

**CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES SISMOLÓGICAS
INSTITUTO DE GEOFÍSICA Y ASTRONOMÍA
MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGIA Y MEDIO AMBIENTE**

**ESTIMADOS DE PELIGROSIDAD SÍSMICA CON EL ERROR
ASOCIADO PARA CUBA, Y CÁLCULO DE PÉRDIDAS PARA LA
CIUDAD DE SANTIAGO DE CUBA USANDO TÉCNICAS SIG.**

Tesis presentada en opción al grado científico de:

DOCTOR EN CIENCIAS GEOFISICAS

ING. JULIO ANTONIO GARCÍA PELÁEZ

La Habana - Trieste

2007

**CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES SISMOLÓGICAS
INSTITUTO DE GEOFÍSICA Y ASTRONOMÍA
MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGIA Y MEDIO AMBIENTE**

**ESTIMADOS DE PELIGROSIDAD SÍSMICA CON EL ERROR
ASOCIADO PARA CUBA, Y CÁLCULO DE PÉRDIDAS PARA LA
CIUDAD DE SANTIAGO DE CUBA USANDO TÉCNICAS SIG.**

Tesis presentada en opción al grado científico de:

DOCTOR EN CIENCIAS GEOFISICAS

**Autor: Ing. Julio Antonio García Peláez
Tutores: Dr C. José Leonardo Álvarez Gómez
Dr C. Dario Slejko**

La Habana - Trieste

2007

Quien diga que la naturaleza se muestra indiferente
a los dolores y preocupaciones de los hombres
es que no sabe ni de hombres, ni de naturaleza.

José Saramago

*A mis hijos, Mauricio y Miriam,
a mi esposa,
a mi madre,
a mi familia cubana, también a la italiana.*

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, que ha creído siempre en lo que hago, gracias también por la batalla de ideas..

A mi esposa e hijos, que con paciencia y amor han sabido soportar mis lejanías, desatenciones y mis desvelos.

Al Centro Internacional de Física Teórica (ICTP), que me ha dado la posibilidad de realizar este estudio en Trieste, en especial al Prof. G. Furlan y su gente (Luisa, Elena, Bárbara, y los demás).

Al Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS), donde realicé todo el trabajo experimental de la tesis, en especial a mis colegas del grupo RISK (Laura, Marco, Sandro, Anna, Francesco y Gianfranco).

A Dr. Leonardo Álvarez, tutor, jefe y amigo, gracias por las críticas, valiosos consejos y tu paciencia infinita en nuestras continuas y ya habituales discusiones.

A Dr. Dario Slejko, a usted le debo todo cuanto soy, gracias por mostrarme el camino justo y llevarme de la mano hacia nuevas conquistas.

A los trabajadores del CENAIIS, en especial a los colegas del dpto. C. Habana, gracias Manuel, Mely y Luis David, por su apoyo y ayuda solidaria, sobretodo en estos últimos meses.

A Bertha E. González Raynal, que ya no está entre nosotros, por tí cambié la geofísica por la sismología, y no me arrepiento. Estés donde estés, gracias infinitas.

Al Migue y a Pepe, ellos saben las razones.

SÍNTESIS

Diferentes estrategias pueden ser acometidas para mitigar el riesgo sísmico. En este trabajo, partiendo de dos grandes campos de investigación (la estimación robusta e integral del peligro sísmico y la evaluación de los daños potenciales esperados en el caso de que ocurra este nivel de amenaza) se profundiza en el estudio de los parámetros que intervienen en la estimación de la peligrosidad sísmica, así como en las incertidumbres (aleatoria y epistémica) involucradas en el proceso de cálculo, obteniendo a escala nacional resultados cualitativamente superiores; mientras, a escala regional para la ciudad de Santiago de Cuba (la de mayor peligro sísmico del territorio cubano), se realiza un análisis de pérdidas potenciales ante la ocurrencia de un terremoto fuerte, usando el enfoque de escenario de riesgo pre-desastre y aprovechando para este propósito las técnicas SIG.

Los resultados más relevantes tienen que ver con la obtención de estimados de peligrosidad sísmica cualitativamente superiores al considerar las incertidumbres involucradas en el proceso de cálculo y su posterior utilización en la representación del error asociado a cada estimación. De forma novedosa las curvas de peligro sísmico obtenidas son objeto de un proceso de clasificación con algoritmos lógico-combinatorios con vistas a obtener comportamientos típicos. Como resultado, por primera vez en Cuba se obtiene un esquema de zonación sísmica basado en el comportamiento integral del fenómeno estudiado, y no de una realización particular del mismo.

Además, este trabajo probablemente está entre los primeros a escala nacional donde se obtienen escenarios de daño a nivel urbano, mediante una aproximación que permite y efectúa un análisis edificio a edificio. Para ello se ha diseñado una aplicación SIG que permite la incorporación y gestión de la información necesaria para la generación de escenarios de daño. El sistema incorpora, entre otros, los mapas de peligrosidad sísmica, los mapas geológico y de debilidad tectónica, la microzonificación sísmica de la ciudad y el inventario de los bienes expuestos. Toda esta información se usa posteriormente para individualizar la vulnerabilidad estructural de las edificaciones y de la población, así como los niveles de daño esperados según el escenario propuesto. Esta aplicación es usada para procesar la información correspondiente a la ciudad de Santiago de Cuba para de esta forma determinar las pérdidas (económicas y humanas). Los resultados de este trabajo han sido divulgados y publicados a nivel nacional e internacional, y están siendo actualmente utilizados para la definición de los “Lineamientos estratégicos para la gestión del riesgo sísmico” en la provincia de Santiago de Cuba.

ÍNDICE

	pag.
AGRADECIMIENTOS	
DEDICATORIA	
SÍNTESIS	
ÍNDICE	
INTRODUCCIÓN.....	1
Antecedentes y estado actual de la temática en Cuba.....	1
Motivación.....	4
Objetivos y alcance.....	5
Objetivos específicos.....	5
Hipótesis de partida.....	5
Resultados prácticos.....	6
Contenido de la tesis.....	6
Capítulo I. Aspectos generales sobre peligro y riesgo sísmico.....	6
Capítulo II. Estimación de la peligrosidad sísmica.....	7
Capítulo III. Estimación del riesgo sísmico.....	7
Capítulo IV. Discusión de los resultados.....	7
I. ASPECTOS GENERALES SOBRE PELIGRO Y RIESGO SÍSMICO.....	9
1.1 Fundamentación teórica y metodologías de cálculo de la peligrosidad sísmica.....	9
1.1.1 Métodos deterministas.....	10
1.1.2 Métodos probabilistas.....	11
Métodos probabilistas no zonificados.....	13
Métodos probabilistas zonificados.....	13
1.2 Cuantificación de las incertidumbres: técnicas de árbol lógico.....	16
1.3 Programas de cómputo utilizados para la estimación de la peligrosidad sísmica.....	19
1.3.1 Método no zonificado: “spatially-smoothed seismicity”.....	19
1.3.2 Método zonificado: “SEISRISK III – SEISTREE”.....	22
1.4 Formulación general del riesgo.....	24
1.5 Metodologías para la estimación del riesgo sísmico.....	25
1.5.1 Grados de daños.....	29
1.5.2 Matrices de probabilidad de daño.....	30
1.5.3 Funciones de vulnerabilidad.....	30
1.6 Riesgo sísmico y técnicas SIG.....	32
II. ESTIMACION DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA.....	35
2.1 Características geólogo – tectónicas de la región de estudio.....	37
2.2 Sismicidad histórica e instrumental.....	42
2.3 Catálogo paramétrico e intervalos de completamiento.....	46
2.4 Método no zonificado.....	48
2.4.1 Modelos de sismicidad.....	48
2.4.2 Parámetros que describen la sismicidad.....	49
2.4.3 Modelos de atenuación.....	50
2.4.4 Resultados obtenidos.....	51
2.5 Método zonificado.....	52
2.5.1 Modelos de zonas sismogeneratoras.....	52
2.5.2 Parámetros que describen la sismicidad.....	57
2.5.3 Estimación de la magnitud máxima.....	59
2.5.4 Modelos de atenuación.....	63
2.5.5 Resultados obtenidos.....	65

2.6 Propuesta de zonación sísmica para Cuba.....	68
2.6.1 Metodología de cálculo, datos iniciales.....	68
2.6.2 Clasificación de las curvas de peligrosidad sísmica.	69
2.6.3 Resultados obtenidos.	70
III. ESTIMACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO	72
3.1 La ciudad de Santiago de Cuba y su entorno geográfico.....	72
3.2 Inventario de los bienes expuestos y coberturas básicas utilizadas.....	73
3.3 Escenario propuesto, estimación de los daños, cálculo de pérdidas.	76
3.3.1 Escenario de daño.	77
3.3.2 Peligro regional.....	77
3.3.3 Peligro local.....	78
3.3.4 Vulnerabilidad estructural y evaluación de los daños en las construcciones.	78
3.3.5 Evaluación de los daños a la población.....	83
3.3.6 Estimación de las pérdidas potenciales.	85
Pérdidas económicas.....	85
Pérdidas humanas.....	87
IV. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	89
CONCLUSIONES.....	95
RECOMENDACIONES	97
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
ANEXO I.- GRÁFICOS.....	124
ANEXO II.- FORMULACIÓN GENERAL DEL CÁLCULO DE AFECTACIONES A LA VIDA Y LA SALUD DE LAS PERSONAS POR LOS TERREMOTOS	186
Definiciones:	186
Probabilidades:.....	186
Personas afectadas por un terremoto que produzca un efecto α	187
Número total de personas afectadas por un terremoto	188

INTRODUCCIÓN

Las pérdidas humanas unidas al costo económico y ecológico asociado a los desastres mal llamados “naturales” han aumentado exponencialmente en los últimos 50 años, constituyendo un serio obstáculo para el desarrollo humano. Los desastres tienen un mayor impacto en los países más pobres o en vías de desarrollo, donde los costos en términos de vidas humanas, de medios de subsistencia y de reconstrucción de infraestructuras destruidas son más elevados. Actualmente, el 85 por ciento de quienes se encuentran expuestos a los terremotos, ciclones tropicales, inundaciones y sequías, viven en países cuyo desarrollo humano es medio o bajo.

En zonas con sismicidad media o baja como gran parte de nuestro territorio nacional, la comunidad ciudadana y las autoridades a nivel local no tienen una percepción real del riesgo sísmico, aún cuando en su entorno existen edificaciones altamente vulnerables y podrían ser destruidas por terremotos de gran intensidad. De la misma manera, las empresas encargadas de mantener los servicios básicos o esenciales de la infraestructura (teléfono, electricidad, gas y agua potable), así como los servicios médicos de emergencia deben estar preparados para que el daño a la infraestructura sea lo más limitado posible.

En tal sentido, diferentes estrategias deben ser desarrolladas para reducir las pérdidas que ocasionan los sismos, promoviendo la aplicación de metodologías que permitan estimar de forma integral el peligro y/o reducir el grado de exposición de los bienes en riesgo. El uso de los SIG (Sistemas de Información Geográfica - Borchardt et al., 1995), técnica de aplicación relativamente reciente, nos brinda una poderosa herramienta para la realización integral de este tipo de estudio, permitiendo ejecutar en una misma plataforma la adquisición, la gestión, el mantenimiento, el análisis y la visualización del gran volumen de información necesario para el cálculo.

Antecedentes y estado actual de la temática en Cuba.

En Cuba (y no sólo) desde los años 70 del siglo pasado y hasta mediados de los 90, la percepción del riesgo sísmico estuvo estrechamente relacionada con el conocimiento del peligro sísmico (en algunos países se usaba indistintamente el mismo vocablo en inglés, “risk”, para describir ambas definiciones). Los mapas de intensidades por datos históricos realizados por Alvarez (1970), Chuy y Rodríguez (1980) y Chuy et al. (1983) constituyeron los primeros intentos de evaluar la peligrosidad sísmica (PS) del territorio cubano. Estos trabajos pueden clasificarse según Muir-Wood (1993), como determinístico - históricos, al realizarse un estudio somero de la sismicidad

(número de terremotos, su periodicidad, intensidades máximas reportadas) y considerar posteriormente su relación con los mapas: geológico, tectónico, geomorfológico e hidrogeológico, delimitándose con ello zonas de diferentes intensidades sísmicas para un período de recurrencia de 100 años. Como resultado, en estos estudios se presentan únicamente las sacudidas máximas observadas para un período de retorno dado, careciendo de un análisis detallado de la sismicidad, las fuentes sísmicas y la atenuación de las intensidades.

El paso a un enfoque más complejo del problema viene dado, cuando se realizan las investigaciones sismológicas para el área de emplazamiento de la Central Electronuclear (CEN) de Juraguá, (Shebalin ed., 1978), donde por primera vez se compila un catálogo de terremotos y se realiza un estudio detallado del campo macrosísmico. También con este trabajo se inician en Cuba los estudios sismotectónicos (Belousov et al., 1983).

Posteriormente siguiendo un enfoque probabilístico, Alvarez y Buné (1985), Rubio (1985), Alvarez et al. (1991), Chuy y Alvarez (1995), Rodríguez et al. (1997) y Despaigne et al. (2002), realizaron estimados cuantitativos de la peligrosidad sísmica para regiones más o menos extensas en el país, con el objetivo de determinar la localización y potencialidad de las fuentes generadoras, 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 ésta de la calidad de los datos de partida o de los objetivos de los trabajos en cuestión. No obstante, pertenecen todos a la tercera generación de estudios de este tipo: probabilista – sismotectónica, siguiendo la misma clasificación (Muir-Wood, 1993).

Rubio (1985) utiliza el enfoque probabilista de Cornell (1968) y el apoyo adicional de datos geólogo - tectónicos y geofísicos para la delimitación de las fuentes sismogeneradoras. Los cálculos los realiza con el programa EQRISK (McGuire, 1976). En este trabajo por vez primera se aborda la definición y el delineamiento de las zonas de origen de terremotos a una escala nacional. Para la definición de las zonas sismogeneradoras considera simultáneamente el movimiento vertical de la corteza terrestre, el delineamiento de fallas y la sismicidad histórica. Además, considera la atenuación de las intensidades en forma de isosistas circulares utilizando un modelo del tipo $I = f(I_0, d)$, donde d es la distancia epicentral e I_0 la intensidad en el epicentro.

Por otra parte, Alvarez y Bune (1985), Alvarez et al. (1991), Chuy y Alvarez (1995), Rodríguez et al. (1997) y Despaigne et al. (2002) utilizan un modelo de isosistas elípticas (Alvarez y Chuy, 1985), como una alternativa al tratamiento circular de los datos de atenuación de la intensidad.

Los cálculos se realizan siempre con el programa SACUDIDA (Alvarez y Bune, 1985b; Alvarez, 1995), que emplea una variante del método clásico de sacudibilidad de la escuela soviética

(Riznichenko, 1965, 1979) el cual considera la ocurrencia de sacudidas sísmicas en un punto como un proceso poissoniano (en lugar de considerar poissoniana la ocurrencia de terremotos), a la vez que usa mapas de zonas sismogeneradoras; el mismo fue denominado como: “Riznichenko modificado”. En la segunda versión del programa SACUDIDA (Alvarez, 1995) se incluye además el algoritmo propuesto por McGuire (McGuire, 1976) para obtener estimados probabilísticos siguiendo el enfoque de Cornell el cual fue utilizado por Rodríguez et al. (1997).

Todos estos estudios, aunque constituyen una parte importante del conocimiento del riesgo sísmico, por si solos no pueden pronosticar las pérdidas económicas y sociales que provocaría la ocurrencia de un evento sísmico (de cualquier intensidad); 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. Por esta razón, los resultados alcanzados en los trabajos anteriormente citados tenían un uso prospectivo y sirvieron como base o guía (normas sismorresistentes) al diseño estructural de nuevas edificaciones o construcciones y urgía la necesidad de realizar estudios cualitativamente superiores.

La estimación del riesgo sísmico es más robusta, al considerar además de la probabilidad de ocurrencia de sacudidas sísmicas, las consecuencias potenciales tanto materiales como humanas que provocarían estas sacudidas en los elementos expuestos (construcciones, las llamadas “líneas vitales”, el medio ambiente y la población), teniendo en cuenta la vulnerabilidad de los elementos expuestos a este nivel de peligro y su capacidad de respuesta y recuperación ante el impacto de las sacudidas sísmicas.

Las catástrofes recientes han obligado a la comunidad científica y los gobiernos de todo el mundo a desarrollar estudios de riesgo para tratar de reducir los daños provocados por los terremotos, tsunamis, huracanes o grandes inundaciones. En los últimos años se han realizado un número importante de investigaciones con estos fines, auspiciadas por organismos internacionales y/o gobiernos locales. Algunas ciudades cuentan ya con estudios de este tipo como: Memphis (Chang et al., 1995), Salt Lake (King et al., 1994), el distrito urbano de Niza (Thibault y Velkiv, 1995), Lisboa (Lopes, 1996), el D.F. de México (Nassar et al., 1996), Barcelona (SERGISAI, 1998; Chávez, 1998) y Basilea (Fäh et al., 2001) entre otras.

En el ámbito Latinoamericano, se destacan los estudios de Cardona (Cardona y Yámin, 1997; Cardona y Hurtado, 2000) para la ciudad de Bogotá y su enfoque multidisciplinario (holístico ver Carreño et al. 2007) donde en la estimación del riesgo según su criterio deben integrarse los resultados obtenidos por las ciencias: naturales (daños físicos), aplicadas (daños económicos) y

sociales (daños sociales) y de esta manera afrontar el riesgo desde una perspectiva única, integral y coherente.

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. En ese momento se consideraban estudios de regionalización sísmica detallada [Orbera et al. (1990), Chuy et al. (1992), y González et al. (1994)], pero al dar como resultado los parámetros de diseño de las estructuras a construir, a partir de los cuales éstas estructuras no estaban “expuestas” al grado de peligro conocido y por lo tanto no eran vulnerables. Se estaba de hecho considerando un escenario de riesgo “particular” donde el peligro es “bien” conocido, las estructuras se construyen “invulnerables” para este grado de peligro y por lo tanto el riesgo es nulo o despreciable.

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 y propósitos. En los primeros trabajos (Oliva et al., 1991; Guasch et al., 1993) solo se realiza una estimación cualitativa de la vulnerabilidad de las edificaciones, y de aquí una estimación (también cualitativa) del riesgo. Otros autores (Fundora et al., 2001; Vega et al., 2000; García et al., 2002a; González et al., 2004), conociendo el nivel de peligro sísmico y la vulnerabilidad de los elementos expuestos (edificaciones y la población principalmente), calculan los grados de daños que pueden sufrir las edificaciones y a partir de los daños evalúan (cualitativamente) el impacto de la ocurrencia de un terremoto particular en el área bajo estudio. Sin embargo, la falta de un sistema integrador entre las metodologías de cálculo utilizadas y el entorno geo-espacial, unido a la incertidumbre o ausencia de información sobre los elementos en riesgo ha limitado el alcance de estos estudios.

Motivación.

La República de Cuba, país insular en vías de desarrollo, no está ajeno a los efectos desastrosos de los fenómenos naturales como es el caso de los terremotos y los eventos hidrometeorológicos. Como parte del "Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales" (DIRDN) y de la Estrategia Internacional de Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (EIRD/ONU), su gobierno, por medio de la Defensa Civil Nacional y el Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI), ha desarrollado un programa integral, dirigido a la reducción y mitigación de los desastres ocasionados por los terremotos en las zonas con alto riesgo sísmico.

Esta problemática ha sido enunciada en la Directiva 01-05 del Vicepresidente del Consejo de Defensa Nacional y justifica plenamente el tema de tesis: “**Estimados de peligrosidad sísmica con el error asociado para Cuba, y cálculo de pérdidas para la ciudad de Santiago de Cuba usando técnicas SIG**”.

El **problema de investigación** está relacionado con la mitigación del riesgo sísmico y las estrategias que deben ser acometidas para su estimación, gestión y administración.

Objetivos y alcance.

Objetivo general.

Contribuir con la mitigación del riesgo sísmico en la república de Cuba a partir de la estimación robusta e integral del peligro sísmico a escala nacional y la evaluación de los daños potenciales esperados en el caso de que ocurra este nivel de amenaza en la ciudad de Santiago de Cuba.

Objetivos específicos.

1. Determinar los modelos aplicables en nuestro contexto de análisis del régimen sísmico, de atenuación del efecto de las sacudidas sísmicas, de delimitación de zonas fuente, y de generación de sacudidas sísmicas en un punto (o de eventos en la zona fuente), así como de los procedimientos de cálculo.
2. Obtener estimados de peligrosidad sísmica con su error asociado utilizando la técnica conocida como “árbol lógico de decisión”, y con ella profundizar en el estudio de los parámetros que intervienen en la estimación de la peligrosidad sísmica, así como en las incertidumbres (aleatoria y epistémica) involucradas en el proceso de cálculo.
3. Obtener una zonación sísmica del territorio nacional a partir de la clasificación de los resultados obtenidos (curvas de período de retorno vs. aceleración) empleando técnicas de clasificación con algoritmos lógico - combinatorios.
4. Implementar los procedimientos de cálculo necesarios para estimar el nivel de peligro (regional y local), la vulnerabilidad de los bienes expuestos y los posibles daños, tomando como estudio de caso la ciudad de Santiago de Cuba.
5. Modelar e implementar dentro del SIG los posibles escenarios de riesgo pre-desastre, así como la estimación de las pérdidas económicas y humanas.

Hipótesis de partida.

Si se realiza una estimación robusta e integral del peligro sísmico es posible minimizar los errores en el proceso de estimación del riesgo sísmico existente, tanto en la fase de proyecto (diseño de

nuevas construcciones), como en un medio ya construido (ciudades, poblados, edificación en particular), a partir de la estimación de las pérdidas potenciales que se verificarían si ocurriese el nivel de peligro calculado.

Resultados prácticos.

Siguiendo la hipótesis anterior, al término de las investigaciones propuestas el país contará con una amplia base de datos contentiva de todos los estimados de peligrosidad sísmica realizados para una red regular de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, con numerosos mapas y gráficos indicativos de diferentes facetas de su procesamiento estadístico, así como de un esquema de zonación sísmica basado en el comportamiento integral del fenómeno estudiado, y no de una realización particular del mismo. Además, existirá la posibilidad de confeccionar otros mapas y gráficos para objetivos específicos a partir de los resultados propuestos. La toma de decisiones sobre construcción en zonas sísmicas y el reforzamiento de edificaciones existentes, así como el cálculo de primas para seguros contra terremotos, podrá realizarse con un elevado margen de confiabilidad. También se dispondrá de estimados de las pérdidas esperadas, como consecuencia de terremotos fuertes, para la ciudad de mayor importancia económico-social de la región: Santiago de Cuba. Por lo tanto, la aplicación de los resultados de este estudio es inmediata y de un carácter estratégico para el desarrollo futuro, tanto económico como social, de la región.

Contenido de la tesis.

Este trabajo está dividido en 4 capítulos, en los cuales se describen de forma clara la problemática planteada para la realización del mismo, las metodologías seleccionadas para la evaluación del problema, así como las herramientas informáticas utilizadas para la implementación de los procedimientos de cálculo. De esta forma, los capítulos de este trabajo tratan los siguientes aspectos:

Capítulo I. Aspectos generales sobre peligro y riesgo sísmico.

En este capítulo se presentan los principios teóricos básicos de la estimación de la peligrosidad sísmica. Se hace énfasis en las metodologías de estimación de la peligrosidad sísmica siguiendo un enfoque probabilístico, debido a que es el utilizado en este trabajo. También se hace una revisión de los conceptos teóricos relacionados con la estimación del riesgo sísmico en un contexto urbano en cuanto a las metodologías de cálculo, los parámetros involucrados y su implementación en una plataforma SIG.

Capítulo II. Estimación de la peligrosidad sísmica.

El Capítulo II describe el marco tectónico del área de estudio, la sismicidad histórica e instrumental y la relación entre la interpretación geólogo - tectónica y los terremotos ocurridos hasta el presente. Además, se detallan las características del catálogo paramétrico confeccionado para acometer los cálculos de peligrosidad sísmica. De la misma manera se precisa como la información sobre tectónica, sismicidad y atenuación de los efectos con la distancia se “transforma” en los parámetros de partida que definen los modelos de cálculo propuestos en el árbol lógico. Los resultados obtenidos a partir de los distintos modelos (zonificado y no zonificado) son presentados aquí. En el último epígrafe de este capítulo se utiliza un procedimiento de clasificación de las curvas de peligrosidad sísmica con el fin de obtener una zonación sísmica del territorio nacional, y se discute también la validez de la misma.

Capítulo III. Estimación del riesgo sísmico.

A modo de introducción en este capítulo se justifica por qué se escogió la ciudad de Santiago de Cuba como caso de estudio para realizar el análisis de riesgo sísmico en un contexto urbano. Posteriormente, se detallan los procedimientos seguidos para obtener el inventario de los bienes expuestos a las diferentes escalas de trabajo (manzana y edificación), así como para diseñar el escenario de riesgo sísmico, evaluar los daños en las edificaciones y estimar las posibles pérdidas potenciales (económicas y humanas).

Capítulo IV. Discusión de los resultados.

En el Capítulo IV se hace un análisis de los resultados obtenidos a escala regional en cuanto a la peligrosidad sísmica se refiere, y a escala local para la ciudad de Santiago de Cuba. Se comparan además estos resultados con los obtenidos por otros autores a nivel internacional para la misma región.

Finalmente, se presentan las conclusiones de este trabajo y se hacen las recomendaciones pertinentes para la utilización de los resultados, así como sobre las futuras líneas de investigación.

En el Anexo I se presentan las figuras utilizadas en el estudio, mientras que en el segundo anexo se describe la formulación teórica utilizada para inferir las afectaciones a la vida y la salud de las personas por los terremotos.

Capítulo I

ASPECTOS GENERALES SOBRE PELIGRO Y RIESGO SÍSMICO

Capítulo I

I. ASPECTOS GENERALES SOBRE PELIGRO Y RIESGO SÍSMICO

La estimación de la peligrosidad sísmica, nos permite cuantificar en que medida una región o un sitio puede estar expuesto a un determinado nivel de peligrosidad sísmica. Por lo general la PS viene definida como cualquier fenómeno físico directo (p.e. sacudidas del terreno, fallamiento superficial) o inducido (p.e. inestabilidad de laderas, liquefacción, tsunami), asociado con la ocurrencia de un terremoto, el cual puede producir efectos adversos a la infraestructura socioeconómica y humana.

En un contexto probabilístico, útil para la evaluación del riesgo sísmico, la PS se entiende como la probabilidad o frecuencia con que un cierto valor de peligro, definido por un parámetro del movimiento del terreno (p.e. aceleración pico) o un grado de intensidad macrosísmica, venga superado (o no pueda ser superado) en un determinado sitio o región de estudio dentro de un intervalo de tiempo dado.

En los últimos años, a partir de los datos reales registrados por la redes de acelerógrafos, ha sido posible estimar la PS en términos de parámetros dinámicos del movimiento del terreno como el desplazamiento máximo, las velocidades espectrales o la aceleración pico (PGA); este último parámetro por ejemplo, es el más frecuentemente utilizado para el diseño de estructuras sismorresistentes.

Sin embargo, uno de los problemas principales de la estimación de la PS en términos de los parámetros dinámicos del terreno como la PGA es el breve período de datos experimentales que por lo general no superan los 30 años. Por esta razón, en los países donde no existe información de este tipo, ha sido necesario usar las relaciones de atenuación obtenidas en ambientes tectónicos similares, extrapolarlo el comportamiento de estos parámetros de una región a otra.

1.1 Fundamentación teórica y metodologías de cálculo de la peligrosidad sísmica.

El análisis de la peligrosidad sísmica o peligro sísmico a la que está 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:

- ¿Dónde ocurren los terremotos?

- ¿Con qué frecuencia?
- ¿Cuál será la intensidad de las sacudidas esperadas?

La respuesta a cada una de ellas conforman los parámetros básicos necesarios para la estimación de la PS. No obstante, para concluir el proceso de cómputo es necesario seleccionar y aplicar un modelo de cálculo.

La estimación de la PS puede ser realizada siguiendo dos enfoques: el **probabilista** y el **determinista**, a partir de considerar el fenómeno sísmico como un proceso estacionario probabilista o determinista. En ambos casos puede considerarse la existencia o no de zonas sismogeneradoras (o provincias sismotectónicas, o estructuras geológicas, etc.), lo que conlleva a subdividirlos en **zonificados** y **no zonificados**.

En las próximas líneas, el enfoque determinista será descrito brevemente debido a que el método utilizado es el probabilista, el cual será tratado con mayor profundidad haciendo un énfasis especial en los métodos que asumen que la ocurrencia de eventos en el tiempo es de tipo poissoniana.

1.1.1 Métodos deterministas.

Los primeros trabajos de PS fueron realizados siguiendo criterios deterministas (Richter, 1959). Los métodos deterministas se basan en la hipótesis de que la ocurrencia de terremotos en el futuro será similar a la registrada en el pasado, por lo tanto se descarta la ocurrencia de terremotos que provoquen efectos mayores de los ya observados. Si no se consideran zonas sismogeneradoras, se estudian los efectos de cada terremoto de la región sobre el emplazamiento; en cambio si se consideran zonas sismogeneradoras o estructuras geológicas a las cuales podrían estar asociados los terremotos, se considera la hipótesis de que éstos pueden ocurrir en cualquier lugar de la zona (o de la estructura geológica), por lo tanto, los terremotos ocurridos deben situarse en el punto más cercano al emplazamiento aplicando, luego, las leyes de atenuación del parámetro que describe las sacudidas para obtener los efectos sobre el mismo.

De todos los posibles valores que pueden alcanzar los efectos producidos por cada terremoto individual o por cada zona se toma el valor máximo. Es decir, al aplicar estos métodos se obtiene siempre el valor máximo del parámetro escogido como medida del movimiento del terreno en un lugar determinado debido a la sismicidad de la región.

Estos métodos presentan algunas desventajas, señaladas ya por algunos autores (Ambraseys, 1983). La primera es la hipótesis de partida: establecer que la sismicidad futura será igual a la pasada supone admitir que el terremoto máximo registrado en el catálogo de una zona no será sobrepasado en el futuro. Como ha sido demostrado por Ambraseys (1983), en algunos casos este

límite ha sido superado por terremotos recientes, invalidando los resultados obtenidos utilizando estos métodos. Otro inconveniente es que, estos resultados no son aplicables al cálculo del riesgo sísmico, pues se consideran siempre los efectos máximos, y no la probabilidad de ocurrencia de un efecto específico. Sin embargo, son ampliamente utilizados en estudios de escenarios de terremotos fuertes.

Se puede resumir que estos métodos: 1) se aplican generalmente en estimaciones puntuales de la PS; 2) sus resultados son independientes del tiempo, lo cual significa que los efectos máximos producidos por el terremoto o la zona se suponen ocurran y no se tiene información alguna sobre cuando, o si este evento ocurrirá realmente; 3) no se analizan las incertidumbres introducidas en el proceso de cálculo.

No obstante, los métodos determinísticos son de suma importancia para los casos de instalación de centrales nucleares o grandes hidroeléctricas, donde la estimación de la PS consiste en la evaluación de un escenario sísmico dado, donde después de evaluar la potencialidad de todas las posibles fuentes sismogeneradoras que podrían afectar el área del emplazamiento, un único terremoto (terremoto de diseño o cálculo) es escogido para calcular el peligro en el sitio. Generalmente la ocurrencia de este evento se considera el peor escenario, es decir, el terremoto que provocaría mayores efectos (afectaciones) en el sitio, cualquiera sea su probabilidad de ocurrencia.

1.1.2 Métodos probabilistas.

Estos métodos se basan en que, conocida la sismicidad pasada, se pueden establecer las leyes estadísticas que rigen la ocurrencia de eventos sísmicos en la región de estudio, al considerar este fenómeno como un proceso estocástico. La hipótesis de partida es que la información sísmica manejada es suficiente como para deducir las leyes estadísticas a que se ajusta el fenómeno analizado. Al igual que en el caso anterior se supone que la sismicidad es estacionaria, pero estos métodos no tienen una dependencia tan fuerte del conocimiento del valor máximo del parámetro con que se evalúa la PS, ya que esta evaluación se fundamenta en los terremotos de todos los niveles de magnitud. Al usar este enfoque se obtiene la probabilidad de ocurrencia de distintos niveles de intensidad del movimiento del terreno en un lugar determinado, en un período de tiempo dado (Reiter, 1990).

Esta es la principal ventaja frente a los métodos deterministas: en este caso no se obtienen los valores máximos del parámetro que define la intensidad del movimiento del terreno, sino la distribución de probabilidades para los distintos niveles de intensidad o daño. Esto es algo fundamental para el diseño estructural, al poderse seleccionar el nivel de riesgo más adecuado a

cada estructura en particular, sin tener que penalizar económicamente el diseño al considerar el efecto máximo como en el caso anterior. Otra consideración importante es que la sismicidad se distribuye de manera uniforme dentro de cada fuente por lo que no es tan crítica la exactitud en la localización. Además, el terremoto máximo posible en una zona no está determinado por el terremoto más fuerte registrado en el pasado, sino que éste se estima a partir de las leyes estadísticas de la sismicidad de la zona.

La descripción del peligro estimado de esta manera, no está restringida a un único escenario, ya que al usar este enfoque se integran los efectos de todos los terremotos (agrupados en una zona o no), que se consideran capaces de producir efectos dañinos en el área de estudio, teniendo en cuenta la probabilidad de que se verifiquen eventos con magnitudes diversas, así como la estimación de la probabilidad de que ocurra una intensidad dada en el sitio de interés. Esto es sumamente importante ya que es posible incorporar directamente en la evaluación del riesgo sísmico los estimados de PS.

Por otro lado, los estudios probabilistas de la peligrosidad sísmica admiten un gran número de enfoques (utilización, excluyente o no, de distribuciones de valores extremos, de métodos bayesianos, modelos estadísticos de ocurrencia de terremotos, etc.) de un uso común en la práctica sismológica, al punto de ser definida la peligrosidad sísmica por la “United Nations Disasters Relief Organization” (UNDRO, 1979) como:

$$H = P[x(s) \geq x_0; t] \quad (1.1)$$

según la cual la peligrosidad H (de “Hazard”, término en inglés) se representa por medio de una función de probabilidad del parámetro que indica la intensidad del movimiento del terreno, x , en un emplazamiento s ; P representa entonces la probabilidad de superación de un umbral x_0 del parámetro elegido durante un tiempo t , y ésta es una definición puramente probabilística.

Lógicamente, estos métodos también presentan inconvenientes. Para deducir las leyes estadísticas que rigen el comportamiento sísmico de cada zona se cuenta con un número finito de muestras contenidas en el catálogo de terremotos de la zona. La longitud temporal del catálogo es variable y depende de muchos factores (tipo de sismicidad, calidad de la información histórica, etc.); esta problemática implica la posibilidad de introducir errores cuando se extrapolan los resultados para períodos de retorno mucho mayores que la longitud temporal de la muestra, como por ejemplo un catálogo que abarque un período de 100 años para resultados con un período de retorno de 100 000 años. Otro problema a considerar si se usan fuentes sismogeneradoras no puntuales es que se debe contar con un número suficiente de terremotos asociados a ellas, que permita realizar el tratamiento estadístico requerido, lo cual condiciona en algunos casos las dimensiones de la fuente.

Métodos probabilistas no zonificados.

Esta metodología es usada frecuentemente 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.

El procedimiento de cálculo a partir de este enfoque implica la ejecución secuencial de cuatro pasos:

Determinación del área de influencia alrededor del emplazamiento o la región donde se efectúa la predicción.

Estimación de la distribución espacial de la sismicidad, asociando cada terremoto al punto definido por sus coordenadas epicentrales.

Cálculo de la función de distribución del parámetro que define la PS en el sitio donde se realiza la estimación. Para este propósito, debe tenerse en cuenta la atenuación de las sacudidas a partir de curvas del tipo efecto-distancia.

Estimación de la probabilidad de superación de un cierto valor de intensidad, durante un tiempo de exposición t , representando así la peligrosidad sísmica del emplazamiento.

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, los resultados obtenidos considerando la ocurrencia de eventos con un período de recurrencia mayor que el período que recoge el mismo son menos confiables.

Métodos probabilistas zonificados.

El fundamento matemático de estos métodos fue desarrollado en la década del 60 del siglo pasado, por Riznichenko (Riznichenko, 1965) en la antigua Unión Soviética y por Cornell (Cornell, 1968) en los EE.UU. Este último se basa esencialmente en la adopción de un modelo de zonas sismogeneradoras con las que se realiza una segmentación del área de influencia, y el ajuste de la sismicidad de cada zona a un modelo de recurrencia; sumando posteriormente la contribución de todas las zonas fuentes para obtener la función de probabilidad en el emplazamiento, mientras que

el primero considera una distribución espacial continua de la sismicidad con diferenciación en su nivel de actividad.

Riznichenko en 1965 define la peligrosidad sísmica (sacudibilidad) como la frecuencia media B_I de ocurrencia, en un punto dado, de oscilaciones sísmicas de intensidad mayor o igual que un cierto valor de intensidad I . El inverso de este valor $T=1/B_I$ es el período de recurrencia de las oscilaciones con intensidad $\geq I$, o período de sacudibilidad. En su forma general, la sacudibilidad es calculada mediante la integral:

$$B_I = \iiint N_{\Sigma}(M_I) \cdot dv \quad (1.2)$$

donde $N_{\Sigma}(M_I)$ es la frecuencia acumulativa de los terremotos para $M=M_I$. Por otra parte, el valor M_I corresponde a la magnitud mínima capaz de producir una intensidad $\geq I$ en el punto en el cual se realizan los cálculos. $N_{\Sigma}(M_I)$ es expresada en términos de la actividad sísmica A (Riznichenko, 1960).

La sacudibilidad es un estimado medio de la peligrosidad sísmica, lo que la diferencia de los estimados probabilísticos directos, que bajo la denominación de riesgo sísmico, fueron desarrollados en la escuela norteamericana a partir de los planteamientos de Cornell. Con posterioridad, el propio Riznichenko relacionó ambos tipos de estimados, al plantear que el período de recurrencia de las sacudidas T_I podía considerarse como la esperanza matemática de los intervalos temporales entre sacudidas con intensidad $\geq I$, lo que permite obtener, a partir de la sacudibilidad, resultados similares a los que se obtienen con el algoritmo de Cornell, quedando las diferencias entre ambos modelos prácticamente en el orden formal.

Como fue enunciado anteriormente, el método propuesto por Riznichenko ha sido el que habitualmente se ha utilizado en nuestro país en los estudios de peligrosidad sísmica, siguiendo su formulación original o una variante de la misma propuesta por Alvarez (1985) que si considera zonas fuente.

No obstante, se debe reconocer que el método propuesto por Cornell, tuvo una mayor difusión internacional y sirvió de punto de partida de muchos trabajos posteriores.

La base de estos estimados la constituye una integral del tipo:

$$P(i \geq I) = \int P[I \geq i | R = r] \cdot f_R(r) \cdot dr \quad (1.3)$$

donde $P[I \geq i | R = r]$ es la probabilidad de que una zona fuente, a una distancia r provoque en el punto de interés sacudidas con intensidad $\geq I$, y $f_R(r)$ es la función de densidad de probabilidad de la distancia hipocentral. Los cálculos se realizan por separado para cada zona fuente. Los

estimados medios se calculan en términos del llamado período de retorno, obtenido a partir de consideraciones probabilísticas adicionales.

Aunque en su enfoque inicial, estos dos métodos son diferentes, al final se obtienen resultados coincidentes. En el primer caso [variante propuesta por Alvarez (1985)] se usan los gráficos magnitud – frecuencia como un estimado medio de la ocurrencia de terremotos, obteniéndose como resultado primario los períodos de recurrencia para diferentes valores de intensidad del parámetro que representa la acción sísmica (intensidad, aceleración, etc.). Posteriormente, usando un modelo poissoniano de las sacudidas en un punto, se calculan los estimados probabilísticos. Cornell, en cambio, construye una función de distribución a partir de la ley magnitud – frecuencia y calcula la probabilidad de ocurrencia, la cual, multiplicada por el número total de eventos, nos lleva a la esperanza matemática de la frecuencia de ocurrencia. A partir de aquí, se determina el período de retorno considerando un modelo poissoniano. Los períodos de recurrencia y retorno son prácticamente iguales para un tiempo superior a los 10 años, por lo tanto ambos enfoques son equivalentes.

