheras y terraplenes con pendientes pronunciadas. Grietas en el suelo de varios centímetros de ancho. Se enturbia el agua de los lagos. Aparecen nuevos manantiales. Vuelven a tener agua pozos secos y se secan pozos existentes. En muchos casos cambia el caudal y el nivel de agua de los manantiales y pozos.

Grado IX

- a) Pánico general. Daños considerables en el mobiliario. Los animales corren confusamente y emiten sus sonidos peculiares.
- b) Muchas construcciones de **tipo A** sufren colapso (**clase 5**). Muchas construcciones de **tipo B** sufren destrucción (**clase 4**) y algunas colapso (**clase 5**). Muchas construcciones de **tipo C** sufren daños graves (**clase 3**), y algunas destrucción (**clase 4**). Caen monumentos y columnas. Daños considerables en depósitos de líquidos. Se rompen parcialmente las canalizaciones subterráneas. En algunos casos, los carriles del ferrocarril se curvan y las carreteras quedan fuera de servicio.
- c) Se observa con frecuencia que se producen extrusiones de agua, arena y fango en los terrenos saturados. Se abren grietas en el terreno de hasta 10 centímetros de ancho y de más de 10 centímetros en las laderas y en las márgenes de los ríos. Aparecen además, numerosas grietas pequeñas en el suelo. Desprendimientos de rocas y aludes. Muchos deslizamientos de tierras. Grandes olas en lagos y embalses. Se renuevan pozos secos y se secan otros existentes-

Grado X

- b) La mayoría de las construcciones de **tipo A** sufren colapso (**clase 5**). Muchas construcciones de **tipo B** sufren colapso (**clase 5**). Muchas construcciones de **tipo C** sufren destrucción (**clase 4**) y algunas colapso (**clase 5**). Daños peligrosos en presas; daños serios en puentes. Los carriles de las vías férreas se desvían y a veces se ondulan. Las canalizaciones subterráneas son retorcidas o rotas. El pavimento de las calles y el asfalto forman grandes ondulaciones.
- c) Grietas en el suelo de algunos decímetros de ancho que pueden llegar a un metro. Se producen anchas grietas paralelamente a los cursos de agua. Deslizamientos de tierras sueltas en las laderas con fuertes pendientes. En los ribazos de los ríos y en laderas escarpadas se producen considerables deslizamientos. Desplazamientos de arenas y fangos en las zonas litorales. Cambio de nivel de agua en los pozos. El agua de canales y ríos es lanzada fuera de su cauce normal. Se forman nuevos lagos.

Grado XI

- b) Daños importantes en construcciones, incluso en las bien realizadas, en puentes, presas y líneas de ferrocarril. Las carreteras importantes quedan fuera de servicio. Las canalizaciones subterráneas quedan destruidas.
- c) El terreno queda considerablemente deformado tanto por desplazamientos horizontales como verticales y con anchas grietas. Muchos deslizamientos de terrenos y caídas de rocas.

Para determinar la intensidad de las sacudidas sísmicas se precisan investigaciones especiales.

Grado XII

- b) Prácticamente se destruyen o quedan gravemente dañadas todas las estructuras, incluso las subterráneas.
- c) La topografía cambia. Grandes grietas en el terreno con importantes desplazamientos horizontales y verticales. Caída de rocas y hundimientos en los escarpes de los valles, producidas en vastas extensiones. Se cierran valles y se transforman en lagos. Aparecen cascadas y se desvían los ríos.

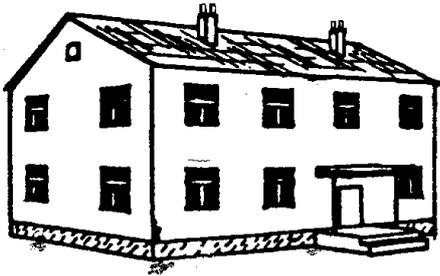
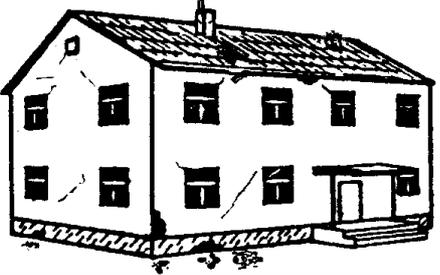
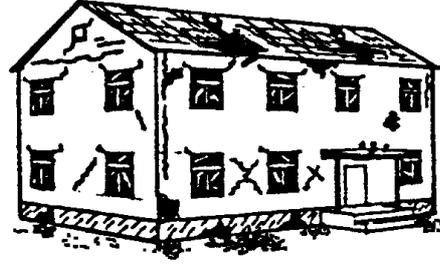
Anexo 6

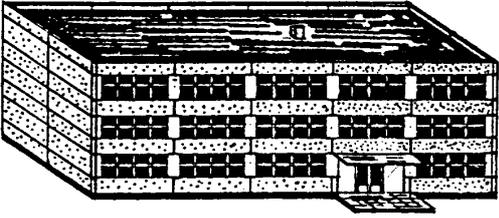
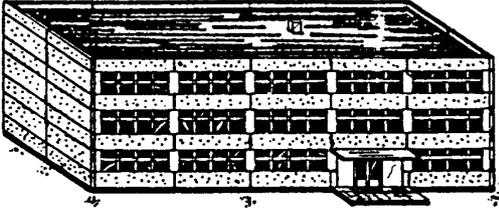
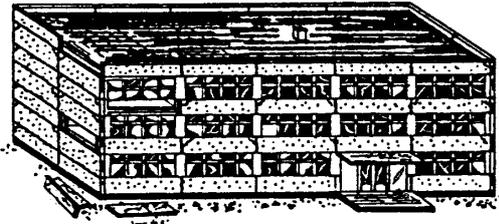
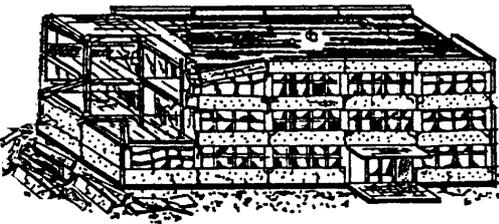
Escala EMS-98, edición en español. Tomado de (Grünthal, ed., 2003)