Los resultados pueden representarse de dos maneras: a) a partir de estimados medios donde se construyen curvas y mapas de $T(\alpha)$ o su inverso $\alpha(T)$, como α se entiende cualquier parámetro que indique la intensidad del movimiento del terreno y T es el período de retorno o recurrencia; b) a partir de considerar la ocurrencia de terremotos como un modelo poissoniano se obtienen curvas y mapas con estimados probabilísticos del tipo: $p(\alpha, t)$ o alguna de las variantes $\alpha(p, t)$ y $t(\alpha, p)$, donde p es la probabilidad de que no ocurra ni una sacudida con valor $\geq \alpha$, y t es el tiempo para el que se calcula esa probabilidad, que comúnmente se denomina “de espera”. Este tiempo está estrechamente vinculado al tiempo de vida útil de las edificaciones sometidas a la acción de los terremotos.

En este trabajo se utilizó el método de Cornell, en la formulación matemática propuesta por Bender y Perkins (1983). Las fases a seguir con esta metodología son las siguientes (ver figura 1.1):

1. Determinación de la distribución espacio – temporal de la sismicidad y de las posibles zonas sismogeneradoras en el área de influencia, con criterios análogos a los enunciados para el método determinista zonificado.
2. Definición de un modelo estadístico de recurrencia en cada zona. Se admite que la sismicidad está distribuida aleatoriamente y se ajusta a una distribución estadística (por lo general se usa la de Gutenberg – Richter, pero puede usarse otra). Además para cada zona se establecen los límites de validez del modelo (M_{\max} , M_{\min}).

3. Estimación de las leyes de atenuación con la distancia en términos del parámetro empleado para evaluar la peligrosidad sísmica (intensidad, aceleración u otro parámetro). Aplicación de estas leyes sobre los modelos de sismicidad de cada zona, obteniendo la función de distribución de los efectos en el emplazamiento.
4. Cálculo de la peligrosidad total, sumando las probabilidades obtenidas por la acción de todas las zonas que influyen en el emplazamiento:

$$H = \sum_{i=1}^n (1 - e^{-\alpha}) \quad (1.4)$$

siendo α la tasa anual de terremotos ocurridos en cualquier zona que den lugar a una intensidad del movimiento del terreno superior a la referencia en el punto estudiado, y n el número de zonas.

1.2 Cuantificación de las incertidumbres: técnicas de árbol lógico.

El proceso de estimación de la peligrosidad sísmica, siguiendo un enfoque determinista o probabilista, conlleva a numerosas incertidumbres de diferente naturaleza, que hacen que los resultados finales se vean afectados en mayor o menor grado por esta problemática. La cuantificación de estas incertidumbres es importante al brindar la posibilidad de obtener como resultado final un valor característico de la peligrosidad sísmica junto al error asociado en el proceso de su estimación.

Dentro de un estudio de PS, estas incertidumbres son generalmente clasificadas como aleatorias o epistémicas; que corresponden a: la variabilidad natural (aleatoria) y a la resultante debido a un incompleto conocimiento del fenómeno que se estudia (epistémica). Para una mayor aclaración sobre estos conceptos y su influencia en la estimación de la PS pueden consultarse los trabajos de Anderson y Brune (1999) y Toro et al. (1997).

La incertidumbre aleatoria está asociada a los errores cometidos en la estimación de los parámetros de un modelo determinado, por lo que puede reducirse aumentando la cantidad y/o calidad de los datos de partida; siempre y cuando esto conlleve a una mayor precisión en la estimación de dichos parámetros. Este tipo de incertidumbre siempre ha estado presente en el proceso de estimación de la PS y de una forma u otra se ha tratado de “corregir” o minimizar.

Por otra parte, la incertidumbre epistémica es inherente al proceso escogido para inferir las sacudidas sísmicas y solo podría estimarse si se pudieran estimar los errores asociados a cada etapa de ese proceso, lo cual es extremadamente difícil. Ejemplos de estos intentos se pueden encontrar en [Cosentino (1980), Keylis-Borok et al. (1973) y McGuire (1977)]

Esta variabilidad intrínseca está presente en la determinación de los parámetros que caracterizan la distribución espacio – temporal – energética de los eventos presentes en el catálogo, en la definición de las zonas fuentes, en las relaciones de recurrencia y de atenuación.

Si se toma como ejemplo el fenómeno de propagación de las sacudidas sísmicas con la distancia, se puede definir que la incertidumbre epistémica es debida a la diferencia entre el modelo matemático escogido para representar la atenuación del parámetro y el modelo real (sacudidas experimentadas cuando ocurre un terremoto); esta incertidumbre siempre se presenta y es habitual encontrar diferentes modelos de atenuación para una misma zona geográfica (California es un buen ejemplo). En este mismo proceso, la incertidumbre aleatoria vendrá dada por la necesidad de ajustar los datos experimentales a una expresión matemática que representa el modelo asumido. Cuanto mayor sea la dispersión de los datos mayor será esta incertidumbre, que disminuirá únicamente si se logra que los datos experimentales se ajusten mejor al modelo definido.

La cuantificación de las incertidumbres ha sido abordada por muchos autores (McGuire, 1977; McGuire y Shedlock, 1981; Kulkarni et al., 1984; Coppersmith y Youngs, 1986; Bender y Perkins, 1993; Budnitz et al., 1997; Toro et al. 1997, Rebez y Slejko, 2000, 2004; Scherbaum et al., 2006), siendo cada vez más recurrente el tratamiento conjunto de ambas incertidumbres dentro del proceso de computo. Según estos trabajos, las mayores incertidumbres están asociadas a las leyes de atenuación, mientras que en una menor cuantía influyen la caracterización sismotectónica y las leyes de recurrencia. Especial interés suscita en estos momentos la variabilidad aportada por las leyes de atenuación, desarrollándose algoritmos y procedimientos de cálculo para solucionar esta problemática (Scherbaum et al., 2004, 2006), incluyendo la extrapolación de relaciones de atenuación empíricas de una zona geográfica a otra. La manera de cuantificar y calibrar las incertidumbres presentes en el proceso de estimación de la peligrosidad sísmica y estimar el error asociado al mismo [incertidumbre total (σ_T), donde $\sigma_T = \sigma_A + \sigma_E$, y σ_A y σ_E representan la incertidumbre aleatoria y epistémica respectivamente], se conoce como metodología de árbol lógico.

Esta metodología fue propuesta por Kulkarni et al. (1984) y Coppersmith y Youngs (1986) con el fin de cuantificar la incertidumbre epistémica (la aleatoria es inherente al proceso de cálculo) a partir de la consideración de varios modelos alternativos de partida. El método ordena la serie de estimaciones a realizar, y direcciona la incertidumbre asociada a cada estimación (hipótesis) de una manera secuencial hasta obtener la incertidumbre o el error asociado a los resultados finales del proceso.

El árbol diseñado contiene una serie de nodos y ramas, cada nodo representa la estimación de un parámetro o un estado del proceso del análisis (cálculo de la M_{\max} o la definición de una ley de atenuación); mientras que cada rama, que parte de un nodo representa una posible alternativa (discreta) para el parámetro o estado del proceso en cuestión, a cada rama se le asocia un “peso”, el mismo representa el grado de “certeza” de cada alternativa. En un contexto probabilístico, estos pesos indican el grado de credibilidad de que la rama represente el valor correcto o real, y se asume que todas las ramas que conducen a un nodo representan el estado verdadero de los parámetros precedentes, siendo la suma de todas ellas la unidad.

Los resultados obtenidos en cada celda, forman parte de una población (ver figura 1.2), distribuida normalmente $[N(\mu, \sigma)]$, con media (μ) y como medida de dispersión, la desviación estándar (σ). El valor medio (μ), se obtiene a partir de $\langle \mu \rangle$, la media ponderada; a partir del número discreto de valores ($\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$) del parámetro que representa el peligro sísmico en cada celda con pesos $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$:

$$\langle \mu \rangle = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (1.5)$$

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:

$$\sigma = \sqrt{v_w^2} \quad (1.6)$$

$$\text{con } v_w^2 = \frac{\sum_{i=1}^n w_i (x_i - \mu)^2}{\sum_{i=1}^n w_i - 1} \quad (1.7)$$

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

De esta manera, el resultado para cada celda del área de estudio será el valor medio ponderado (μ) y el error asociado a esta estimación está representado numéricamente por la dispersión estándar σ . En este trabajo se utiliza el método del árbol lógico para obtener resultados a escala nacional, en términos de aceleración pico del terreno (PGA), involucrando en el proceso de cálculo ambos enfoques, el no zonificado (Frankel, 1995; Frankel et al., 2000) y el zonificado (Cornell, 1968; Bender y Perkins, 1987). El diseño del árbol lógico y sus parámetros serán presentados más

adelante. Usando este método se han obtenido resultados preliminares a nivel nacional por García et al. (2003a, 2004a) y a nivel regional para Bayamo por Rivera et al. (2004).

1.3 Programas de cómputo utilizados para la estimación de la peligrosidad sísmica.

Para llevar a cabo el proceso de cómputo, se han desarrollado un gran número de programas de cálculo, los cuales de una forma u otra consideran los basamentos teóricos del problema, incluyendo ligeras modificaciones debido a aspectos prácticos que deben ser tomados en cuenta. Por razones de espacio, se hace referencia únicamente a los programas utilizados en este trabajo, y como se implementaron las modificaciones necesarias para su aplicación en nuestro contexto.

1.3.1 Método no zonificado: “spatially-smoothed seismicity”.

Art Frankel, especialista del servicio geológico americano (USGS), siguiendo las ideas propuestas por Riznichenko (1965, 1966), desarrolló una serie de algoritmos (5 en total) entre 1994 y 1998 usando simultáneamente rutinas en lenguaje FORTRAN y C para un ambiente SUN, este método es conocido como “spatially-smoothed seismicity” (sismicidad suavizada espacialmente). Usando estos algoritmos, fue estimada la peligrosidad sísmica a escala nacional en los Estados Unidos (Frankel et al., 1996, 2002).

El código fuente puede ser obtenido gratuitamente en el sitio “Web” del USGS (<http://eqhazmaps.usgs.gov/html/hazsoft.html>), junto con una serie de datos de partida y un catálogo de la región oeste de los Estados Unidos. No existe, sin embargo, la posibilidad de “descargar” los resultados obtenidos a partir del uso de los datos presentes en el sitio, algo necesario e importante a la hora de validar la puesta a punto de los algoritmos de cálculo.

Frankel (1995), retoma el concepto de actividad sísmica A (Riznichenko, 1965) y su uso en la estimación de la PS al proponer una metodología que estima directamente la peligrosidad sísmica a partir de los valores de 10^a ($A=10^a$) suavizados espacialmente, obtenidos para diferentes umbrales de magnitud.

Este método sigue los preceptos probabilísticos de Cornell (1968) y presupone que la sismicidad recogida en el catálogo puede pronosticar la ocurrencia de terremotos fuertes en el futuro, coincidiendo espacialmente con las zonas donde se reportan los terremotos históricos. Por esta razón, el parámetro de partida más importante es el catálogo de terremotos, junto a la identificación de los períodos de completamiento para las diferentes clases de magnitud consideradas, las relaciones de atenuación y la distancia de correlación usada para “suavizar” la sismicidad (valores de 10^a). Adicionalmente, pueden introducirse fuentes sísmicas como zonas sismogeneradoras y/o

fallas activas (Frankel et al. 1996, 2002), las cuales responderían a un modelo de sismicidad propio o característico.

El primer paso del método consiste en la estimación de la actividad sísmica (A), a la cual Frankel (1995) no hace alusión, pero utiliza:

$$A = 10^a = N(M) \Big|_{M_0} \quad (1.8)$$

donde a es el parámetro de la relación magnitud – frecuencia (G-R), Gutenberg – Richter, (1954):

$$N(M) = 10^{a-b(M-M_0)} \quad (1.9)$$

a través de una red regular que cubre el área de estudio. En cada celda (i) de la red se calcula el número [$N(M)$] de eventos (en el intervalo donde la clase de magnitud del evento se considere completa) iguales o mayores que el umbral mínimo de magnitud escogido (M_0), posteriormente los valores de actividad sísmica ($A_i = 10^a|_i$) son convertidos de acumulativos (número de eventos mayores que M_0) a distributivos (número de eventos en el intervalo $M_0, M_0 + \Delta M$) usando la fórmula de Herrmann (1977) y luego “suavizados” espacialmente a partir de una función circular gaussiana:

$$\tilde{A}_i(M_0) = \frac{\sum_j A_j(M_0) e^{-(\Delta_{ij}/c)^2}}{\sum_j e^{-(\Delta_{ij}/c)^2}} \quad (1.10)$$

donde c es la distancia de correlación y Δ_{ij} es la distancia entre la i -ésima y la j -ésima celda. En esta ecuación, los valores de $\tilde{A}_i(M_0)$ son normalizados para preservar el número total de eventos. La sumatoria es realizada en todas las celdas (j) que estén a una distancia de $3c$ de la celda (i). La distancia de correlación no toma un valor fijo como en los trabajos de Riznichenko, varía en función de la calidad de las determinaciones de los parámetros espaciales de los eventos utilizados, por lo tanto aumenta con el incremento del umbral mínimo de magnitud (M_0) escogido en el modelo.

El programa brinda la posibilidad de ejecutar este proceso usando todas las clases de magnitud, o para magnitudes menores de cierto umbral ($M_{6.0}$). Los terremotos con magnitudes superiores a este umbral, pueden asociarse a un segmento de falla con un comportamiento característico (Coppersmith y Youngs, 1984) o a “fallas flotantes”, donde la sismicidad es representada por la relación G-R y las dimensiones del segmento de falla está determinada por las relaciones empíricas de Wells y Coppersmith (1994). Todos los modelos asumen la ocurrencia de terremotos como poissoniana.

En la propuesta original de Frankel (1995) la actividad sísmica se calculaba según el método original de Riznichenko (1960), diferenciándose ambos métodos sólo en la forma de normalizar la actividad sísmica. Frankel usa una función gaussiana con una distancia variable (c), mientras que Riznichenko prefería un área circular fija de 1000 Km. Ambos, obtenían los valores de la actividad sísmica utilizando únicamente el período del catálogo donde los terremotos son mayores, o iguales a la magnitud de referencia M_0 y por lo tanto sólo era posible considerar una parte del catálogo en los cálculos (con la disminución de M_0 , se hace más corto el período útil del catálogo). Esta problemática limita la validez del método y puede ser solucionada de manera simple, introduciendo un nuevo criterio de cálculo de la forma:

$$A_j(M_0) = \sum_{i=1 \rightarrow M_0}^{i(M_{\max})} \frac{N(M_i)}{T_i} \quad (1.11)$$

de esta manera es posible considerar los diferentes períodos de completamiento que tienen cada una de las clases de magnitud consideradas y por ende casi todo el período que abarca el catálogo. La ecuación 1.11 se sustituye en 1.10, manteniendo el mismo criterio de normalización espacial. Esta modificación fue incluida en la segunda versión del programa y utilizada por Frankel et al. (1996, 2002).

La estimación de la PS se realiza a partir del cálculo de la tasa anual de eventos $\lambda(u > u_0)$ que superan un valor dado del peligro (u_0) en un sitio determinado, usando una doble sumatoria:

$$\lambda(u > u_0) = \sum_k \sum_l 10^{[\log(N_k/T) - b(M_l - M_0)]} P(u > u_0 | D_k, M_l) \quad (1.12)$$

donde k es el índice para la distancia y l para la magnitud. T es el tiempo en años del catálogo utilizado para determinar N_k (número total de valores $\tilde{A}_i(M_0)$ para cada celda a partir de una cierta distancia k del sitio). El valor de b (pendiente del gráfico magnitud – frecuencia) se considera uniforme para toda el área del modelo y $P(u > u_0 | D_k, M_l)$ no es más que la probabilidad de que el parámetro u en el sitio sea superado por u_0 , para un terremoto a una distancia D_k , con una magnitud M_l .

$$P(u > u_0 | D_k, M_l) = \frac{1}{2} \Phi^* \left(\frac{\ln(u_0) - \ln_u(D_k, M_l)}{\sigma \sqrt{2}} \right) \quad (1.13)$$

Esta probabilidad (condicional) depende, obviamente, de la atenuación $[\ln_u(D_k, M_l)]$ del parámetro con la distancia y su dispersión (σ). Φ^* en 1.13 representa la función complementaria de errores. La ecuación 1.12 es solo una simplificación de la ecuación original propuesta por Cornell (1968), pero considerando cada celda como una fuente puntual.

Después que han sido calculados los valores de $\lambda(u > u_0)$, es posible obtener los valores del movimiento del terreno para una probabilidad de excedencia dada a partir de una interpolación lineal de los valores de $\lambda(u > u_0)$. Además, se puede considerar una multiplicidad de hipótesis, al diseñar diferentes modelos de sismicidad [diversos valores de b , umbrales de magnitud (mínima y máxima) y atenuación del parámetro con la distancia], organizados en un árbol lógico. El valor final de PS es calculado a partir de la suma de las probabilidades de cada alternativa multiplicada por el factor peso proveniente de cada rama.

En este trabajo, una nueva versión llamada SMOOSEIS fue desarrollada para su uso en el contexto cubano, unificando todas las subrutinas en FORTRAN e introduciendo las formas funcionales de las relaciones de atenuación apropiadas para nuestra región. La subrutina en C fue eliminada.

1.3.2 Método zonificado: “SEISRISK III – SEISTREE”.

El SEISRISK III (Bender y Perkins, 1987) es un código FORTRAN basado en el algoritmo de Cornell (1968), diseñado específicamente para obtener el valor máximo del parámetro amenazante que tiene una probabilidad dada de no ser superado durante un período de tiempo fijo. El análisis puede hacerse lo mismo para un sitio particular, que para un número de ellos espaciados de manera irregular o en una red regular, es recomendado especialmente para aplicaciones con un gran número de fuentes sísmicas y un amplio conjunto de puntos espaciados en una red regular.

Probablemente es el programa basado en el algoritmo de Cornell que más difusión ha obtenido en el mundo. Se obtiene de forma gratuita a través de Internet vía ftp (<ftp://hazards.cr.usgs.gov/hazmaps/sw>), y fue recomendado y utilizado por el programa internacional GSHAP [“Global Seismic Hazard Assessment Program”, Giardini et al. (1999)].

Este programa presenta una serie de características que lo diferencian de otros usados en la actualidad:

1. La ocurrencia de terremotos no se considera uniforme dentro de la zona fuente. Los terremotos son eventos puntuales distribuidos normalmente en el espacio, por lo que fuera de la zona su frecuencia no es $= 0$, sino que varía suavemente a través de las fronteras. De tal forma, si la ubicación esperada (media) de un terremoto es en (x_e, y_e) y su desviación estándar es σ , la probabilidad de que el terremoto ocurra en una pequeña área A alrededor del punto $(x_e \pm \Delta x, y_e \pm \Delta y)$ está dada por:

$$P_A[\Delta x, \Delta y] = \frac{A}{2\pi \cdot \sigma^2} \cdot e^{-[\Delta x^2 + \Delta y^2]/2\sigma^2} \quad (1.14)$$

2. Admite 2 tipos de fuente, superficial (polígonos) y lineal. Para la lineal emplea un modelo de ruptura de fallas. En tal caso, las rupturas ocurren con igual probabilidad en cualquier lugar de la falla, y están totalmente contenidas en ella. La longitud de ruptura es función de la magnitud y está distribuida normalmente con media $l(m)$ y desviación estándar σ_l . Igualmente la distancia es tomada como la existente entre el punto y el lugar más cercano a la ruptura. El modelo de ruptura puede ser modificado por cualquier otro del mismo tipo. Para la fuente superficial el tratamiento es similar a los otros programas, con frecuencia de ocurrencia uniforme en elementos de área ΔA que dependen del tamaño de celda escogido.
3. La magnitud se analiza en intervalos discretos, con valor asignado a su centro. Dados M_{max} , M_{min} y un número n de intervalos se tiene:

$$\begin{aligned} m &= M_{min} + (j + 1/2) \cdot \Delta m \\ \Delta m &= (M_{max} - M_{min})/n \end{aligned} \quad (1.15)$$

4. La sismicidad puede ser ajustada a una distribución estadística del tipo G-R, o utilizar directamente la tasa anual de eventos por clase de magnitud.
5. Se asume que el valor del parámetro usado en los cálculos tiene distribución lognormal con desviación estándar σ en escala logarítmica (ln).
6. Las fórmulas de atenuación son introducidas en el programa en forma de tablas para un número discreto de magnitudes y distancias, en el proceso de cálculo se interpolan estos valores para determinar el comportamiento del parámetro en cada sitio particular.

Como resultado final se obtiene para cada punto:

- La frecuencia anual de ocurrencia de eventos que superen un valor fijo del parámetro.
- La frecuencia media de ocurrencia del parámetro para un período de retorno fijo.
- La probabilidad extrema de ocurrencia del parámetro para un tiempo dado.

En todos los casos es posible considerar la influencia de la incertidumbre aleatoria inherente a la dispersión de las fórmulas de atenuación a partir de la inclusión (o no) de la desviación estándar de su ajuste (σ) en los resultados finales.

Este programa no fue concebido para realizar automáticamente una serie de estimados múltiples para un mismo escenario (tipo árbol lógico), por esta razón fue necesario crear una nueva versión (SEISTREE). Con este código es posible realizar de forma automática la generación de los ficheros de partida para el procesamiento de cada rama, el almacenamiento de los resultados de cada una y el proceso estadístico posterior, necesario para obtener los resultados finales y el error asociado a los mismos.

1.4 Formulación general del riesgo.

En el año 1977, la UNDRO y la UNESCO promovieron una reunión internacional de expertos con el objetivo de tratar de unificar criterios y proponer definiciones sobre peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo. El informe resultante (“Natural Disasters and Vulnerability Análisis”; UNDRO, 1979) propuso las siguientes definiciones:

Amenaza, peligro o peligrosidad (“Hazard”, H): Probabilidad de ocurrencia de un suceso potencialmente desastroso durante cierto intervalo de tiempo en un sitio dado.

Vulnerabilidad (“Vulnerability”, V): Grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo resultado de la probable ocurrencia de un suceso desastroso, expresada en una escala de 0 (sin daño) a 1 (daño total).

Riesgo específico (“Specific risk”, R_s): Grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un suceso particular y como una función de la amenaza y la vulnerabilidad.

Riesgo total (“Total risk”, R_t): Se define como el número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica debido a la ocurrencia de un desastre, es decir el producto del riesgo específico (R_s), y la cuantificación de las pérdidas ocasionadas en los elementos en riesgo.

De esta forma, la evaluación del riesgo puede llevarse a cabo a partir de la siguiente formulación general:

$$R_s = H \cdot V \quad (1.16)$$

$$R_t = R_s \cdot C \quad (1.17)$$

de esta manera, el riesgo se puede representar matemáticamente como la probabilidad de exceder un nivel de consecuencias económicas, sociales o ambientales en cierto sitio durante un cierto período de tiempo. La fórmula 1.17 se aplica para cada uno de los elementos en riesgo bajo estudio. Cuando se analizan diferentes elementos en riesgo se convierte en una sumatoria.

Aunque existen y conviven en estos momentos diversas definiciones de riesgo, estas pueden considerarse de una u otra forma una variación de esta formulación inicial, la cual ha servido como base para la realización de una amplia variedad de estudios de este tipo (Bertero, 1992; Zonno et al., 1998 entre otros)

En el ámbito Latinoamericano, Cardona (2001) critica duramente los enfoques que tienden a fragmentar la concepción del riesgo, proponiendo una nueva filosofía - metodología a partir de un enfoque multidisciplinario (holístico) donde se integren los resultados obtenidos por las ciencias: naturales (daños físicos), aplicadas (daños económicos) y sociales (daños sociales) y de esta

manera afrontar el riesgo desde una perspectiva única, integral y coherente. No obstante, este autor y otros (Davidson et al., 2000; Di Pasquale et al., 1998) concuerdan en que son los daños físicos los más relevantes y los que de una manera u otra condicionan los otros y el impacto de sus consecuencias.

Actualmente, el proceso de estimación del riesgo sísmico se realiza a partir de los llamados escenarios de riesgo, donde la ocurrencia de terremotos de distinta índole (fuerza destructora, recurrencia, distancia de los elementos expuestos) y sus posibles consecuencias interactúan con el medio amenazado, obteniéndose daños y pérdidas de diversa índole, de acuerdo al grado de amenaza, la vulnerabilidad de los elementos expuestos y su capacidad de “gestionar” este nivel de amenaza.

1.5 Metodologías para la estimación del riesgo sísmico.

El objetivo principal al enfrentar un estudio de riesgo sísmico, es la evaluación, lo más precisa posible de los efectos perjudiciales de los terremotos en el medio construido y sus consecuencias. Esto significa estimar el grado de daño ocasionado a las edificaciones, entendiendo el daño como el proceso de degradación física que experimenta una estructura cuando es sometida a un cierto grado de demanda sísmica; y el daño a la población (fallecidos, heridos de diverso grado), como consecuencia de los daños físicos (directos o indirectos) que se ocasionan en las edificaciones donde se encuentran estas personas durante la ocurrencia del sismo. Como el riesgo sísmico depende directamente de la peligrosidad (o amenaza) sísmica y la vulnerabilidad de los elementos expuestos a este nivel de peligro, su evaluación implica la obtención de estimaciones previas de estos dos parámetros.

En la pasada década, se realizaron dos grandes iniciativas para desarrollar metodologías y procedimientos de cálculo del riesgo sísmico: el programa internacional RADIUS (<http://www.geohaz.org/contents/projects/radius.html>), una iniciativa del DIRDN, financiada por el gobierno japonés, donde se escogieron 9 ciudades de países poco desarrollados o en vías de desarrollo (Addis Abeba, Antofagasta, Guayaquil, Izmir, Skopje, Bandung, Tashkent, Tijuana y Zigong), con el fin de obtener una metodología de cálculo de fácil implementación y promover estos estudios en países con pocos recursos financieros. La segunda iniciativa fue organizada por la Agencia federal para manejo de emergencias de los E. U. (FEMA), a través del Instituto nacional de ciencias de las edificaciones (NIBS). En esta propuesta, llamada HAZUS (FEMA, 1997, 1999) se desarrolla una metodología estándar para los EE.UU., del cálculo de las pérdidas ocasionadas por los terremotos. Los resultados en ambos casos se obtienen a partir de un escenario particular,

en ellos se describen la extensión y magnitud de los daños y su impacto en la economía, población e infraestructura.

Siguiendo estos dos enfoques, una guía metodológica, independiente de la escala y los propósitos específicos del estudio de riesgo sísmico se presenta en la figura 1.3. En esta propuesta (García, 2000, García et al., 2002b), el proceso de cálculo se divide en módulos independientes y por lo general, para cada módulo se necesita realizar estudios específicos. Las flechas indican la dependencia entre los módulos, siendo los resultados de unos los datos de partida de otros. Existe una amplia variedad de métodos para obtener los resultados específicos de cada módulo, por lo tanto la elección depende exclusivamente del grado de detalle del estudio y la información disponible. Este tipo de estructura (modular) permite realizar estimados basados en modelos simples o refinados a partir del grado de estudio del problema a resolver en cada módulo particular. Las técnicas SIG son una herramienta excelente en este tipo de estudio por su potencialidades en el manejo de la información.

En el primer módulo, se define el nivel de peligro sísmico, que puede afectar con mayor o menor grado el medio estudiado. El escenario puede ser definido usando un enfoque determinista (terremoto máximo histórico, terremoto máximo creíble) o sobre la base de un estudio probabilístico. Sobre peligrosidad sísmica, los elementos que intervienen en su estimación, las metodológicas de cálculo y la incertidumbre de los resultados se ha hablado bastante en los capítulos anteriores. Las técnicas de estimación pueden ser más o menos complejas en dependencia de los objetivos del trabajo y la información disponible. Como resultado se obtiene siempre el nivel de peligro a que están expuestos los elementos en riesgo, expresado por lo general de manera probabilística en términos de la intensidad macrosísmica (escalas MM, MSK, EMS, MCS) o parámetros dinámicos del terreno (aceleración, velocidad, desplazamiento). El grado de peligro puede ser representado a partir de valores específicos (para un período de retorno dado), o en forma de curvas y mapas.

El escenario de peligro (determinista o probabilista) estará definido por: la ubicación geográfica de los bienes expuestos, la potencialidad de las zonas amenazantes, y la atenuación del parámetro que caracteriza los efectos. En este contexto, se deben separar los efectos directos (sacudidas sísmicas, fallas en el terreno), de los secundarios o inducidos (inestabilidad de laderas, liquefacción, tsunami). Los efectos directos se presentan siempre, su intensidad depende de la fuerza destructora del terremoto; los efectos secundarios o inducidos (módulo 3 en figura 1.3) dependen en gran medida de cuanto sea susceptible el terreno a la ocurrencia de los mismos y pueden verificarse siempre y cuando existan estas condiciones y por supuesto ocurra un evento sísmico que los

desencadene. Existen técnicas específicas para determinar la susceptibilidad de ocurrencia de estos fenómenos, así como la probabilidad de que estos se verifiquen al ocurrir un evento sísmico de una intensidad dada. En el “Manual for zonation on seismic geotechnical hazards” (TC4, 1993, 1999) se proponen distintas metodologías para este propósito dependiendo de la escala de trabajo y la información disponible.

Es bien conocido que los daños son por lo general de mayor envergadura en las estructuras construidas sobre terrenos o suelos friables que sobre suelos rocosos o semirrocosos. A este fenómeno se le conoce como efecto de sitio o de amplificación. Si se tiene en cuenta que la gran mayoría de los asentamientos urbanos han sido construidos (o se construyen) sobre suelos friables o poco consolidados y que en este tipo de suelos puede verificarse incrementos de hasta 2 y 3 grados de intensidad (escalas MSK, MM o EMS), se tiene entonces una buena razón para incluir en la metodología el módulo 2 (ver figura 1.3).

La amplificación de las ondas sísmicas en los depósitos sedimentarios es debida al contraste de impedancia entre estos sedimentos y el manto rocoso donde subyacen. Este es un elemento poco considerado en los trabajos de peligrosidad sísmica a escala regional, donde por lo general, se obtienen resultados para un tipo de suelo específico (roca, suelo medio, semiroca, suelo blando).

Para la estimación del efecto de sitio existen varios métodos, éstos dependen de la calidad de la información disponible (geometría, espesor, propiedades físicas, velocidades) sobre las capas o las formaciones que se encuentran en la región bajo estudio.

En las áreas donde la información disponible es limitada, pueden ser utilizadas relaciones de atenuación que discriminen el comportamiento del parámetro que caracterizan según el tipo de suelo (ver epígrafe 2.4.3 y 2.5.4). Este se considera el nivel mínimo de representación de esta problemática. El segundo conjunto de métodos se refieren a las mediciones “*in situ*” de propiedades de los suelos a partir de las cuales se pueden inferir de forma directa o indirecta los parámetros asociados a la amplificación del suelo (velocidades de las ondas sísmicas, factor de calidad, interfase suelo-roca). Algunos de estos métodos son muy costosos como los métodos sísmicos (reflexión o refracción), pero al mismo tiempo muy resolutivos, otros son más económicos (mediciones de microsismos) pero susceptibles a errores de interpretación. Si existe información geotécnica (espesor, composición, propiedades físicas de los suelos, profundidad del nivel freático), se pueden utilizar métodos numéricos más sofisticados. Las técnicas de modelación numérica permiten identificar la variabilidad del parámetro estudiado y por ende la posible amplificación a partir de un modelo definido a priori. Las técnicas de interpretación pueden utilizar metodologías uni, bi o tri-dimensionales, en dependencia del grado de estudio y la disponibilidad

de información sobre la propagación de las ondas en las estructuras analizadas (capas, perfil geológico).

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, 1990; Grünthal, 1998). Este comportamiento en gran medida se debe a que existen edificaciones con una calidad estructural superior a otras, o lo que es lo mismo, son menos vulnerables. El conocimiento real del comportamiento de una estructura es complejo y depende generalmente de parámetros difíciles de obtener de forma directa o indirecta. Para estimar el impacto de la ocurrencia de un terremoto determinado en un medio expuesto se necesita conocer cuanto es vulnerable el medio para este grado de amenaza sísmica. El cuarto módulo está relacionado precisamente con este propósito.

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 (Applied Technology Council, 1985, 1991), 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 disponible sobre los elementos bajo estudio.

La información cartográfica digital constituye la base fundamental para la construcción del inventario de los bienes expuestos y junto a los parámetros descriptivos de las edificaciones y de la distribución de la población (necesarios para la determinación de su vulnerabilidad), constituyen los elementos necesarios para poder evaluar cuán vulnerable somos ante la ocurrencia de un grado de peligro particular. Las edificaciones deben ser clasificadas de forma general de acuerdo a: su uso (vivienda, comercial, industrial ect.), modelo de diseño estructural (IMS, Sandino, Girón, GPS, ect), material de construcción predominante (madera, mampostería, hormigón), altura (número de pisos), edad (pre o post código sísmico vigente), elementos estructurales y características del entorno que puedan potenciar los efectos de las sacudidas sísmicas, entre otros.

En cuanto a la vulnerabilidad de la población, esencialmente se necesita conocer cuantas personas se encuentran en las edificaciones (independientemente de su uso) en el momento que ocurre un nivel de peligro dado. Por lo tanto es imprescindible una estimación del nivel de ocupación de las edificaciones, su uso y el flujo de las personas que las ocupan durante el día. Esto permite considerar varios escenarios de riesgo, haciendo más precisos y reales los cálculos. Se pueden establecer índices de vulnerabilidad de la población más complejos si se toman en consideración

los parámetros de vulnerabilidad del entorno socio - económico y la posibilidad (o no) de recuperación (del impacto) de la infraestructura donde se evalúa el riesgo, incluyendo en los cálculos no solo el impacto inicial (víctimas fatales, heridos de cualquier tipo, personas sin hogar) debido al colapso de las edificaciones, sino también las pérdidas ocasionadas por la insuficiente recuperación (o el colapso) de la infraestructura socio - económica que debe enfrentar la situación de desastre (en el caso que se verifique).

El módulo 5 y 6 se relacionan con las técnicas utilizadas para determinar el grado de los daños que se ocasionan en los bienes expuestos ante un nivel de peligro particular (definido en los módulos 1, 2 y 3), las cuales serán abordadas con profundidad en los epígrafes 1.5.1., 1.5.2., y 1.5.3.

Los dos últimos módulos tienen que ver con los procedimientos utilizados para representar el riesgo sísmico estimado a partir de los daños (módulo 7) y la gestión (módulo 8) y/o mitigación de este nivel de riesgo. Los resultados de la estimación del riesgo sísmico pueden presentarse de dos formas diversas: a partir de un índice de riesgo global que involucre y integre todos los parámetros que intervienen en la estimación o a partir de la estimación de las pérdidas (económicas y humanas), donde se desglosa de forma cuantitativa el impacto del terremoto en los diferentes elementos expuestos. Esta última representación es la más aceptada y entendida, por su fácil asimilación en un contexto no científico.

1.5.1 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 nivel 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 las sacudidas sísmicas. Esto se logra sólo aproximadamente, y estos grados están influenciados mayormente por la necesidad de que quien use la escala pueda describir clases de daños fácilmente distinguibles:

G0: Sin daño o daño leve (sin daño estructural, daño no estructural leve)

G1: Daño moderado (daño estructural leve, daño no estructural moderado)

G3: Daño sustancial a severo (daño estructural moderado, daño no estructural moderado)

G4: Daño muy severo (daño estructural severo, daño no estructural muy severo)

G5: Destrucción (daño estructural muy severo)

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 sólo 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.

Por lo general, debido a la poca disponibilidad de datos sobre el comportamiento real de las edificaciones, solo es posible calcular los daños estructurales directos. Estos se estiman utilizando matrices de probabilidad o funciones de vulnerabilidad, obtenidas ambas a partir de las experiencias con terremotos pasados, usando técnicas de simulación, o juicios de expertos.

1.5.2 Matrices de probabilidad de daño.

Las matrices de probabilidad de daño son representadas matemáticamente de la siguiente manera:

$$R = \sum_j \sum_i P[D = j | i] \cdot P[i] \quad (1.18)$$

donde el riesgo específico 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 que ocurra dicho sismo para un período dado. Todo esto para cada nivel de daño y cada intensidad. De esta manera el riesgo queda asociado al mismo período de retorno que el proporcionando por la peligrosidad sísmica (PS).

1.5.3 Funciones de vulnerabilidad.

Las funciones de vulnerabilidad son representadas genéricamente de la forma:

$$F(\bar{d}) = \int_0^{\bar{d}} \int_0^{I_{max}} f(d = \bar{d} | I) \cdot f(I) \cdot dI \cdot dd \quad (1.19)$$

donde $F(\bar{d})$ es la función de distribución de probabilidades de daño acumulado para \bar{d} , siempre que las variables señaladas se puedan considerar 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 peligrosidad sísmica y $f(I)$ la función de densidad de probabilidad de ese parámetro. Por consiguiente, el riesgo específico R vendrá dado por el valor máximo de la función de distribución de daño acumulado, como se evidencia en:

$$R = F(d \text{ max}) \quad (1.20)$$

En nuestro país se ha utilizado para la estimación del riesgo sísmico la primera variante (matrices de probabilidad de daños, MPD), a partir de la definición de los daños descritos en las escalas MSK (Medvedev et al. 1965, Medvedev, 1978) y EMS (Grünthal, ed., 1998), o utilizando MPD definidas de forma empírica [Oliva (1993), escala MSK; Braga (1985) y SES (2002) escala EMS]. 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 la tipología constructiva (o clase de vulnerabilidad) considerada.

Este es un método de estimación de la vulnerabilidad estructural de las edificaciones rápido y hasta cierto punto económico. Solo es necesario “clasificar” las edificaciones según las tipologías o clases de vulnerabilidad descritas en la escala macrosísmica para la cual se obtuvo la MPD y otorgarles posteriormente un grado de daño según el nivel de amenaza considerado. Si no se cuenta con ningún tipo de información acerca de las características estructurales de las edificaciones es imprescindible una clasificación *in situ* de las mismas. Si a partir de la información estructural disponible, las edificaciones pueden ser clasificadas (o reclasificadas) es posible economizar este proceso, ganando tiempo y reduciendo los gastos. De nuevo, los objetivos que se persigan al realizar la estimación del riesgo, impondrán el uso de un método o el otro.

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 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 propias de vulnerabilidad, las cuales caracterizan completamente su comportamiento ante diferentes niveles de demanda sísmica (expresada en términos dinámicos). En García et al. (2005) se presentan los resultados preliminares obtenidos para las diferentes tipologías constructivas presentes en la ciudad de Santiago de Cuba.

Esta metodología es más precisa que la anterior y generalizable a todo el país cuando se logre modelar el comportamiento de la totalidad de las tipologías constructivas presentes.

Para la estimación de los daños inducidos se necesita una información amplia y específica sobre la exposición de los elementos involucrados, adentrándonos en ocasiones en la vulnerabilidad no solo de las edificaciones, sino también de los procesos tecnológicos relacionados con la producción, almacenamiento y transporte de, por ejemplo, sustancias tóxicas o peligrosas, grandes presas, fabricas, entre otros. Toda esta información, vinculada con los resultados del módulo 5 permite obtener los daños inducidos; no existe una metodología única para su evaluación, dependen como el nivel de peligro (inducido) de las características propias del escenario de riesgo diseñado.

1.6 Riesgo sísmico y técnicas SIG.

A inicios de los 70, un gran número de geógrafos crearon un sistema de almacenamiento y organización de información espacial en un ordenador, sin llegar a darle un nombre propio. En los 90, se le dio nombre a este proyecto: Sistema de Información Geográfica (SIG). Con estos sistemas paralelamente se fueron desarrollando aplicaciones importantes como la cartografía de alta resolución, la planificación del uso de suelo, la gestión de recursos naturales, la evaluación y planificación ambiental, la investigación ecológica, comunicaciones, investigación demográfica, servicios, aplicación a negocios, entre otras muchas.

Dentro de las ventajas que presentan los SIG en las aplicaciones está la discretización de la información en sistemas de pequeñas unidades que pueden almacenarse en una base de datos divididas en dos temas principales: por una parte la información referente a la ubicación o localización georreferenciada de los elementos de estudio, y por la otra, la información descriptiva de los mismos. Es decir, por una parte en forma geométrica se representan los elementos, que se pueden describir por medio de diferentes temas, por ejemplo, un elemento geométrico georreferencial que represente una ciudad puede estar acompañado de información en forma tabular como el uso del suelo, tamaño de la población, geología, topografía, entre otros, relacionados todos por un indicador común.

La capacidad de los SIG para elaborar y presentar los resultados de los análisis en mapas temáticos resulta fundamental en cualquier estudio, en especial en los estudios de riesgo sísmico. Estos mapas permiten mostrar el nivel de peligro, los posibles escenarios de daño y el impacto de los mismos en el entorno socio – económico de la zona en estudio, con lo cual se pueden estimar localidades y regiones con riesgo sísmico más alto, sitios con efectos locales del suelo más marcados, estructuras más vulnerables y las pérdidas esperadas, dando una idea global del

problema y sentando las bases para dar soluciones al mismo, mediante planes de mitigación del riesgo sísmico.

En la década pasada, el campo de aplicación de los SIG se extendió al manejo de los riesgos naturales debido a las experiencias sufridas con los terremotos, huracanes, inundaciones y erupciones, entre otras, cuya peligrosidad o severidad radica en el efecto que tiene en grandes áreas, alcanzando sobre todo zonas urbanas, que en algunas ocasiones están densamente pobladas, debido a un crecimiento incontrolable y a un mal manejo urbanístico de las ciudades, como puede comprobarse en los trabajos de la OEA (1993); SERGISAI (1998), entre otros. De esta manera, se observa la necesidad de manejar una gran cantidad de información, especialmente de elementos georreferenciados o espaciales que pueden verse afectados por estos fenómenos, como son los edificios, puentes, presas, líneas vitales (líneas de agua, gas, luz, fibra óptica, etc.), así como los mismos fenómenos naturales que pueden actuar.

Dentro de los programas de planificación y mitigación de desastres, los SIG permiten combinar la información de los peligros naturales, recursos, población e infraestructura para determinar las áreas menos expuestas, aptas para las actividades de desarrollo, áreas que requieren una evaluación más detallada y/o las áreas donde se debe priorizar la aplicación de estrategias de mitigación.

Por otro lado, una vez ocurrido el desastre, los SIG son esenciales para una pronta respuesta de las autoridades civiles de una manera ordenada y prioritaria en aquellos lugares donde se determinó que los daños podrían ser mayores. Los SIG, dentro de los programas de planificación, permiten determinar las zonas con mayor probabilidad de daño, localizando a su vez los sistemas de emergencia más cercanos y las zonas que pueden utilizarse como áreas de resguardo para la población. Las aplicaciones de los SIG en el manejo de los riesgos naturales normalmente están limitadas por la cantidad y calidad disponible de información de los elementos que se quieran estudiar y, en algunos casos, por la falta de metodologías adecuadas para el estudio. Además, la vinculación dentro de un SIG de los elementos cartográficos (polígono, línea, punto, celda) que definen espacialmente a los elementos expuestos (edificaciones, grupos de ellas, límites de: manzanas, consejos populares, repartos, municipios, provincia) con sus parámetros, es un proceso engorroso y lento, y hasta este momento no automático. Esta limitante, entre otras, puede impedir la obtención de resultados de forma inmediata. Algunos ejemplos de la aplicación de los SIG se pueden ver en los trabajos de Tatsumi et al. (1992), OEA (1993), King et al. (1994), Xie et al. (1996), Mena, (1997), SERGISAI (1998), Anagnos et al. (1996), Mena et al. (2001), Polovinchik et al. (1995), en algunos de los cuales existe una aplicación en los sistemas de Protección Civil.

Capítulo II

ESTIMACIÓN DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA

Capítulo II

II. ESTIMACION DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA

Este estudio se desarrolló en dos partes. La primera involucra la creación del árbol lógico de decisión a partir del cual se definieron 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 contaba en el país hasta el momento.

En la segunda, se llevó 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) más representativos de la estimación de la peligrosidad sísmica y evaluar su incertidumbre. Este proceso nos permite identificar la influencia de la variación de los parámetros de entrada en los resultados finales, a partir del análisis estadístico de los errores asociados a los resultados obtenidos en cada una de las celdas de la red.

La región de estudio está comprendida entre los 16°N-24°N y los 67°O-85°O (ver figura 2.1), 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 un comportamiento de las diferentes estructuras tectónicas presentes en el área bastante complejo, por lo que se divide el árbol lógico en dos grandes ramas asociadas a las dos metodologías descritas en el capítulo I. El procedimiento de estimación de la peligrosidad sísmica aquí utilizado considera una simbiosis entre el enfoque probabilístico no - zonificado (método propuesto por Frankel, 1995) y el zonificado (método de Cornell, 1968). La variabilidad (incertidumbres) inherente en ambas metodologías será introducida en el proceso de evaluación de la peligrosidad sísmica a partir del árbol lógico diseñado, pudiendo estudiarse estas incertidumbres de una manera más amplia. En la figura 2.2 se presenta de forma abreviada el árbol lógico diseñado y en la tabla 2.1 la descripción de los códigos utilizados.

Tabla 2.1- Descripción del árbol lógico, más detalles en el texto y en las figuras 2.12 y 2.18.

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 (PGA)
No. Ramas	2	3	2 (2)	3	3	3	2 (2)
Descripción de la rama	S1: $M \geq 3.0$ S2: $M \geq 5.0$	Z1: modelo 1 Z2: modelo 2 Z3: modelo 3	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., (2003a) ZS-C: García et al., (2005)	B1: Mínimos cuadrados. B2: Máxima verosimilitud B3: Kijko y Graham, (1998)	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.

2.1 Características geológico – tectónicas de la región de estudio.

El origen y evolución geológica del Caribe ha sido abordado en innumerables trabajos, a partir de dos posiciones o hipótesis del desarrollo geológico - tectónico de la corteza terrestre: fijistas (o in situ) o movi listas (o alóctonos).

En los últimos años, el modelo movi lista propuesto por J. L. Pindell con sus sucesivas precisiones (Pindell y Dewey, 1982, Pindell, 1985; Pindell y Barrett, 1990; Pindell, 1994; Pindell et al., 2004; Pindell et al., 2006) es el más aceptado en el contexto caribeño, y a partir del él, Mann y Burke (1984), Mann et al. (1991, 1995) y Dolan y Mann, ed. (1998) realizan sus interpretaciones.

En el contexto cubano, los estudios realizados por Iturralde-Vinent han demostrado algunas contradicciones entre el modelo de Pindell y una serie de aspectos de la geología de Cuba (Iturralde-Vinent, 1994; ed., 1996). Por esta razón este autor, propone un nuevo modelo basado en los conceptos por él desarrollados (Iturralde-Vinent, 1981; ed.1996, 1998, Iturralde-Vinent E.G. Lidiak, eds. 2006) y los trabajos de Bush y Sherbakova (1986), Pushcharosvky (ed., 1989) y Kerr et al. (1999). Las diferencias fundamentales entre el modelo de Pindell y el propuesto por Iturralde-Vinent se enmarcan en: la posición original y el emplazamiento de los terrenos tectónicos: Pinos, Escambray y Guaniguanico, y, si la evolución tectónica de la placa del caribe se produjo a partir de un gran arco volcánico que tuvo lugar dentro del Aptiano (cerca de 120 Ma) o a partir de arcos múltiples que estuvieron activos desde el Cretácico.

A partir de lo hasta aquí expuesto se puede considerar a la placa Caribe (CA) como una placa litosférica de poca extensión que se originó en las inmediaciones del Pacífico, la cual migró con dirección NE como consecuencia de la expansión de la corteza que separa las placas Norteamericana (NOAM) y Suramericana (SUR), debido a la subducción de la corteza oceánica que conforma la placa de Cocos (CO), hasta chocar con la plataforma de las Bahamas entre el Cretácico Superior y el Mioceno. Limita al norte y al este con la placa NOAM (ver figura 2.3), al sur con la placa SUR y al oeste con la placa de CO. El límite norte está formado por una zona de 100-250 Km de ancho (figura 2.4), donde una zona de fallas transcurrente con movimiento preferentemente siniestro tiene lugar a lo largo de más de 2000 Km.

Este sistema de fallas comienza en el bloque de Yucatán en Guatemala (falla Polochic-Motagua), pasando por la zona de fallas “Swan”, hasta llegar al centro de generación de corteza oceánica de Caimán (CSC), donde se alarga en dos ramas: la rama norte conecta el CSC con la falla Oriente (al sur de Cuba), la falla Septentrional (al norte de la Española) y la falla “19°” en el borde norte de Puerto Rico; a la rama sur pertenecen la falla “Walton” (une el límite inferior del CSC con el borde norte de Jamaica), la falla Enriquillo (entre Jamaica y el sur de la Española), la falla “Plantain

Garden” y la depresión de Los Muertos (las dos al sur de la Española). Ambas ramas se unen en la zona de subducción de la Antillas Menores que pertenece al límite este, donde la placa NOAM penetra por debajo de la placa del CA. El límite sur, menos importante en este trabajo, tiene características de interacción transcurrente dextral en relación con la placa de SUR, mientras en el límite occidental existe una extensa zona de subducción, donde la placa de CO penetra por debajo de la placa del CA (Dolan y Mann, eds., 1998).

Los resultados obtenidos a partir de mediciones geodésicas usando técnicas GPS (Dixon et al., 1998; DeMets et al., 2000) indican que la placa NOAM se está moviendo en dirección S - SE (70°) a una velocidad relativa con respecto a la placa CA de $18-20 \pm 3$ mm/año; unos 10 mm/año más que los resultados obtenidos usando un modelo global como el NUVEL-1A (11 ± 3 mm/año - DeMets et al., 1994). Además, esta dirección implica que la convergencia entre ambas placas al Norte de la Española es oblicua, como ya había sido propuesto por Dolan et al. (1998).

Otra cuestión importante es la existencia de microplacas activas dentro de la zona norte que limita ambas placas (CA y NOAM), formadas según Mann et al. (1998) debido a la colisión oblicua del límite norte de la placa CA al norte de la Española y la plataforma de las Bahamas en la placa NOAM; estas microplacas tienen velocidades y direcciones de movimiento propias, las cuales difieren con las de las placas CA y NOAM.

La microplaca de Gonave propuesta por Rosencrantz y Mann (1991), y confirmada por otros autores posteriormente (Lundgren y Russo, 1996; Deng y Sykes, 1995 y Calais y Mercier de Lépinay, 1993), está situada entre el sur de Cuba y el norte de Jamaica, desde el centro de dispersión de Caimán, hasta el oeste de La Española, limitada al norte por la falla Oriente y al sur por la fallas “Walton” y Enriquillo – “Plantain Garden”. La existencia de esta microplaca sugiere que la apertura de la depresión Caimán es una medida del movimiento relativo entre la microplaca de Gonave y la placa NOAM, siendo precisamente este movimiento relativo o diferencial, la causa principal de la ocurrencia de terremotos en esta zona, evidenciando los procesos geodinámicos que en ella ocurren.

La microplaca Septentrional (Mann et al., 1998, 2002) ocupa la región comprendida entre la falla Septentrional y la fallas Española Norte y Los muertos, que limitan la zona de colisión de la Plataforma de las Bahamas hasta la zona de subducción en las Antillas menores (ver figura 2.4). El límite Oeste de esta microplaca, no fue bien definido por Mann et al. (1998), mientras que en Mann et al. (2002) se busca una solución de compromiso al unir el límite norte de la microplaca con la falla Oriente al suroeste de las costas cubanas. Es posible que este límite se extienda un poco más con dirección NO, considerando que la colisión de la plataforma de las Bahamas (placa

NOAM) está presente con la misma intensidad al norte de la región oriental, como evidencia la actividad sísmica anómala de los últimos años en esta zona.

A pesar de que el área mexicano-caribeña ha sido ampliamente estudiada, como lo confirman los trabajos citados anteriormente, se puede decir que la región que ocupa Cuba ha sido tratada a veces a grandes rasgos y de forma superficial por autores foráneos, pudiendo excluirse los trabajos realizados por Calais y Mercier de Lépinay (1990, 1991) y Calais et al. (1989, 1990, 1998) en el borde sur - oriental de Cuba, donde se hace un estudio de la falla Oriente, proponiendo los regímenes geodinámicos presentes en cada sector de la misma, lo que es desarrollado posteriormente por Arango (1996, 2000) para la misma región.

La porción inicial de la falla Oriente que conecta el límite norte del centro de generación de corteza Caimán (CSC) y la cuenca de Cabo Cruz (CCB) (ver figura 2.4) está poco estudiado (Calais et al., 1989), de este segmento no obstante se puede inferir a partir de los mecanismos focales obtenidos por el CMT (Harvard Seismology: Centroid-Moment Tensor Project - <http://www.seismology.harvard.edu/projects/CMT/>) en el período 1977-1993, que predomina un movimiento lateral siniestro.

Tanto Calais et al. (1998) como Arango (1996, 2000) coinciden en la existencia de la Cuenca de Cabo Cruz (CCB), como una estructura del tipo “pull apart basin”, formada como consecuencia de un proceso **transtensivo**, a partir del desplazamiento hacia la izquierda de la placa NOAM en una inflexión de la falla principal. Dentro de la cuenca se encuentran una serie de “horts” y “grabens” delimitados por fallas normales con rumbos de 45° a 50° NE.

En el segmento que le sigue, a partir de los 77°45' LO, se pueden definir con claridad el trazado de la falla principal, con rumbo entre 85°NE (Arango, 1996) y 90°NE (Calais et al. 1998), evidenciado morfológicamente por el cambio de las pendientes del escarpe del fondo marino (Calais y Mercier de Lépinay, 1991) y los fuertes gradientes de los campos geofísicos (Arango, 1996). Arango propone que en el segmento comprendido entre los 77°45' y los 76°50' de LO, y a los 19°30' de LN ocurre un deslizamiento por el rumbo “puro”, sin prácticamente ningún proceso geodinámico secundario de consideración; Calais et al. (1998) no hacen ninguna consideración al respecto sobre este sector en particular. Se coincide con la interpretación de Arango, por dos razones: 1- los sedimentos inmediatamente al sur y al norte de esta zona no parecen estar deformados por fallas con rumbo 60°NE como en el sector subsiguiente que precede la zona de deformación del promontorio de Santiago de Cuba y 2- las soluciones de los mecanismos focales obtenidos (Moreno et al., 2002) corroboran un mecanismo preferentemente rumbo deslizante. Aunque este sector de la falla Oriente se puede interpretar morfotectónicamente como una doble falla paralela al sur de la costa, se

considera que la situada más al Norte es la principal y más activa (Arango, 1996; Calais et al., 1998).

Un poco más al Este entre los 76°50', y hasta los 76°00' de LO, la falla principal se encuentra dislocada por fallas de segundo orden que la desplazan hacia el norte aproximándola a la costa. Según Calais et al. (1998) en este sector tiene inicio un proceso transpresivo que continua más al este, corroborado por una serie de fallas inversas y pliegues en "echelon" (escalón) situados a lo largo del borde sur de la falla principal. Arango (1996, 2002) difiere de esta interpretación, proponiendo la ocurrencia de un proceso de tipo extensional en esta zona, que comenzó con la apertura de la fosa de Bartlet (Oriente) y continúa hasta nuestros días. Los estudios de microtectónica realizados por Rojas-Agramonte et al. (2005) confirman esta interpretación.

El sector subsiguiente (entre los 76°00' y los 75°15' LO), conocido como cinturón deformado de Santiago de Cuba (SDB), es considerado uno de los más importantes dentro del contexto geodinámico de la región. Todos los autores coinciden en que ésta es una estructura formada como consecuencia de un proceso transpresivo tipo "flower" (flor) que se inició a partir del Plioceno (tardío?), originada como resultado del choque de la placa NOAM con la CA. La existencia de un complejo cuadro estructural, donde abundan fallas inversas, pliegues y fallas de empuje, típicas de una tectónica compresiva confirman el proceso geodinámico descrito anteriormente (Calais et al., 1998, Arango, 1996, 2002). El trazado de la falla Oriente en este sector es bastante incierto, en Calais et al. (1998) se diferencian claramente las cuencas de Chivirico y Baitiquirí como inicio y fin del trazado de la falla, pero no así el trazado de la misma entre ambas cuencas.

Lo mismo sucede después de los 75°15' LO, sector poco estudiado, que Calais et al. (1998) consideran parte del SDB. Se supone que en este sector predomine un proceso de deslizamiento por el rumbo. Esta suposición se basa en que más al Este, en el Paso de los Vientos, la falla Oriente corta "claramente" los sedimentos jóvenes depositados en la depresión del mismo nombre [Calais et al. (1998)], lo que contradice la interpretación inicial de Mann y Burke (1984) que consideraban esta zona como un "pull apart basin" activo.

Para el territorio emergido, Cotilla et al. (1998) propone un modelo neotectónico formado por dos unidades independientes: Occidental y Oriental, en las cuales se advierten una marcada diferenciación tectónica, geomorfológica, geofísica y sismológica. El sistema de fallas Cauto-Nipe con dirección NE es el límite que separa ambas unidades neotectónicas. La unidad Occidental tiene la mayor extensión superficial y su actividad neotectónica es significativamente menor con respecto a la Oriental por estar más alejada del límite transformante Bartlet - Caimán.

En la unidad Occidental predominan los esfuerzos transpresionales que generan los movimientos a lo largo de las fallas siniestras de rumbo NE-SO (Pinar, Varadero, La Trocha, Camagüey, Cauto Nipe), originadas probablemente como una reacción al movimiento siniestro que tiene lugar en el límite de las placas NOAM y CA (Rosencratz, 1996; Iturralde-Vinent, 1998). Las deformaciones, entorno a estas fallas, son por lo general poco perceptibles a excepción de La Trocha (Iturralde-Vinent, 1998). La velocidad de los movimientos verticales determinados por métodos geodésicos muestra que la región que ocupa la unidad neotectónica Occidental como máximo se está moviendo unos 4 mm/año, mientras que en la Oriental se alcanzan valores extremos entre 12-15 mm/año (Iturralde-Vinent, 2003).

En la unidad neotectónica oriental la falla Oriente generó una amplia zona de deformación en el flanco sur de la Sierra Maestra y de la Sierra del Purial que incluye pliegues tumbados, pequeños corrimientos y fallas inversas afectando las rocas del Eoceno Superior y más antiguas; mientras que las rocas más jóvenes según Iturralde-Vinent (1998) solo están afectadas por fallas normales.

En la figura 2.5 se muestran los rumbos de los principales sistemas de fallas activos según Iturralde-Vinent, (ed., 1996). Algunos rumbos son heredados de la etapa anterior al Neoaútóctono (Sistema Cubano, Sistema Camagüey), mientras otros pertenecen a esta etapa, como el Sistema Banao (con rumbo NS), originado durante el Terciario superior (Iturralde-Vinent, ed., 1996) y asociado a los movimientos de las fallas sinistralas de rumbo E-O (falla Oriente).

Por otra parte, las características geológicas de nuestro país han sido estudiadas desde 1869 hasta la fecha por un gran número de investigadores, nacionales y foráneos (Iturralde-Vinent, 1998). Estos trabajos han demostrado que la constitución geológica de nuestro territorio es una de las más complejas de la región del Caribe insular. El modelo propuesto por Iturralde-Vinent (1998) en opinión del autor es el que mejor explica la constitución, estructura e historia geológica de Cuba en el contexto del Caribe.

En la constitución geológica de Cuba, de acuerdo a este autor, se pueden reconocer dos niveles estructurales principales: **el substrato plegado** y **el neoaútóctono**. El substrato plegado lo forman distintos tipos de terrenos (ver figura 2.6), que constituyen fragmentos de las placas de Norteamérica, del Caribe y probablemente del Pacífico (siguiendo un modelo tectónico “movilista”). El neoaútóctono (ver la misma figura) está representado por las rocas y las estructuras originadas a partir del Eoceno Superior, posterior a la acreción del substrato plegado en el borde meridional de la placa Norteamericana entre el Cretácico y finales del Eoceno. A partir del Eoceno Superior y hasta el presente, predominan los movimientos verticales oscilatorios (Díaz, 1985; Prol et al., 1993; Cuevas, 1994), que según varios autores (Iturralde-Vinent, 1998; Formell,

1994) dieron lugar a la formación de una estructura de bloques distintamente elevados. No obstante, fallas transformantes con rumbo NE y E-O estuvieron activas en este período.

2.2 Sismicidad histórica e instrumental.

Las investigaciones sobre la sismicidad del Caribe a partir de las compilaciones realizadas por Perrey (1843, 1845, 1856) y Poey (1855, 1857) principalmente, se inician con los trabajos de Scherer (1911, 1912) para la isla de la Española y Taber (1920, 1922) para Jamaica y toda la región respectivamente.

Por ejemplo, Scherer (1912) es capaz de asociar la ocurrencia de terremotos a tres zonas teniendo en cuenta la información macrosísmica - histórica y algunos elementos fisiográficos de la isla (ver figura 2.7):

- I. La depresión Norte, que incluía la zona de fallas Septentrional.
- II. La depresión Intermedia, que abarcaba la parte central de la isla, incluyendo las fallas del macizo rocoso de la cordillera central hasta la bahía de Ocoa y luego en dirección NE – E bordeando la costa sur hasta el cabo Engaño.
- III. La depresión Sur, abarcaba la parte sur occidental de la isla, entre la península sur de Haití y la isla de Gonave, hasta la bahía de Neiva adentrándose un poco más al SO hasta los 70°LO.

No es difícil darse cuenta que las zonaciones posteriores no difieren mucho de esta propuesta.

Para las Antillas Mayores, Taber en 1922, realiza un análisis más profundo, relacionando convenientemente la información macrosísmica con los elementos geográficos, fisiográficos y geológicos de la región. Individualiza los distintos sectores que se conocen actualmente como el límite norte de la placa del Caribe desde el golfo de Honduras hasta la zona de subducción en las Antillas Menores, bordeando los límites de la microplaca de Gonave y el norte de Puerto Rico. Propone además, un mapa de epicentros “diferente” (ver figura 2.8), al asociar los terremotos con las fallas (donde el autor infería habían ocurrido). La práctica habitual hasta ese momento era la de asociar los epicentros con la localidad donde se habían reportados las mayores afectaciones (Montesus de Ballore, 1907; Hall, 1922). Específicamente para el territorio cubano, Taber (1922) hace notar que mientras en las otras islas (Española, Jamaica y Puerto Rico) con frecuencia ocurren terremotos devastadores, en el área de Cuba esta frecuencia es menor y los reportes de los sismos están referidos principalmente a la ciudad de Santiago de Cuba, con la excepción del terremoto de “Vuelta Abajo” (San Cristóbal - Candelaria, 1880) y los de Bayamo (1551, 1624). También reconoce la existencia de la zona de fallas Bartlet-Caimán (“Cayman Islands” - Sierra Maestra –

“North Haiti” para Taber), y alerta sobre la excesiva asociación de terremotos a la ciudad de Santiago de Cuba, por ser esta la única ciudad de importancia en toda la costa sur oriental de Cuba. Como se puede apreciar en la figura 2.8 los terremotos pertenecientes al archipiélago cubano los ubica en el mar y los territorios emergidos (Pinar del Río, Bayamo) y la densidad de los mismos en la región sur - oriental es de las más altas. Ya anteriormente Salteraín (1883) había reconocido la existencia de dos “distritos sísmicos”, uno al SE de la ciudad de Santiago de Cuba y el otro en el extremo occidental de la isla (Pinar del Río), pasando de la simple recopilación y cronología de los sucesos relacionados con la ocurrencia de terremotos perceptibles a la caracterización del peligro del territorio cubano.

Otros investigadores, posteriormente realizaron trabajos sobre la sismicidad del área del Caribe en su conjunto (Sykes y Ewing, 1965; Molnar y Sykes, 1969; Mann y Burke, 1984; Alvarez et al. 1985), así como de los sectores geográficos que la conforman: Tomblin y Robson (1977) entre otros para Jamaica; Prentice et al. (1994), Chalas (1989, 1996), Dolan et al. (1998), Russo y Villaseñor (1995) para la isla de la Española y Reid y Taber (1918, 1920) para Puerto Rico entre otros.

Del análisis de estos trabajos, se puede describir brevemente y a grandes rasgos la sismicidad de la placa del Caribe y su relación con las principales estructuras tectónicas del área. En los límites litosféricos occidental y oriental, se reportan los terremotos más profundos ($h \geq 70$ Km) y fuertes ($M \geq 7.0$). El borde Pacífico tiene con respecto al borde Atlántico una mayor densidad de epicentros, así como una mayor actividad volcánica. En los márgenes norte y sur de la placa la sismicidad por lo general es moderada ($M < 6.0$), aunque en algunos sectores puede ser alta. El límite norte es el más complejo desde el punto de vista geodinámico, distribuyéndose la sismicidad a lo largo de las estructuras que conforman las diferentes microplacas (Gonave, Española - Puerto Rico, Septentrional). La zona interna de la placa Caribe tiene muy poca actividad, así como la zona de interior de placa del megabloque cubano, la cual se analiza más adelante.

En el contexto cubano es larga la lista de las personas que a lo largo de estos años han estudiado los terremotos perceptibles y sus efectos, destacándose los nombres de Andrés Poey ya citado y otros como: Benito Viñes, Pedro Salteraín, Mariano Gutiérrez Lanza, Eduardo Montelieu, Julio Jover y Emilio Bacardí entre otros. En Cotilla (1998, 1999) y Chuy (1999, 2000) se hace un extenso análisis de estas personalidades, las fuentes que utilizaron, la validez y el alcance de sus resultados. Después del triunfo de la Revolución es principalmente el segundo de estos investigadores quien organiza y dirige de manera paciente y laboriosa los trabajos de recopilación, detallamiento, procesamiento y evaluación de los datos de los terremotos perceptibles y sus

efectos. Este largo y “tortuoso” camino iniciado en 1980 por Chuy (Chuy y Rodríguez, 1980; Chuy et al., 1983, 1984, 1988 entre otros) culmina con la confección de un catálogo de sismos perceptibles y un atlas de isosistas (Chuy, 1999), ambos para el período (1502 – 1990).

Para la obtención de los parámetros de los terremotos, Chuy (1999) utiliza dos criterios partiendo de la calidad de los datos iniciales:

Si existen datos puntuales (I_i) suficientes, los parámetros (intensidad epicentral, magnitud, coordenadas hipocentrales) se obtienen a partir del ajuste visual de los puntos mediante un modelo de isosistas elípticas (Alvarez y Chuy, 1985).

Si no es posible realizar el ajuste por insuficiencia de los datos iniciales se deben inferir estos parámetros independientemente, utilizando diferentes métodos.

Al segundo caso pertenecen la mayoría de los terremotos analizados, teniendo en cuenta que del total de terremotos (961) sólo a un poco más del 20% se le confeccionó un mapa de isosistas (196). Los resultados obtenidos por Chuy (1999) son importantes y han permitido extender en tiempo y espacio las investigaciones acerca de la sismicidad y el peligro sísmico en Cuba, demostrándose que prácticamente todo el territorio nacional ha sido o puede ser afectado por las sacudidas de los terremotos. No obstante se debe señalar, el alto grado de subjetividad que implica el método escogido por este autor para obtener los parámetros espacio - energéticos de los terremotos y de atenuación de las intensidades en las regiones centro y occidental de Cuba principalmente. El ajuste se realiza a partir de un proceso visual de prueba y error, modificando al mismo tiempo los parámetros del modelo elíptico y los espaciales y energéticos, sin considerar ningún criterio estadístico para determinar la calidad del mismo. Además, a pesar de contar con un elevado número de intensidades puntuales el autor no se propone obtener fórmulas de atenuación específicas para la región.

Históricamente, la zona aledaña a la costa sur – oriental donde se produce un proceso de interacción directa entre las placas de NOAM y la del CA ha sido reconocida como la de mayor actividad sísmica del país. Esta actividad sísmica es evidenciada por la ocurrencia de terremotos históricos destructivos (1766, 1852, $I_{max}=IX$ MSK) reportados en la ciudad de Santiago de Cuba, destacándose de este a oeste un grupo de sectores, vinculados a los procesos geodinámicos explicados en el epígrafe 2.1 (Cuenca de Cabo Cruz, Pílon, cinturón deformado de Santiago de Cuba, Guantánamo, Purial, Maisí - Paso de los vientos). La relación sismicidad-falla o sismicidad-proceso geodinámico está bien establecida, los datos aportados por el servicio sismológico cubano lo demuestran, así como las soluciones de los mecanismos focales (CMT, Harvard Seismology: Centroid-Moment Tensor Project - <http://www.seismology.harvard.edu/projects/CMT/>; Moreno,

2002). Más al este (Haití) o el oeste (Caimán) la dispersión de los epicentros es evidente, al disminuir la calidad de las determinaciones hipocentrales de la red cubana y al no existir determinaciones de las redes internacionales para terremotos de baja energía.

En los territorios emergidos del oriente cubano, la sismicidad histórica ayuda poco por la ya comentada “excesiva” asociación de los terremotos a la ciudad de Santiago de Cuba, solo en Bayamo (1551, con I_{\max} =VIII; 1624, con I_{\max} =VII) y Gibara (1914, con I_{\max} =VII) se reportan estremecimientos importantes.

En la etapa instrumental no se reportan en los terrenos emergidos de la región oriental terremotos de gran envergadura y los epicentros al borde de la costa sur no permiten dilucidar con precisión si la actividad sísmica es consecuencia de la interacción del sistema de fallas Oriente y las fallas secundarias que dividen los bloques del territorio emergido. Se destaca no obstante la zona de Moa - Purial y se percibe una gran “tranquilidad” en la región que ocupa la Cuenca del Cauto. Por el contrario, la sismicidad de la costa norte – oriental se ha incrementado en los últimos años, debido en opinión del autor a la acreción de la plataforma de las Bahamas con los terrenos que limitan el megabloque cubano.

En la región centro – occidental la sismicidad es menor, Alvarez et al. (1985) la denominaron de interior de placa (o intraplaca). Los terremotos en esta zona son significativamente menos frecuentes y menos fuertes con respecto a la región sur-oriental. La sismicidad de esta parte de la Isla ha sido estudiada casi exclusivamente a partir de los datos macrosísmicos. Se destacan con estremecimientos de envergadura ($I \geq VI$) la zona de San Cristóbal en Pinar del Río, Trinidad en S. Espíritus y Remedios en Villa Clara. La sismicidad instrumental en esta región ha aportado poco, las determinaciones hipocentrales tienen poca calidad y están ausentes de los reportes de las agencias internacionales. No existen determinaciones de mecanismos focales, ni estudios geodinámicos, por lo tanto la relación sismicidad-falla tiene un alto grado de incertidumbre

Un problema no resuelto aún por el servicio sismológico cubano es la determinación precisa de los hipocentros, existiendo diferencias apreciables entre las determinaciones instrumentales de las agencias internacionales y las de nuestro servicio sismológico. Una buena parte de los epicentros son determinados sin el error inherente a esta estimación, mientras que la profundidad es uno de los parámetros menos preciso, abundando los valores de 0, 10 y 33 Km, los cuales han sido prefijados para obtener los otros tres (coordenadas epicentrales y magnitud). No obstante, se puede afirmar que la mayoría de los terremotos son superficiales ($h \leq 30$ Km).

2.3 Catálogo paramétrico e intervalos de completamiento.

Una versión actualizada hasta el año 2000 del catálogo paramétrico (Alvarez et al., 1999), fue preparada a partir de los reportes de las agencias internacionales (NOOA, ISC, MPR, NEIC, JSN) y del Servicio Sismológico Nacional (SSSN) cubano. Este catálogo cubre un período de casi 500 años (1502-2000) y está geográficamente enmarcado entre los 16°-24° N y 67°-86° O (ver mapa de epicentros en la figura 2.9). El número total de eventos fue de 16525 y el parámetro energético escogido fue la magnitud obtenida a partir de las ondas superficiales (M_S). A cada evento en consecuencia se le calculó su magnitud M_S de forma directa o indirecta usando el mismo procedimiento que en Alvarez et al. (1999) y García et al. (2003a). No se impuso un umbral de magnitud mínimo, pero se excluyeron del catálogo los eventos sin magnitud o intensidad macrosísmica reportada, así como aquellos a los que no fue posible asignarle sus coordenadas hipocentrales.

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 tipo Gardner – Knopoff (Gardner y Knopoff, 1974), obtenida empleando datos instrumentales de la región de estudio. En García et al. (2003a) se detalla el procedimiento utilizado.

Como dentro del árbol lógico se utilizó una relación de atenuación definida en una escala de magnitud diversa M_W (Dahle et al., 1995), se utilizaron las fórmulas empíricas (con validez global) propuestas por Ekström y Dziewonski (1988) para transformar la magnitud M_S a M_W . Es necesario aclarar que esta transformación se realizó dentro de los programas de cálculo (SEISRISK III, SEISTREE, SMOOSEIS), por lo tanto la magnitud de los eventos del catálogo no fue alterada.

Es bien conocido que las relaciones de atenuación se obtienen generalmente para terremotos someros, y este es el caso de las seleccionadas por nosotros. Por esta razón, con el fin de no excluir de los cálculos a los eventos profundos de La Española y los ya citados del promontorio de Santiago de Cuba, fue necesario aplicar un procedimiento para convertir la magnitud y la profundidad real (M_S y h) de los eventos con profundidades ≥ 30 Km a una magnitud y profundidad equivalente (M_{Se} y $h_e = 30$ Km). Este procedimiento que se realiza en el proceso de cálculo 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. La corrección obtenida depende sólo de la profundidad:

$$\Delta M_S = M_S - M_{S_e} = 0.01464(h - 30) \tag{2.1}$$

Esta corrección empírica fue calculada para tres intervalos de profundidades ($h = 50, 100, 175 \text{ Km}$) y aplicada a los terremotos del catálogo paramétrico:

$$\begin{aligned} \Delta M_S = 0.3 & \quad \text{para } 30 \text{ Km} \leq h < 75 \text{ Km} \text{ (377 eventos);} \\ \Delta M_S = 1.0 & \quad \text{para } 75 \text{ Km} \leq h < 150 \text{ Km} \text{ (208 eventos);} \\ \Delta M_S = 2.1 & \quad \text{para } h \geq 150 \text{ Km} \text{ (27 eventos).} \end{aligned}$$

Representatividad de los datos.

Para la definición de la representatividad de los datos en cada intervalo de magnitud se escogió el procedimiento propuesto por Stepp (1972). Este método consiste en la determinación del número total (acumulativo) de eventos en el tiempo para cada clase de magnitud (ver figura 2.10), 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. (2003a), se consideró a la región de La Española de manera independiente, realizado el análisis para cuatro 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.
- 1. **Zona B:** Comprende la región sur - oriental de la Isla de Cuba, incluyendo las zonas que se encuentran al sur - este de la falla anteriormente citada.
- 2. **Zona C:** Comprende la Isla de Jamaica y las zonas que se encuentran al sur-oeste de Cabo Cruz.
- 3. **Zona D:** Comprende la Isla de La Española y la región entre esta Isla y la de Puerto Rico.

En la figura 2.11 y la tabla 2.2 se muestran los resultados obtenidos para estas cuatro zonas.

Tabla 2.2- Intervalos temporales de completamiento de los eventos presentes en el catalogo por clase de magnitud, ver en el texto las características espaciales de cada zona.

M_S	Zona A	Zona B	Zona C	Zona D
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	1985	1975	1985	1985

2.4 Método no zonificado.

A pesar de ser métodos conocidos, nunca se había estimado la peligrosidad sísmica a partir de un método no zonificado a escala nacional; 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 especial la magnitud máxima), en una región donde el conocimiento de las estructuras potencialmente sismogeneradoras es aún 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 sí sola no puede apoyar la definición de zonas potencialmente sismogeneradoras, mejorando y corrigiendo los mapas propuestos con este fin. En la figura 2.12 se presenta de manera más detallada el árbol lógico diseñado para la ejecución del proceso de cálculo de la peligrosidad sísmica usando el método no zonificado escogido (Frankel, 1995; Frankel et al., 1996, 2000).

2.4.1 Modelos de sismicidad

El método propuesto por Frankel (1995), como anteriormente Riznichenko (1960), 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 dos modelos de sismicidad (S1 con $M \geq 3$ y S2 con $M \geq 5$ en el árbol lógico, figura 2.12), para los cuales se calculó la actividad sísmica con intervalos de completamiento variable a partir de la magnitud mínima (M_0) escogida. Se hicieron además varias pruebas para determinar el valor apropiado de la distancia de correlación “ c ” a utilizar en cada uno de los modelos; se verificó que un valor de $c = 30$ Km era apropiado para el primer modelo (S1), mientras un valor de $c = 40$ Km era más apropiado para el modelo S2. Un patrón demasiado fragmentado se obtuvo usando valores de $c < 25$ Km y al utilizar valores superiores a 50 Km se verificó el efecto contrario.

Estos dos modelos son capaces de representar por sí solos la variabilidad espacio - temporal de la sismicidad en la región de estudio. Los parámetros que diferencian los modelos de sismicidad son:

el umbral de magnitud escogido (S1: $M \geq 3$ y S2: $M \geq 5$) y la distancia de correlación utilizada para “suavizar” la sismicidad (S1: $c = 30$ Km y S2: $c = 40$ Km).

Dos modificaciones al modelo conceptual propuesto por Frankel (1995) y Frankel et al. (1996) para los E.U. fueron necesarias:

1. No se consideró la existencia de un modelo 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 para inferir que la ocurrencia de terremotos en las zonas sismogeneradoras que se supone se hayan originado estos eventos siga un proceso de este tipo. Son necesarias otras evidencias (paleosísmicas, geodinámicas) que nos permitan estimar la periodicidad o recurrencia “característica” de eventos de esta clase de magnitud y de esta manera poder considerar un modelo del tipo “time dependent” [dependiente del tiempo, Working Group on California Earthquake Probabilities (1988, 1990, 1995); Peruzza (1999); Cramer et al. (2000)].
2. Se excluye igualmente, el modelo denominado por Frankel (1995): “zona de fondo uniforme”, pues la finalidad del mismo es en esencia obtener un valor mínimo de actividad sísmica uniforme para toda la región (fijando el valor de 10^3), con el fin de tener un valor mínimo de peligro sísmico donde “volcar” los resultados obtenidos usando los otros modelos y que no existan “agujeros negros” en los mapas finales.

2.4.2 Parámetros que describen la sismicidad.

N3 - El tercer nodo se relaciona con la hipótesis inicial del método que presupone la invariabilidad del parámetro (b) del gráfico magnitud – frecuencia y la magnitud máxima (M_{\max}), a lo largo del área o en la mayoría de ella. Se proponen tres modelos diferentes ($Z1$, $Z2$, $Z3$ en la figura 2.13). En ellos el parámetro “ b ” se calcula de forma independiente para diversas variantes de macrozonas que conforman cada modelo. Algunos autores han asociado la división del área de estudio con diferentes regímenes de atenuación del parámetro que caracteriza la peligrosidad sísmica (Frankel et al., 1996 para los EE.UU.; Akinci et al., 2004 para Italia), en este trabajo la división en macrozonas se realizó teniendo en cuenta los diferentes tipos de sismicidad presentes en la región y su 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 fuente del método zonificado.

Los valores de (b) fueron obtenidos ajustando el número acumulativo de eventos en cada clase de magnitud según la relación de Gutenberg – Richter, usando el método de máxima verosimilitud (Weichert, 1980). La magnitud máxima de cada macrozona se obtuvo utilizando la técnica “one step beyond” (Slejko, 1998), en la cual estos valores se asignan incrementando en una clase la magnitud del terremoto máximo observado (ver más detalles del método en el epígrafe 2.5.3).

El modelo Z1 (figura 2.13a) considera una zona única, homogénea a todo lo largo y ancho del área de estudio. La magnitud máxima observada está relacionada con el terremoto de 1946 ($M_S = 8.2$) ocurrido al Norte de La Española. Los valores de b obtenidos (ver figura 2.14a) oscilan entre 0.74 (modelo S1) y 0.69 (modelo S2). En el modelo Z2 (figura 2.13b), la región de estudio fue dividida en dos partes, considerando los dos diversos ambientes tectónicos globales que existen en el área. La región norte (interior de placa) se relaciona con una sismicidad de moderada a baja. El terremoto de Gibara (1914, $M_S = 6.2$), presenta la magnitud máxima observada y los valores de b calculados son de 0.90 para el modelo S1 y 0.84 para el modelo S2 (figura. 2.14b). En el mismo modelo, la región sur, está relacionada con el límite de las placas NOAM y CA. Este límite se considera un límite complejo y por ende no se trata de diferenciar los sectores del mismo. Los terremotos ocurren principalmente en el límite de la placa (límites norte y sur de la microplaca de Gonave), el terremoto del año 1946 es considerado el máximo observado ($M_S = 8.2$) y los valores de b calculados varían de manera significativa 0.73 para el modelo S1 y 0.64 para el modelo S2 (figura 2.14c). La región del límite Norte de la placa del CA, fue dividida en dos zonas (norte y sur) en el modelo Z3 (figura 2.13c), focalizando el papel del límite activo de la misma. En la porción norte sigue siendo el terremoto del año 1946 ($M_S = 8.2$) el más significativo, mientras los valores de b obtenidos para esta zona oscilan entre 0.76 y 0.60 para los modelos S1 y S2, respectivamente (figura 2.14d). En la zona sur, el terremoto de Port Royal, Jamaica (1692, $M_S = 7.8$), representa el mayor evento en el área y el valor de b coincide en ambos modelos (0.70, figura 2.14e). Un área de solapamiento de 50 Km fue considerada en los límites de cada zona, para evadir problemas de fronteras y que el paso de una zona a otra fuera “suave”.