Diferenciación de estructuras (edificios) en clases de vulnerabilidad (Tabla de Vulnerabilidad)

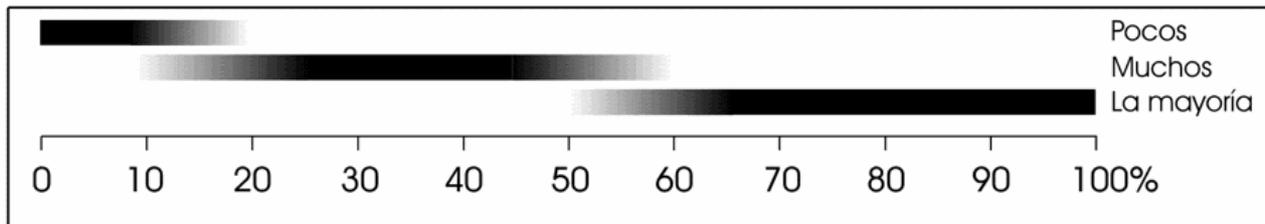
Tipo de Estructura		Clase de Vulnerabilidad					
		A	B	C	D	E	F
MAMPOSTERIA	Cantos rodados, rocas	○					
	Adobe (ladrillo de tierra)	○—					
	Roca simple	┆...○					
	Roca masiva		┆—○—┆				
	Sin refuerzo, con unidades de rocas manufacturadas		┆...○—┆				
	Sin refuerzo, con pisos de concreto reforzado			┆—○—┆			
	Reforzada o confinada				┆—○—┆		
CONCRETO REFORZADO	Marco sin diseño sismorresistente (DSR)			┆...—○—┆			
	Marco con nivel moderato de DSR			┆...—○—┆	┆—		
	Marco con alto nivel de DSR				┆...—○—┆	┆—	
	Muros sin DSR		┆...—○—┆				
	Muros con moderato nivel de DSR			┆...—○—┆			
	Muros con alto nivel de DSR				┆...—○—┆		
ACERO	Estructuras de acero				┆...—○—┆		
MADERA	Estructuras de madera			┆...—○—┆			

○ Clase más típica de vulnerabilidad; — Rango probable;
 Rango de casos menos probables, casos excepcionales

<i>Clasificación de daño a edificios de mampostería</i>	
	<p>Grado 1: Sin daño o daño leve (Sin daño estructural, daño no estructural leve)</p> <p>Grietas muy delgadas en muy pocos muros. Caída de pequeños pedazos de repello. Caída de rocas sueltas desde la parte alta de edificios en muy pocos casos.</p>
	<p>Grado 2: Daño moderado (daño estructural leve, daño no estructural moderado)</p> <p>Grietas en muchos muros. Caída de pedazos grandes de repello. Colapso parcial de chimeneas.</p>
	<p>Grado 3: Daño substancial a severo (daño estructural moderado, daño no estructural moderado)</p> <p>Grietas largas y extensas en casi todos los muros. Caída de tejas. Fractura de las chimeneas en la línea del techo; falla de elementos individuales no estructurales (particiones, tabicaciones).</p>
	<p>Grado 4: Daño muy severo (daño estructural severo, daño no estructural muy severo)</p> <p>Falla seria en muros; falla estructural parcial de techos. Falla de techos y pisos.</p>
	<p>Grado 5: Destrucción (daño estructural muy severo)</p> <p>Colapso o casi colapso total.</p>

Clasificación de daño a edificios de concreto reforzado	
	<p>Grado 1: Sin daño o daño leve (Sin daño estructural, daño no estructural leve)</p> <p>Grietas delgadas en el repello sobre miembros del marco o en la base de los muros. Fine cracks in partitions and infills.</p>
	<p>Grado 2: Daño moderado (daño estructural leve, daño no estructural moderado)</p> <p>Grietas en columnas y vigas de marcos y en muros estructurales. Grietas en particiones y en tabicaciones; caída de cubierta y repello quebradizo. Caída de mortero en las uniones de paneles</p>
	<p>Grado 3: Daño substancial a severo (daño estructural moderado, daño no estructural severo)</p> <p>Grietas en uniones de columnas y vigas; de marcos en la base y en las uniones de muros acoplados. Descascaramiento de cubierta de concreto. Torcedura de varillas de refuerzo. Grandes grietas en muros de particiones y</p>
	<p>Grado 4: Daño muy severo (daño estructural severo, daño no estructural muy severo)</p> <p>Grandes rajaduras en elementos estructurales con falla a compresión de concreto y fractura de barras de refuerzo. Ruptura de uniones de vigas reforzadas; inclinación de columnas. Colapso de algunas columnas o de un único piso superior.</p>
	<p>Grado 5: Destrucción (daño estructural muy severo)</p> <p>Colapso de planta baja o parte de edificios (e. g. alas).</p>

Definiciones de Cantidad



Definiciones de Grados de Intensidad

Arreglo de la escala:

- a. efectos en humanos
- b. efectos en objetos o en la naturaleza
(efectos en el suelo y falla de suelos se tratan especialmente en la sección 7)
- c. Daños a edificios

Comentario Preliminar:

Los grados de intensidad única pueden incluir también los efectos de vibración del grado de intensidad inferior respectivo, cuando estos efectos no se mencionan explícitamente.

I.No se ha sentido

- a. No sentido, aun en las condiciones más favorables
- b. Sin efecto
- c. Sin daño

II.Sentido apenas

- a. El temblor es sentido solo en situaciones aisladas (<1%) de los individuos en reposo y en una posición especialmente receptiva en el interior de un edificio o vivienda.
- b. Sin efecto
- c. Sin daño

III. Débil

- a. El temblor es sentido en el interior de viviendas y edificios por pocos. Personas en reposo sienten una vibración lenta o temblor leve.
- b. Objetos colgantes se mecen levemente.
- c. Sin daño.