2.4.3 Modelos de atenuación.

En ausencia de relaciones de atenuación de parámetros dinámicos válidas para la región de Cuba, se utilizaron relaciones de validez regional: A1 = Ambraseys et al. (1996), A2 = 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 (ver epígrafe 2.5.4).

2.4.4 Resultados obtenidos.

Usando este método fueron obtenidos 12 juegos de curvas diferentes para el área de estudio dividida en celdas de aproximadamente 10 Km² (1623 celdas). Se consideraron además, aceleraciones pico para los períodos de retorno de 1, 5, 15, 25, 35, 50, 75, 100, 250, 475, 750, 1000, 2500, 5000, 10000, 50000, 100000, 500000, 1000000 años. A partir de considerar dos modelos de sismicidad (S1 y S2), tres esquemas de macrozonas diversos (Z1, Z2 y Z3) y dos relaciones de atenuación en términos de aceleración horizontal pico para roca y suelo blando (A1 y A2, Ambraseys et al., 1996; Dahle et al., 1995 respectivamente). Los resultados presentados aquí en forma de mapas son referidos a roca (figura 2.15) y suelo blando (figura 2.16) para un período de retorno de 475 años o una probabilidad de excedencia del 10% y 50 años de vida útil de las edificaciones, considerando siempre el aporte de la incertidumbre aleatoria (desviación estándar de las leyes de atenuación, $sd\tau$).

En los mapas obtenidos usando el modelo de sismicidad S1 (columna izquierda en la figura 2.15 y 2.16) el peligro está focalizado en varias zonas, mientras que en aquellos que utilizan el modelo S2 (columna derecha de la mismas figuras) estas zonas son más grandes debido a la influencia del “suavizado” usando una distancia de correlación mayor. Además, este modelo (S2) acentúa las áreas más sísmicas de la región, mientras que con el modelo S1 se logra evidenciar algunas áreas peligrosas en la región de baja sismicidad (centro-occidente de Cuba). La influencia de la división del área en macro-zonas es bastante limitada en el modelo S1, por el contrario, en el modelo S2 determina fuertemente el nivel de peligrosidad sísmica a lo largo del límite de placa.

La PGA es mayor en las áreas más sísmicas (p.e. Santiago y sus alrededores) usando el modelo de atenuación A1 (Ambraseys et al., 1996) mientras que usando el modelo A2 (Dahle et al., 1995) ocurre lo mismo pero en las áreas menos sísmicas (compare p.e. el noroeste de Cuba en las figuras 2.15a y 2.15g). Los valores más grandes de PGA referidos a roca (que exceden los 0.40 g) se obtienen con el modelo de sismicidad S2, la división en macrozonas Z3, y el modelo de atenuación A1 a lo largo de la mayor parte de la costa suroriental de Cuba (figura 2.15f).

Como se esperaba, las características generales de los mapas obtenidos para un suelo blando (figura 2.16) no se diferencian mucho de los obtenidos para roca (figura 2.15), pero los valores de PGA lógicamente son mayores. Los resultados obtenidos con el modelo de atenuación A1 (Ambraseys et al., 1996) exceden los 0.60 g a lo largo del límite de la placa del CA desde Cuba a La Española y en la región central se sobrepasan los 0.20 g usando el modelo de sismicidad S1 y de atenuación A2 (figura 2.16a y 2.16g).

Nótese que los resultados obtenidos a partir del modelo S2, son más bajos y menos detallados en la región centro – occidental; este comportamiento está asociado a: (1)- un número insuficiente de eventos con $M \geq 5.0$ en la zona de interior de placa, y (2)- el efecto del “suavizado” de la sismicidad que comporta inevitablemente una disminución de la peligrosidad al “compartir” la actividad sísmica con las celdas vecinas.

Los mapas finales se obtuvieron “agregando” los resultados obtenidos en cada rama a partir del árbol lógico diseñado. En la figura 2.17a se muestra el mapa obtenido teniendo en cuenta el aporte de la incertidumbre aleatoria (desviación estándar de las leyes de atenuación, sdr), mientras que en el segundo caso (figura 2.17b) una variante más conservadora que incluye además el aporte de la incertidumbre epistémica.

2.5 Método zonificado.

Como fue anunciado anteriormente, se usó el algoritmo probabilista propuesto por Cornell (1968) y modificado por Bender y Perkins (1987), con el fin de aplicar consecutivamente varias hipótesis o parámetros de entrada diversos, permitiendo la evaluación de todas las incertidumbres que se derivan del conocimiento insuficiente del fenómeno que se estudia.

En la figura 2.18, se presenta el diseño del árbol lógico. En el mismo se consideró la variabilidad de selección de la fuente sísmica (3 modelos diversos), los métodos de estimación de los parámetros de la relación magnitud frecuencia (2) y la magnitud máxima (2), y de fórmula de atenuación (2). Más adelante se dan detalles sobre cada una de las alternativas escogidas y como se obtuvieron a partir de las mismas los parámetros necesarios para realizar los cálculos.

2.5.1 Modelos de zonas sismogeneradoras.

Teniendo en cuenta la complejidad del ambiente geológico - tectónico del área de estudio, el hasta el momento insuficiente conocimiento acerca de la evolución cinemática de los principales sistemas de fallas cubanos y la incertidumbre asociada a la localización de los terremotos, la relación sismicidad-falla tiene poca fiabilidad, siendo necesario asociar la misma a zonas sismogeneradoras y no a fallas individuales.

Un comentario aparte merecen entonces los estudios de delimitación de las zonas de origen de terremotos (ZOT). Al inicio de la década del 70 estos estudios se limitaban a la delimitación de los principales sistemas de fallas y el ajuste posterior de los parámetros del régimen sísmico a estas estructuras (Rubio, 1985; Alvarez y Bune, 1985). Los trabajos de sismotectónica se inician con las investigaciones de equipos cubano – soviéticos para el emplazamiento de centrales

electronucleares usando la metodología propuesta por Belousov et al. (1983), denominada en algunas referencias como “método histórico – tectónico”. La misma se fundamenta en la evaluación de la historia neotectónica de la región, a partir de la información contenida en un conjunto de mapas de amplitudes (verticales) de los desplazamientos en el período Neógeno – Cuaternario. El mapa de Zonas Sismogeneradoras (ZS) se elabora integrando la información geólogo – geomorfológica mencionada anteriormente y la geofísica, incluyendo la sismológica. La categorización de las ZS y su Magnitud máxima (M_{\max}) son evaluadas de acuerdo a sus características morfológicas y morfométricas. Trabajos de este tipo se realizaron en Cuba por Orbera et al. (1987, 1989), principalmente en los estudios de emplazamiento de objetivos nucleares.

Desde el punto de vista sismotectónico estos estudios constituyeron un gran aporte, en lo referido a la cartografía y la delimitación por métodos geólogo – geomorfológicos y geofísicos de las principales estructuras sísmicamente activas de nuestro país. Sin embargo, como ya fue reconocido por Arango (1996, 2000), es incorrecto considerar una superficie de nivelación homogénea para todo el país, a partir de la cual se produjeron los desplazamientos neotectónicos que dieron como resultado el relieve actual, desconociendo los grandes movimientos horizontales que tuvieron lugar a partir del Eoceno – Medio y hasta la actualidad (Cobiella, 1984; Iturralde–Vinent, 1994, 1996). Esta interpretación conlleva en algunos casos a una sobrestimación del potencial de las ZS y de su M_{\max} al categorizar las ZS usando esta metodología.

Con una concepción diferente del tratamiento de la información geólogo – tectónica Cotilla et al. (1988, 1991) realizan trabajos de sismotectónica basados en la interpretación de imágenes cósmicas y la constatación de esta interpretación a partir de la información geológica, neotectónica, geofísica y sismológica existente. A partir de estos estudios se propone una red de zonas de alineamientos principales y nudos (intersección de los alineamientos) del territorio insular cubano donde es posible la ocurrencia de terremotos y una guía metodológica para la asignación de la M_{\max} de las ZS empleando información geólogo – tectónica y geofísica, con énfasis fundamental en los datos sismológicos. Estos resultados fueron utilizados solamente en Alvarez et al. (1991), donde se asume como hipótesis de partida que los terremotos fuertes ocurren con mayor probabilidad en la intersección de los alineamientos (nudos), asociando los epicentros de los terremotos históricos a los mismos. La incertidumbre asociada a la determinación de los parámetros espaciales de los terremotos, sobre todo en la región centro – occidental de Cuba, hace poco feliz este tipo de zonación, única tanto en el ámbito nacional, como internacional.

En una investigación aplicada a inicios de los 90, se trataron de conciliar las diferentes interpretaciones de la sismotectónica de la región oriental de Cuba. Como información básica se utilizaron los trabajos referidos anteriormente: Orbera et al (1984, 1987, 1989), Babaev et al. (1989) y Cotilla et al. (1988, 1990). En el esquema resultante de ZS (comisión ad hoc., 1991) las ZS pertenecientes a la zona de fallas Oriente (Bartlet – Caimán en su conjunto) y la llamada Norte Cubana se ajustaron sin dificultades a las concepciones espacio – energéticas de los trabajos tomados como base, específicamente los de Cotilla et al.(1990) y Babaev et al. (1989), sin embargo, en la región insular no prevaleció ningún criterio, conformándose un gran “mosaico” de ZS a partir de concepciones en muchos casos contrapuestas. La asignación de las magnitudes máximas fue bastante cercana a la propuesta por Cotilla et al. (1990).

Posteriormente Orbera et al. (1990) proponen un nuevo mapa para la región occidental del país. González et al. (1994) proponen otro para la región central. En ambos casos se utiliza la metodología propuesta por Belousov et al. (1983), pero se mejoran los resultados anteriores al utilizarse un mayor cúmulo de información de partida, y de forma novedosa en el segundo trabajo se utiliza además información gravimétrica (Cuevas, 1993) para la estimación de la M_{max} . Estos dos esquemas de ZS junto con los resultados obtenidos por la comisión ad hoc (1991) se unen en Chuy y Alvarez (1995) conformando un esquema único de ZS a escala nacional.

Por esa misma fecha, Cotilla y Alvarez preparan un nuevo esquema de ZS (fue publicado tres años después: Cotilla y Alvarez, 1998), en el cual a partir de la interpretación de imágenes cósmicas del LANDSAT y su posterior complementación con información de tipo: geomorfológica, geológica, gravimétrica, sísmica, y sismológica se obtuvieron las principales líneas de debilidad tectónica actual (LDTA). Las ZS resultantes tienen como eje principal las LDTA, el número de ZS disminuyó con respecto al esquema anterior (Cotilla et al., 1991), así como la categoría de las ZS de menor potencial sísmico, pasando algunas de ellas al “background” o sismicidad de fondo. En este nuevo esquema no se considera la presencia de nudos tectónicos en las intersecciones de las LDTA y la mayoría de las ZS fueron delimitadas como una franja de aproximadamente 10 Km, con excepción de algunas zonas de mayor complejidad a las que se le asignó un ancho mayor. El trazado de las ZS no difiere sustancialmente del propuesto en Chuy y Alvarez (1995), en cuanto las LDTA responden en gran medida con los principales sistemas de fallas presentes en el territorio insular cubano y no son más que una generalización (línea primero, un polígono de ancho variable luego) cartográfica de las mismas. Las diferencias principales estriban en la categorización de las ZS y la asignación de la magnitud máxima. Este esquema fue utilizado por Rodríguez et al. (1997) para obtener estimados probabilísticos a escala nacional.

Finalmente, se deben incluir en esta reseña los trabajos realizados por Arango (1996, 2000), con el fin de determinar las particularidades geodinámicas de la principal ZS del territorio cubano: la Bartlet – Caimán, a partir de la interpretación de mapas batimétricos (SEA CARIB-II), perfiles y mapas geológico – geofísicos y datos sismológicos. Estos estudios, que toman como base los trabajos sobre el sistema de fallas Oriente realizados por Calais y Mercier de Lépinay [Calais y Mercier de Lépinay (1989, 1993), Lépinay et al. (1988), Calais (1988)], analizan y proponen la existencia de 4 procesos geodinámicos en el área, relacionados al movimiento lateral izquierdo de la Placa de Norteamérica (NOAM) con la Placa del Caribe (CA) a través de la falla transformante Bartlet – Caimán.

A partir de la diferenciación de estos procesos geodinámicos Arango (Arango, 2000; Despaigne et al., 2002), propone una nueva zonación para la zona de fallas Oriente: (1)- Cabo Cruz (transtensión), (2)- Pílon (deslizamiento por el rumbo), (3)- Oriente (extensión) y (4)- Santiago (transpresión). Este enfoque constituye un salto cualitativo en cuanto a las metodologías aplicadas hasta ese momento para categorizar las ZS, ya que éstas se basaban fundamentalmente en la interpretación de los desplazamientos neotectónicos verticales y en esta área predominan sustancialmente los movimientos horizontales.

Toda esta diversidad de enfoques e interpretaciones ha conllevado a una nueva problemática, pues diferentes autores han considerado, bajo las mismas condiciones, diferentes modelos de zonas sismogeneradoras, igualmente válidos. En este trabajo, con el fin de incorporar y cuantificar la incertidumbre aportada por esta problemática al proceso de estimación de la peligrosidad sísmica, se utilizaron tres modelos de zonas sismogeneradoras (ZONA-A, ZONA-B y ZONA-C).

Modelo de zonas sismogeneradoras ZONA-A.

Modelo utilizado a escala nacional en Chuy y Alvarez (1995) y posteriormente modificado por Despaigne et al. (2002) para la región sur - oriental. 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 siglo pasado en las regiones: oriental (Chuy et al., 1992), centro - oriental (González et al., 1994) y occidental (Orbera et al., 1990). Las zonas sismogeneradoras y su potencialidad, en ocasiones no están respaldadas por la sismicidad presente en el catálogo, lo que conlleva a una diferencia, a veces significativa, entre el terremoto máximo observado en la zona sismogeneradora y la magnitud máxima asignada (ver epígrafe 2.5.3).

En anteriores trabajos (Rodríguez et al., 1997; García et al., 2003a) se han expuesto las limitaciones de este modelo en cuanto a la no uniformidad en el tratamiento de la información de partida (debido a su origen) y su posterior procesamiento. No es objetivo de este trabajo re-evaluar el modelo propuesto en Chuy y Alvarez (1995), por lo que únicamente se incluyen dos modificaciones: la primera ya fue introducida por Despaigne et al. (2002) y consiste en la variación de las fronteras de las zonas sismogeneradoras de la falla Oriente, en correspondencia con los nuevos criterios geodinámicos propuestos para esta región por Arango (1996, 2000); la segunda es una modificación por razones técnicas: debido a que el programa de cálculo no admite superposiciones en las fronteras de las zonas, las fronteras de la zona profunda de La Española debieron ser modificadas.

El modelo resultante se presenta en la figura 2.19, consta de 55 zonas sismogeneradoras + 3 zonas de sismicidad de fondo o “background”. En lo que sigue ZONA-A [modificado de Chuy y Alvarez (1995)].

Modelo de zonas sismogeneradoras ZONA-B.

Modelo utilizado en García et al. (2003a) 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), 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.

Debido a recientes aportes en el conocimiento geodinámico de la zona de fallas Oriente y de las zonas sismogeneradoras de Jamaica y La Española, en este modelo se incluyen las modificaciones pertinentes a la luz de las recomendaciones propuestas:

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

generación de corteza (CSC) y la costa NW de Jamaica, coincidiendo con el límite sur de la microplaca de Gonave.

El modelo de zonas sismogeneradoras resultante (figura 2.20) consta de 44 zonas sismogeneradoras + 3 zonas de sismicidad de fondo o “background”. En lo que sigue ZONA-B [modificado de García et al. (2003)].

Modelo de zonas sismogeneradoras ZONA-C.

El tercer modelo, mucho más 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, 1993).

El tamaño de estas macrozonas 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, con características sismotectónicas similares, pero no idénticas, teniendo en cuenta además la incertidumbre de las determinaciones hipocentrales de los terremotos en zonas de baja sismicidad o con una red sismológica poco eficiente. El régimen sísmico dentro de la macrozona resultante representa la potencialidad promedio de las zonas sismogeneradoras, zonas de fallas o fallas que la componen. El modelo de zonas sismogeneradoras resultante (figura 2.21) consta de 29 zonas sismogeneradoras + 3 zonas de sismicidad de fondo.

2.5.2 Parámetros que describen la sismicidad.

Estimación de los parámetros de los gráficos magnitud - frecuencia.

Para comprobar la variabilidad del parámetro b del gráfico magnitud - frecuencia a partir del método de ajuste utilizado, se realizó un análisis de sensibilidad tomando como base el modelo ZONA-B. Los resultados de este análisis se muestran en la figura 2.22.

A cada una de las ZS se les calculó el parámetro b usando dos métodos de ajuste diferentes [triángulo en la figura 2.22: ajuste por el método mínimos cuadrados (b_{AMMC}); cuadrado en la misma figura: 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 (círculo en la figura 2.22), 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); sólo en dos ocasiones (zonas 07 y 44) los resultados obtenidos por ambos métodos son lo suficientemente diferentes como para superar el valor medio +1 sd . En todos los demás casos la diferencia es menor

de 0.24 (media+1sd), aún cuando la sd del ajuste (barra inferior o superior del símbolo según sea el método) es apreciable.

Como resultado de este análisis se aprecia que las zonas donde existe una marcada diferencia entre los dos ajustes son zonas donde el aporte de la sismicidad histórica y la instrumental 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 2.23a. En las zonas donde no se aprecia este fenómeno, ambos ajustes coinciden plenamente como en la zona 28 (ver figura 2.23b).

Se consideró entonces 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, se favorece de manera conservadora el aporte de la sismicidad histórica y por lo tanto se toman los resultados obtenidos por el método de mínimos cuadrados.

A partir de estos resultados, se puede concluir que la variabilidad del parámetro b no es significativa en cuanto al uso de un método u otro para el ajuste de los datos experimentales a un modelo tipo G-R se refiere. Por esta razón, en el árbol lógico se considera la incertidumbre asociada a la posibilidad de ajustar o no los datos experimentales a un modelo dado. Un análisis de este tipo fue realizado por Slejko et al. (1998, 2002), para el norte de Italia y por el autor (García et al., 2003a, García et al., 2005) para Cuba.

En el primer método [descrito en Slejko et al. (1998), IND en la figura 2.18] no se requiere del ajuste de las frecuencias de terremotos por clase de magnitud a una relación exponencial (G-R), caracterizándose 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 (G-R).

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., (2003a)], normalizando este valor para un período de 100 años. Posteriormente, 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.

De la misma manera, estas frecuencias fueron ajustadas utilizando los métodos descritos más arriba. De la línea resultante se tomaron las frecuencias por clase de magnitud y no el valor de a y b porque es ésta la manera de introducir los datos en el programa de cómputo.

2.5.3 Estimación de la magnitud máxima.

Partiendo de que los modelos de zonas sismogeneradoras tienen un origen diverso, se usaron para la estimación de la magnitud máxima de las zonas sismogeneradoras tres metodologías diversas: **(a)** – “*One step beyond*”, método propuesto por Slejko et al. (1998) y utilizado anteriormente en (García et al., 2003a). La traducción del nombre de este método, “un salto adelante”, no es muy explicativa, y en lo que sigue se usa 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 Wells 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 sólo se utiliza el procedimiento de cálculo para la obtención de la M_{\max} .

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 M_{\max} . Este método utiliza implícitamente la información contenida en el catálogo y sólo 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 zonas donde la sismicidad está bien documentada y es posible realizar un buen ajuste del gráfico magnitud – frecuencia, dependiendo en gran medida de la calidad del mismo la magnitud máxima obtenida.

El procedimiento de cálculo para la obtención de la M_{\max} consiste en la extrapolación del ajuste del gráfico magnitud – frecuencia un paso más (0.5 unidades de magnitud). La magnitud máxima obtenida será válida únicamente si su período de recurrencia medio está comprendido en un intervalo de tiempo mayor que el período que cubre el catálogo, pero no tan grande como para obtener frecuencias de ocurrencia demasiado bajas; el intervalo escogido varía entre 500 y 2500 años. Si la M_{\max} obtenida tiene un período de retorno medio que no está comprendido en este intervalo (de 500 a 2500 años), se presupone que la M_{\max} es igual a la magnitud del terremoto máximo observado (M_{\max_obs}). En la figura 2.24a se presentan como ejemplo los resultados

obtenidos para el modelo de zonas sismogeneradoras ZONA-B [modificado de García et al. (2003a)].

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 la figura 2.24b se muestran los resultados para una zona en particular, la 29; los círculos azules representan la frecuencia acumulativa de eventos para un período 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 se siguen dos criterios diversos:

- (a) - utilizar la relaciones empíricas propuestas por Wells y Coppersmith (1994) para obtener la M_{\max} a partir de la longitud (semi-longitud) de la falla (zonas de fallas),
- (b) - tomar directamente la clasificación (y por ende el valor de M_{\max}) 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 M_{\max} son estimados tomando en consideración entre otros parámetros, también la longitud de zona de fallas (Shebalin, 1971).

Para los modelos restantes, se utilizó una relación del tipo:

$$M = a + \log(K) \quad (2.2)$$

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).

En primera instancia se obtuvo la magnitud máxima usando los valores anteriormente mencionados: la semi-longitud total de la falla (0.5L) y un tercio de esta (0.3L). Se tuvo en cuenta además los valores de M_{\max} 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).

La relación escogida fue la propuesta por Wells y Coppersmith (1994):

$$M = 5.08(0.10) + 1.16(0.07) * \log(SRL) \quad (2.3)$$

donde M = magnitud de momento (M_W), 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: $M_W = \{5.2 - 8.1\}$ y $SRL = \{1.3 - 432\}$ Km.

En la figura 2.25 se muestran los resultados obtenidos para el modelo de zonas sismogeneradoras ZONA-B [modificado de García et al. (2003a)]. Lo primero que se aprecia 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 M_S . Sin embargo, tanto la magnitud máxima obtenida usando (3.3) como las ya existentes están por encima de 6.0 M_S . 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 (3.3): zonas 29 y 32; en ambos casos se utilizó la clasificación sismotectónica existente, otorgándole a la zona el valor medio del intervalo [$M_{max_max} - M_{max_min}$]; en los demás casos se utilizó la M_{max} obtenida usando (3.3) con 0.5L.

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

Kijko y Graham (1998) proponen un método de estimación de la peligrosidad sísmica el cual llamaron “paramétrico – histórico”. 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. De este método, solo se usó el procedimiento de cálculo para la obtención de la magnitud máxima y por lo tanto es el que se analiza en detalle a continuación.

Al calcular la M_{max} 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} representa el umbral de magnitud mínima 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 su función de distribución acumulativa (CDF), $F_M(m | m_{max})$. El parámetro m_{max} es considerado el límite superior del rango de magnitudes posibles y por lo tanto puede ser estimado. Kijko y Graham en vez de usar la definición clásica de la función de distribución acumulativa (CDF), proponen que esta sea representada a partir de una función gamma – exponencial:

$$F_M(m) = C_\beta \left\{ 1 - [p/(p + m - m_{\min})]^q \right\} \quad (2.4)$$

donde $m_{\min} \leq m \leq m_{\max}$, y C_β es un coeficiente de normalización. Los parámetros p y q son utilizados para representar el valor medio [$p = \bar{\beta}/(\sigma_\beta)^2$] y la varianza [$q = (\bar{\beta}/\sigma_\beta)^2$] de β . El símbolo $\bar{\beta}$ representa el valor medio de β , σ_β es la desviación estándar de la determinación de este parámetro, mientras que

$$C_\beta = 1/\left\{ 1 - [p/(p + m_{\max} - m_{\min})]^q \right\} \quad (2.5)$$

A partir de la condición de comparar la magnitud máxima observada (m_{\max}^{obs}) con la magnitud máxima esperada durante un intervalo de tiempo T , esta última es calculada a partir de la formulación genérica:

$$\hat{m}_{\max} = m_{\max}^{obs} + \Delta_i \quad (2.6)$$

donde Δ_i puede obtenerse de distinta manera según el estimador que se utilice: Tate - Pisarenko, T-P (Tate, 1959; Pisarenko et al., 1996); Kijko-Sellevoll, K-S (Kijko y Sellevoll, 1989); Kijko-Sellevoll-Bayesiano, K-S-B (Kijko y Graham, 1998). De la misma forma es posible obtener la incertidumbre de esta estimación a partir de la varianza asociada a la misma:

$$Var(\hat{m}_{\max}) \cong \sigma_M^2 + \Delta^2 \quad (2.7)$$

donde σ_M representa el error cuadrático medio cometido en la determinación de la magnitud máxima y Δ tiene el mismo significado que en 2.6.

Para la obtención de las magnitudes máximas se usó el programa “scena” amablemente cedido por uno de los autores. Los datos de partida para cada zona son: la magnitud máxima observada (m_{\max}^{obs}), la magnitud mínima (m_{\min}), 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 obtuvieron valores de $\hat{m}_{\max} = M_{\max}$ utilizando estimadores estadísticos diversos (T-P, K-S, K-S-B) y se tomó como válida la magnitud máxima con menor error cuadrático medio. El estimador más eficiente fue el K-S.

De forma general los resultados obtenidos utilizando este procedimiento son muy cercanos a la magnitud máxima observada, alejándose de ésta muy poco (alrededor de 0.03M como valor medio

y menos de 0.1M como 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 este método, en este caso la magnitud del terremoto máximo observado se considera como magnitud máxima de la zona en cuestión.

En la figura 2.26 se muestran los valores de magnitud máxima obtenidos para el modelo ZONA-B a partir de las tres metodologías descritas en este epígrafe.

2.5.4 Modelos de atenuación.

El parámetro escogido para describir las sacudidas sísmicas fue la aceleración horizontal pico. En estos momentos no existen en Cuba relaciones de atenuación propias que describan el comportamiento de este parámetro, por lo tanto se utilizan 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,

$$\log(PGA) = C_1 + C_2 * M + C_4 * \log(R) + C_A * S_A + C_S * S_S \quad (2.8)$$

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 (en un rango de validez de 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 (en un rango de validez de 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:

$$\ln(PGA) = C_1 + C_2 * M + C_3 * \log(R) + C_4 * R + C_5 * S \quad (2.9)$$

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), $C_1 = -1.579$, $C_2 = 0.554$, $C_3 = -0.560$, $C_4 = -0.00302$, $C_5 = 0.326$, $h_0 = 6.0$, 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: $S = 1$

En la figura 2.27 se muestra el comportamiento de estas relaciones en roca para dos clases de magnitud ($M=4.0$ y $M=6.0$). En las magnitudes bajas (hasta $M5.0$) los valores más altos se alcanzan siempre usando la relación de Dahle et al. (1995), ver figura 2.27a. Para las magnitudes mayores (figura 2.27b) la diferencia entre los valores de PGA para el campo cercano es significativa, pero los valores más altos se obtienen con Ambraseys et al. (1996) y no con Dahle et al. (1995). Este último toma valores superiores a Ambraseys et al. (1996) solo a distancias mayores de 30-35 Km.

El campo de atenuación de ambas relaciones es circular y por lo tanto independiente de las variaciones azimutales. Se considera un rango de magnitud de 4.0 – 8.0 M_S con un paso de 0.5 unidades, y uno de distancia de 0 – 200 Km (ver tablas 2.3 y 2.4 para roca).

Tabla 2.3- Valores de aceleración horizontal pico (PGA) en roca: Ambraseys et al. (1996), $sd=0.25$.

Dist.(km)	M7.5	M7.0	M6.5	M6.0	M5.5	M5.0	M4.5	M4.0
0	1.031	0.759	0.692	0.412	0.292	0.215	0.158	0.117
5	1.003	0.738	0.468	0.400	0.181	0.134	0.098	0.072
10	0.596	0.439	0.312	0.238	0.109	0.080	0.059	0.043
20	0.277	0.204	0.166	0.111	0.060	0.044	0.032	0.024
30	0.180	0.132	0.103	0.072	0.041	0.031	0.023	0.017
40	0.134	0.099	0.069	0.054	0.032	0.023	0.017	0.013
50	0.107	0.079	0.050	0.043	0.026	0.019	0.014	0.010
60	0.089	0.066	0.037	0.036	0.022	0.016	0.012	0.009
70	0.077	0.057	0.029	0.031	0.019	0.014	0.010	0.008
80	0.068	0.050	0.023	0.027	0.017	0.012	0.009	0.007
90	0.060	0.044	0.019	0.024	0.015	0.011	0.008	0.006
100	0.054	0.040	0.016	0.022	0.014	0.010	0.007	0.005
110	0.050	0.037	0.013	0.020	0.013	0.009	0.007	0.005
120	0.046	0.034	0.011	0.018	0.012	0.009	0.006	0.005
130	0.042	0.031	0.010	0.017	0.011	0.008	0.006	0.004

140	0.040	0.029	0.009	0.016	0.010	0.007	0.005	0.004
150	0.037	0.027	0.008	0.015	0.009	0.007	0.005	0.004
200	0.028	0.021	0.004	0.011	0.007	0.005	0.004	0.003

Tabla 2.4- Valores de aceleración horizontal pico (PGA) en roca: Dahle et al. (1995), $sd=0.35$.

Dist.(km)	M7.5	M7.0	M6.5	M6.0	M5.5	M5.0	M4.5	M4.0
0	0.478	0.362	0.281	0.224	0.182	0.153	0.126	0.105
5	0.413	0.313	0.243	0.193	0.158	0.132	0.109	0.091
10	0.326	0.247	0.192	0.153	0.124	0.104	0.086	0.072
20	0.229	0.173	0.134	0.107	0.087	0.073	0.060	0.050
30	0.179	0.136	0.105	0.084	0.068	0.057	0.047	0.039
40	0.148	0.112	0.087	0.069	0.056	0.047	0.039	0.033
50	0.127	0.096	0.075	0.060	0.048	0.041	0.034	0.028
60	0.111	0.084	0.065	0.052	0.042	0.036	0.029	0.024
70	0.099	0.075	0.058	0.046	0.038	0.032	0.026	0.022
80	0.089	0.067	0.052	0.042	0.034	0.028	0.023	0.020
90	0.081	0.061	0.047	0.038	0.031	0.026	0.021	0.018
100	0.074	0.056	0.043	0.034	0.028	0.023	0.020	0.016
110	0.068	0.051	0.040	0.032	0.026	0.022	0.018	0.015
120	0.062	0.047	0.037	0.029	0.024	0.020	0.016	0.014
130	0.058	0.044	0.034	0.027	0.022	0.019	0.015	0.013
140	0.054	0.041	0.032	0.025	0.021	0.017	0.014	0.012
150	0.050	0.038	0.029	0.023	0.019	0.016	0.013	0.011
167	0.045	0.034	0.026	0.021	0.017	0.014	0.012	0.010
183	0.040	0.031	0.024	0.019	0.015	0.013	0.011	0.009
200	0.036	0.027	0.021	0.017	0.014	0.012	0.010	0.008

2.5.5 Resultados obtenidos.

Usando este método se obtuvieron 36 valores de PGA para cada celda del área de estudio en correspondencia con las ramas definidas en el árbol lógico diseñado. Se consideraron además, aceleraciones pico para los períodos de retorno de 1, 5, 15, 25, 35, 50, 75, 100, 250, 475, 750, 1000, 2500, 5000, 10000, 50000, 100000, 500000, 1000000 años. A partir de considerar tres modelos de zonas fuente (ZONA-A, B y C), dos modelos de sismicidad (IND, GRI), tres modelos de M_{max} [ISB: “one step beyond”, TEC: origen tectónico, KIJ: (Kijko y Graham, 1998)] y dos modelos de atenuación en términos de aceleración horizontal pico tanto para roca como para suelo blando (A1 y A2, Ambraseys et al., 1996; Dahle et al., 1995 respectivamente).

En la figura 2.28 se presentan los resultados obtenidos en roca para la ciudad de Santiago de Cuba (a) y la Habana (b), para un período de retorno de 475 años. Las ramas están representadas por un número (del 1 al 36), para cada una de ellas se muestran los valores de aceleración horizontal pico (PGA) sin tener en cuenta la incertidumbre aleatoria (sd_T , círculo “vacío”) y teniendo en cuenta la misma (cuadrado “vacío”). El círculo “lleno” representa el valor medio de los resultados obtenidos en cada rama sin tener en cuenta la sd_T (pga_{475}), el cuadrado “lleno” el valor medio de PGA teniendo en cuenta la sd_T (pga_{574sd} , con $sd = sd_T$), 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 que sería el resultado final de nuestro procesamiento. En el eje X, se muestra de manera abreviada la estructura del árbol lógico.

Como ya era conocido, los valores de PGA obtenidos usando Ambraseys et al. (1996) son mayores que los obtenidos usando Dalhe et al. (1995) para las zonas de alta sismicidad (ver figura 2.28a), mientras que en las zonas de media o baja actividad ocurre lo contrario (figura 2.28b). 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-A y ZONA-B), con las 12 restantes (ZONA-C), más esto era previsible dadas las dimensiones de las zonas sismogeneradoras que conforman este último. Los resultados obtenidos usando los dos primeros modelos son similares en las áreas donde la morfología de las zonas sismogeneradoras influyentes es parecida (figura 2.28b), mientras que en otras donde ésta morfología es sustancialmente diferente se observan diferencias apreciables (en la misma figura, caso a). La variabilidad asociada al modelo de ajuste de los parámetros del régimen sísmico es pequeña y se “esconde” o se pierde dentro de la variabilidad aportada por los otros parámetros, evidenciando la validez de utilizar el método propuesto por Slečko et al. (1998). Finalmente, 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 para las ramas correspondientes son inferiores (ramas 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33 y 36).

En la figura 2.29 (roca) se muestran los resultados en forma de curvas para las dos ciudades anteriormente descritas. Las curvas muestran el comportamiento tanto en roca (3.29a y c) como en suelo blando (3.29b y d) de: el valor medio de la aceleración pico (pga), 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.

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 y la extrapolación de los resultados a períodos mayores que el intervalo de tiempo que cubre el catálogo.

Para toda el área de estudio se presentan en las figuras 2.30 y 2.31 los resultados obtenidos para roca y suelo blando, para un período de retorno de 475 años (una probabilidad de excedencia del 10% y 50 años de vida útil de las edificaciones). En el primero (figuras 2.30a y 2.31a), se presenta el valor medio de PGA (media de los estimados), en el segundo (figuras 2.30b y 2.31b), el valor medio de PGA (media de los estimados) considerando el aporte de la incertidumbre aleatoria (sd_T), y en el tercero se toman en consideración ambas incertidumbres (figuras 2.30c y 2.31c), 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, se verifican valores entre 0.06 y 0.08 g (aceleración de la gravedad) en casi toda el área (figura 2.30a), llegando a 0.10 g 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 0.12 g; mientras que en la costa sur de Cabo Cruz a Punta de Maisí, los valores de PGA varían desde 0.16 g hasta 0.12 g llegando a tomar valores máximos (0.24 g) en Santiago de Cuba.

La influencia de la incertidumbre aleatoria (sd_T) en los resultados (figura 2.30b), 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 0.32 g cercanos a la bahía de Santiago de Cuba. Al incluir el aporte de la incertidumbre epistémica (figura 2.30c), 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 2.31 (suelo blando), los máximos regionales se mantienen invariables, sólo aumenta de valor la PGA de al menos una clase (0.02 g en la zona centro - occidental y 0.04 g en la oriental) con respecto a la roca.

2.6 Propuesta de zonación sísmica para Cuba.

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, Alvarez et al. (1995) clasificaron las curvas de peligrosidad sísmica mediante técnicas lógico - combinatorias, con vistas a obtener una zonación sísmica. En el presente trabajo se aplican esas técnicas con los mismos objetivos, esta vez usando los estimados de peligro sísmico obtenidos en este trabajo por el método zonificado.

2.6.1 Metodología de cálculo, datos iniciales.

En el epígrafe 1.2.1 se presenta de forma detallada el proceso de obtención de los estimados de peligro sísmico usando un árbol lógico, y en el epígrafe 2.5.5 los resultados obtenidos en términos de aceleración pico del terreno (PGA) con su error asociado. Del conjunto de resultados obtenidos usando el método paramétrico zonificado, el cual se considera más robusto, se prepararon dos conjuntos de datos:

- a) aceleraciones pico promedio + 1 desviación estándar de las fórmulas de atenuación (incertidumbre aleatoria) en roca para diferentes períodos de retorno
- b) aceleraciones pico promedio + 1 desviación estándar de las fórmulas de atenuación (incertidumbre aleatoria) en suelos blandos para diferentes períodos de retorno

De los 19 valores de períodos de retorno presentes en los datos iniciales (1, 5, 15, 25, 35, 50, 75, 100, 250, 475, 750, 1000, 2500, 5000, 10000, 50000, 100000, 500000, 1000000) se tomaron sólo 10 que permitían dar una caracterización completa de las curvas de peligro sísmico. Estos están en el rango 50-100000 años. No obstante, en los gráficos se reduce este rango a 50-10000 años que es el que más sentido tiene para las aplicaciones normales de los estudios de peligrosidad sísmica. De igual manera la región de estudio se redujo y abarca únicamente los territorios emergidos de Cuba y parte de sus mares adyacentes, pero se mantuvo la misma red de 100 km² para un total de 897 celdas.

En la figura 2.32 se presentan las curvas de PGA en roca (a: muestra completa, b: muestra reducida) para toda el área de estudio (valor medio + sd_T), mientras que en la 3.33 (a: muestra

completa, b: muestra reducida) se presenta el gráfico correspondiente para el caso de suelos blandos.

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

Para la clasificación se utilizó el programa “P4” realizado sobre la base del programa “Prognosis” (Ruiz et al. 1992) con modificaciones aportadas por Pico (1995, 1999), 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.

2.6.2 Clasificación de las curvas de peligrosidad sísmica.

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, como el conjunto de curvas a clasificar era demasiado extenso (897 objetos) y excedía la capacidad de trabajo del programa 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 (figuras 2.32b y 2.33b).

Este nuevo conjunto (de 145 objetos) se clasificó usando el algoritmo de conjuntos compactos maximales. 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. 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 (celda de la red 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.

Se procesaron por separado las curvas correspondientes a roca y suelos blandos. Como resultado en cada caso se obtuvieron nueve grupos de curvas de peligrosidad sísmica bien diferenciados entre si que fueron representados en mapas para un análisis preliminar, donde estos grupos de puntos delineaban zonas cuasihomogéneas en cuanto a las manifestaciones de la peligrosidad sísmica. Se detectó que había algunas zonas que prácticamente sólo tenían representación en los

mares adyacentes de la región suroriental de Cuba, lo que dificultaba el procesamiento ulterior de las mismas. Esto motivó la decisión de unir algunas de estas zonas (la 1 con 2 y la 3 con la 4), por lo que el número total de grupos pasó de 9 a 7. Las curvas (valor medio de $PGA + sd_T$) de cada grupo se presentan en la figura 2.34 (a: roca, b: suelo blando).

2.6.3 Resultados obtenidos.

Los mapas resultantes de la clasificación se presentan en las figuras 2.35 (roca) y 2.36 (suelo blando). Para cada una de las siete zonas que están presentes en ambos mapas se prepararon los gráficos de peligro sísmico asociado. Estos contienen tres curvas, un límite inferior (valor medio de PGA), un valor central (valor medio de $PGA + sd_T$) y un límite superior (valor medio de $PGA + sd_T + \sigma$). Cada curva fue obtenida promediando las ordenadas de las curvas correspondientes a los puntos pertenecientes a cada zona (figuras 2.37 y 2.38). Para lograr que este proceso arrojase resultados lo más fidedignos posibles, en la promediación se eliminaron algunos puntos ubicados en los mares adyacentes.

Capítulo III

ESTIMACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

Capítulo III

III. ESTIMACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

3.1 La ciudad de Santiago de Cuba y su entorno geográfico.

Santiago de Cuba es la ciudad más importante de la región oriental de la isla. Fue fundada en 1515, entre las primera siete villas de Cuba. La misma se encuentra ubicada en la costa suroriental (figura 3.1), limita al sur con las aguas del mar Caribe, al norte con las elevaciones de las sierras de Puerto Pelado y Boniato, al este con el macizo montañoso de la Gran Piedra y al oeste con la parte centro occidental de la Sierra Maestra.

El relieve es variado. Hacia el norte es semi-montañoso y accidentado, constituido por elevaciones jóvenes y alargadas, las cuales forman un arco que bordea la cuenca de pendientes medianamente abruptas y cimas en forma de crestas separadas por pequeños valles; al sur el relieve es llano y ondulado, constituido por escasas elevaciones de pendientes suaves, predominando las costeras en forma de mesetas alargadas y formando hacia la cercanía de la costa terrazas escalonadas. En la bahía la costa es escarpada y se desarrollan elevaciones de aspecto terraciforme.

En las zonas lejanas de las costas el relieve es mucho más suave y a lo largo del curso de los ríos se pueden observar extensas llanuras aluviales. En el área no existe una red hidrográfica desarrollada; sólo la atraviesan escasas corrientes fluviales y por lo general, son de carácter intermitente, desapareciendo casi totalmente durante los períodos secos. Entre los ríos más importantes se encuentran el San Juan y el Sardinero, que corren al este de la ciudad de Santiago de Cuba y desembocan en la costa sur. Los ríos Los Guaos, Yarayó y Paradas (Cobre) corren al oeste de Santiago de Cuba y vierten sus aguas en la bahía.

La ciudad desde el punto de vista socio-administrativo se divide en 4 distritos urbanos:

Distrito I (José Martí): 4 consejos populares y 70 circunscripciones.

Distrito II (26 de Julio): 3 consejos populares y 21 circunscripciones.

Distrito III (Antonio Maceo): 4 consejos populares y 60 circunscripciones.

Distrito IV (Abel Santamaría): 4 consejos populares y 53 circunscripciones.

En estos distritos urbanos viven actualmente de forma permanente alrededor de 400.000 personas en cerca de **92 000** viviendas. Como se puede observar en la tabla 3.1, en los distritos urbanos de la ciudad de Santiago de Cuba hay **92 631** viviendas donde residen **382 449** personas. En estos distritos urbanos se concentra el **40%** de la población de la provincia, esto constituye un elemento que hace a la ciudad más vulnerable.

Tabla 3.1. Tipología constructiva y estado técnico en los distritos Urbanos de la ciudad, donde: 1- Dtto Jose Martí, 2- Dtto 26 de Julio, 3- Dtto Antonio Maceo y 4- Dtto Abel Santamaría, tomado de Garcia et al. (2002a).

Dtto.	Tipo A				Tipo B				Tipo C				Cant. Viviendas.
	B	R	M	Total	B	R	M	Total	B	R	M	Total	
1	0	106	3677	3783	389	5360	4790	10539	11726	2164	230	14120	28442
2	0	39	708	747	170	4232	4946	9348	865	2489	257	3611	13706
3	0	80	4806	4886	125	6042	7636	14103	1918	3398	571	5887	24876
4	18	51	2826	2895	888	6549	3946	11383	8122	2872	335	11329	25607
Total	18	276	12017	12311	1572	22183	21618	45373	22631	10923	1393	34947	92631

En la actualidad, más del 70% de las edificaciones se encuentran en estado técnico regular o malo y su gran mayoría no posee diseño sismorresistente. Además, existe un predominio de las viviendas de tipo A y B sobre las del tipo C, según la tipología de la escala sísmica MSK. Esta situación se torna más compleja si se tiene en cuenta que el relieve de la ciudad es accidentado, las edificaciones están adaptadas al mismo y pudieran ocurrir movimientos gravitacionales del terreno por efecto de las vibraciones sísmicas. Otra agravante es que las calles de la parte más antigua de la ciudad son muy angostas y pueden ser obstruidas fácilmente, dificultando las labores de rescate y reparación de averías.

3.2 Inventario de los bienes expuestos y coberturas básicas utilizadas.

En Cuba lamentablemente no existe una institución que se responsabilice con la generación, organización, actualización e integración de los datos necesarios (datos espaciales y sus atributos) para llevar a cabo un estudio de riesgo sísmico a cualquier escala de trabajo. Esta información se encuentra dispersa en varias instituciones (IPF, GEOCUBA, INV, ONE, CEPDE, IGP, DIGICUPET, CENAIS), existiendo discrepancias y no uniformidad en los datos que almacenan o custodian (clasificaciones, formatos). En muchos casos, aún existiendo la información necesaria, ésta no es fácilmente accesible y en todos los casos debe ser transformada para poder ser utilizada. Por esta razón, en este estudio se tuvo que trabajar en tres escalas de trabajo diversas (ver figura 3.2), tomando en consideración el tipo de datos y su disponibilidad, los parámetros de cálculo y sus incertidumbres, y la celda elemental a la cual se asignan los resultados finales:

- Ciudad de Santiago de Cuba y sus alrededores.
- Distrito 26 de Julio
- Consejo popular Guillermón Moncada.

Para el área que abarca la ciudad de Santiago de Cuba y sus alrededores (figura 3.2a) se obtuvieron los parámetros referidos a la peligrosidad sísmica (módulos 1, 2 y 3 de la figura 1.3). El inventario de los bienes en una primera aproximación se realizó tomando como referencia o celda elemental

las manzanas (figura 3.2b). Acá se presentan los resultados obtenidos para el distrito 26 de Julio; a esta escala se obtuvieron los estimados de los daños y las pérdidas a partir del escenario de riesgo propuesto. Con el objetivo de mejorar estos resultados, se realizó una clasificación *in situ* de las edificaciones pertenecientes al consejo popular Guillermon Moncada, perteneciente al mismo distrito (figura 3.2c). En este caso los estimados se obtuvieron a nivel de edificación, tomando como referencia el espacio físico que ocupa el lote donde está construida la misma.

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 3.2. 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 3.2- Información contenida en los archivos del catastro (capas del fichero AUTOCAD).

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

Como ejemplo, se muestra en la figura 3.3 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 3.2.

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.

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), junto con sus atributos, se le añadieron además los atributos necesarios para efectuar el análisis de la vulnerabilidad de las edificaciones.

Para este propósito, 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 la escala MSK (Medvedev et al., 1965; Medvedev, 1978) y la propuesta en HAZUS99 (FEMA, 1997). Además, se determinó el estado técnico constructivo de las edificaciones (B-bueno, R-regular, M-malo), añadiendo toda esta información como nuevos campos en la base de datos. 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., 2002a) y en no pocas ocasiones ha empeorado. También fue necesario comprobar y actualizar en el trabajo de campo la información concerniente al 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 3.4) 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), con 400 manzanas y 12275 parcelas.

El uso de los suelos se presenta en la figura 3.5; 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, entre otros), 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 3.6). En este consejo popular solo el 32% (1472) de las edificaciones se encuentra en estado técnico bueno, mientras que el 54% (2460) está 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 en su construcción.

En esta área, las características constructivas, los materiales utilizados y las edades de las edificaciones son diversas, aunque la mayoría de las edificaciones son de mampostería sin reforzar. Existen edificaciones de hormigón armado con pórticos resistentes a momentos y en menor medida edificios de mampostería reforzada. También, se encuentran edificaciones con pórticos de madera, otras con pórticos de acero y paredes de mampostería, algunas con pórticos de hormigón prefabricado y tímpanos de hormigón, y edificaciones con pórticos de hormigón armado y paredes de mampostería. Es necesario señalar que existen algunas edificaciones con paredes de “cuje” y piedra picada que fueron clasificadas como de mampostería sin reforzar.

También fue posible clasificar las parcelas según las escalas macrosísmicas actualmente en uso en el CENAI (MSK y EMS); en la figuras 3.7 y 3.8 se muestran los resultados. La primera clasificación, según la escala MSK (Medvedev et al., 1965; Medvedev, 1978) 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.

3.3 Escenario propuesto, estimación de los daños, cálculo de pérdidas.

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 se combinan ambos enfoques, aprovechando los resultados de peligrosidad sísmica a escala nacional obtenidos de forma probabilística presentados en el capítulo II, que son comparables con los estremecimientos ocasionados por el último sismo que provocó daños de consideración en la ciudad el 3 de Febrero de 1932 ($M_S=6.75$, $I_{max}=VIII$ MSK). Estamos conscientes de que los niveles de amenaza que afectan a la ciudad están en gran medida determinados por la influencia de la zona sismogeneradora más próxima a ella (23 en la figura 2.19

y 29 en la figura 2.20), la misma que se supone generó el evento mencionado más arriba, mientras que el aporte de las demás zonas sismogeneradoras que afectan esta área es menor. En este caso coinciden de manera fortuita el evento más probable (sacudidas esperadas para un período de retorno de 475 años teniendo en cuenta la incertidumbre aleatoria, sd_T) y el evento más cercano en el tiempo que ha ocasionado el mayor número de daños en la ciudad (evento máximo creíble).

3.3.1 Escenario de daño.

Aunque normalmente los estimados de riesgo se realizan considerando varios escenarios, por limitaciones de espacio, solamente se presenta un escenario de daño. Este corresponde al caso donde al ocurrir el terremoto la población se encuentra dentro de sus viviendas. Los estimados de pérdidas económicas (expresadas como el costo de reposición de los daños físicos) son aproximadamente los mismos para todos los escenarios, siempre y cuando se verifique el mismo nivel de peligro sísmico, debido a que los daños en las edificaciones se verifican siempre. No ocurre así en el caso de las pérdidas humanas que dependen de donde se encuentren las personas en el momento que ocurre el terremoto. Por tanto, el caso seleccionado es la peor variante.

En el mismo 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; SES (2002) a nivel sólo 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, de acuerdo al esquema presentado en la figura 1.3. Las pérdidas en la población (muertos, heridos de diversa índole, personas sin hogar) se obtienen de forma empírica en función del número de personas que se encuentran bajo las estructuras que sufrirán daños de 3^{er}, 4^{to} y 5^{to} grados. Las estimaciones se realizan a nivel de manzana para el distrito 26 de Julio y a nivel de lote para el consejo popular Guillermon Moncada.

3.3.2 Peligro regional.

Los resultados en términos de intensidad macrosísmica para un suelo medio, en toda el área de estudio tienen un único valor (VIII grados) referido a un suelo medio. Este estimado corresponde a la intensidad más extendida por la ciudad de Santiago de Cuba durante el terremoto del 3 de febrero de 1932 y corresponde además a los resultados obtenidos en este mismo trabajo para un período de retorno de 475 años, o lo que es lo mismo: un 90% de probabilidad de que no sea excedido ese valor de intensidad en 50 años.

3.3.3 Peligro local.

Para la obtención de las variaciones locales de las sacudidas sísmicas de los sismos de moderada o gran intensidad en las construcciones, se utilizó el método de categorías de suelos (Medvedev, 1973), mediante el cual se relacionó la profundidad media del nivel freático con la susceptibilidad litológica de las formaciones geológicas presentes en el área de estudio [ver más detalles en García et al. (2002a)], extraída del esquema geológico de la cuenca de Santiago de Cuba (Medina et al., 1999).

Posteriormente se clasificaron las áreas de acuerdo a su capacidad de respuesta dinámica, definiendo para cada una de ellas un incremento o decremento de la intensidad sísmica según su comportamiento. Tomando como base 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 3.9. Como se puede apreciar dentro del área pueden esperarse efectos de VI grados (decrementos de 2 grados con respecto a los estimados regionales referidos a un suelo medio) en zonas con rocas bien consolidadas independientemente de su edad geológica y hasta de X grados (incrementos de 2 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., 2002a). De esta manera se le asoció a cada celda elemental su grado base de amenaza o PS. En las figuras 3.10 y 3.12 se presentan estos resultados, correspondientes al distrito 26 de Julio y al consejo popular Guillermón Moncada respectivamente.

3.3.4 Vulnerabilidad estructural y evaluación de los daños en las construcciones.

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.

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 y la interacción de los elementos estructurales con los elementos no estructurales, 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 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. 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.

En estudios regionales (centros urbanos, ciudades, grupos de localidades) lo más común es estimar los daños físicos directos, vinculando el riesgo sísmico con el colapso de las edificaciones y los daños provocados por los fenómenos físico - geológicos secundarios (inundaciones, liquefacción, deslizamientos, tsunamis) y los tecnológicos (grandes incendios, derrame de sustancias peligrosas). La metodología escogida para la estimación de los daños fue el uso de matrices de probabilidad de daños (MPD) obtenidas a partir de la definición de los daños descritos en las escalas MSK (Medvedev et al., 1965; Medvedev, 1978) 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 la 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 (ver coeficientes en la tabla 3.3) y algunas consideraciones del autor a partir de su experiencia en la evaluación de daños reales en las edificaciones de nuestro país.

Tabla 3.3- 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
A	0.30	0.15	0.05	0.00	0.00	0.00
B	0.50	0.30	0.15	0.00	0.00	0.00
C	0.80	0.40	0.30	0.00	0.00	0.00
GRADO 1	Intensidad MSK					
	Tipología	VII	VIII	IX	X	XI
A	0.25	0.20	0.10	0.00	0.00	0.00
B	0.30	0.25	0.20	0.00	0.00	0.00
C	0.20	0.35	0.25	0.00	0.00	0.00
GRADO 2	Intensidad MSK					
	Tipología	VII	VIII	IX	X	XI
A	0.20	0.20	0.15	0.00	0.00	0.00
B	0.20	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00
C	0.00	0.20	0.20	0.25	0.00	0.00
GRADO 3	Intensidad MSK					
	Tipología	VII	VIII	IX	X	XI
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
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
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 matriz (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 (ver tabla 3.4). 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. En este trabajo se utilizó la primera solución.

Tabla 3.4- 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					IX					
	A	B	C	D		A	B	C	D	E
G0	92	92	100	100	G0	0	0	0	20	65
G1	8	8	0	0	G1	0	0	20	45	27
G2	0	0	0	0	G2	0	20	45	27	8
G3	0	0	0	0	G3	20	45	27	8	0
G4	0	0	0	0	G4	45	27	8	0	0
G5	0	0	0	0	G5	35	8	0	0	0
VI					X					
	A	B	C	D		A	B	C	D	E
G0	65	65	92	100	G0	0	0	0	0	20
G1	27	27	8	0	G1	0	0	0	20	45
G2	8	8	0	0	G2	0	0	20	45	27
G3	0	0	0	0	G3	0	20	45	27	8
G4	0	0	0	0	G4	20	45	27	8	0
G5	0	0	0	0	G5	80	35	8	0	0
VII					XI					
	A	B	C	D		A	B	C	D	E
G0	0	20	65	92	G0	0	0	0	0	0
G1	20	45	27	8	G1	0	0	0	0	20
G2	45	27	8	0	G2	0	0	0	20	45
G3	27	8	0	0	G3	0	0	20	45	27
G4	8	0	0	0	G4	0	20	45	27	8
G5	0	0	0	0	G5	100	80	35	8	0
VIII					XII					
	A	B	C	D		A	B	C	D	E
G0	0	0	20	65	G0	0	0	0	0	0
G1	0	20	45	27	G1	0	0	0	0	0
G2	20	45	27	8	G2	0	0	0	0	0
G3	45	27	8	0	G3	0	0	0	0	0
G4	27	8	0	0	G4	0	0	10	20	20
G5	8	0	0	0	G5	100	100	90	80	80

Posteriormente, a partir del nivel de amenaza sísmica considerado en la celda elemental escogida (manzana o lote), la tipología constructiva (MSK) o las clases de vulnerabilidad (EMS) de las edificaciones que la componen y los coeficientes de las matrices de vulnerabilidad (MPD), se estima el número de casas colapsadas, destruidas, con daños graves, moderados y leves de la siguiente manera:

$$N_{G_k} = \sum_j A_{j,G_k} \cdot N_j \quad (3.1)$$

donde N_{G_k} es el número de edificaciones que sufren grados de daños G_k (G_0 = sin daños, G_1 = daños ligeros, G_2 = daños moderados, G_3 = daños considerables, G_4 = daños graves y G_5 = daños totales); A_{j,G_k} son los coeficientes de la matriz para cada tipología constructiva (que dependen del grado de intensidad y la probabilidad de que esta ocurra) y (N_j) es el número de edificaciones de esta tipología dentro de la celda elemental escogida. El resultado final de este procesamiento es la obtención del número de edificaciones en las 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.

Como un ejemplo de los resultados obtenidos al utilizar este procedimiento de cálculo se presenta en la figura 3.12 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).

En este trabajo se calcularon los daños en las edificaciones aisladas calculando de forma individual todos los efectos que provocaría un valor de intensidad dado en la misma utilizando la ecuación:

$$D_j = P[G = j | i] \cdot P[i] \quad (3.2)$$

donde el grado de daño j , 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 período dado; $j = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ por definición.

En la figura 3.13 se presentan los resultados obtenidos para el consejo popular Guillermón Moncada a partir del uso de la MPD propuesta por Oliva (2000), mientras que en la figura 3.14 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.

3.3.5 Evaluación de los daños a la población.

Para la estimación de las pérdidas humanas se consideraron 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.

Para la ciudad de Santiago de Cuba no existen estudios post-terremotos con fines ingenieriles. El terremoto más reciente que ocasionó daños de envergadura en la ciudad y sus alrededores, ocurrió el 3 de febrero de 1932 (Chuy, 1999) y el país no contaba con especialistas (profesionales o aficionados) que pudieran al menos describir los daños con el nivel de detalle necesario. Hay que decir también que este evento tuvo varios premonitores perceptibles, 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.

La estimación de las pérdidas en la población se debe obtener 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:

$$N(\lambda | \alpha) = \sum_T N(T) \cdot \sum_G p(\lambda | G, T) \cdot MPD(G | T, \alpha) \quad (3.3)$$

donde el número de personas afectadas $N(\lambda | \alpha)$, fallecidas o heridas, depende del número de personas $N(T)$ que se encuentren dentro de las edificaciones de tipo o clase de vulnerabilidad (T) con la probabilidad $p(\lambda | G, T)$ de que una persona que se encuentre en una edificación de este tipo resulte muerta o herida si ocurre un grado de daño G en ella y de los elementos de la matriz de probabilidad de daño $MPD(G | T, \alpha)$. El parámetro α es el efecto sísmico y caracteriza el peligro sísmico; puede ser la intensidad macrosísmica, un valor pico del movimiento del terreno, alguna característica espectral, entre otros. En el Anexo II se detalla la formulación probabilística del problema.

La probabilidad $p(\lambda | G, T)$ debe calcularse empíricamente y no pudo ser encontrada en la literatura para las escalas MSK o EMS, ya que solo se habían publicado sin diferenciarla por tipología constructiva. Tal diferenciación sólo existía para los diferentes tipos constructivos descritos en el HAZUS (FEMA, 1997), donde se trata este problema en términos de aceleración. Esto obligó a utilizar un método indirecto para calcularla. Partiendo del hecho de que los estados de daño 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 presente en el HAZUS (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 valores de la probabilidad mencionada, asociando a la clase de vulnerabilidad macrosísmica los coeficientes empíricos obtenidos por el HAZUS para la misma tipología constructiva, utilizando en este procesamiento las tipologías constructivas presentes en Santiago de Cuba (ver discusión en García et al., 2005).

Los valores de esta probabilidad se presentan en la tabla 3.5 para λ = número de muertos y daños de tercer, cuarto y quinto grados. En la tabla 3.6 se presentan los mismos valores para λ = número de heridos totales y en las tablas 3.7, 3.8 y 3.9 se diferencian estos valores según la gravedad de los heridos.

Otro indicador de importancia que puede obtenerse es el número de personas que quedan sin vivienda producto del colapso de edificaciones o daños estructurales severos en estos. 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:

$$N_{SV} = \sum_j (A_{j,G_4} + A_{j,G_5}) \cdot N_j \tag{3.4}$$

donde N_{SV} es el número de personas que queda sin vivienda, N_j es el número de personas que habitan la vivienda de tipología j .

Tabla 3.5- Probabilidad $p(\lambda | G, T)$ para λ = número de muertos.

Tipología (T)	G3	G4	G5
A	0.0020	0.0200	0.1000
B	0.0020	0.0200	0.1000
C	0.0001	0.0100	0.2000
D	0.0001	0.0100	0.2000
E	0.0001	0.0100	0.2000

Tabla 3.6- Probabilidad $p(\lambda | G, T)$ para λ = número total de heridos.

Tipología (T)	G3	G4	G5
A	0.0220	0.1202	0.6500
B	0.0220	0.1202	0.6500
C	0.0110	0.0601	0.6500
D	0.0110	0.0601	0.6500
E	0.0110	0.0601	0.6300

Tabla 3.7- Probabilidad $p(\lambda | G, T)$ para $\lambda =$ heridos leves (nivel S1).

Tipología (T)	G3	G4	G5
A	0.0200	0.1000	0.4000
B	0.0200	0.1000	0.4000
C	0.0100	0.0500	0.4000
D	0.0100	0.0500	0.4000
E	0.0100	0.0500	0.4000

Tabla 3.8- Probabilidad $p(\lambda | G, T)$ para $\lambda =$ heridos graves (nivel S2).

Tipología (T)	G3	G4	G5
A	0.0020	0.0200	0.2000
B	0.0020	0.0200	0.2000
C	0.0010	0.0100	0.2000
D	0.0010	0.0100	0.2000
E	0.0010	0.0100	0.2000

Tabla 3.9- Probabilidad $p(\lambda | G, T)$ para $\lambda =$ heridos muy graves (nivel S3).

Tipología (T)	G3	G4	G5
A	0.0000	0.0002	0.0500
B	0.0000	0.0002	0.0500
C	0.0000	0.0001	0.0500
D	0.0000	0.0001	0.0500
E	0.0000	0.0001	0.0500

3.3.6 Estimación de las pérdidas potenciales.

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 debido a la ocurrencia de un terremoto de moderada o gran intensidad. Las pérdidas económicas para una edificación particular se obtienen a partir de:

$$P_{ik} = c_i \cdot I_k \quad (3.5)$$

donde P_{ik} son las pérdidas monetarias según la tipología constructiva i para grados de daños k , c_i es el costo total de reposición para la tipología i e I_k es la variación del costo total de reposición según el grado de daño esperado. De esta manera es posible obtener las pérdidas económicas o materiales directas relacionadas con la estimación de los daños que sufren las edificaciones a partir de un escenario particular.

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 3.3.4. En la tabla 3.10 se muestran los valores de “ c_i ” 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, 1997).

Tabla 3.10- Costo de reposición de las viviendas según su tipología constructiva. DAU- Dirección de arquitectura y urbanismo. Las equivalencias con respecto a la escala MSK fueron tomadas de García et al. (2002a), mientras que las de la escala EMS son propias de este trabajo.

Costo de reposición(c_i)		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

En el caso de la clase D (escala EMS) la cual no forma parte de esta clasificación, se tuvieron en cuenta dos consideraciones: (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 más alto sea éste, más costosa será la construcción). Tomando en cuenta la opinión de expertos en ingeniería civil pertenecientes al MICONS y a la DCN se decidió obtener el costo de reposición de esta tipología (D según la escala EMS) aumentando un 30% el costo de reposición de la tipología C de la misma escala.

Los valores de la tabla 3.10 se refieren al costo total de reposición de las edificaciones, por lo tanto es necesario definir que porcentaje de este costo se espera “se pierda” al ocurrir cierto grado de daños. En la tabla 3.11 se presentan los valores propuestos. En la figuras 3.15 se presentan las pérdidas económicas totales, valoradas en pesos cubanos para el distrito 26 de Julio, mientras que en la figura 3.16 se presentan las pérdidas parciales ocasionadas para una tipología constructiva específica (tipo B) presentes en el área de estudio.

Tabla 3.11- Fracción del costo de reposición (c_i) de los daños según la intensidad de los mismos.

Daño	Intervalo de c_i	Valor medio de c_i
G0	0	0
G1	0.1 – 0.2	0.15
G2	0.2 – 0.4	0.30
G3	0.4 - 0.6	0.50
G4	0.6 – 0.8	0.70
G5	0.8 – 1.0	0.90

En las figuras 3.17 y 3.18 se presentan las pérdidas monetarias (expresadas en miles de pesos) para las edificaciones del CP Guillermon Moncada. En este caso se utilizan los resultados obtenidos usando ambas MPD [Oliva (2000) y SES (2002)]. Toda esta información y mucha más está disponible en forma de tablas dentro del SIG.

Pérdidas humanas.

Para estimar pérdidas en la población se utilizó la variante metodológica propuesta en el epígrafe 3.3.5, obteniéndose el número de personas fallecidas (figura 3.19), el número total de heridos, el número de heridos de acuerdo a la severidad de los daños sufridos (figura 3.20), así como el número de personas sin hogar (figura 3.21).

En este caso solo fue posible obtener las pérdidas para el distrito 26 de Julio, debido a que no fue posible obtener la información necesaria (número de habitantes por edificación) para estimar las pérdidas a esta escala de trabajo. Se decidió esperar a que esté disponible esta información a usar valores aproximados que alejarían demasiado el escenario de la realidad.

Capítulo IV

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Capítulo IV

IV. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La comparación de los resultados obtenidos en este trabajo utilizando ambas metodologías (zonificada y no zonificada), sirvieron de retroalimentación en el proceso de diseño y planificación de la investigación. Los mapas resultantes (figura 2.17a y 2.30b), por ejemplo, evidencian la existencia de zonas donde la sismicidad y los criterios sismotectónicos están en desacuerdo, reafirmando que aún existen insuficiencias en el conocimiento de la información de base, que podrían ser evidenciadas con un análisis de sensibilidad (Rebez y Slejko, 2000) de los parámetros usados en el procedimiento de cálculo.

Los resultados presentados en la figura 2.31b, son comparables con los de Chuy y Alvarez, 1995 (aceleración horizontal para perfiles de suelo S2, 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 suelo blando o terreno tipo S2-S3 (velocidad de propagación de las ondas de cizalla entre 180 y 360 m/seg.); aunque se debe tener en cuenta que por el período de retorno usado por estos autores, sus resultados deben ser en consecuencia algo menores.

Los valores máximos que alcanza la PGA en la zona occidental en Chuy y Alvarez (1995), ver figura 4.1, 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 0.14 g en Ciudad de la Habana y valores entre 0.07 y 0.1 g en el resto del área.

En la región central los valores de este trabajo 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 (0.24 g). Valores máximos de 0.4 g en las cercanías de Santiago de Cuba aparecen en el mapa de Chuy y Alvarez (1995), mientras en este aumenta el valor hasta 0.46 g 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, en el norte de Guantánamo y en los mares adyacentes de cabo Cruz sobresalen en el nuestro debido a la inclusión en el catálogo confeccionado para este trabajo, de terremotos importantes ocurridos a finales de la década del 80 y durante los 90 en estas regiones.

Otro trabajo con el cual se pueden confrontar los 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 (figura 4.2), 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 por este trabajo (del orden de 0.3 g en la región suroriental, con el máximo cercano a las costas de Guantánamo), sólo comparables con los resultados presentados por Rubio (1985). En la zona occidental los valores máximos se encuentran en la región de ciudad de la Habana (0.1 g) y en la región central (provincias de Ciego de Ávila y Camagüey) con el mismo valor. Rodríguez et al. (1997) justifican este comportamiento debido a la eliminación de las réplicas del catálogo paramétrico usado (valores inferiores de PGA) y a la influencia de la zona sismogeneradora Española Norte (parámetros de atenuación). En opinión del autor, la eliminación de las réplicas del catálogo utilizado no debe ser la causa de este comportamiento, pues en trabajos posteriores se han obtenido, como media, valores de PGA superiores utilizando el mismo catálogo y el mismo procedimiento para la eliminación de las réplicas (García et al., 2003a, este trabajo). En opinión del autor, es 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 sísmica). 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 se usan 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, (García et al., 2003a, García, inédito) muestran una gran diversidad del comportamiento de este parámetro 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).

En estos momentos, diferentes autores (Reiter, 1990; Boore y Ambraseys, 1993; McGuire, 1993) proponen abandonar este enfoque debido a las incertidumbres aportadas por el uso de la intensidad sísmica como parámetro de cálculo y su naturaleza discreta y cualitativa, unido a la gran incertidumbre de las relaciones entre la PGA y la intensidad sísmica. Otros autores (Wald et al., 1999) han señalado también la saturación de los valores de PGA a intensidades mayores o iguales a X grados, así como la influencia del aporte de las condiciones locales del terreno, cuestión poco valorada por Trifunac y Brady (1975), pero concluyente en trabajos posteriores (Murphy y O'Brien, 1977; Wald et al., 1999).

Es por ello que en el presente trabajo se abandonó ese enfoque y se usó 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.

Por otra parte, en el mapa mundial de peligro sísmico (conocido como GSHAP, por sus siglas en inglés), referido a roca, para un período de retorno de 475 años, en la región del Caribe [ver figura 4.3a, Shedlock (1999)] se muestran valores por encima de los 0.32 g en el área cercana a Santiago de Cuba, con valores menores a 0.30 g al suroeste hasta Cabo Cruz y entre 0.24 y 0.16 g en Guantánamo y Holguín. En la región central se observan valores entre 0.16 y 0.08 g y en la zona occidental aún menores, con un mínimo de 0.04 g en Pinar de Río. En este trabajo se verifican valores de PGA comparables en la región suroriental, no así en la región central y occidental donde los valores obtenidos son sustancialmente diversos. Como ya fue discutido en (García et al., 2003a) estas diferencias ocurren debido a que el catálogo utilizado por Shedlock (1999) no cuenta con la información macrosísmica utilizada en este trabajo, elemento crucial en los resultados obtenidos por ellos, ya que utilizan un enfoque no zonificado, con un procedimiento de cálculo (Veneziano et al., 1984) donde el catálogo y su completamiento constituyen una cuestión vital.

El trabajo sobre PS de la región de estudio publicado más reciente es el propuesto por Tanner y Shedlock (2004), donde estos autores proponen un mapa (figura 4.3b) en términos de PGA referido a roca, para un período de retorno de 475 años. En este mapa en la costa suroriental de Cuba se alcanzan valores mayores de 0.8 g, un poco menores al norte de la Española y Jamaica (0.6 g). En la región oriental, más al norte, se verifican valores entre 0.3 y 0.6 g, mientras que en la zona central entre 0.1 y 0.2 g. Los mínimos se encuentran en la región occidental (menores de 0.1 g), con la excepción de la región de Pinar del Río donde se alcanzan valores de 0.2 g. Valores tan altos de PGA no habían sido publicados para la región hasta el momento. Los autores justifican este comportamiento con la predicción de la ocurrencia de terremotos de gran intensidad en los límites

de las placas que se encuentran en el área, pero el uso de fórmulas de atenuación que alcanzan valores altos de PGA en el campo cercano como las utilizadas en este trabajo [Boore et al. (1997), Campbell (1997) y Sadigh et al. (1997)] pudiera ser la causa de las diferencias entre los resultados obtenidos por estos autores y los del presente trabajo. Valores tan altos sólo se observan en los mapas en que se tiene en cuenta ambas incertidumbres (figura 2.17b y 2.30c).

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

Tanto para roca como para suelos blandos 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 obtenidos aunque muestran la misma tendencia, reflejan diferencias menores que pueden ser explicadas por el uso de expresiones no lineales diferentes para el cálculo de la atenuación en función de la distancia.

Estos mapas, 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 en función del período de retorno en ese punto, los 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 tanto estos mapas constituyen verdaderas zonaciones sísmicas. En el futuro la zonación obtenida puede enriquecerse con un número mayor de curvas en los gráficos integrales promedio de peligrosidad sísmica que definen a cada grupo.

Por otra parte, este trabajo probablemente está entre los primeros a escala nacional donde se obtienen escenarios de daño a nivel urbano, mediante una aproximación que permite y efectúa un análisis edificio a edificio. Para ello se ha diseñado una aplicación SIG que permite la

incorporación y gestión de la información necesaria para la generación de escenarios de daño. El sistema incorpora, entre otros, los mapas de peligrosidad sísmica, los mapas geológico y de debilidad tectónica, la microzonificación sísmica de la ciudad y el inventario de los bienes expuestos. Toda esta información se usa posteriormente para individualizar la vulnerabilidad estructural de las edificaciones y de la población, así como los niveles de daño esperados según el escenario propuesto. Los resultados de la tesis son de aplicación inmediata a la protección civil y a la planificación y gestión del riesgo sísmico. Aunque sólo se presenta un estudio de caso, el procedimiento es fácilmente extensible a cualquier otro escenario.

Los resultados obtenidos durante la estimación de las pérdidas potenciales modeladas a partir del escenario de riesgo propuesto para la ciudad de Santiago de Cuba tienen un cierto grado de incertidumbre, debido a la indefinición de algunos parámetros que intervienen en el proceso de cálculo, los que fueron obtenidos de forma indirecta o a partir de juicios de expertos. No obstante, es la primera vez que se logra hacer una estimación del riesgo sísmico a una escala tan detallada, por lo tanto la aplicación de estos resultados debe ser inmediata y de un carácter estratégico para el desarrollo futuro, tanto económico como social, de la región.

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 sólo se puede 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, fuera de los lugares con suelos desfavorables (rellenos o pocos consolidados), y de los lugares donde puedan ocurrir fenómenos físico - geológicos catalizados por los terremotos como los deslizamientos, las avalanchas o la licuefacción.

Otra estrategia para la mitigación del riesgo que se puede aplicar en las zonas urbanas es evitar las grandes concentraciones en zonas cuya peligrosidad sísmica sea alta. Para esto los Institutos 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”, permitirán hacer planes a corto plazo. Además, los resultados de este estudio de riesgo sísmico, proporcionan las zonas donde se requiere construir centros de atención y socorro frente a catástrofes, espacios abiertos que sirvan como zonas de

refugio, y en el futuro, rutas de evacuación, rutas por donde puedan entrar los equipos de rescate, entre otros.

CONCLUSIONES

1. Por primera vez en Cuba se obtienen estimados de peligrosidad sísmica en términos de aceleración horizontal pico del terreno con su error asociado (aleatorio y epistémico), utilizando la técnica de árbol lógico en estas estimaciones, partiendo de un enfoque probabilístico (zonificado y no zonificado). Los resultados obtenidos en términos de aceleración horizontal pico del terreno referidos a roca y suelos blandos son comparables a los que hasta el momento han sido publicados por otros autores (nacionales y foráneos).
2. Los resultados individuales (rama por rama) evidencian que la mayor influencia en los estimados de peligrosidad sísmica está dada por la dispersión de las relaciones de atenuación (incertidumbre aleatoria) y por los modelos de zonas sismogeneradoras, en particular la definición de su potencialidad (M_{max}).
3. La comparación de los resultados obtenidos utilizando ambas metodologías (zonificada y no zonificada), evidencian la existencia de zonas donde la sismicidad y los criterios sismotectónicos están en desacuerdo, reafirmando que aún existen problemas en la toma de decisiones iniciales de uno u otro método.
4. A partir de los resultados obtenidos usando un enfoque paramétrico zonificado, se considera como estimado básico robusto de peligrosidad sísmica el caso: “valor medio + incertidumbre aleatoria”, y el uso de la variante: “valor medio + incertidumbre aleatoria + incertidumbre epistémica” en estudios de obras de especial o excepcional importancia, que garantiza se evite la subestimación epistémica, siempre posible cuando se usa una única variante de cálculo.
5. Se obtuvo una zonación sísmica aplicando técnicas de reconocimiento de patrones; la misma está conformada por un mapa (roca o suelo blando) y el gráfico de peligro sísmico integral asociado a cada una de las zonas. Estos gráficos de peligro sísmico (período de retorno vs. PGA) obtenidos para cada zona constan de 3 curvas (límite inferior, valor central y límite superior), representativas de la incertidumbre o el error asociado al cálculo de la peligrosidad sísmica.
6. Este trabajo probablemente está entre los primeros a escala nacional donde se obtienen escenarios de daño a nivel urbano, mediante una aproximación que permite y efectúa un análisis edificio a edificio. La aplicación SIG diseñada posibilita la incorporación y gestión de la información necesaria para la generación de escenarios de daño y la estimación de las pérdidas económicas y humanas. Aunque los resultados no pueden considerarse un pronóstico

real en cuanto la modelación del escenario (que exige ciertas simplificaciones o aproximaciones del fenómeno estudiado), sí constituyen una guía imprescindible para la mitigación, gestión y administración del riesgo de la ciudad.

7. Del análisis de riesgo sísmico llevado a cabo queda demostrada la necesidad de disminuir el grado de vulnerabilidad física de las edificaciones de la ciudad. En el estado actual, no es necesario que ocurra un evento sísmico extremo para que se registren pérdidas materiales y humanas considerables.
8. Con el uso de matrices de probabilidad de daño en la evaluación de los daños a nivel urbano (cuando se dispone de la información mínima necesaria para evaluar la calidad sismorresistente de los edificios o estructuras que se estudien) se logran diferenciar las pérdidas por tipología constructiva y grado de daño que experimentan las edificaciones.

RECOMENDACIONES

Las recomendaciones de este trabajo deben cumplir dos objetivos: (1)- alertar sobre los aspectos que no pudieron ser resueltos en esta investigación, pero que deberán ser abordados en proyectos futuros y además, (2)- facilitar la comprensión y materialización de los resultados aquí obtenidos.

1. En opinión del autor es aún bastante incierta la definición de las zonas sismogeneradoras y su potencialidades, siendo éste el principal aspecto a tener en cuenta en las investigaciones futuras. Se debe en consecuencia potenciar la ejecución de proyectos, tesis de maestría y/o doctorados que aborden este problema, aun cuando no contemos con datos recientes de apoyo a la interpretación como la geología, geodesia y geofísica. Se necesita más que nada un cambio en la manera de estudiar la dinámica y la cinemática de las estructuras activas de nuestra región de estudio.
2. Utilizar como base para la actualización de la norma sísmica vigente en nuestro país el mapa de zonación para roca obtenido en este trabajo. Este mapa, a diferencia de los usados normalmente para este propósito, no presenta un valor de peligrosidad sísmica (aceleración, intensidad, parámetros espectrales) para 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).
3. Enriquecer en el futuro la zonación sísmica propuesta con un número mayor de curvas en los gráficos integrales promedios de peligrosidad sísmica definidos para cada grupo, utilizando la técnica de árbol lógico para obtener estimados en términos de intensidad macrosísmica y parámetros dinámicos del terreno. Esta acciones garantizarían la mitigación del riesgo en la fase de proyecto, al incluir dentro de las normas sismorresistentes una cantidad apreciable de variantes de cálculo.
4. Reconocer la necesidad de realizar estudios de escenario de riesgo pre-desastre como el realizado en este trabajo, que permitan a las instituciones involucradas en la toma de decisiones trabajar sobre una base objetiva y viable. En consecuencia proponemos transferir los estimados de pérdidas obtenidos para la ciudad de Santiago de Cuba a los organismos con responsabilidad de la gestión, mitigación y administración del riesgo sísmico, así como la planificación urbana y la gestión de emergencias. Se debe hacer hincapié en la gestión del riesgo sísmico como acción preventiva y no emergencial.

5. Es imprescindible generar una base de datos geo-espacial de los bienes expuestos a nivel nacional que posibilite la generalización de este tipo de trabajo; teniendo en cuenta que en nuestro país no existe una Institución que se responsabilice con la generación, organización, actualización e integración de los datos necesarios (datos espaciales y sus atributos) para llevar a cabo un estudio de riesgo a cualquier escala de trabajo y que toda esta información se encuentra dispersa en varias instituciones (IPF, GEOCUBA, INV, ONE, CEPDE, IGP, DIGICUPET, CENAIS), existiendo discrepancias y no uniformidad en los datos que almacenan o custodian (clasificaciones, formatos).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AKINCI, A., MUELLER, C., MALAGNINI, L., LOMBARDI, A. Seismic Hazard Estimate in the Alps and Apennines (Italy), using smoothed historical seismicity and regionalized predictive ground-motion relationships. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, **45**, 4, pp. 285-304, 2004.
2. ALVAREZ, H. Intensidad sísmica de Cuba. En: Atlas Nacional de Cuba, La Habana, p. 20, 1970.
3. ALVAREZ, L. *SACUDIDA: versión 2.0: Un programa para la estimación de la peligrosidad sísmica*. Editorial Academia, La Habana, 60 pp., 1995.
4. ALVAREZ, L. y BUNE, V.I. Seismic shakeability of eastern Cuba region. *Izv. Akad. Nauk S.S.S.R. Fizika Zemli*, 10, pp. 3-12, 1985a. (en ruso)
5. ALVAREZ, L. y BUNE, V.I. A computer program for seismic hazard estimation. *Proceedings of the 3rd International Symposium on the Analysis of Seismicity and Seismic Risk, Liblice Castle, Czechoslovakia, June 17-22*, pp. 432-439, 1985b.
6. ALVAREZ, J.L. y CHUY, T.J. Iseismal Model for Greater Antilles. *Proceedings of the 3rd International Symposium on the Analysis of Seismicity and Seismic Risk, Liblice Castle, Czechoslovakia, June 17-22*, pp. 134-141, 1985.
7. ALVAREZ, L., CHUY, T., COTILLA, M., RUBIO, M. Estudio de la sismicidad de la región del Caribe y estimación preliminar de la peligrosidad sísmica en Cuba. Informe Final Tema 31001, Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI), CITMA, 600 pp., 1985.
8. ALVAREZ, L., CHUY, T., COTILLA, M. Peligrosidad sísmica de Cuba. Una aproximación a la regionalización sísmica del territorio nacional. *Revista Geofísica del Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH)*, 35, pp. 125-150, 1991.
9. ALVAREZ, L., PICO, R., COTILLA, M. 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., 1995.
10. ALVAREZ, L., CHUY, T., GARCIA, J., MORENO, B., ALVAREZ, H., BLANCO, M., EXPOSITO, O., GONZALEZ, O., FERNANDEZ, A.I. An earthquake catalogue of Cuba and neighbouring areas. ICTP Internal Report IC/IR/99/1, Miramare, Trieste, Italy, pp. 1-60, 1999.
11. AMBRASEYS, N.N. Evaluation of seismic risk, seismicity and seismic risk in the offshore North Sea Area. Ritsema A.R. and Gúrpinar A. (eds.), D. Reidel Publishing Company, 3, pp. 17-345, 1983.