IV. Observado Ampliamente

- a. El temblor es sentido por muchos en el interior y solo por pocos afuera de viviendas o edificios. Algunas personas se despiertan. El nivel de vibración no es alarmante. La vibración es moderada. Observadores sienten una leve vibración del edificio, dormitorio, cama, silla, etc.
- b. Porcelana, vasos, ventanas y puertas se traquetean. Objetos colgantes se mecen. Muebles livianos vibran notablemente en algunos casos. Piezas de madera crujen en algunos casos.
- c. Sin daño

V. Fuerte

- a. El temblor es sentido por casi todos en el interior y por pocos afuera de viviendas o edificios. Pocas personas se asustan y corren hacia fuera. Muchas personas se despiertan. Observadores sienten una fuerte vibración del edificio, dormitorio o muebles.

- b. Objetos colgantes se mecen considerablemente. Porcelana y vasos resuenan⁽⁸⁾. Pequeños objetos que son más pesados en su parte de arriba o bien objetos sostenidos deficientemente se pueden mover o caer. Puerta y ventanas se abren y se cierran. En algunos casos los marcos de ventanas se pueden quebrar. Los líquidos oscilan y se pueden derramar de contenedores llenos. Animales en interiores se inquietan.
- c. Daño de grado 1 en pocos edificios vulnerables de clases A y B.

VI. Daños leves

- a. El temblor es sentido por casi todos en el interior y por muchos afuera de viviendas o edificios. Algunas personas pierden el balance. Muchas personas se asustan y corren hacia afuera.
- b. Pequeños objetos estables pueden caerse y los muebles pueden ser desplazados. En algunos casos se pueden quebrar los platos y vasos. Los animales de corral se pueden asustar (aun los que yacen afuera).
- c. Daño de tipo 1 a muchos edificios de vulnerabilidad de clase A y B; pocos de clase A y B sufren daños de grado 2; muy pocos de la clase C sufren daños de grado 1.

VII. Daños

- a. La mayoría de las personas se asustan y tratan de correr hacia afuera. A muchos les cuesta mantenerse de pie, especialmente en los pisos altos.
- b. Los muebles son desplazados y los muebles pesados pueden volcarse. Se caen los objetos de los entrepaños. El agua es salpicada en los contenedores, tanques y piscinas.
- c. Muchos edificios vulnerables de clase A sufren daños de grado 3 y algunos de grado 4.
Muchos edificios vulnerables de clase B sufren daños de grado 2 y pocos de grado 3.
Pocos edificios vulnerables de clase C sufren daños de grado 2.
Pocos edificios vulnerables de clase D sufren daños de grado 1.

VIII. Daños Severos

- a. Mucha gente encuentra difícil mantenerse de pie, aun afuera.
- b. Los muebles pueden volcarse. Se caen los objetos tales como las televisiones, máquinas de escribir, etc. Las lápidas pueden desplazarse o caerse. Se pueden ver ondas en suelos muy suaves.
- c. Muchos edificios vulnerables de clase A sufren daños de grado 4 y algunos de grado 5.
Muchos edificios vulnerables de clase B sufren daños de grado 3 y pocos de grado 4.
Muchos edificios vulnerables de clase C sufren daños de grado 2 y pocos de grado 3.
Pocos edificios vulnerables de clase D sufren daños de grado 2.

IX. Destructivo

- a. Pánico general. La gente se cae bruscamente al suelo.
- b. Muchos monumentos y columnas se caen o se retuercen.
- c. Muchos edificios vulnerables de clase A sufren daños de grado 5.
Muchos edificios vulnerables de clase B sufren daños de grado 4 y pocos de grado 5.
Muchos edificios vulnerables de clase C sufren daños de grado 3 y pocos de grado 4.
Muchos edificios vulnerables de clase D sufren daños de grado 2 y pocos de grado 3.
Pocos edificios vulnerables de clase E sufren daños de grado 2.

X. Muy Destructivo

- c. La mayoría de los edificios vulnerables de clase A sufren daños de grado 5.
Muchos edificios vulnerables de clase B sufren daños de grado 5.

Muchos edificios vulnerables de clase C sufren daños de grado 4 y pocos de grado 5.
Muchos edificios vulnerables de clase D sufren daños de grado 3 y pocos de grado 4.
Muchos edificios vulnerables de clase E sufren daños de grado 2 y pocos de grado 3.
Pocos edificios vulnerables de clase F sufren daños de grado 2.

XI. Devastador

c. La mayoría de los edificios vulnerables de clase B sufren daños de grado 5.
Muchos edificios vulnerables de clase C sufren daños de grado 4 y pocos de grado 5.
Muchos edificios vulnerables de clase D sufren daños de grado 4 y pocos de grado 5.
Muchos edificios vulnerables de clase E sufren daños de grado 3 y pocos de grado 4.
Muchos edificios vulnerables de clase F sufren daños de grado 2 y pocos de grado 3.

XII. Totalmente Devastador

c. Todos los edificios vulnerables de clases A, B y prácticamente todos los de clase C quedan destruidos.
La mayoría de los edificios de las clases D, E y F quedan destruidos.
Los efectos del terremoto han alcanzado los efectos máximos concebibles.

Anexo 7

Formulación general del cálculo de afectaciones a la vida y la salud de las personas por los terremotos

Definiciones:

Sean: G – grado de daño, definido discreto desde 0 (sin daños) hasta 5 (ver discusión en el texto)

T – tipo constructivo o clase de vulnerabilidad, 3 casos en la escala MSK (A, B, C) y 6 casos en la escala EMS (A, B, C, D, E, F)

α – efecto sísmico: parámetro usado para caracterizar el peligro sísmico; puede ser intensidad macrosísmica, valores picos del movimiento del terreno, características espectrales, etc.