12. AMBRASEYS, N.N. Reappraisal of the prediction of ground accelerations in Europe. *EAAE Working Group report, in 10th European Conference on Earthquake Engineering, Duma (ed.), Balkema, Rotterdam, The Netherlands*, pp. 3041–3048, 1995.
13. AMBRASEYS, N.N., SIMPSON, K.A., BOMMER, J.J. Prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **25**, 4, pp. 371-400, 1996.
14. ANAGNOS, T., BOUABID, J., LAWSON, S., BOUHAFS, M. Application of an integrated GIS loss estimation methodology to emergency response preparedness. *Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, (CDROM) Paper No. 884*, 1996.
15. ANDERSON, J.G. y BRUNE, J.N. Probabilistic seismic hazard analysis without the ergodic assumption. *Seis. Res. Letts.* **70**, 1, pp. 19-28, 1999.
16. APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL Earthquake Damage Evaluation Data for California. ATC-13, Redwood City, California, 492pp, 1985.
17. APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Lifelines in the Conterminous United States. ATC-25, Federal Emergency Management Agency (FEMA), Redwood City, California, 440 pp., 1991.
18. APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. ATC-40, Redwood City, California, 626 pp., 1996.
19. ARANGO, E. 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., 1996.
20. ARANGO, E. 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, pp. 72-87, 2000.
21. AUTODESK MAP Autocad2000, ©Autodesk, Inc. 1983-2003. Washington D.C.
22. BABAIEV, A., TOKARIOV, V., LYSKOV, L., ORBERA, L. Informe de las investigaciones geológico tectónicas del territorio de Cuba oriental y de la región de emplazamiento de las áreas No. 2 y 10 de la CEN de Holguín. Tomo 1, libro 3, parte 1/1. Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS), CITMA, 250 pp., 1989.
23. BARBAT, A. H., YEPEZ, F., CANAS, J. A. Damage Scenario Simulation for Risk Assessment in Urban Zones. *Earthquake Spectra*, **12**, pp. 371-394, 1996.
24. BENDER, B. Maximum likelihood estimation of b values for magnitude grouped data. *Bull.*

- Seism. Soc. Am.*, 73, pp. 831-851, 1983.
25. BENDER, B. y PERKINS, D. M. *SEISRISK III: A computer program for seismic hazard estimation*. U. S. Geological Survey Bulletin 1772, Denver, Colorado, 48 pp., 1987.
 26. BENDER, B. y PERKINS, D.M. Treatment of parameter uncertainty and variability for a single seismic hazard map. *Earthquake Spectra*, **9**, 2, pp. 165-195, 1993.
 27. BENEDETTI, D. y PETRINI, V. Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: proposte di un metodo di valutazione, *L'Industria delle Costruzioni*, 149, pp. 66-74, 1984.
 28. BENEDETTI, D., BENZONI, G., PARISI, M. A. Seismic vulnerability and risk evaluation for old urban nuclei, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16, pp. 183-201, 1988.
 29. BELOUSOV, T. P., KRESTNIKOV, V. N., SHEBALIN, N. V. Delimitación de zonas sismogeneradoras en Cuba central y estimación de su magnitud máxima. En: Investigación de la sismicidad de las zonas de baja actividad sísmica (Cuba central), Editorial Nauka, Moscú, pp. 81-85, 1983. (en ruso)
 30. BERTERO, V. V. Lessons learned from recent catastrophic earthquakes and associated research. *Proc. 1st Torroja int. conf., 1989, Monografía no. 410-411, Instituto de ciencias de la construcción Eduardo Torroja, Madrid, Spain, 1992.*
 31. BOMMER, J. J., HERNANDEZ, D. A., NAVARRETE, J. A., SALAZAR, W. M. Seismic hazard assessments for El Salvador. *Geofísica Internacional*, **35**, 3, pp. 227–244, 1996.
 32. BOORE, D.M. y AMBRASEYS, N.N. Some notes concerning prediction of ground motions for GSHAP. *Annali Geofisica*, **36**, 3–4, pp. 169-180, 1993.
 33. BOORE, D.M., JOYNER, W., FUMAL, T.E. Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: a summary of recent work. *Seismol. Res. Lett.* **68**, pp. 128– 153, 1997.
 34. BORCHERDT, R. D., LAWSON, S., PESSINA, V., BOUABID , SHAH, J. H. Applications of geographic information system technology (GIS) to seismic zonation and earthquake loss estimation. *In proceeding of fifth international conference on seismic zonation. V. 3, Nice, October 17-19, pp.1933–1948. 1995,*
 35. BRAGA, F., DOLCE, M., LIBERATORE, D. Statistical study of damage data from 23.11.80 Italy earthquake. *US-Italy Workshop on Seismic Hazard and Risk Analysis, Varenna, Italy, 1985.*
 36. BUDNITZ, J., APOSTOLAKIS, G., BOORE, D. M., CLUFF, L. S., COPPERSMITH, K. J., CORNELL, C. A., MORRIS, P. A. Recommendations for probabilistic seismic hazard

- analysis: guidance on uncertainty and use of experts. NUREG/CR-6372, Vol. 1 and 2, U.S. Nuclear Regulatory Comisión, 1997.
37. BUNE, V.I., GORSHKOV, G.P. *Regionalización sísmica de la URSS. Principios metodológicos y descripción regional del mapa de 1978.*, Editorial Nauka, Moscú, 308 pp., 1980 (en ruso).
 38. BUSH, W. A. y SCHERBAKOVA, I. N. Nuevos datos sobre la tectónica profunda de Cuba oriental. *Geotektonika*, 3, pp. 24-43, 1986 (en ruso).
 39. CALAIS, E., MERCIER DE LÉPINAY, B., RENARD, V., TARDY, M. Geometry and tectonic regime along a transcurrent plate boundary: the northern Caribbean border from Cuba to Hispaniola, Greater Antilles. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 308, pp. 131–135, 1989.
 40. CALAIS, E. Aspect structural d'une limite de plaques en coulissage: la frontière nord-Caraïbe de Cuba à Hispaniola (Grandes Antilles). Diplôme d'études approfondies à l'Université de Bretagne Occidentale. Archivo CENAI. 118 pp, 1988.
 41. CALAIS, E. y MERCIER DE LÉPINAY, B. A natural model of active transpressional tectonics: the en echelon structures of the Oriente deep, along the northern Caribbean transcurrent plate boundary. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 45, pp. 147-160. 1990.
 42. CALAIS, E. y MERCIER DE LÉPINAY, B. From transtension to transpresión along the northern Caribbean plate. *Tectonophysics*, 186, pp. 329-350, 1991.
 43. CALAIS, E. y MERCIER DE LÉPINAY, B. Semiquantitative modeling of strain and kinematics along the Caribbean-North America strike-slip plate boundary zone. *J. Geophys. Res.*, 98, pp. 8293-8308, 1993.
 44. CALAIS, E., PERROT, J., MERCIER DE LÉPINAY, B. *Strikeslip tectonics and seismicity along the northern Caribbean plate boundary from Cuba to Hispaniola. In: Active Strike-Slip and Collisional Tectonics of the Northern Caribbean Plate Boundary Zone. Geol. Soc. of Amer. Special Paper 326*, edited by J.F. Dolan and P. Mann, pp. 125-141, 1998.
 45. CAMPBELL, K. W. Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra. *Seismol. Res. Lett.*, 68, pp. 154-179, 1997.
 46. CARDONA O. D. y YAMÍN L. E. Seismic Microzonation and Estimation of Earthquake Loss Scenarios: Integrated Risk Mitigation Project of Bogotá, Colombia, *Earthquake Spectra*, 13, 4, pp. 795-814, 1997
 47. CARDONA, O.D. y HURTADO, J.E. Holistic seismic risk estimation of a metropolitan center: application for Bogotá, Colombia. *Proceedings of the 12th World Conference on*

- Earthquake Engineering (WCEE)*, paper No. 2643, ISBN 0-9582154-0-5 Auckland, New Zealand. 2000.
48. CARREÑO M. L., CARDONA, O. D., BARBAT, A. H. Urban Seismic Risk Evaluation: A Holistic Approach. *Natural Hazards*, 40, 1 , pp. 137-172, 2007.
 49. CHANG, T. S., PEZESHK, S., YIAK, K. C., KUNG, H. T. Seismic vulnerability evaluation of essential facilities in Memphis and Shelby County, Tennessee. *Earthquake Spectra*, 11 (4), pp. 527-544, 1995.
 50. CHÁVEZ, J. Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico a escala regional: aplicación a Cataluña. Tesis en opción al Grado de Doctor en Ciencias, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 343 pp., 1998.
 51. CHÁVEZ, J., GOULA, X., ROCA, A., CABAÑAS, L., BENITO, B., RINALDIS, D., SABETTA, F. Análisis de daños y de parámetros del movimiento del suelo correspondientes al terremoto de Irpina de 1980. *1ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Aguadulce, Almería, España, 9-13 febrero*, 1998.
 52. CHUY, T. J. 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 Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI), CITMA, 273 pp., 1999.
 53. CHUY, T. J. y RODRÍGUEZ, M. La actividad sísmica de Cuba por datos históricos. *Investigaciones Sismológicas en Cuba*, 1, pp. 5-17, 1980.
 54. CHUY, T. J., GONZALEZ, B. E., ALVAREZ, L. Sobre la peligrosidad sísmica en Cuba. *Investigaciones Sismológicas en Cuba*, 4, pp. 37-52, 1983.
 55. CHUY, T. J., GONZALEZ, B.E., POLO, B. Algunos criterios sobre la peligrosidad sísmica de la región occidental de Cuba. En: *Comunicaciones Científicas sobre Geofísica y Astronomía*, 4, La Habana, 21 pp, 1988.
 56. CHUY, T. J., ALVAREZ, L., ZAPATA, J., GONZÁLEZ, B.E. Investigaciones sismológicas complejas para el Complejo Hidroenergético Toa-Duaba. Reporte de Investigación, Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI), CITMA, 745 pp, 1992.
 57. CHUY, T. J. y ALVAREZ, L. Mapa de peligrosidad sísmica de Cuba para la nueva norma sísmica de la República de Cuba. CENAI, folleto, Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI), CITMA, 21 pp. 1995.
 58. COBIELLA, J. *Sobre el origen del extremo oriental de la fosa de Bartlett*. Editorial Oriente,

- Santiago de Cuba, 90 pp, 1984.
59. COBURN, A.W. y SPENCE, R.J.S. Factors Determining Human Casualty Levels in Earthquakes: Mortality Prediction in Building Collapse, *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), Madrid, Spain*, pp. 5989-5994, 1992.
 60. COMISION AD-HOC Dictamen de la Comisión Ad-hoc para la determinación de las zonas sismogeneradoras de la región oriental de Cuba y zonas aledañas. Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS), CITMA, La Habana. 12 pp, 1991.
 61. COPPERSMITH, K.J. y YOUNGS, R.R. Capturing uncertainty in probabilistic seismic hazard assessments within intraplate environments. *Proceedings of the 3rd National Conference on Earthquake Engineering*, vol. 1, pp. 301-312, 1986.
 62. COPPERSMITH, K.J. y YOUNGS, R.R. Seismic hazard analysis using expert opinion: an example from Pacific Northwest. *Memoir on Neotectonics in Earthquake Evaluation, Boulder, Colorado, The Geological Society of America*, pp. 27-46, 1990.
 63. CORNELL, C.A. Engineering seismic risk analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **58**, pp. 1583-1606, 1968.
 64. COSENTINO, P. y LUZIO, D. Earthquake risk: point estimates and confidence intervals. *Publs Inst. Geophys., Pol. Acad. Sci.*, **A**, pp. 7-14, 1980.
 65. COTILLA, M. y ALVAREZ, L. Principios del mapa sismotectónico de Cuba. *Revista Geofísica del Instituto Panamericano de Geografía e Historia*, **35**, pp. 113- 124, 1991.
 66. COTILLA, M. y ALVAREZ, L. Esquema de regionalización del potencial de amenaza geológica en Cuba. *Revista Geofísica del Instituto Panamericano de Geografía e Historia*, **49**, pp. 47-85, 1998.
 67. COTILLA, M. y UDÍAS, A. La ciencia sismológica en Cuba (II). Algunos terremotos históricos. *Revista Historia de América del Instituto Panamericano de Geografía e Historia*, **125**, pp. 46-90, 1999.
 68. COTILLA, M. y UDÍAS, A. El terremoto del 11 de junio de 1766 en Santiago de Cuba. *Revista Geofísica del Instituto Panamericano de Geografía e Historia*, **52-53**, pp. 5-26, 2000.
 69. COTILLA, M., BANKWITZ, P., FRANZKEE, H.J., ALVAREZ, L., GONZALEZ, E., PILARSKI, J., DIAZ, J.L., ARTEAGA, F. Una valoración sismotectónica de Cuba. *Revista Geofísica del Instituto Panamericano de Geografía e Historia*, **45**, pp. 145-179, 1996.
 70. CRAMER, C.H., PETERSEN, M.D., CAO, T., TOPPOZADA, T.R., REICHLER, M. A time-dependent probabilistic seismic-hazard model for California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**, 1,

- pp. 1-21, 2000.
71. CRAMER, C.H. A seismic hazard uncertainty analysis for the New Madrid seismic zone, *Engineering Geology*, 62, pp. 251-266, 2001.
 72. CUEVAS, J.L. Caracterización de las Anomalías de la Gravedad en Cuba Centro Oriental y su utilización en Estudios de Tectónica y Sismicidad (inédito). Tesis en opción al Grado de Doctor en Ciencias Geofísicas. Instituto de Geofísica y Astronomía, La Habana, 146 pp., 1994.
 73. DAHLE, A., CLIMENT, A., TAYLOR, W., BUNGUM, H., SANTOS, P., CIUDAD REAL, M., LINHOLM, C., STRAUCH, W., SEGURA, F. New spectral strong motion attenuation models for Central America. *Proceedings of the Fifth International Conference on Seismic Zonation, Nice, France*, vol. II, pp. 1005-1012, 1995.
 74. DAVIDSON, R., VILLACIS, C., CARDONA, C., TUCKER, B. A project to study urban earthquake risk worldwide. *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), Auckland, New Zealand*, paper N° 0791, 2000.
 75. DENG, J. y SYKES, L.R. Determination of Euler pole for contemporary relative motion of Caribbean and North American plates using slip vectors of interplate earthquakes. *Tectonics*, 14, pp. 39-53, 1995.
 76. DESPAIGNE, G., CHUY, T., RODRÍGUEZ, A. Estimados de peligrosidad sísmica a partir de un nuevo enfoque geodinámico de la región Bartlett-Caimán. *En: Nuevas investigaciones sismológicas en Cuba (Chuy, T. y Alvarez, L. ed.) Editorial Academia, La Habana*, pp. 47-56, 2002.
 77. DeMETS, C., JANSMA, P., MATTIOLI, G., DIXON, T., FARINA, F., BILHAM, R., CALAIS, E., MANN, P. GPS geodetic constraints on Caribbean-North America plate motion. *Geophys. Res. Lett.*, 27, pp. 437-440, 2000.
 78. DeMETS, C., GORDON, R.G., ARGUS, D.F., STEIN, S. Effect of recent revisions of the geomagnetic reversal timescale on estimates of current plate motions. *Geophys. Res. Lett.*, 21, pp. 2191-2194, 1994.
 79. DÍAZ, J. L. Morfoestructura de Cuba Occidental y su dinámica. Tesis de candidato a doctor en Ciencias Geográficas. Instituto de Geografía, Academia de Ciencias de la U.R.S.S., 200 pp., 1985 (en ruso).
 80. DILLON, W.P., EDGAR, N.T., SCANLON, K.M., PARSON, L.M. *A review of the tectonic problems of the strike-slip northern boundary of the Caribbean plate and examination by GLORIA, in Geology of the United States Seafloor: The View from Gloria*. Edited by J.V.

- Gardner, M.E. Field, and D.C. Twichell, Cambridge University Press, United Kingdom, pp. 135-164, 1994.
81. DI PASQUALE, G., ORSINI, G., PUGLIESE, A., ROMEO, R.W. Damage scenarios from future earthquakes. *Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, The Netherlands*. ISBN 90 5410 982 3, 1998.
82. DIXON, T.H., FARINA, F., DeMETS, C., JANSMA, P., MANN, P., CALAIS, E. Relative motion between the Caribbean and North American plates and related plate boundary deformation based on a decade of GPS observations. *Journal of Geophysical Research*, **103**, 157-15,182, 15 p., 1998.
83. DOLAN, J.F. y MANN, P. (eds.) *Active Strike-slip and Collisional Tectonics of the Northern Caribbean Plate Boundary Zone*. G.S.A. Special Paper 326. Geological Society of America, Boulder, Colorado. 174 pp., 1998.
84. DOLAN, J.F. y WALD, D.J. The 1943-1953 north-central Caribbean earthquakes: Active tectonic setting, seismic hazards and implications for Caribbean-North America plate motions. *In: Active Strike-slip and Collisional Tectonics of the Northern Caribbean Plate Boundary Zone, Geological Society of America Special Paper 326*. Edited by J.F. Dolan and P. Mann, Geological Society of America, Boulder, Colorado, pp. 143-169, 1998.
85. DOLAN, J.F., MULLINS, H.T., WALD, D.J. Active tectonics of the northcentral Caribbean: Oblique collision, strain partitioning, and opposing subducted slabs. *In: Active Strike-slip and Collisional Tectonics of the Northern Caribbean Plate Boundary Zone, edited by J. F. Dolan and P. Mann, Geological Society of America Special Paper 326*. Geological Society of America, Boulder, Colorado, p. 1-61, 1998.
86. EERI Committee on Seismic Risk The basics of seismic risk analysis. *Earthquake Spectra*, **5**, 4, pp. 675-702, 1990.
87. EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH INSTITUTE (EERI) Post-Earthquake Investigation Field guide. Learning from Earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute, Publication No. 96-1, Oakland, California, 114 pp., 1996.
88. EKSTRÖM, G. y DZIEWONSKI, A. Evidence of bias in estimations of earthquake size. *Nature*, **332**, pp. 319-323, 1988.
89. ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI/SOG) Seismic Hazard Methodology for the Central and Eastern United States - Volume 1, Part 1, Theory, and Part 2, Methodology, Prepared for Seismicity Owners Group under Research Projects P101-38, -45, -46, and 2256-14, EPRI Report NP-4726, Revised, February, Palo Alto, California, 1987

90. FÄH, D., KIND, F., LANG, K., GIARDINI, D. Earthquake scenarios for the city of Basel. *Soil Dynamics and Earthq. Eng.*, 21, pp. 405-413, 2001.
91. FEDOTOV, S. A. y SHUMILINA, S. L. Peligrosidad sísmica de Kamchatka. *Izv. Akad. Nauk S.S.S.R., Fizika Zemli*, 9, pp. 3-15, 1971 (en ruso).
92. FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA) NEHRP Handbook of the Seismic Evaluation of Existing Building. FEMA 178, Washington D.C., 1992.
93. FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA) NEHRP Guidelines for The Seismic Rehabilitation of Buildings/ Commentary. FEMA Reports 273/274, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., 1997.
94. FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA) Earthquake Loss Estimation Methodology HAZUS. Technical Manual, Vol. I, II and III, First Edition 1997, National Institute of Buildings Sciences for Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., 1999.
95. FRANKEL, A. Mapping seismic hazard in the Central and Eastern United States. *Seism. Res. Letts.*, 66, 4, pp. 8-21, 1995.
96. FRANKEL, A., MUELLER, C., BARNHARD, T., PERKINS, D., LEYENDECKER, E., DICKMAN, N., HANSON, S., HOPPER, M. National seismic-hazard maps: documentation June 1996. U.S. Geological Survey, Open-file Report 96-532, 110 pp., 1996.
97. FRANKEL, A., MUELLER, C., HARMSSEN, S., WESSON, R., LEYENDECKER, E., KLEIN, F., BARNHARD, T., PERKINS, D., DICKMAN, N., HANSON, S., HOPPER, M. USGS National Seismic Hazard Maps. *Earthquake Spectra*, 16, pp. 1-19, 2000.
98. French, C.D. y Schenk, C.J. Map Showing Geology, Oil and Gas Fields, and Geologic Provinces of the Caribbean Region. U.S.G.S. Open File Report 97-470-K, 2004.
99. FORMELL, F. Naturaleza de los rasgos flexuro fallados principales de Cuba. Informe inédito. Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS), CITMA, 15 pp., 1994.
100. FUNDORA, M., DIAZ, L., GONZALEZ, B., GARCIA, J., SERRANO, M., PEREZ, L. Peligros, vulnerabilidad y riesgos geológicos e hidrológicos en San José de las Lajas. *En: Memorias del IV congreso de Geología y Minería, GEOMIN'2001, La Habana, 19-23 de Marzo*, 10 pp., 2001.
101. GARDNER, J.K., KNOPOFF, L. Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bull. Seism. Soc. Am.* 64, pp. 1363-1367, 1974.
102. GARCIA, J. New hazard assessment and earthquake loss estimation using geographic

- information system technology (GIS). *En: Memorias de Geoinfo'2000, La Habana*, ISSN 1028-8961, 10 pp., 2000.
103. GARCIA, J., ARANGO, E., ZAPATA, J.A., OLIVA, R., GONZÁLEZ, B., FERNÁNDEZ, B., CHUY, T., REYES, C., MONNAR, O. Programa nacional de la defensa, Informe final del proyecto “Mapa de riesgo sísmico de la ciudad de Santiago de Cuba”. Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI), CITMA, 120 pp., 2002a.
104. GARCÍA, J. A., ZAPATA, J. A., ARANGO, E. D., MONNAR, O., CHUY, T. J., FERNÁNDEZ, B. C., REYES, C. R., OLIVA, R. Estimación del riesgo sísmico en la ciudad de Santiago de Cuba con el objetivo de su mitigación, a partir de su implementación en un Sistema de Información Geográfica (S.I.G.), *En: “Nuevas investigaciones sismológicas en Cuba”* (Chuy T. y Alvarez L., eds.), Editorial Academia, La Habana, ISBN 959-02-0347-7, pp. 73-82, 2002b.
105. GARCIA, J., SLEJKO, D., ALVAREZ, L., PERUZZA, L., REBEZ, A. Probabilistic seismic hazard assesement for Cuba. In: Slejko e Rebez (eds.) G.N.G.T.S 21° Convengo Nazionale- Riassunti estesi delle comunicazioni, Tipografia Masetti, Trieste, pp. 173-176, 2002c.
106. GARCIA, J., SLEJKO, D., ALVAREZ, L., PERUZZA, L., REBEZ, A. Seismic hazard maps for Cuba and surrounding areas. In: DipTeRis, E.S.C. 28th General Assembly Book of Abstracts, Studio64, Genova, 126 pp., 2002d.
107. GARCIA, J., SLEJKO, D., ALVAREZ, L., PERUZZA, L., REBEZ, A. Seismic hazard maps for Cuba and surrounding areas. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93**, 6, pp. 2563-2590, 2003a.
108. GARCIA, J., SLEJKO, D., ALVAREZ, L., PERUZZA, L., REBEZ, A. Probabilistic seismic hazard assesement for Cuba. In: Slejko D. (ed.) G.N.G.T.S Atti del 21° Convengo Nazionale, CD-ROM, Prospero Trieste, file 04.20, 10 pp., 2003b.
109. GARCIA, J., SLEJKO, D., ALVAREZ, L., REBEZ, SANTULIN, M. Smoothed seismicity approach for the seismic hazard assessment of the Caribbean region. In: Slejko D. (ed.) G.N.G.T.S., 22° Convengo Nazionale - Riassunti estesi delle comunicazioni, Tipografia Masetti, Trieste, pp. 183-186, 2003c.
110. GARCIA, J., SLEJKO, D., ALVAREZ, L., REBEZ, SANTULIN, M. Smoothed seismicity approach for the seismic hazard assessment of the Caribbean region. In: Slejko D. (ed.) G.N.G.T.S., Atti del 22° Convengo Nazionale - CD-ROM, Prospero Trieste, file 07.05, 5 pp., 2004a.
111. GARCIA, J., SLEJKO, D., ALVAREZ, L., REBEZ, SANTULIN, M. Seismic hazard map

- for the Cuba region using the spatially smoothed seismicity approach. In: European Seismological Commission, XXIX General Assembly Abstracts, University and GFZ Potsdam, pp. 195, 2004b.
112. GARCIA, J., ALVAREZ, L., SLEJKO, D., REBEZ, A., ARANGO, E., PICO, R., SANTULIN, M., MÁRQUEZ, P. I., MOREJÓN, G., VÁZQUEZ, J.C., BERENGUER, Y. Informe final del proyecto “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 ”. Programa nacional de la defensa, Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS), CITMA, 180 pp., 2005.
113. GARCIA, J., SLEJKO, D., ALVAREZ, L., REBEZ, SANTULIN, M. Seismic hazard map for the Cuba region using the spatially smoothed seismicity approach, submitted to: Journal of Earthquake Engineering. 2006.
114. GARCIA, J. Macroseismic intensity attenuation in Cuba for probabilistic seismic hazard assessment, (inédito).
115. GIARDINI, D., GRUNTHAL, G., SHEDLOCK, K., ZHANG, P. The GSHAP global seismic hazard map. *Ann. Geofis.*, **42**, pp. 1225-1230, 1999.
116. GINER, J.J., MOLINA, S., DELGADO, J., JAUREGUI, P. Mixing Methodologies in Seismic Hazard Assessment via a Logic Tree Procedure: An Application for Eastern Spain. *Natural Hazards*, **25**, pp. 59-81, 2002.
117. GITIS, V.G., RUIZ SHULCLOPER, J., ALVAREZ, L. (ed.) *Reconocimiento de elementos de estructuras espaciales*. Editorial Academia, La Habana, 116 pp., 1992.
118. GIARDINI, D. The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP): 1992/1999. *Ann. Geofis.*, **42**, pp. 957-974, 1999.
119. GONZALEZ, B.E. y otros Peligro Sísmico Local y Microzonificación Sísmica de Áreas Urbanas de Mariel. *Memorias del Taller Internacional sobre Informática y Geociencias GEOINFO*, La Habana, 10 pp., 2004.
120. GONZALEZ, B.E., CHUY, T., ALVAREZ, L., RUBIO, M. Estudios sismológicos complejos de Cuba centro oriental para el emplazamiento de objetivos nucleares. Reporte de Investigación, Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS), CITMA, 357 pp., 1994.
121. GRÜNTAL, G. European macroseismic scale 1998. *Cahiers du centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, **15**, 100 pp., 1998.
122. GRÜNTAL, G. y WAHLSTRÖM, R. Sensitivity of parameters for probabilistic seismic

- hazard analysis using a logic tree approach. *Journal of Earthquake Engineering*, **5**, No. 3, pp. 309-328, 2001.
123. GUTENBERG, B. y RICHTER, C.F. *Seismicity of the Earth and associated phenomena*. 2nd ed. Princeton Univ. Press. 273 pp., 1954.
124. GUTENBERG, B. y RICHTER, C.F. Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration, *Bull. Seisl. Soc. Am.*, **46**, pp. 105-145, 1956
125. GUTIERREZ LANZA, M. Conferencias de Sismología pronunciadas en la Academia de Ciencias de La Habana. Editorial Lloredo, La Habana, 1914.
126. HERRMAN, R.B.: Recurrence relations, *Earthquake Notes* **48**, pp. 47-49, 1977.
127. HO, P. Estimating the direct and indirect losses from a midwest earthquake. Mid-America Earthquake Center, Project SE-10: Economic loss estimation, 21 pp., 2001.
128. INSTITUTO NACIONAL DE LA VIVIENDA (INV). Programa para el desarrollo Tecnológico de la Vivienda en el Período 1997-2000, Centro Técnico de la Vivienda y el Urbanismo, La Habana, Cuba, 27 pp., 1997.
129. ITURRALDE-VINENT, M.A. Nuevo modelo interpretativo de la evolución geológica de Cuba. *Rev. Ciencias de la Tierra y del Espacio*, **3**, pp.51-90, 1981.
130. ITURRALDE-VINENT, M.A. Cuban Geology: A new plate tectonic synthesis: *Journal of Petroleum Geology*, **17** (1), pp. 39-71, 1994
131. ITURRALDE-VINENT, M.A. (ed.) *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., 1996.
132. ITURRALDE-VINENT, M.A. Synopsis de la constitución geológica de Cuba. *Acta Geol. Hisp.* **33**, pp. 9– 56, 1998.
133. ITURRALDE-VINENT, M.A. Ensayo sobre la paleogeografía del Cuaternario de Cuba. *V Congreso de Geología y Minería, Havana, Cuba, CD-ROM: ISBN-959-7117-11-8* (www.ig.utexas.edu/caribplate/caribplate.html), 2003.
134. ITURRALDE-VINENT, M.A. y E.G. LIDIAK, Eds., Caribbean Plate Tectonics. Stratigraphy, Magmatic, Metamorphic and Tectonic Events. (UNESCO/IUGS IGCP Project 433. *Geologica Acta* **4** (1-2), 341 pp., 2006.
135. JACOB, K., ARMBRUSTER, J.; BARSTOW, N.; HORTON, S. 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, 1994.

136. JAMES, K. H. Arguments for and against the Pacific origin of the Caribbean Plate: discussion, finding for an inter-American origin: In: Iturralde-Vinent, M. A. and E. G. Lidiak (Eds.), Caribbean Plate Tectonics, *Geologica Acta*, v. 4, no. 1-2, pp. 279-302, 2006.
137. JOVER, J. Sismología de la Región Oriental de la República de Cuba. El Macrosismo del 27 de febrero de 1914. En: *Memorias de la Sociedad Cubana de Historia Natural Felipe Poey, Vol. II*. 1917.
138. JOYNER, W.B.; BOORE, D.M. Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. *Bull. Seis. Soc. Am.* **71**, pp. 2011-2038, 1981.
139. KEYLIS-BOROK, V. I., KRONROD, T. L., MOLCHAN, G. M. Algoritmo para la estimación del riesgo sísmico. *Vichislitielnaya Seismologiya*, N. 6, pp. 21-43, 1973.
140. KIJKO, A.; GRAHAM, G. Parametric-historic procedure for probabilistic seismic hazard analysis. Part I: Estimation of maximum regional magnitude M_{max} . *Pure Appl. Geophys.*, **52**, pp. 413-442, 1998.
141. KIJKO, A.; GRAHAM, G. Parametric-historic procedure for probabilistic seismic hazard analysis. Part II: Assessment of seismic hazard at specific site. *Pure Appl. Geophys.*, **154**, pp. 1-22, 1999.
142. KIJKO, A.; SELLEVOLL, A. 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.* **79**, 3, pp. 645-654, 1989.
143. KING, S. A., KIREMIDJIAN, A. S., ROJAHN, C., SCHOLL, R. F. Earthquake hazards and loss estimation using Geographic Information Systems. *Proceedings of the Tenth European Conference on Earthquake Engineering. Vienna*, **2**, pp. 1135-1140, 1994.
144. KIRCHER, C. A.; NASSAR, A. A.; KUSTU, O.; HOLMES, W. T. Development of Building Damage Functions for earthquake Loss estimation. *Earthquake Spectra*, **13**, 4, pp. 663-682, 1997.
145. KULKARNI, R.B.; YOUNGS, R.R.; COPPERSMITH, K.J. Assessment of confidence intervals for results of seismic hazard analysis. In: *Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, vol. 1, San Francisco, California, July 21-28*, pp. 263-27, 1984.
146. LANTADA N., PUJADES L.G. AND BARBAT A. H. GIS techniques for seismic risk scenarios evaluation. Application to Barcelona, Spain. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, paper N° 42, Vancouver, Canada*, 2004.

147. LIU, HUIXIANG On the seismic zoning map of China. *In: Proceedings of International Seminar on Seismic Zonation*, Guangzhou, China, pp. 35-42, 1987.
148. LOPES, M. S. Evaluation of the seismic performance of an old masonry building in Lisbon, *Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, (CD-ROM) Paper No. 1484*, 1996.
149. LUNDGREN, P. R. y RUSSO, R. M. Finite element modelling of crustal deformation in the North America –Caribbean plate boundary zone, *J. Geophys. Res.*, 101, 11, pp. 317 – 327, 1996
150. MANN, P. y BURKE, K. Neotectonics of the Caribbean region. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, **22**, 4: pp. 309-362, 1984.
151. MANN, P., G. DRAPER, LEWIS J. F. An overview of the geologic and tectonic development of Hispaniola, *In: Geologic and Tectonic Development of the North America – Caribbean Plate Boundary in Hispaniola*, edited by P. Mann, G. Draper, and J. F. Lewis, *Spec. Pap. Geol. Soc. Am.*, **262**, pp. 1 – 28, 1991
152. MANN, P. TAYLOR, F. W., EDWARDS, R. L., KU, T. L. Actively evolving microplate formation by oblique collision and sideways motion along strike slip faults: An example from the northwestern Caribbean plate margin, *Tectonophysics*, **246**, pp. 1 –69, 1995.
153. MANN, P., PRENTICE, C. S. BURR, G. PENA, L. R., TAYLOR, F. W. Tectonic geomorphology and paleoseismology of the Septentrional fault system, Dominican Republic, *In: Active Strike-slip and Collisional Tectonics of the Northern Caribbean Plate Boundary Zone*, edited by J. F. Dolan and P. Mann, (1998): *Geological Society of America Special Paper 326*, Geological Society of America, Boulder, Colorado, pp. 63– 123, 1998.
154. MANN, P., CALAIS, E., RUEGG, J., DEMETS, C., JANSMA, P. E., MATTIOLI, G. S., Oblique collision in the northeastern Caribbean from GPS measurements and geological observations. *Tectonics*, **21**, 6, 1057, pp. 7-23, 2002.
155. MARTÍNEZ-FORTÚN, J. A. Anales y Efemérides de San Juan de los Remedios. Remedios, 1930.
156. MARTÍNEZ-FORTÚN, J.A. Meteorología Histórica Cubana. Caibarién, 1948.
157. McCORMACK T. C.; RAD, F. N. An earthquake loss estimation methodology for buildings based on ATC-13 and ATC-21. *Earthquake Spectra*, **13**, 4, pp. 605-622, 1997.
158. McGUIRE, R. K. Fortran computer program for seismic risk analysis. U.S. Department of the Interior, Geological Survey. Open File report, No. 76-67, 92 pp., 1976.
159. McGUIRE, R. K. 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, 1977.
160. McGUIRE, R. K. Computations of seismic hazard, *Ann. Geofis.*, **36**, No 3-4, pp. 181-201, 1993.
161. McGUIRE, R. K. y SHEDLOCK, K. M. Statistical uncertainties in seismic hazard evaluations in the United States, *Bull. Seisl. Soc. Am.* **71**, pp. 1287-1308, 1981.
162. McQUEEN, C. M. An evaluation of seismic hazard in the Caribbean and Central America using three probabilistic methods, Ph.D. Thesis, University of Lancaster, U. K. 342 pp., 1997.
163. MEDINA y otros. Reconocimiento geólogo - geofísico de la cuenca de Santiago de Cuba, con fines de Riesgo Sísmico. Empresa Geominera de Oriente, Santiago de Cuba, Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI), CITMA, 32 pp., 1999.
164. MEDVEDEV, S. V.; SPONHEUER, V.; KARNIK, V. Escala de intensidad sísmica MSK-1964, Comité Geofísico Inter-departamental del Presidium de la Academia de Ciencias de la URSS, Moscú, 11 pp., 1965 (en ruso).
165. MEDVEDEV, S. V. Recomendaciones para la microregionalización sísmica. RMS-3. *En: Cuestiones de ingeniería sísmica, vol.15, Ed. Nauka, Moscú*, pp. 6-34, 1973 (en ruso).
166. MEDVEDEV, S. V. (ed.) Microregionalización sísmica. Editorial Nauka, Moscú, 248pp., 1977 (en ruso).
167. MEDVEDEV, S. V. Determination of the seismic intensity, *Voprosy Inzhenyernoy Seismologii* **19**, pp. 108-116, 1978 (in russian).
168. MENA, U. Implementación del método del índice de Vulnerabilidad en el Sistema de Información Geográfica, ARCINFO. Tesis en opción al Grado de Master en Ciencias, Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Barcelona, pp. 125, 1997.
169. MENA, U., Pujades, L. G., Canas, J. A. Automatización de los resultados del estudio de Riesgo Sísmico en la Ciudad de Barcelona, *En: 2º Congreso de Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, CD-ROM, Paper 024.1, Madrid, España*, 11pp., 2001.
170. MERCIER DE LÉPINAY, B. y otros. Rapport de mission SEA CARIB II. Informe inédito. Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI). Santiago de Cuba, 118 pp, 1988.
171. MOLNAR, P. y SYKE5, L.R. Tectonics of the Caribbean and Middle America regions from focal mechanism and seismicity. *Geol. Soc. of Am. Bull.*, **80**, 9, pp. 1639-1684, 1969.
172. MONTESUS de BALLORE. F. La Géologie Sismologique: Les Tremblements de Ferre..

- Paris. Armand Colin.,488p, 1924 (en francés)
173. MORENO, B., GRANDISON, M., ATAKAN, K. Crustal velocity model along the southern Cuban margin: implications for the tectonic regime at an active plate boundary. *Geophys. J. Int.* **151**, pp. 632–645, 2002.
174. MUELLER, C.S.; FRANKEL, A.D.; PETERSEN, M.D.; LEYENDECKER, E.V. 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, 22pp., 2003.
175. MUIR-WOOD, R. From global seismotectonics to global seismic hazard, *Ann. Geofis.*, **36**, No. 3 – 4, pp.153-169, 1993.
176. MURPHY, J. R.; O'BRIEN, L. J. The correlation of peak ground acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **67**, pp. 877–915, 1977.
177. NASSAR, A. A., WILLIAMS, C., R., ROMER, M. E., VANDERMARCK, P., BENDIMERAD, F. Seismic risk analysis model for Mexico City using spectral accelerations, *Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, (CD-ROM) Paper No. 1904*, 1996.
178. NC 46. Construcciones sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción, La Habana, Comité Estatal de Normalización, 1999.
179. NORMA CUBANA Construcciones Sismorresistentes. Especificaciones de Proyecto y Métodos de Cálculo (NC 53 - 114. 1984), 1985.
180. NUEVO Atlas Nacional de Cuba por Colectivo de autores. Cuba, Editorial Academia, ACC, 1985.
181. OEA. Manual sobre el manejo de peligros naturales en la planificación para el desarrollo regional integrado, Washington, D. C., <http://www.oas.org>, 1993.
182. OLIVA, R.; RUBIO, M.; MARISY, J. Vulnerabilidad Sísmica de la Ciudad de Santiago de Cuba. *Revista Geofísica*, Instituto Panamericano de Geografía e Historia, No. 34., pp. 177 – 184, 1991.
183. OLIVA, R. Vulnerabilidad y Desarrollo Urbano de la ciudad de Santiago de Cuba. Jornada Científica del Instituto Nacional de Planificación Física (IPF), Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS), 10 pp., 2000.
184. OLIVA, R.; AVICH, B. 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 Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS) y el Estado Mayor de la

- Defensa Civil (EMDCN), 20 pp., 1993.
185. ORBERA, L.; RAMIREZ, R., LOPEZ ,M., ARIAS, A., MARQUETI, M., CRESPO, R. Las investigaciones sismotectónicas y la estabilidad de las construcciones energéticas en Cuba , *En: Primer Congreso Internacional sobre Desastres Naturales , 27-30 enero ,Resúmenes, Comisión de sismología, Habana, 45 pp., 1987.*
186. ORBERA, L.; RODRIGUEZ, J.; PENA, B.; ARIAS, A.; MARQUETI, M. y LOMBARDERO, T. Estudio sismotectónico para el emplazamiento del Complejo Hidroenergético Toa-Duaba. EIPB, MINBAS, Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI), pp. 180, 1989.
187. ORBERA, L.; GONZÁLEZ, B.; CHUY, T.; ORO, J. Investigación sísmica en la región de emplazamiento del Centro de Investigaciones Nucleares. Reporte de Investigación, Anexos gráficos, Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI), 344 pp., 1990.
188. PERUZZA, L. Analisi di sensibilità all'introduzione di sorgenti lineari e trattamento time-dependent. *In: Progetto MISHA. Metodi innovativi per la stima dell'hazard: applicazione all'Italia Centrale, L. Peruzza (ed.), CNR-GNDT, Roma, pp. 137-160. 1999 (en Italiano).*
189. PICO, R. Determinación del parámetro β_0 para los algoritmos de agrupamiento lógico-combinatorios. *En: Conferencia Internacional "Ciencia y tecnología para el desarrollo", CIMAFA'95. I Taller Iberoamericano de reconocimiento de patrones, La Habana, pp. 99-100, 1995.*
190. PICO, R. Determinación del umbral de semejanza β_0 para los algoritmos de agrupamiento lógico-combinatorios, mediante el dendrograma de un algoritmo jerárquico. *En: SIARP'99, IV Simposio Iberoamericano de Reconocimiento de Patrones, La Habana, pp. 259-265, 1999.*
191. PICO, R.,; ALVAREZ, L.; COTILLA, M. Zonación sísmica de Cuba mediante algoritmos de clasificación lógico-combinatorios. *En: II Taller Iberoamericano de Reconocimiento de Patrones, TIARP'97, La, Habana, Marzo 1997, pp. 245-250, 1997.*
192. PERREY, A. Note historique sur les tremblements de terre des Antilles. *Compt. Rend. de l'Acad. des Sc. De Paris, XVI, pp. 1283-1303, 1843.*
193. PERREY, A. Sur les Tremblements de Terre aux Antilles. *Mém. De l'Acad. des Sc. de Dijon, pp. 325-392, 1845.*
194. PERREY, A. Catalogues Annuels des Tremblements de Terre. *Bull. de l'Acad. des Sc. de Belgique, XXIII, 23, XXIV, 1., 1856.*

195. PINDELL, J.L. Alleghenian reconstruction and subsequent evolution of the Gulf of Mexico, Bahamas and Proto-Caribbean. *Tectonics*, **4**(1), pp. 1-39, 1985.
196. PINDELL, J. L. Evolution of the Gulf of Mexico and the Caribbean. In S. Donovan y T. Jackson (eds.). *Caribbean Geology, an introduction*, pp. 13-40, 1994.
197. PINDELL, J. L., DEWEY, J. F. Permo Triassic reconstruction of western Pangea and the evolution of the Gulf of Mexico/Caribbean region: *Tectonics*, **1**, pp.179-211. 1982.
198. PINDELL, J.L., BARRETT, S. Geological evolution of the Caribbean Region; A plate tectonic perspective. In G. Dengo y J. Case, 1990. *The geology of North America, Vol. H., The Caribbean Region, GSA*, pp. 405-432, 1990.
199. PINDELL, J., L. KENNAN, K-P STANEK, W. V. MARESCH, DRAPER, G. Foundations of Gulf of Mexico and Caribbean evolution: eight controversies resolved: In: Iturralde-Vinent, M. A. and E. G. Lidiak (Eds.), *Caribbean Plate Tectonics, Geologica Acta*, v. **4**, no. 1-2, p. 303-341, 2006.
200. PISARENKO, V. F.; LYUBUSHIN, A. A.; LYSENKO, V. B.; GOLUBIEVA, T. V. Statistical estimation of seismic hazard parameters: Maximum possible magnitude and related parameters, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **86**, pp. 691-700, 1996.
201. POEY, A. Tableau chronologique des tremblements de terre ressentis a l'île de Cuba de 1551 á 1855. París, 1855
202. POEY, A. Catalogue chronologique des tremblements de terre ressentis dan les Indes Occidentales de 1530 á 1887, accompagné d'une revue bibliographique contenant tous les travaux relative aux tremblements de terre des Antilles. París, 1887.
203. POLOVINCHIK, I. F., KLYACHKO, M. A., KOFF, G. L. Development of Geoinformational (GIS) for analysis and management of seismic risk on the urban areas. *Proceedings of the Tenth European Conference on Earthquake Engineering. Vienna*, **2**, pp. 1141-1146, 1994.
204. PROL, J.; ARIAZA, G. y OTERO, R. Sobre la confección de los mapas de profundidad del basamento y espesor de la corteza terrestre en el territorio cubano. Informe Científico-Técnico de la Emp. Nacional de Geofísica, Ministerio de la Industria Básica (MINBAS), pp. 36., 1993.
205. PUSHCHAROVSKY, Yu., A. MOSSAKOVSKY, G. NEKRASOV, S. SOKOLOV, ITURRALDE-VINENT, M. Tectonic of the Republic of Cuba: Explanatory note to the Tectonic map of Cuba 1:500 000. Ed. Nauka, Moscow, 77 pp., 1989 (russian/english).
206. RADIUS. Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban Areas Against Seismic Disasters.

- Geneva, Switzerland: IDNDR Secretariat, United Nations, Website: <http://geohaz.org/radius.html>. 2000.
207. REBEZ A.; SLEJKO, D. Sensitivity analysis on the input parameters in probabilistic seismic hazard assessment, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **20**, pp. 341-351, 2000.
208. REBEZ, A. y SLEJKO D. Introducing epistemic uncertainties into seismic hazard assessment for the broader Vittorio Veneto area (N.E. Italy). *Boll. Geof. Teor. Appl.*, **45**, 4, pp. 305-320, 2004.
209. REID, H. F.; TABER, S. The Porto Rico Earthquake of 1918 with Descriptions of Earlier Earthquakes. Report of the Earthquake Investigation Commission, Doc. No. 269, U. S. House of Representatives, 66th Congress, 1st Sess., pp. 53-66, 1920
210. REITER, L. *Earthquake hazard analysis: issues and insights*. Columbia University Press, New York, 252 pp., 1990.
211. RICHTER, C.F. *Elementary seismology*, Freeman and Co., San Francisco, U.S.A., 768 pp., 1958.
212. RIZNICHENKO, Yu. V. On quantitative determination and mapping of seismic activity. *Ann. di Geof.* Vol. XII, X-1862, pp. 227-237, 1959.
213. RIZNICHENKO, Yu.V. (ed.) *Métodos de estudio detallado de la sismicidad*, Trudy, Isvestiya Akad. Nauk SSSR, No. 25, 176 pp., 1960 (en ruso).
214. RIZNICHENKO, Yu. V. Método de suma de terremotos para el estudio de la actividad sísmica, Isvestiya Akad. Nauk SSSR, Ser. Geofiz., No. 17. 1964 (en ruso).
215. RIZNICHENKO, Yu.V. De la actividad de los focos de terremotos a la sacudibilidad de la superficie terrestre, Isvestiya Akad. Nauk SSSR, Fizika Zemli, No. 11, pp. 1-12 (pp. 715-721 A.G.U.), 1965 (en ruso y inglés).
216. RIZNICHENKO, Yu.V. Cálculo de la sacudibilidad de los puntos en la superficie de la Tierra debida a terremotos en su vecindad, Izveziya Akad. Nauk SSSR Fizika Zemli, 1, pp. 16-32, 1966 (en ruso).
217. RIZNICHENKO, Yu. V., GORBUNOVA, I. V. Sobre los métodos de preparación de mapas de actividad sísmica. *En: Regionalización sísmica de la URSS*, Nauka, Moscow, 1968 (en ruso).
218. RIZNICHENKO, Yu.V. (ed.) *Sacudibilidad sísmica del territorio de la URSS*. Nauka, Moscow, 184 pp., 1979 (en ruso).
219. RIVERA, Z; SLEJKO, D.; GARCÍA, J.; PERUZZA L.; REBEZ, A.; SANTULIN, M.

- Seismic hazard of the Bayamo region (eastern Cuba) considering local soil typologies, *Bol. Geof. Teo. Apl.*, **45**, No. 1-2, pp. 15-35, 2004.
220. RODRÍGUEZ, M.; ALVAREZ, L.; GARCÍA, J. Estimaciones probabilísticas de la peligrosidad sísmica en Cuba, *Revista Geofísica del IPGH*, **47**, pp. 46-77, 1997.
221. ROJAS-AGRAMONTE, Y. NEUBAUER, F., HANDLER, R., GARCIA-DELGADO, D.E., FRIEDL, G.R. DELGADO-DAMAS Variation of palaeostress patterns along the Oriente transform wrench corridor, Cuba: significance for Neogene–Quaternary tectonics of the Caribbean realm, *Tectonophysics* **396**, pp. 161–180, 2005.
222. ROJAHN, C.; KING, S.A.; SCHOLL; R.E.; KIREMIDJIAN, A.S.; REAVELEY, L.D.; WILSON, R.R. Earthquake damage and loss estimation methodology and data for Salt Lake County, Utah (ATC-36). *Earthquake Spectra*, **13**, No. 4, pp 623-662, 1997
223. ROSENCRANTZ, E., MANN, P. SeaMARC II mapping of transform faults in the Cayman trough, Caribbean Sea, *Geology*, **19**, pp. 690 – 693, 1991.
224. RUBIO, M. 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, 1985.
225. RUIZ, J.; PICO, R.; ALVAREZ, L.; CHUY, T. 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, 1992.
226. RUIZ, J.; PICO, R.; LÓPEZ, R.; ALAMINOS, C.; LAZO, M.; BAGGIANO, M.; BARRETO, E.; SANTANA, A.; ALVAREZ, L.; CHUY, T. 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, México, LIMUSA*, pp. 561-586, 1992
227. RUIZ, J.; PICO, R.; ALAMINOS, C.; LAZO, M.; BAGGIANO, M.; BARRETO, E.; SANTANA, A.; ALVAREZ, L.; CHUY, T. Prognosis y sus Aplicaciones a las Geociencias. *Revista Ciencias Matemáticas*. **14**, No 2-3. pp. 124-144, 1993.
228. RUSSO, R. M. y VILLASEÑOR A. The 1946 Hispaniola earthquakes and the tectonics of the North America-Caribbean plate boundary zone, northeastern Hispaniola. *J. Geophys. Res.*, **100**, pp. 6265-6280, 1995.
229. SADIGH, K., CHANG, C.Y., EGAN, J.A., MAKDISI, F., YOUNGS, R.R. Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data. *Seismol. Res. Lett.* **68**, pp. 180–189, 1997.
230. SALTERAIN, P. *Ligera reseña de los temblores de tierra ocurridos en la isla de Cuba*.

- Anales de la Real Academia de Ciencias Médicas, Físicas y Naturales de la Habana, Tomo XXI, La Habana, 1883.
231. SERGISAI Group SEismic Risk evaluation through integrated use of Geographical Information Systems and Artificial Intelligence techniques: Final Report of the SERGISAI Project. European Commission Directorate General XII for Science, Research and Development. Environment and Climate 1994-1998- Climatology and Natural Hazard. Contract number ENV4-CT96-0276, March, 1996 – February, 1998. <http://ade.irrs.mi.cnr.it/SERGISAI/sergisai.html>, 1998.
232. SES: Simulación de escenarios sísmicos. SES 2002. Manual Técnico. Dirección General de Protección Civil, Ministerio del Interior-España, 53 pp., 2002
233. SCHERBAUM, F., BOMMER, J. J., BUNGUM, H., COTTON, F., ABRAHAMSON, N. A. Composite ground-motion models and logic trees: methodology, sensitivities and uncertainties. *Bull. Seism. Soc. Am.* **95**, pp. 1775-1593, 2005.
234. SCHERBAUM, F., SCHMEDES, J. COTTON, F. On the conversion of source-to-site distance measures for extended earthquake source models. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **94**, 3, pp. 1053-1069, 2004.
235. SCHERER, J. Great Earthquakes in the Island of Haiti, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **2**, pp. 161-180, 1912.
236. SHEBALIN, N. V. Sobre la magnitud máxima y la intensidad máxima de los terremotos. *Izv, Akad., Nauk SSSR, Fizika Zemli*, **6**, pp. 12-20, 1971 (en ruso).
237. SHEDLOCK, K. M. Seismic hazard map of North and Central America and the Caribbean, *Annali di Geofisica* **42**, pp. 977-999, 1999.
238. SHEDLOCK, K. M., TANNER, J. G. Seismic hazard map of the western hemisphere. *Ann. Geof.* **42**, pp. 1199– 1214, 1999.
239. SHEPHERD, J. B.; TANNER, J. G., McQUEEN, C. M.; LYNCH, L. L. Seismic hazard in Latin America and the Caribbean, in *Seismic Hazard Maps for the Caribbean*, IRDC, Ottawa, vol. 5, 15 pp., 1997.
240. SINGHAL, A., KIREMIDJIAN, A. S. Method for developing motion damage relationships for reinforced concrete frames. BLUME-115, The John A. Blume Earthquake Engineering Center Stanford, California, 1995-01, 94 pp., 1995.
241. SIROTINSKAIA, S. V. *Métodos lógicos de análisis de información geológica*. Nedra. Moscú, 128 pp., 1986 (en ruso).
242. SLEJKO, D., PERUZZA, L., REBEZ, A. Seismic hazard maps of Italy, *Annali di Geofisica*,

- vol **41**, pp. 183-214, 1998:
243. SLEJKO, D. y REBEZ, A. Probabilistic seismic hazard assessment and deterministic ground shaking scenarios for Vittorio Veneto (N.E. Italy), *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* **43**, pp. 263-280, 2002.
244. STEPP, J. C. 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, 1972.
245. SYKES, L.R. y EWING, M. The seismicity of the Caribbean region. *J. Geophys. Res.* **70**, pp. 5065 – 5074, 1965.
246. TABER, S. Jamaica Earthquakes and the Bartlett Trough. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **10**, No. 2, pp. 55 – 89, 1920.
247. TABER, S. The Seismic Belt in the Greater Antilles. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **12**, No. 4, pp. 199 – 219, 1922.
248. TANNER J. G. y SHEDLOCK K. M. Seismic hazard maps of Mexico, the Caribbean, and Central and South America. *Tectonophysics* **160**, 390, pp.159–175, 2004.
249. TATE, R. F. Unbiased estimations: Function of location and scale parameters, *Ann. Math. Statist.*, **30**, pp. 331-366, 1959.
250. TATSUMI, Y., SUGIMOTO, M., SEYA, H. A seismic damage evaluation system for buildings. *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid*, **1**, pp. 515-520, 1992.
251. TECHNICAL COMMITTEE FOR EARTHQUAKE GEOTECHNICAL ENGINEERING Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards, TC4, International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1st ed., Tokyo, Japan : Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 149 pp., 1993.
252. TECHNICAL COMMITTEE FOR EARTHQUAKE GEOTECHNICAL ENGINEERING Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards (revised version), TC4, International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Japan : Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 210 pp., 1999.
253. THE CARIBBEAN DISASTER MITIGATION PROJECT Final report available at: <http://www.oas.org/CDMP/document/final/oasfinal.htm> , 1999.
254. THIBAUT, C. y VELKOV, P. Evaluation of seismic vulnerability of an urban neighbourhood in Nice. *Proceedings of the Fifth International Conference on Seismic Zonation, Nice, France, 1*, pp. 92-100, 1995.

255. TOMBLIN, J. M. y ROBSON, G. R. A Catalogue of Felt Earthquakes for Jamaica with references to others islands in the Greater Antilles, 1524 - 1971. En: Mines Geol. Division. Special Publication. No. 2, Jamaica Ministry of Mining and Natural Resources, Jamaica, pp. 243, 1977.
256. TORO, G., ABRAHAMSON, N., SCHNEIDER J. Model of strong ground motions from earthquakes in the central and eastern North America: best estimates and uncertainties, *Seism. Res. Letts.*, **68**, pp. 41-57, 1997.
257. TRIFUNAC, M. D.; BRADY, A. G. On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of ground motion records, *Bull. Seism, Soc. Am.* **65**, pp.139-162, 1975.
258. ULOMOV, V.I. Regional seismicity structures and some aspects of seismic zoning in Eurasia. En: *Proceedings of PRC/USSR workshop on Geodynamics and seismic risk assessment, Beijing, Seism.. Press*, pp. 283-301, 1993.
259. 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. Seismic hazard of Northern Eurasia. *Annali di Geofisica*, **42**, pp. 1023-1038, 1999.
260. UNITED NATIONS DISASTERS RELIEF ORGANIZATION. Natural Disasters and Vulnerability Analysis. Report of Expert Group Meeting (9-12 July), UNDRO, Geneva, 49 pp. 1979.
261. VEGA, I., ARTÍMEZ, J. A., RODRÍGUEZ, D. Valoración del riesgo sísmico de la ciudad de Bayamo. En *“Sismos perceptibles, peligro y vulnerabilidad sísmica en Cuba”*, ISBN 959-02-0243-8, Editorial Academia, la Habana, pp. 93-102, 2000.
262. VENEZIANO, D., CORNELL, C., O’HARA, T. Historical method of seismic hazard analysis, Rep. NP-3428, Electric Power Research Inst., Box 50490, Palo Alto, CA 94303, 119 pp., 1984.
263. VENEZIANO, D., PAIS, A. L. Automatic source identification based on historical seismicity. In: *8th European conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal*, 12 pp., 1986.
264. VIÑES, B. y SALTERAÍN, P. Excursión a Vuelta Abajo de Viñes y Salterain en ocasión de los fuertes temblores de tierra ocurridos en la noche del 22 al 23 de enero de 1880. Ediciones “La Voz de Cuba”, La Habana, pp. 68., 1880.

265. WALD, D. J., V. QUITORIANO, T. H. HEATON, H. KANAMORI Relations between PeakGround Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California, *Earthquake Spectra*, **15**, 3, pp. 557-564, 1999.
266. WEICHERT, D. H. Estimation of earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **70**, pp. 1337-1356, 1980.
267. WELLS, D. L., COPPERSMITH, K. J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, and surface displacements, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**, pp. 974-1002, 1994.
268. WILLIAMS, Ch. R. MASTERS, S. MORROW, G. MUIR-WOOD, R. 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, 1999.
269. WOODWARD-CLYDE CONSULTANTS Development and initial application of software for seismic exposure evaluation. Report for the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Vol. II. 46 pp., 1982.
270. WORKING GROUP ON CALIFORNIA EARTHQUAKE PROBABILITIES Probabilities of large earthquakes occurring in California on the San Andreas fault. U.S. Geol. Surv. Open-file rep. 88-398, 62 pp., 1988.
271. WORKING GROUP ON CALIFORNIA EARTHQUAKE PROBABILITIES Probabilities of large earthquakes in the San Francisco Bay region, California. U.S. Geol. Surv. Circular rep. C 1053, 51 pp., 1990.
272. WORKING GROUP ON CALIFORNIA EARTHQUAKE PROBABILITIES Seismic hazards in southern California: probable earthquakes, 1994-2024, *Bull. Seism. Soc. Am.*, v. 85, pp. 379-439, 1995.
273. WORKING GROUP ON CALIFORNIA EARTHQUAKE PROBABILITIES Earthquake probabilities in the San Francisco Bay region: 2002-2031. U.S.G.S. Open-file report. 03-214, 235 pp. + appendices, 2003.
274. XIE, Li-Li, XIAXIN, T., HUIQIANG, Z. An AI-GIS based seismic hazard assessment system for urban area, *Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, (CD-ROM) Paper No. 128*, 1996.
275. YANG, T., XIAO, L., ZHU Y. Urban local earthquake disaster risk index, *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, Paper N°*

- 1510, 2000.
276. ZHANG, P. Seismic hazard assessment in Continental Asia. *Annali di Geofisica* **36**, No 3–4., pp. 41-61, 1993.
277. ZHANG, P., YANG, Z., GUPTA, H.K., BHATIA, S.C.; SHEDLOCK, K.M. Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) in continental Asia. *Annali di Geofisica* **42**, pp. 1167 – 1190, 1999.
278. ZONNO G., CELLA F., LUZI L., MENONI S., MERONI F., OBER G., PERGALANI F., PETRINI V., TOMASONI R., CARRARA P., MUSELLA D., GARCÍA-FERNÁNDEZ M., JIMÉNEZ M.J., CANAS J.A., ALFARO A.J., BARBAT A.H., MENA U., PUJADES, L.G., SOETERS R., TERLIEN M.T.J., CHERUBINI, A., ANGELETTI P., DI BENEDETTO A., CALEFFI M., WAGNER J.J., ROSSET P. Assessing seismic risk at different geographical scales: concepts, tools and procedure. *Proc. of the XI European Conference on Earthquake Engineering, Paris (France), 6-11 September*. CD-ROM, Balkema/Rotterdam, 12 pp. 1998.

Anexo I

ANEXOS GRÁFICOS

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1- Pasos básicos al enfrentar un estudio probabilístico de peligrosidad sísmica (modificado de Reiter, 1990).

Fig. 1.2- 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 $N(\mu, \sigma)$.

Fig. 1.3- Estructura metodológica diseñada para obtener los estimados de riesgo sísmico.

Fig. 2.1- Región de estudio. 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); LAT, “Lower Antilles trench” (depresión de las Antillas Menores); CCB, “Cabo Cruz basin”(cuenca de Cabo Cruz); SDB, “Santiago deformed belt”(cinturón deformado de Santiago). Las abreviaturas corresponden a su denominación en inglés.

Fig. 2.2- Forma abreviada del árbol lógico (ambos métodos), en la tabla 2.1 se explican los códigos utilizados.

Fig. 2.3- Mapa estructural de la región del Caribe, modificado de French y Schenk (2004).

Fig. 2.4- Tectónica del límite norte de la placa del Caribe. Las velocidades de las placas fueron tomadas de DeMets et al. (2000). Los números identifican las microplacas propuestas por Mann et al. (2002): 1- microplaca de Gonave, 2- microplaca Septentrional y 3- microplaca La Española. Las abreviaturas que identifican las estructuras tienen el mismo significado que en la figura 2.1.

Fig. 2.5- Rumbos de los principales sistemas de fallas activos según Iturralde-Vinent (1996).

Fig. 2.6- Constitución geológica de Cuba según Iturralde-Vinent (1998).

Fig. 2.7- División de la isla de La Española según Scherer (1912) teniendo en cuenta la información macrosísmica - histórica y algunos elementos fisiográficos de la Isla.

Fig. 2.8- Mapa de epicentros de la región del Caribe propuesto por Taber (1922), es notable el número de terremotos en la región de Santiago de Cuba.

Fig. 2.9- 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. Las abreviaturas que identifican las estructuras tienen el mismo significado que en la figura 2.1

Fig. 2.10- Gráfico de “Steep” para dos intervalos de magnitud: a)- M3.0 y b) M6.0. Los círculos representan la distribución temporal de los eventos y los triángulos el número acumulativo de los mismos en el tiempo.

Fig. 2.11- Intervalos de completamiento del catálogo por clase de magnitud, ver en el texto las características espaciales de cada zona.

Fig. 2.12- Árbol lógico de decisión diseñado para obtener los resultados usando el método no zonificado, ver más detalles en el texto.

Fig. 2.13- Modelos propuestos para la estimación de los parámetros que determinan el régimen sísmico, (a)- Z1, (b)- Z2 y (c)- Z3.

Fig. 2.14- Valores de b obtenidos para cada modelo de sismicidad (S1 y S2) y macrozona (Z1, Z2 y Z3). Entre paréntesis se muestra el error de estimación del parámetro.

Fig. 2.15- Aceleración horizontal pico (PGA) en roca para un período de retorno de 475 años (en g), considerando el aporte de la incertidumbre aleatoria (desviación estándar de las leyes de atenuación, sd_T): a) modelos S1, Z1, A1; b) S2, Z1, A1; c) S1, Z2, A1; d) S2, Z2, A1; e) S1, Z3, A1; f) S2, Z3, A1; g) S1, Z2, A2; h) S2, Z1, A2; i) S1, Z2, A2; j) S2, Z2, A2; k) S1, Z3, A2; l) S2, Z3, A2.

Fig. 2.16- Aceleración horizontal pico (PGA) en suelo blando para un período de retorno de 475 años (en g), considerando el aporte de la incertidumbre aleatoria (desviación estándar de las leyes de atenuación, sd_T): a) modelos S1, Z1, A1; b) S2, Z1, A1; c) S1, Z2, A1; d) S2, Z2, A1; e) S1, Z3, A1; f) S2, Z3, A1; g) S1, Z2, A2; h) S2, Z1, A2; i) S1, Z2, A2; j) S2, Z2, A2; k) S1, Z3, A2; l) S2, Z3, A2.

Fig. 2.17- Mapa agregado de aceleración horizontal pico (PGA) en roca a partir de los resultados obtenidos con el método no zonificado, (a)- teniendo en cuenta la incertidumbre aleatoria (sd_T) y (b)- valor medio teniendo en cuenta las incertidumbres aleatoria y la epistémica ($sd_T + \sigma$)

Fig. 2.18- Árbol lógico zonificado, ver más detalles en el texto..

Fig. 2.19- Modelo de zonas sismogeneradoras: ZONA-A [modificado de Chuy y Alvarez (1995)].

Fig. 2.20- Modelo de zonas sismogeneradoras: ZONA-B [modificado de García et al. (2003)].

Fig. 2.21- Modelo de zonas sismogeneradoras: ZONA-C [García et al. (2006)].

Fig. 2.22- 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).

Fig. 2.23- 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, el valor del parámetro b y la incertidumbre de su determinación.

Fig. 2.24- 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.

Fig. 2.25- Magnitudes máximas por zona sismogeneradora para el modelo ZONA-B: M_{max_max} y M_{max_min} : límite máximo y mínimo de la categorización sismotectónica propuesta por Cotilla et al. (1996); M_{max_05L} y M_{max_03L} : magnitudes obtenidas usando la fórmula (1.17), M_{max_obs} : magnitud máxima observada y M_{max_WC} : magnitud máxima obtenida por otros autores utilizando las relaciones de Wells y Coppersmith (1994).

Fig. 2.26- Magnitudes máximas por zona sismogeneradora (ZONA-B).

Fig. 2.27- Comportamiento de las relaciones de atenuación utilizadas, para dos clases de magnitud: (a) $M=5.0$ y (b) $M=7.5$. Trazo continuo Ambraseys et al. (1996), trazo discontinuo Dahle et al. (1995).

Fig. 2.28- Valores de aceleración pico del terreno (PGA) obtenidos en cada una de las 36 ramas del árbol lógico en Santiago de Cuba (a) y Ciudad de la Habana (b) para un período de retorno de 475 años y referidos a roca. En cada rama se obtienen dos valores: PGA sin tener en cuenta la incertidumbre aleatoria (sd_T , círculo “vacio”) y PGA teniendo en cuenta la misma (cuadrado “vacio”). El círculo “lleno” representa el valor medio de los resultados obtenidos en cada rama sin tener en cuenta la sd_T (pga_{475}), el cuadrado “lleno” el valor medio de PGA teniendo en cuenta la sd_T (pga_{574sd} , con $sd = sd_T$), 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. En el eje X, se muestra de manera abreviada la estructura del árbol lógico.

Fig. 2.29- Curvas de peligrosidad sísmica para Ciudad de la Habana (a: roca y b: suelo blando) y Santiago de Cuba (c: roca y d: suelo blando). 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. 2.30- Aceleración pico del terreno (PGA) en roca para un período de retorno de 475 años (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. 2.31- Aceleración pico del terreno (PGA) en suelo blando para un período de retorno de 475 años (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. 2.32- 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 (145 puntos).

Fig. 2.33- Curvas de período de retorno vs. aceleración pico para suelo blando 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 (145 puntos).

Fig. 2.34- Resultado de la clasificación de las muestras reducidas. (a) caso de roca y (b) caso de suelos blandos. Estas curvas corresponden a los patrones encontrados en las muestras reducidas de 145 puntos.

Fig. 2.35- 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 3.37.

Fig. 2.36- Mapa de zonación sísmica para suelo blando. Los números en la leyenda corresponden a la numeración seleccionada en orden descendente del nivel de peligro sísmico. La peligrosidad sísmica asociada a cada una de las zonas se presenta en la figura 3.38.

Fig. 2.37- Curvas que caracterizan la peligrosidad sísmica en cada una de las zonas delimitadas en el mapa de la Fig. 2.35. En cada gráfico: (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, (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. 2.38- Curvas que caracterizan la peligrosidad sísmica en cada una de las zonas delimitadas en el mapa de la Fig. 2.36. En cada gráfico: (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, (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. 3.1- Ubicación de la ciudad de Santiago de Cuba dentro de la Cuenca del mismo nombre, modificado de: Nuevo Atlas Nacional de Cuba (1985).

Fig. 3.2- Escalas de trabajo utilizadas para la estimación del riesgo: a)- toda la ciudad, b)- distrito 26 de Julio y c)- consejo popular Guillermón Moncada.

Fig. 3.3- Datos existentes en los archivos del catastro confeccionado por GEOCUBA Santiago. La información de la edificación resaltada corresponde a: VM - Vivienda Multifamiliar; 170 - número postal, /6 - número de la parcela dentro de la manzana y 2P - número de niveles de la edificación.

Fig. 3.4- Distrito 26 de Julio y límites de sus los consejos populares.

Fig. 3.5- Distrito 26 de Julio. Uso de suelos. En el gráfico se muestra el número de edificaciones en cada categoría, se usaron los mismos colores que en la leyenda.

Fig. 3.6- Consejo popular “Guillermón Moncada”. Estado técnico de las edificaciones (Nivel I). En el gráfico se muestra el número de edificaciones (y el por ciento) en cada categoría, se usaron los mismos colores que en la leyenda.

Fig. 3.7- Consejo popular “Guillermón Moncada”. Clasificación de las edificaciones según la escala MSK. En el gráfico se muestran el número de edificaciones (y el por ciento) en cada categoría, se usaron los mismos colores que en la leyenda

Fig. 3.8- Consejo popular “Guillermón Moncada”. Clasificación de las edificaciones según la escala EMS. En el gráfico se muestran el número de edificaciones (y el por ciento) en cada categoría, se usaron los mismos colores que en la leyenda.

Fig. 3.9- Mapa de efecto de sitio, modificado de García et al. (2002a).

Fig. 3.10- Mapa de respuesta de sitio para el distrito 26 de Julio.

Fig. 3.11- Mapa de respuesta de sitio para el consejo popular Guillermón Moncada.

Fig. 3.12- Porcentaje de edificaciones dentro de la manzana (con respecto al total) donde ocurren daño de grado 5, independientemente de su tipología constructiva.

Fig. 3.13- Estimación de los daños en las edificaciones del consejo popular Guillermón Moncada, usando la MPD propuesta por Oliva (2000). En el gráfico se muestran el porcentaje de edificaciones en cada categoría, se usaron los mismos colores que en la leyenda.

Fig. 3.14- Estimación de los daños en las edificaciones del consejo popular Guillermón Moncada, usando la MPD propuesta por SES (2002). En el gráfico se muestran el porcentaje de edificaciones en cada categoría, se usaron los mismos colores que en la leyenda.

Fig. 3.15- Mapa de pérdidas totales en las edificaciones del distrito 26 de Julio, expresadas en miles de pesos.

Fig. 3.16- 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.

Fig. 3.17- Mapa de pérdidas totales en las edificaciones del consejo popular Guillermón Moncada obtenidas utilizando SES (2002). En el gráfico se presenta el número de edificaciones usando los mismos intervalos y colores que muestra la leyenda.

Fig. 3.18- Mapa de pérdidas totales en las edificaciones del consejo popular Guillermón Moncada obtenidas utilizando Oliva (2000). En el gráfico se presenta el número de edificaciones usando los mismos intervalos y colores que muestra la leyenda.

Fig. 3.19- 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.

Fig. 3.20- Número de heridos leves (por manzana), obtenido a partir del uso de la MPD propuesta por Oliva (2000), dentro del distrito 26 de Julio.

Fig. 3.21- 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.

Fig. 4.1- Mapa de aceleraciones horizontales máximas referidas a un suelo tipo S2 obtenidas por Chuy y Alvarez (1995).

Fig. 4.2- Mapa de aceleraciones horizontales máximas (en % de g) referidas a un suelo tipo S2 obtenidas por Rodríguez et al. (1997).

Fig. 4.3- Mapa de aceleraciones horizontales máximas (en % de g) referidas a roca obtenidos por: a- Shedlock y Tanner (1999) para el mapa mundial de peligrosidad sísmica (GSHAP, Giardini et al., 1999) y b- Tanner y Shedlock (2004).

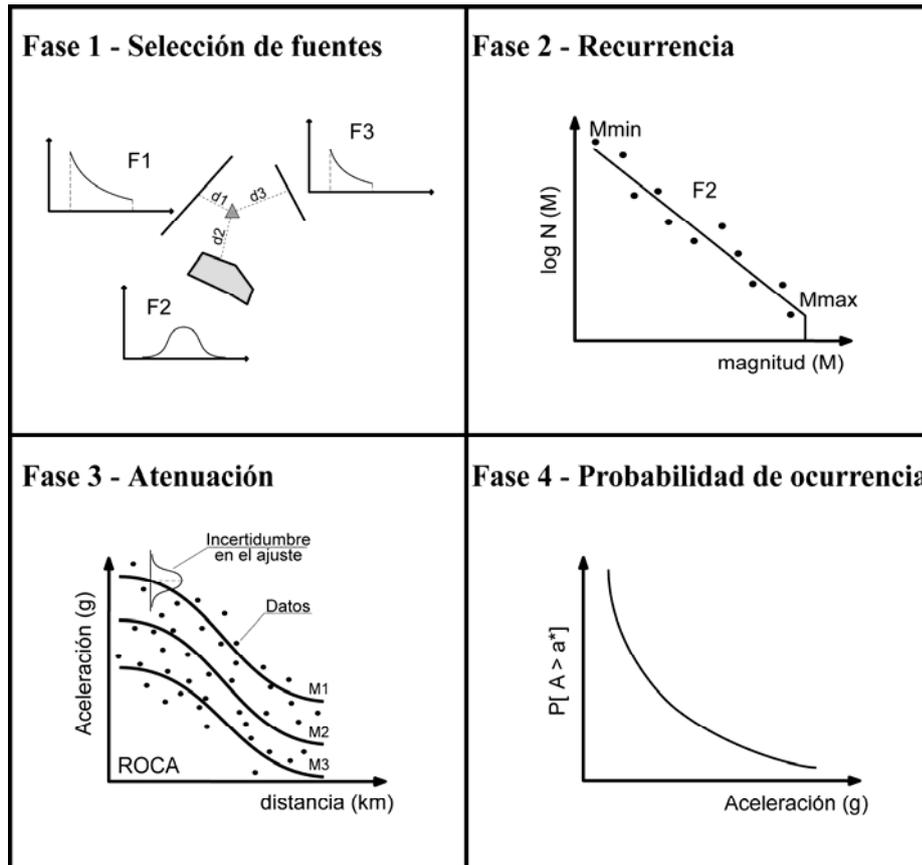


Fig. 1.1- Pasos básicos al enfrentar un estudio probabilístico de peligrosidad sísmica (modificado de Reiter, 1990)

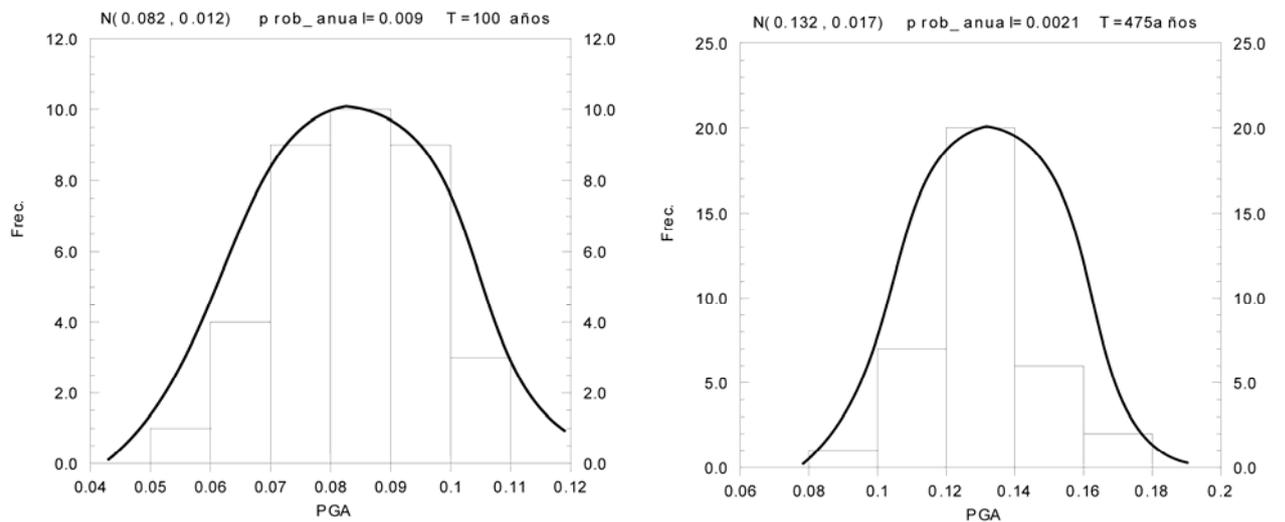


Fig. 1.2- Distribución de los resultados obtenidos en términos de aceleración pico del terreno (PGA) en roca, para una probabilidad anual de excedencia de 0.009 (a) y 0.0021 (b). La población fue ajustada a una función de distribución normal con $N(\mu, \sigma)$.

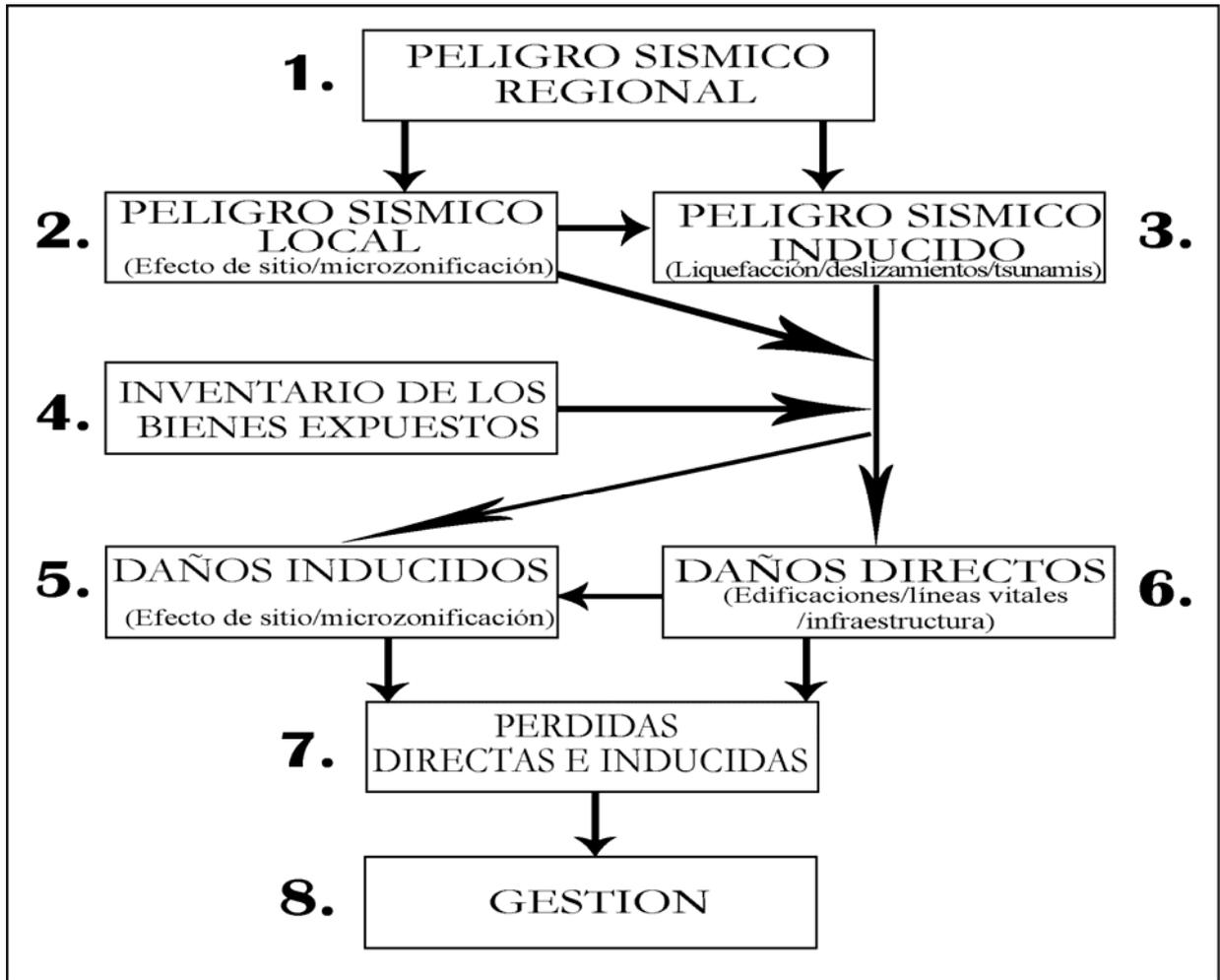


Fig. 1.3- Estructura metodológica diseñada para obtener los estimados de riesgo sísmico.