I – intensidad sísmica, definida en valores discretos de 1 a 12, pero que en este tipo de trabajo se limita al rango 5-12 por no provocar daños de consideración los grados de intensidad inferiores.

N – número total de personas en el área de estudio

$N(T)$ – número de personas en construcciones de tipo “ T ” dentro del área de estudio

$MPD=MPD(G|T, \alpha)$ – matriz de probabilidad de daño

La matriz de probabilidad de daño MPD representa la probabilidad de que ocurra un daño de grado G , en una construcción de tipo o clase de vulnerabilidad T , si ocurre un terremoto con efecto α . Es la base de todos los cálculos que se realizan para las afectaciones a la vida y la salud de las personas por los terremotos. En las fórmulas 4.2 - 4.19 se han simbolizado por los coeficientes D_{TG} , obviando por simplicidad la dependencia respecto al efecto, en ese caso, la intensidad del terremoto.

Probabilidades:

$p(T) = \frac{N_T}{N}$ - probabilidad de que una persona esté en una construcción de tipo o clase de vulnerabilidad T al momento de ocurrencia del terremoto. Depende fuertemente de la hora del día y del día de la semana.

$p(m|G, T)$ - probabilidad de que una persona resulte muerta en una edificación de tipo o clase de vulnerabilidad T , si ocurre un grado de daño G

$p(h|G,T)$ - probabilidad equivalente de resultar herida, igualmente se definen las probabilidades $p(h^{S1}|G,T)$, $p(h^{S2}|G,T)$ y $p(h^{S3}|G,T)$ para las 3 categorías de heridos (S1, S2, S3) definidas en el texto (ver fórmula 4.20)

Estas últimas probabilidades son los otros coeficientes básicos para el cálculo de las afectaciones a la vida y la salud humanas que deben ser estimadas experimentalmente [en el texto se han simbolizado como (a, b, c, e, f, g) para el caso $\alpha=I$]

$p(m|T,\alpha)$, $p(h|T,\alpha)$ - probabilidad de que una persona resulte muerta o herida en una edificación de tipo o clase de vulnerabilidad T, para un efecto α , cualquiera que sea el grado de daño. Se obtiene sumando las probabilidades para cada grado de daño:

$$p(m|T,\alpha) = \sum_G p(m|G,T) \cdot MPD(G|T,\alpha) \quad (4.a.1)$$

$$p(h|T,\alpha) = \sum_G p(h|G,T) \cdot MPD(G|T,\alpha) \quad (4.a.2)$$

$p(m|\alpha)$, $p(h|\alpha)$ - probabilidad de que una persona resulte muerta o herida, para un efecto α , cualesquiera que sean el tipo de construcción o la clase de vulnerabilidad donde se encuentre y el grado de daño que ésta sufra.

$$p(m|\alpha) = \sum_T p(T) \cdot p(m|T,\alpha) = \sum_T p(T) \cdot \sum_G p(m|G,T) \cdot MPD(G|T,\alpha) \quad (4.a.3)$$

$$p(h|\alpha) = \sum_T p(T) \cdot p(h|T,\alpha) = \sum_T p(T) \cdot \sum_G p(h|G,T) \cdot MPD(G|T,\alpha) \quad (4.a.4)$$

Personas afectadas por un terremoto que produzca un efecto α

El número total de muertos y heridos en el área de estudio, si ocurren sacudidas con un valor de efecto α , se obtiene multiplicando la probabilidad de que una persona resulte muerta o herida por el número total de personas:

$$N(m|\alpha) = N \cdot p(m|\alpha) = \sum_T N(T) \cdot \sum_G p(m|G,T) \cdot MPD(G|T,\alpha) \quad (4.a.5)$$

$$N(h|\alpha) = N \cdot p(h|\alpha) = \sum_T N(T) \cdot \sum_G p(h|G,T) \cdot MPD(G|T,\alpha) \quad (4.a.6)$$

Las fórmulas 4.a.5 y 4.a.6 son de carácter general y engloban las presentadas en el texto como 4.2-4.19 para el caso $\alpha=I$.

Número total de personas afectadas por un terremoto

Cuando se quiere calcular el número total de personas afectadas por un terremoto, hay que tomar en consideración toda el área de influencia del terremoto, esto es, todos los valores del efecto α , estando α dentro del rango de valores que pudieran ocasionar daños de al menos tercer grado (G3). Esto se ve mucho mejor en el caso de que el efecto se mida en intensidad sísmica, en cuyo caso se toma para el estudio la zona abarcada por las isosistas de las intensidades mayores, a partir de cuando comiencen a afectar a las construcciones (generalmente se toman las isosistas de $I \geq V$).

$$N(m) = \sum_I N(m | I) \quad (4.a.7)$$

$$N(h) = \sum_I N(h | I) \quad (4.a.8)$$

donde $N(m|I)$ y $N(h|I)$ se obtienen evaluando 4.a.5 y 4.a.6 para $\alpha = I$. Las fórmulas 4.a.2, 4.a.4, 4.a.6 y 4.a.8 también son válidas para las 3 categorías de heridos (S1, S2, S3) mencionados, sólo hay que sustituir h por h^{S1} , h^{S2} o h^{S3} .

Anexo 8

Programa “perdidas”. Manual de usuario

Introducción

La metodología para el cálculo de pérdidas humanas (muertos y heridos), descrita en el epígrafe 2.1, parte de la base de que para calcular las pérdidas ante el caso de ocurrencia de un terremoto fuerte se tiene que conocer la cantidad de personas que se encuentra en cada tipo de edificación (entendiéndose como tal el tipo constructivo según una escala de intensidades macrosísmicas). Esta información se le introduce al programa, se selecciona el grado de intensidad del terremoto esperado y el programa dará los estimados de las pérdidas en todas las variantes posibles. El programa permite reconstruir el escenario de una ciudad o región dividiendo la misma en sectores, que pueden ser de dimensión grande o pequeña, donde para cada sector se fija el valor de intensidad sísmica esperado. Debe tenerse presente que el uso de una escala macrosísmica para evaluar los efectos de un terremoto siempre tiene implícito el uso de una estadística; nótese que se usan conceptos indefinidos como “muchos”, “pocos”, “algunos”, etc.. Puede ocurrir que luego de un terremoto fuerte permanezcan en pie construcciones de baja calidad mientras que colapsan otras de buena calidad. Los grados de intensidad se determinan analizando los efectos sobre zonas de dimensiones espaciales relativamente grandes. Por tanto, la división en sectores para este análisis (“pronóstico de pérdidas”) no puede llevarse hasta dimensiones muy pequeñas y esperar obtener resultados precisos para cada uno de dichos sectores. Todos los cálculos de fórmulas basadas en parámetros de una escala de intensidad y coeficientes empíricos son más confiables según sea mayor la región analizada. Así por ejemplo, si dividimos una ciudad como Santiago de Cuba en 10 sectores, tendremos un buen estimado para la ciudad como un todo, un estimado algo menos confiable para cada uno de los sectores por separado, y mucho menos confiable si particularizamos por manzana en cada uno de los sectores.

Una vez puntualizada la limitación de esta metodología para el cálculo de pérdidas pasaremos a describir el programa y su forma de uso.

Descripción del programa

El programa está escrito en lenguaje FORTRAN y su operación se realiza en línea de comandos. Esto es, al iniciarse el programa se abre una ventana, se hacen algunas preguntas y el programa se ejecuta. Una de esas preguntas permite introducir los datos de forma interactiva (el programa va preguntando por cada dato que es necesario, y da la oportunidad de revisar a intervalos). Esta variante, que nosotros no recomendamos, es útil para aquellos que no gustan de preparar tablas de datos.

En el programa se encuentran todos los coeficientes necesarios para calcular las pérdidas humanas (muertos y heridos), así como las personas sin viviendas. Estos coeficientes corresponden a los elementos de las 4 matrices de probabilidad de daño (MPD) presentadas en el epígrafe 2 (tablas 2.1 - 2.4) y a los del número de muertos y heridos en función del grado de daño también presentadas en dicho epígrafe (tablas 2.5 - 2.6). Los cálculos se realizan for las fórmulas genéricas:

$$N(m|I) = \sum_T N(T) \cdot \sum_G p(m|G,T) \cdot MPD(G|T,I) \quad (1)$$

$$N(h|I) = \sum_T N(T) \cdot \sum_G p(h|G,T) \cdot MPD(G|T,I) \quad (2)$$

donde $MPD(G|T,I)$ es la matriz de probabilidad de daño, cuyos elementos corresponden a la probabilidad de que ocurra un grado de daño G , en una construcción de tipo T , que sufre los efectos

de un terremoto de grado I, mientras que $p(h|G,T)$ [$p(m|G,T)$] es la probabilidad de que una persona resulte herida (muerta) en una construcción de tipo T que sufre un grado de daño G. Finalmente, $p(h|I)$ [$p(m|I)$] es la probabilidad de que una persona resulte herida (muerta) durante un terremoto de grado I mientras que $N(T)$ es el número total de personas que se encuentran en construcciones de tipo T, siendo $N(h|I)$ [$N(m|I)$] el número total de heridos (muertos) si ocurre un terremoto de grado I. La fórmula para heridos puede ser dividida en varias correspondientes a diferentes niveles de gravedad. El tratamiento probabilístico general del problema se presenta en el anexo 7.

a) Entrada de datos

Los datos que requiere este programa son:

- Identificación de la ciudad, barrio o sector para el que se calculan las pérdidas humanas
- Intensidad del terremoto que se espera
- Tipo de escala usada para clasificar las construcciones (dos posibles - MSK y EMS)
- Cantidad de total de personas en cada tipo constructivo. Mientras mejor sea la valoración de este parámetro, mejores serán los estimados de las pérdidas

Existen dos formas de introducirle los datos al programa

- interactiva
- mediante ficheros de datos

la selección entre ambas variantes es lo primero que se realiza al ejecutar el programa, respondiendo a una pregunta simple. La variante interactiva no requiere explicación; una vez seleccionada ésta, el propio programa va guiando al usuario sobre los datos que deben ser introducidos. Permite una verificación a intervalos de los datos introducidos para corregir posibles errores. Una vez finalizado el proceso de introducción de datos el programa realiza los cálculos.

La introducción de los datos mediante ficheros tiene dos variantes:

- fichero secuencial con un dato por línea
- fichero en forma de tablas

en ambos casos se utiliza como fichero primario de entrada uno denominado "perdidas.dat". Veamos un ejemplo de este fichero:

Tabla 1. Ejemplo de fichero de entrada "perdidas.dat"

```
#-----Datos para programa perdidas-----
Santiago de Cuba           : Nombre de la ciudad
#----- Selección de la escala. La MSK solo considera 3 tipos de edificaciones,
#----- mientras que la EMS clasifica las construcciones en 5 tipos-----
1                           : Escala a utilizar (0 - MSK, 1 - EMS)
#---Para la escala MSK toda la población estará en edificaciones de tipos A, B y C ----
#---Para la escala EMS la población estará en edificaciones de tipos A, B, C, D y E----
# -----Tipo de análisis a relizar (puntual o distribuido espacialmente)-----
# Para el caso puntual sólo se tiene una intensidad correspondiente a toda la ciudad o
# región; en el caso distribuido se tienen varios valores de intensidad correspondientes
# a diferentes manzanas,barrios, distritos, municipios,etc. Llamemos a estos componentes
# "bloques"-----
0                           :(0 - caso puntual, >1 - numero de "bloques",
#                           : 1 - lectura en fichero independiente para
#                           : caso de varios bloques y datos preparados en
#                           : forma de tablas)
# La información que sigue se repetirá para cada uno de los bloques a analizar
# -----inicio de bloque o caso puntual-----
#                           : nombre del bloque (en blanco para caso puntual)
#----- Se debe definir cual es la intensidad sísmica esperada -----
7                           : Intensidad sísmica del terremoto
#----- Distribución de la población por tipo de edificación-----
#  A      B      C      D      E      :Tipo de edificación
100000 100000 100000 100000 100000 :Cantidad de personas en cada tipo (formato libre)
```

```
#-----
#Notas:
# 1) Las líneas que comienzan con el símbolo de número (#) son comentarios. Se pueden
#     eliminar o añadir otras según se desee
# 2) Debe tener cuidado al colocar los datos, siguiendo el orden de este ejemplo. En
#     el caso del nombre de la ciudad o bloque, no debe exceder de 35 caracteres, y el
#     comentario de la derecha siempre debe situarse después de la columna 40
# 3) Préstese especial atención a la clasificación de las construcciones. Si se
#     clasifican en A, B y C debe ponerse un 0 en la selección de la escala para
#     garantizar el uso de la la escala MSK. Si se clasifican en A, B, C, D y E debe
#     ponerse un 1 para garantizar el uso de la la escala EMS
# 4) En la selección del caso a analizar, si se pone 1 la lectura se transfiere a un
#     fichero adicional "perdidas.tab" que contiene los datos de los bloques en forma
#     de tabla
```

Este fichero tiene una forma muy peculiar. Las líneas con datos se entremezclan con las que sólo tienen comentarios (comenzando con un “#” en la primera columna. Durante la ejecución se saltan esas líneas, leyéndose solamente las líneas que traen información útil). La cantidad de líneas de comentarios se puede variar a voluntad. El usuario puede escribir todas las explicaciones que desee, teniendo cuidado de comenzar cada línea de comentarios con un “#”. Así por ejemplo, el fichero de la tabla 1 tiene los datos siguientes solamente:

```
Santiago de Cuba           → Nombre de la ciudad
1                           → Escala a utilizar (0 - MSK, 1 - EMS)
0                           →(0 - caso puntual, >1 - numero de "bloques",
                           → nombre del bloque (en blanco para caso puntual)
7                           → Intensidad sísmica del terremoto
```

Existe una posibilidad de utilizar otro tipo de fichero de entrada, y es en forma tabulada. Para ello en la tercera línea con información útil se sitúa un “1”. Esto hace que se transfiera el control a otro fichero “perdidas.tab” que contiene la información tabulada. En la tabla 2 se presenta el fichero “perdidas.dat” que produce la transferencia de control, y en la tabla 3 se presenta un ejemplo de fichero “perdidas.tab”. La ciudad o región puede ser dividida en partes que denominamos bloques, y los datos para cada “bloque” se introducen por separado.

Tabla 2. Caso de fichero de entrada “perdidas.dat” que transfiere el proceso de lectura al fichero “perdidas.tab”

```
# Sólo son necesarias 3 líneas, con el nombre de la ciudad o región, el tipo de escala
# a utilizar y la indicación de paso al fichero "perdidas .tab"
Santiago de Cuba           : Nombre de la ciudad
1                           : Escala a utilizar (0 - MSK, 1 - EMS)
2                           : 1 - lectura de datos de fichero "perdidas.tab"
```

Tabla 3. Ejemplo de fichero de entrada “perdidas.tab”

```
# Fichero con datos para calcular las pérdidas en forma de tabla. Es muy útil
# cuando la información se tiene en un SIG. La forma de colocar los datos es la siguiente
2                           : numero de bloques
# tabla con población, intensidad y nombre de bloques en formato libre
# [pobla(X) es la población en construcciones de tipo X]:
# pobla(A) pobla(B) pobla(C) pobla(D) pobla(E) intensidad "nombre de bloque"
```

```
100000 100000 100000 100000 100000 7 qq-1
100000 100000 100000 100000 100000 8 qq-2
```

b) Ejecución del programa

La ejecución del programa es inmediata a la lectura de datos. Los resultados se imprimen en pantalla, y pueden ser analizados directamente. Además se imprime un fichero denominado “perdidas.res” que contiene los datos iniciales, los resultados del cálculo y los coeficientes de las MPD y de las probabilidades de muertos/heridos por grado de daño utilizados. Al iniciarse, el programa busca un fichero de este nombre; si existe, le da la opción de sobrescribirlo, o si no, de salir del programa para guardarlo con otro nombre.

Tanto para el caso de escala MSK como EMS se dispone de dos MPD diferentes. Unas están más completas que otras. Siempre que el valor de intensidad esté comprendido en el rango existencia de la MPD, ésta es utilizada. Por tanto, la mayoría de las veces los estimados de muertos/heridos se hacen por 2 MPD diferentes; se imprimen estos resultados finales y además se calcula el promedio entre ambos estimados. Los heridos se calculan, como se discute en el epígrafe 2.1, en 3 niveles: leves, graves y muy graves. También se realiza el cálculo del número de personas sin vivienda sumando la cantidad de personas que viven en edificaciones destinadas a viviendas que sufren daños de grado 4 o 5. Los cálculos por bloque se realizan por separado, y al final se suman las pérdidas promedio de todos los bloques.

A pesar de que todos estos cálculos arrojan resultados fraccionarios, los mismos se redondean a valores enteros y por tanto, debe tenerse mucho cuidado al usar el programa cuando el número de personas expuestas a un terremoto es bajo. Si la cantidad de personas que vive en cada tipo constructivo es bajo, los estimados realizados con este programa pueden ser erróneos.

c) Resultados

Los resultados, además de en pantalla, se escriben en el fichero “perdidas.res”. En la tabla 4 se presenta un ejemplo del mismo.

Tabla 4. Ejemplo de de fichero de salida “perdidas.res. Caso de escala MSK y ciudad dividida en dos bloques. Se eliminó al final la parte donde escribe los coeficientes usados.

```
Santiago de Cuba
escala seleccionada: MSK -> 3 tipos de edificaciones
=====
bloque No.          1:  qq-1
intensidad seleccionada:          9
poblacion en viviendas de tipo:A: 100000
poblacion en viviendas de tipo:B: 100000
poblacion en viviendas de tipo:C: 100000
+-----+
Calculos con matriz de danno de Braga (2005)
muertos:          8792, sin vivienda:          157000
heridos leves:    37530, heridos graves:          15918
heridos muy graves:    3567, total de heridos:          57015
+-----+
Calculos con matriz de danno de Oliva et al. (1999)
muertos:          8792, sin vivienda:          157000
heridos leves:    16250, heridos graves:          6150
heridos muy graves:    1261, total de heridos:          23661
+-----+
Valores promedio:
muertos:          6212, sin vivienda:          118500
heridos leves:    26890, heridos graves:          11034
heridos muy graves:    2414, total de heridos:          40338
=====
```

Algunas veces aparece en la estadística de heridos una línea que dice:” ajuste por redondeo del número total de heridos”. Este es el caso cuando la suma del número de heridos leves, menos graves y graves no es igual al número total de heridos, y se ajusta este último. El fenómeno es debido a que tanto los heridos parciales (por gravedad) como los totales se obtienen por redondeo, por lo que a veces no ajusta su suma.

Ejemplo de uso

A continuación se presenta un ejemplo de uso de este programa, con datos cuasi-reales, para la ciudad de Santiago de Cuba. Se dispone de una estadística preliminar del número de viviendas perteneciente a cada tipo constructivo en los 4 distritos que componen la ciudad de Santiago de Cuba. Sin embargo, no se dispone de información sobre el número de personas que viven en esas construcciones. No obstante, considerando una ocupación media de 5 personas por vivienda se puede obtener un estimado preliminar del número de personas por tipo de construcción, que es la información que requiere el programa. En la tabla 5 se presentan estos datos. Debe aclararse que esto es un estimado grosero y en ningún caso puede considerarse como una solución al problema. Sólo se ha hecho para dar una idea del rango de valores que pueden esperarse en los resultados.

Tabla 5. Tipología constructiva y población estimada en los distritos urbanos de la ciudad de Santiago de Cuba. (a) Cantidad de viviendas clasificadas según los tipos constructivos A, B y C de la escala MSK [tomado de (García et al., 2002)], (b) Población estimada considerando una ocupación media de 5 personas por vivienda.

(a)

Distrito	A	B	C	Total
José Martí	3783	10539	14120	28442
26 de Julio	747	9348	3611	13706
Antonio Maceo	4886	14103	5887	24876
Abel Santamaría	2895	11383	11329	25607
Total	12311	45373	34947	92631

(b)

Distrito	A	B	C	Total
José Martí	18915	52695	70600	142210
26 de Julio	3735	46740	18055	68530
Antonio Maceo	24430	70515	29435	124380
Abel Santamaría	14475	56915	56645	128035
Total	61555	226865	174735	463155

Con estos datos se preparó el fichero “perdidas.dat” que se presenta en la tabla 6. Nótese que aparecen valores debajo de las columnas correspondientes a los tipos constructivos “D” y “E” que se sabe que no existen para la escala MSK. Estos valores NO SON LEIDOS POR EL PROGRAMA, sólo se mantienen en el fichero de entrada para mantener su formato.

Tabla 6. Fichero de entrada “perdidas.dat” preparado con los datos de la tabla 5b.

```
#-----Datos para programa perdidas-----
Santiago de Cuba           : Nombre de la ciudad
#----- Selección de la escala. La MSK solo considera 3 tipos de edificaciones,
#----- mientras que la EMS clasifica las construcciones en 5 tipos-----
0                           : Escala a utilizar (0 - MSK, 1 - EMS)
#---Para la escala MSK toda la población estará en edificaciones de tipos A, B y C ---
#---Para la escala EMS la población estará en edificaciones de tipos A, B, C, D y E---
```

```
# -----Tipo de análisis a relizar (puntual o distribuido espacialmente)-----
# Para el caso puntual sólo se tiene una intensidad correspondiente a toda la ciudad o
# región; en el caso distribuido se tienen varios valores de intensidad correspondientes
# a diferentes manzanas,barrios, distritos, municipios,etc. Llamemos a estos componentes
# "bloques"-----
4                                     :(0 - caso puntual, >1 - numero de "bloques",
#                                     : 1 - lectura en fichero independiente para
#                                     : caso de varios bloque y datos preparados en
#                                     : forma de tablas)
# La información que sigue se repetirá para cada uno de los bloques a analizar
# -----inicio de bloque o caso puntual-----
José Martí                            : nombre del bloque (en blanco para caso puntual)
#----- Se debe definir cual es la intensidad sísmica esperada -----
8                                     : Intensidad sísmica del terremoto
#----- Distribución de la población por tipo de edificación-----
#  A      B      C      D      E      :Tipo de edificación
  18915  52695   70600  100000  100000  :Cantidad de personas en cada tipo (formato libre)
#-----inicio de bloque-----
26 de Julio                           : nombre del bloque (en blanco para caso puntual)
#----- Se debe definir cual es la intensidad sísmica esperada -----
8                                     : Intensidad sísmica del terremoto
#----- Distribución de la población por tipo de edificación-----
#  A      B      C      D      E      :Tipo de edificación
   3735  46740  18055  100000   100000  :Cantidad de personas en cada tipo (formato libre)
#-----inicio de bloque-----
Antonio Maceo                          : nombre del bloque (en blanco para caso puntual)
#----- Se debe definir cual es la intensidad sísmica esperada -----
8                                     : Intensidad sísmica del terremoto
#----- Distribución de la población por tipo de edificación-----
#  A      B      C      D      E      :Tipo de edificación
  24430  70515  29435  100000   100000  :Cantidad de personas en cada tipo (formato libre)
#-----inicio de bloque-----
Abel Santamaría                        : nombre del bloque (en blanco para caso puntual)
#----- Se debe definir cual es la intensidad sísmica esperada -----
8                                     : Intensidad sísmica del terremoto
#----- Distribución de la población por tipo de edificación-----
#  A      B      C      D      E      :Tipo de edificación
  14475  56915  56645  100000   100000  :Cantidad de personas en cada tipo (formato libre)
#-----
```

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 7. Nótese el orden en que éstos aparecen. Primero los datos iniciales, después los cálculos realizados para cada bloque (en este caso cada uno de los distritos) y finalmente la suma de todos ellos. Para cada bloque se dan los cálculos usando dos MPD diferentes (las dos incluidas para la escala MSK) y el valor medio de ambas.

Tabla 7. Resultados obtenidos con el programa pérdidas usando el fichero de entrada presentado en la tabla 6. Se eliminó del listado la parte donde se incluyen las tablas con los valores de los coeficientes utilizados en los cálculos

```
Santiago de Cuba
escala seleccionada: MSK -> 3 tipos de edificaciones
=====
bloque No. 1: José Martí
intensidad seleccionada: 8
población en viviendas de tipo A: 18915
población en viviendas de tipo B: 52695
población en viviendas de tipo C: 70600
población total: 142210
+++++
Calculos con matriz de daño de Braga (2005)
muertos: 922, sin vivienda: 23807
```

Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica ...

```
heridos leves: 4405,   heridos graves: 1469
heridos muy graves: 272, total de heridos: 6146
+++++
Calculos con matriz de daño de Oliva et al. (1999)
ajuste por redondeo del número total de heridos
valor inicial: 1740, valor ajustado: 1741
muertos: 922,   sin vivienda: 23807
heridos leves: 1342,   heridos graves: 350
heridos muy graves: 49, total de heridos: 1741
+++++
Valores promedio:
ajuste por redondeo del número total de heridos
valor inicial: 3944, valor ajustado: 3945
muertos: 587,   sin vivienda: 15586
heridos leves: 2874,   heridos graves: 910
heridos muy graves: 161, total de heridos: 3945
=====
bloque No. 2: 26 de Julio
intensidad seleccionada: 8
poblacion en viviendas de tipo:A: 3735
poblacion en viviendas de tipo:B: 46740
poblacion en viviendas de tipo:C: 18055
poblacion total: 68530
+++++
Calculos con matriz de daño de Braga (2005)
muertos: 432,   sin vivienda: 11769
heridos leves: 2128,   heridos graves: 649
heridos muy graves: 110, total de heridos: 2887
+++++
Calculos con matriz de daño de Oliva et al. (1999)
muertos: 432,   sin vivienda: 11769
heridos leves: 594,   heridos graves: 120
heridos muy graves: 10, total de heridos: 724
+++++
Valores promedio:
muertos: 267,   sin vivienda: 7520
heridos leves: 1361,   heridos graves: 385
heridos muy graves: 60, total de heridos: 1806
=====
bloque No. 3: Antonio Maceo
intensidad seleccionada: 8
poblacion en viviendas de tipo:A: 24430
poblacion en viviendas de tipo:B: 70515
poblacion en viviendas de tipo:C: 29435
poblacion total: 124380
+++++
Calculos con matriz de daño de Braga (2005)
muertos: 1182,   sin vivienda: 28745
heridos leves: 5545,   heridos graves: 1886
heridos muy graves: 355, total de heridos: 7786
+++++
Calculos con matriz de daño de Oliva et al. (1999)
muertos: 1182,   sin vivienda: 28745
heridos leves: 1724,   heridos graves: 452
heridos muy graves: 63, total de heridos: 2239
+++++
Valores promedio:
muertos: 756,   sin vivienda: 19189
heridos leves: 3635,   heridos graves: 1169
heridos muy graves: 209, total de heridos: 5013
=====
bloque No. 4: Abel Santamaría
intensidad seleccionada: 8
poblacion en viviendas de tipo:A: 14475
```

```
poblacion en viviendas de tipo:B: 56915
poblacion en viviendas de tipo:C: 56645
poblacion total: 128035
+++++
Calculos con matriz de daño de Braga (2005)
ajuste por redondeo del número total de heridos
valor inicial: 5470, valor ajustado: 5471
muertos: 820, sin vivienda: 21475
heridos leves: 3948, heridos graves: 1289
heridos muy graves: 234, total de heridos: 5471
+++++
Calculos con matriz de daño de Oliva et al. (1999)
muertos: 820, sin vivienda: 21475
heridos leves: 1177, heridos graves: 291
heridos muy graves: 38, total de heridos: 1506
+++++
Valores promedio:
muertos: 518, sin vivienda: 13970
heridos leves: 2563, heridos graves: 790
heridos muy graves: 136, total de heridos: 3489
+++++
Pérdidas totales para todos los bloques
muertos: 2128, sin vivienda: 56265
heridos leves: 10433, heridos graves: 3254
heridos muy graves: 566, total de heridos: 14253
```

Volvemos a señalar que esto no constituye un estimado real de las pérdidas humanas en caso de un terremoto de grado 8 en Santiago de Cuba. La necesidad de pasar de la estadística del número de viviendas por tipología constructiva de que disponíamos a una estadística del número de personas habitando en los diversos tipos constructivos obligó a asumir un nivel medio de ocupación, que perfectamente puede no ser real. Además, la población total considerada de tal forma fue de 463155 habitantes que es inferior a la real en estos momentos.

Consideraciones finales

El programa puede ser corrido para un numero ilimitado de bloques, pero en todos ellos debe usarse la misma escala de intensidades.

El único dato necesario es la cantidad de personas que se encuentran en cada tipo de construcción según la escala macrosísmica. Este no puede ser sustituido por el número total de personas

Se entregan dos versiones en código ejecutable, una para Windows y otra para Linux.