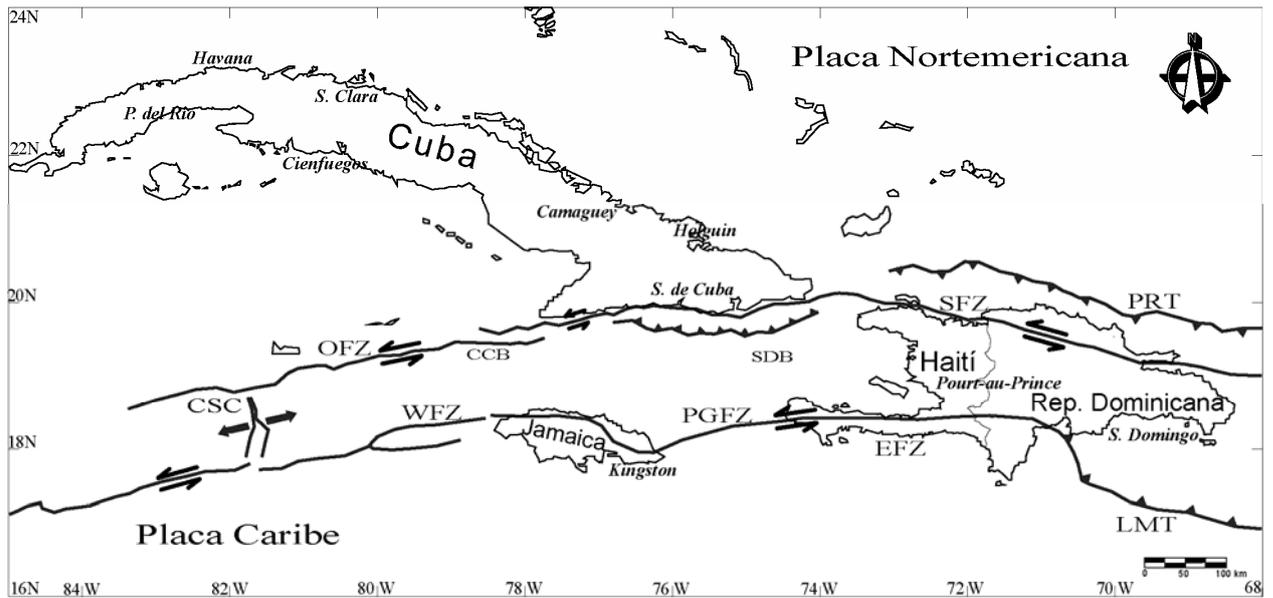


Fig. 2.1 Región de estudio. Los principales sistemas de fallas del límite de placa se indican a partir de las siguientes abreviaturas: CSC, “Cayman spreading center”(centro de generación de corteza oceánica de Caimán); WFZ, “Walton fault zone”(zona de fallas Walton); OFZ, “Oriente fault zone”(zona de 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); LAT, “Lower Antilles trench” (depresión de las Antillas Menores); CCB, “Cabo Cruz basin”(cuenca de Cabo Cruz); SDB, “Santiago deformed belt”(cinturón deformado de Santiago). Las abreviaturas corresponden a su denominación en inglés.

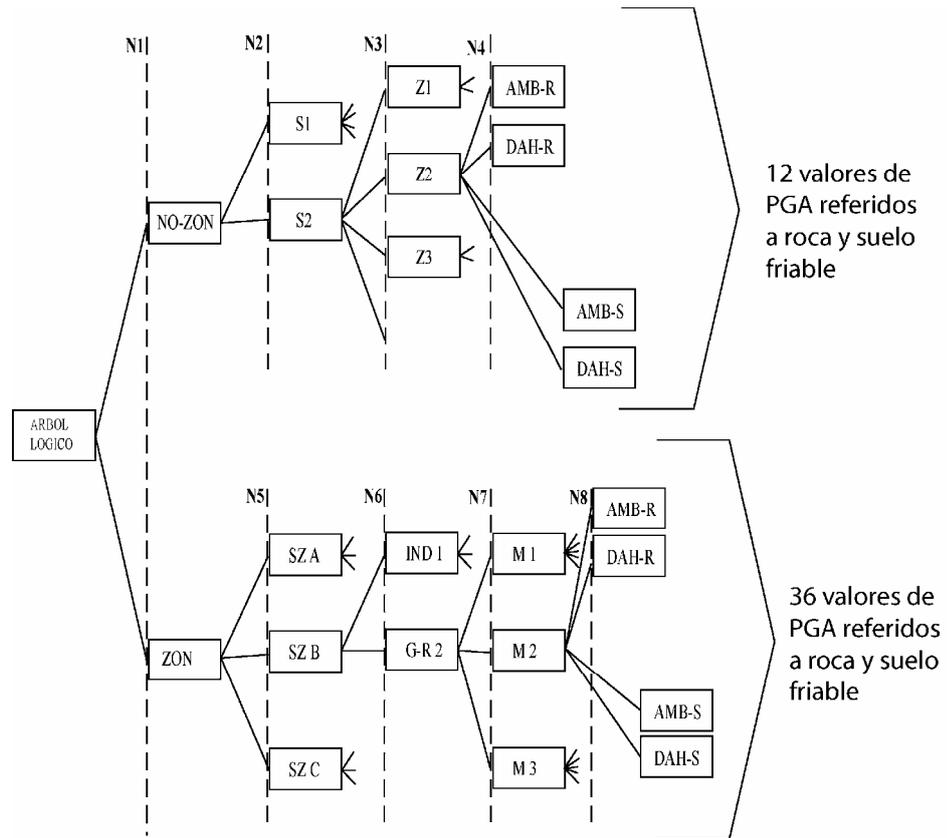


Fig. 2.2 Forma abreviada del árbol lógico (ambos métodos), en la tabla 2.1 se explican los códigos utilizados.

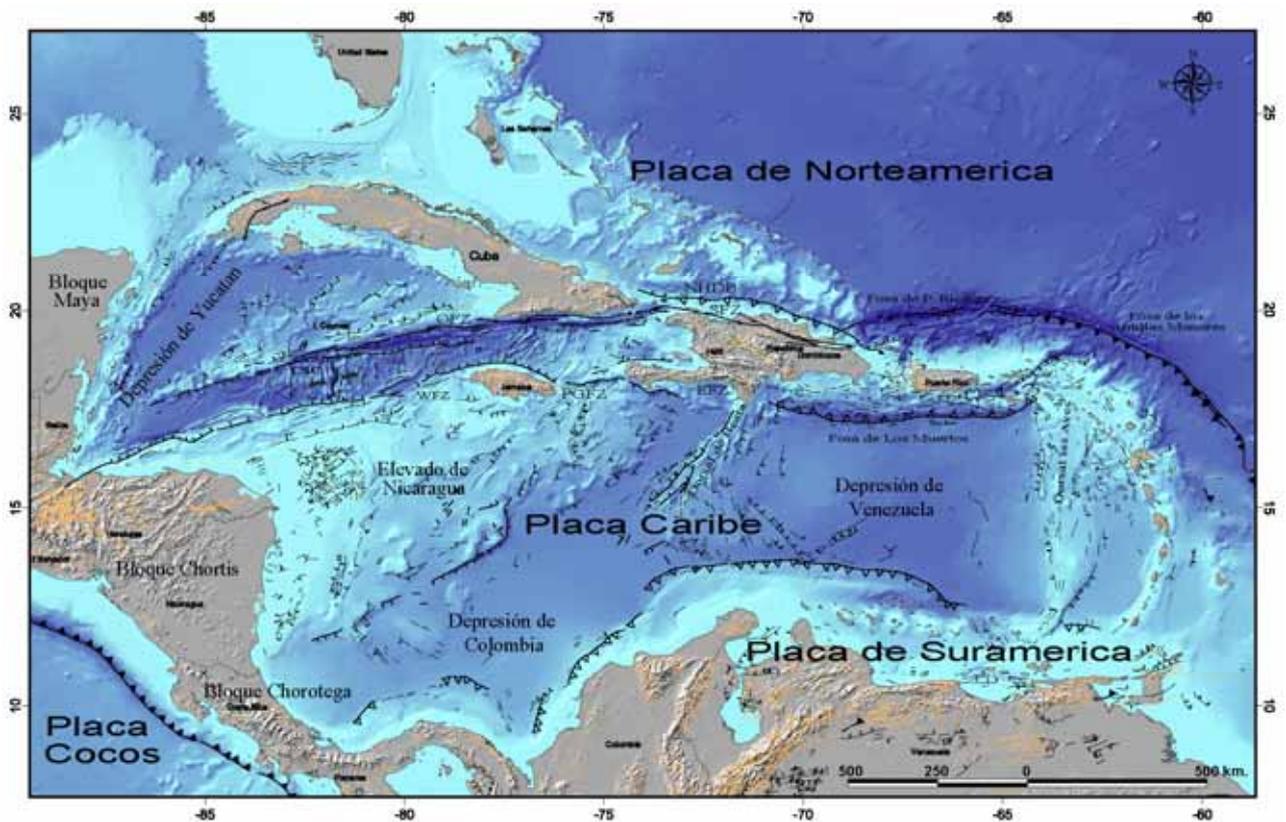


Fig. 2.3- Mapa estructural de la región del Caribe, modificado de French y Schenk (2004).

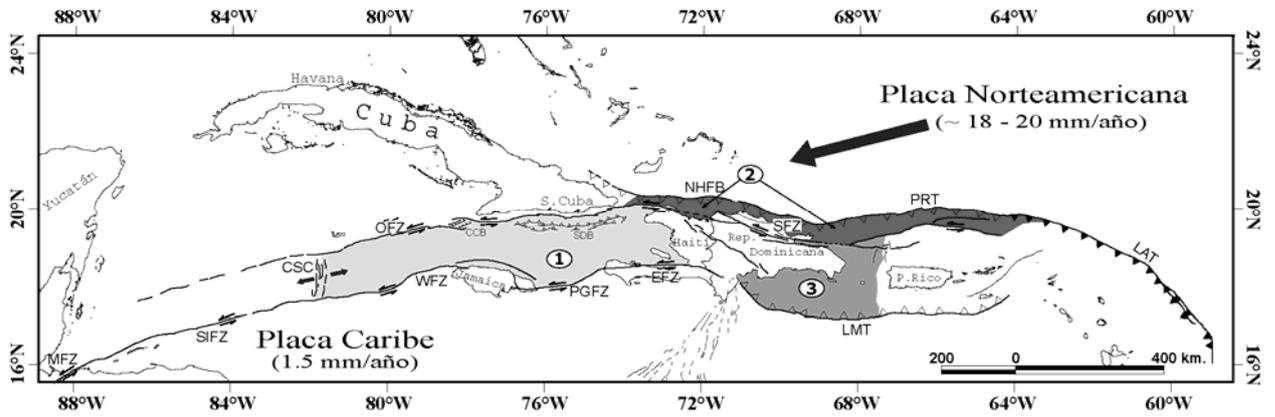


Fig. 2.4- Tectónica del limite norte de la placa del Caribe. Las velocidades de las placas fueron tomadas de DeMets et al. (2000). Los números identifican las microplacas propuestas por Mann et al. (2002): 1- microplaca de Gonave, 2- microplaca Septentrional y 3- microplaca La Española. Las abreviaturas que identifican las estructuras tienen el mismo significado que en la figura 2.1

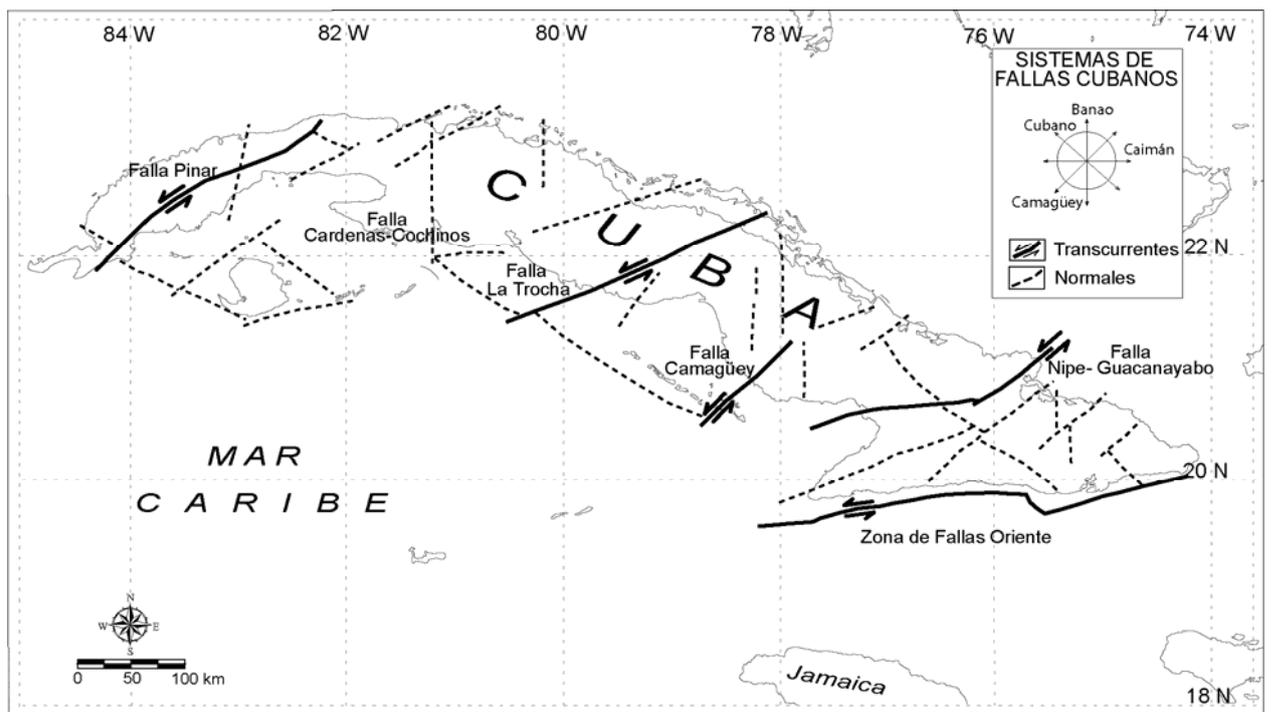


Fig. 2.5- Rumbos de los principales sistemas de fallas activos según Iturralde-Vinent (1996).

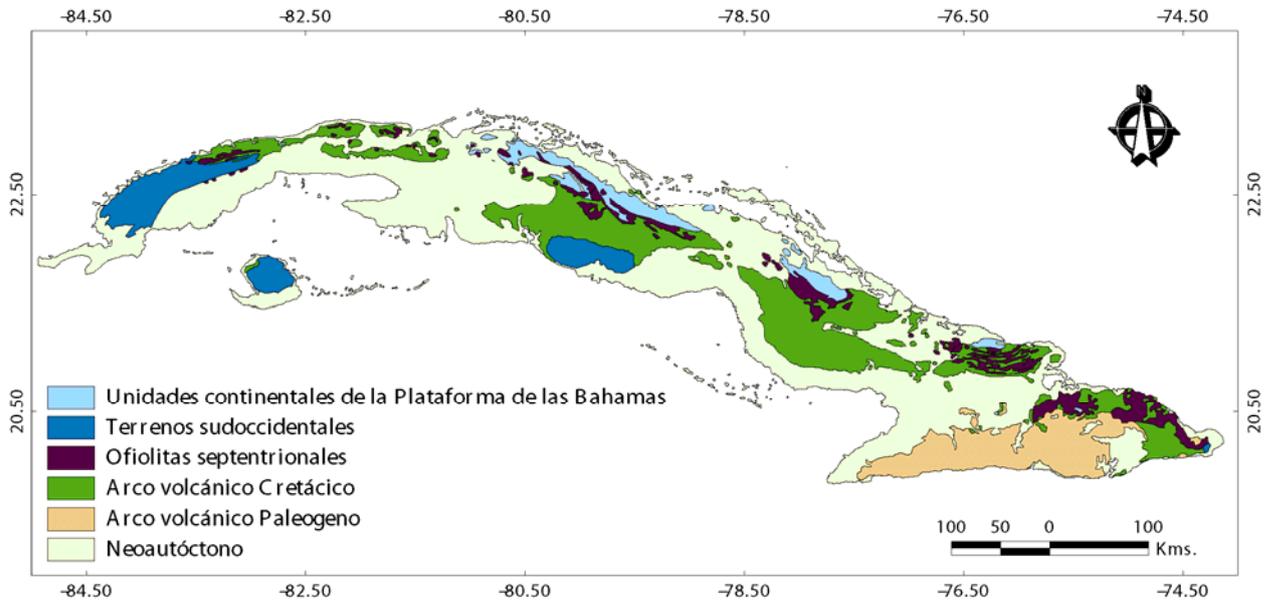


Fig. 2.6- Constitución geológica de Cuba según Iturralde-Vinent (1998).

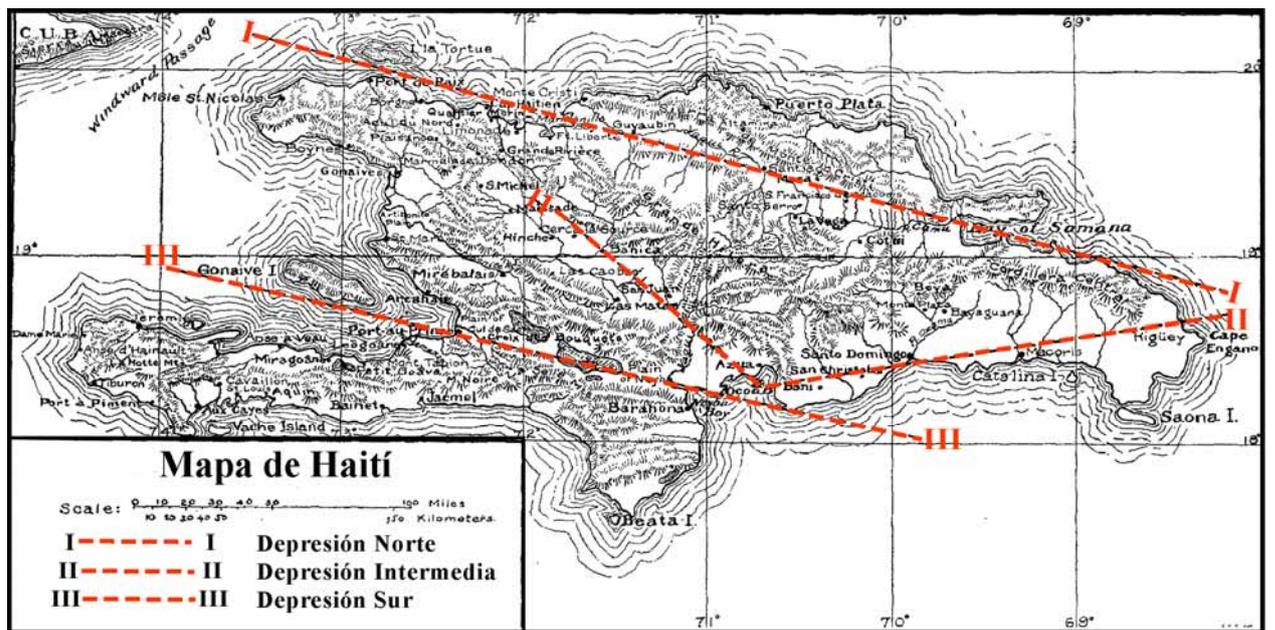


Fig. 2.7- División de la isla de La Española según Scherer (1912) teniendo en cuenta la información macrosísmica - histórica y algunos elementos fisiográficos de la Isla.

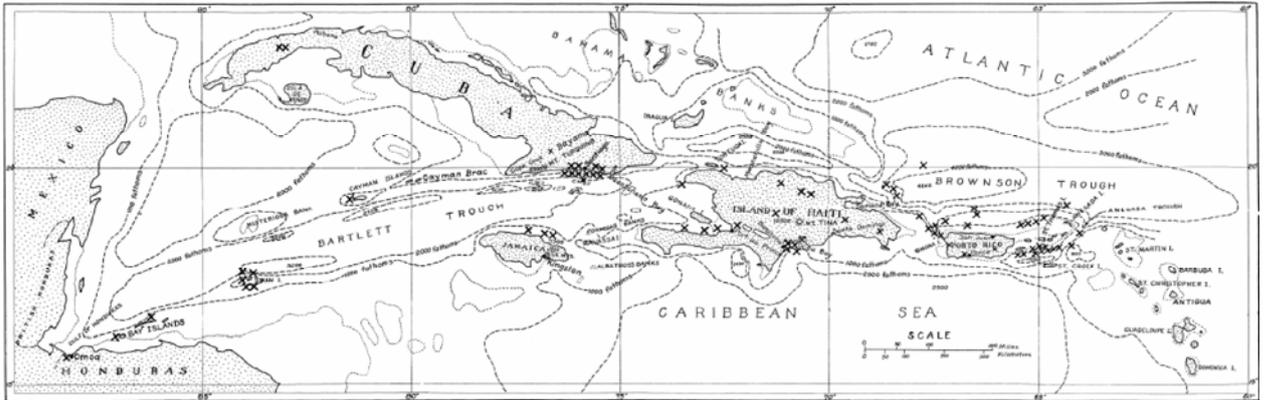


Fig. 2.8- Mapa de epicentros de la región del Caribe propuesto por Taber (1922), es notable el número de terremotos en la región de Santiago de Cuba.

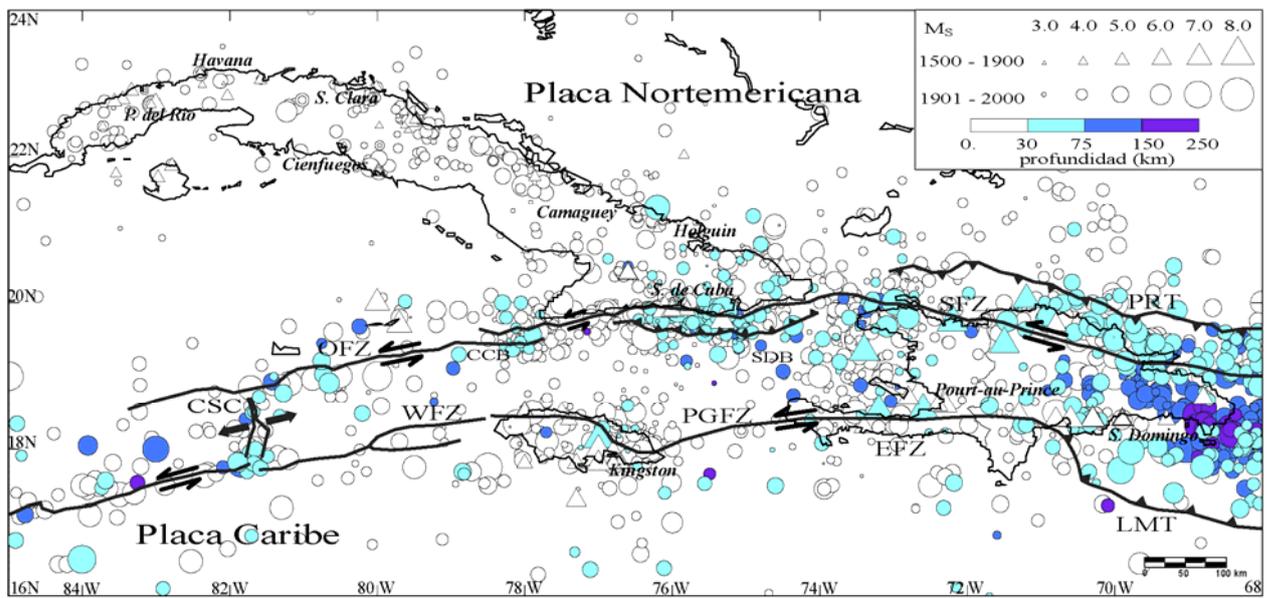


Fig. 2.9- Terremotos independientes del área de estudio (1502–2000, $M_s \geq 3$): los triángulos representan los eventos históricos (pre-1900), los círculos muestran los eventos del siglo XX. Las abreviaturas que identifican las estructuras tienen el mismo significado que en la figura 2.1

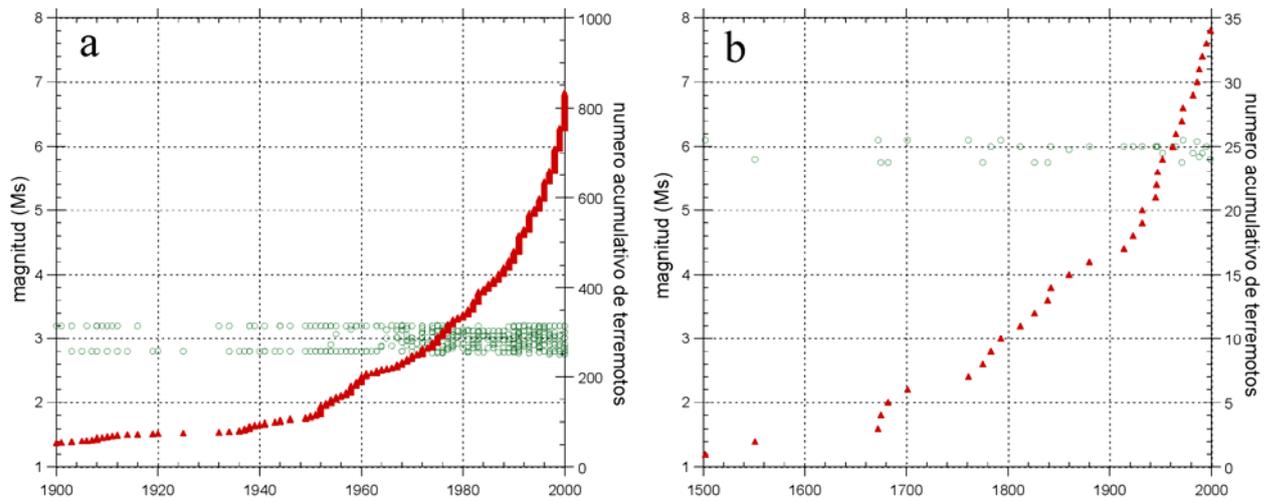


Fig. 2.10- Gráfico de “Steep” para dos intervalos de magnitud: a)- M3.0 y b) M6.0. Los círculos representan la distribución temporal de los eventos y los triángulos el número acumulativo de los mismos en el tiempo.

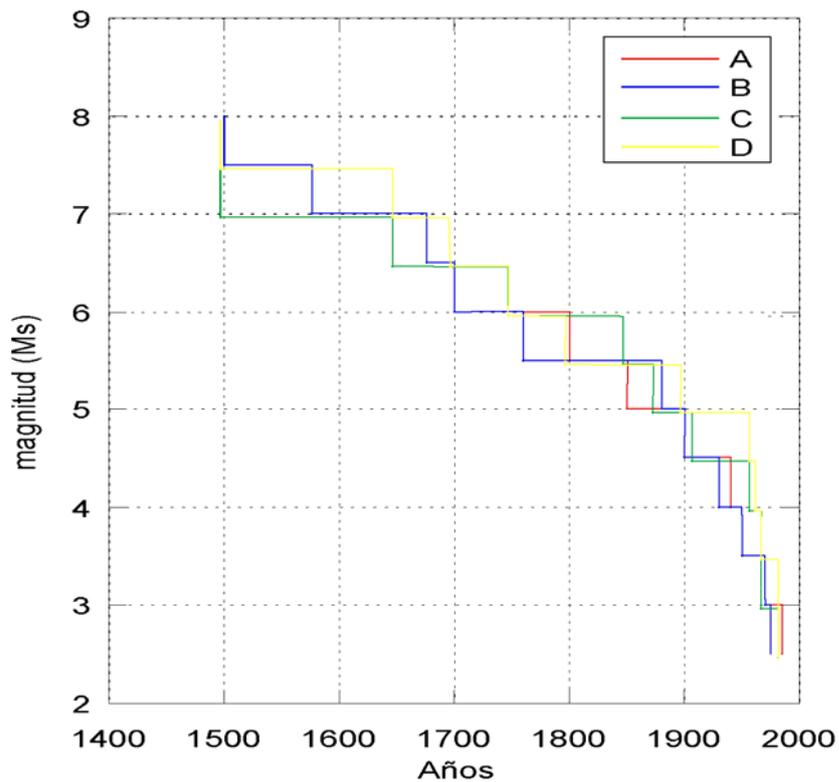


Fig. 2.11 Intervalos de completamiento del catálogo por clase de magnitud, ver en el texto las características espaciales de cada zona.

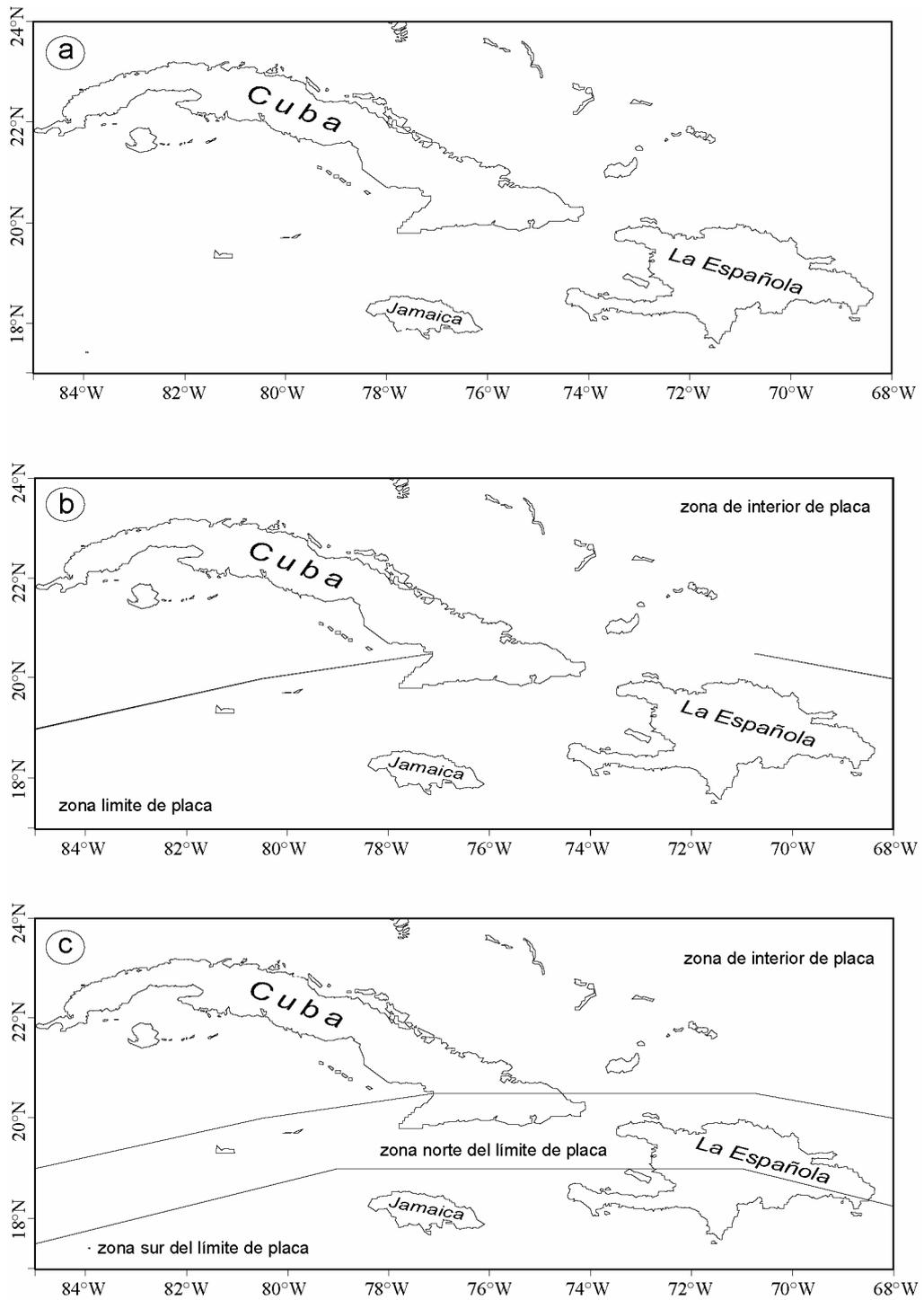


Fig. 2.13 Modelos propuestos para la estimación de los parámetros que determinan el régimen sísmico, (a)- Z1, (b)- Z2 y (c)- Z3.

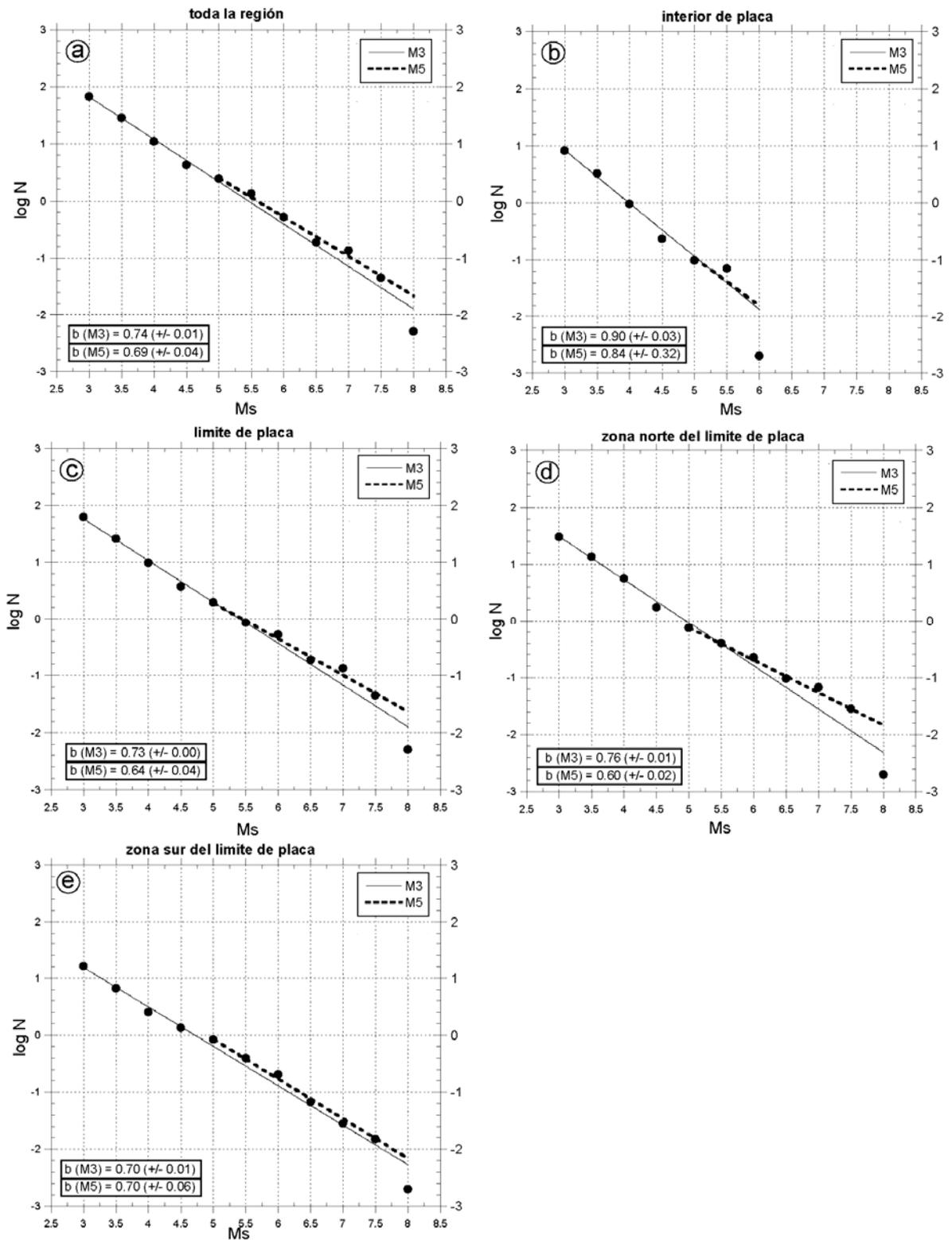


Fig. 2.14- Valores de b obtenidos para cada modelo de sismicidad (S1 y S2) y macrozona (Z1, Z2 y Z3). Entre paréntesis se muestra el error de estimación del parámetro.

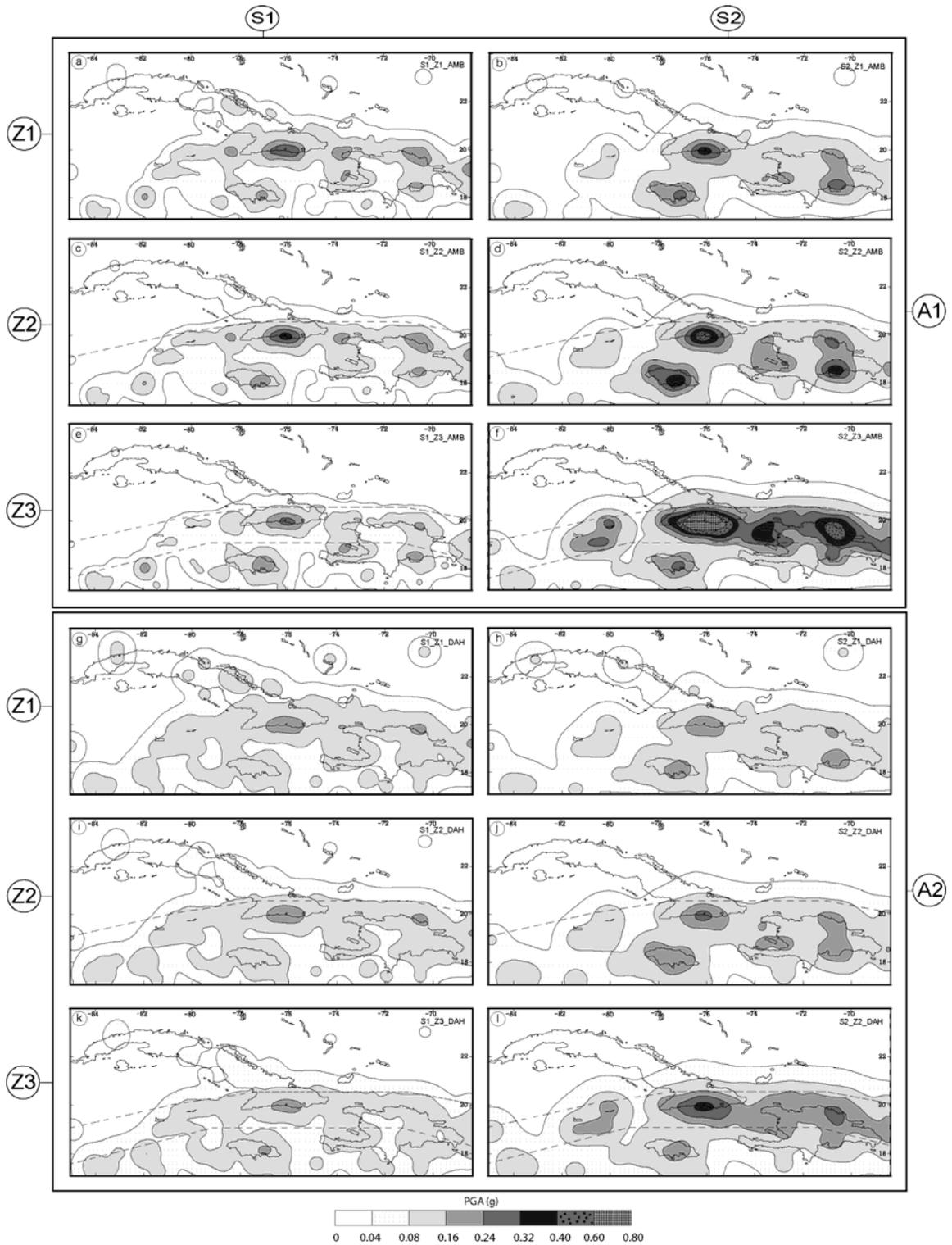


Fig. 2.15 – Aceleración horizontal pico (PGA) en roca para un período de retorno de 475 años (en g), considerando el aporte de la incertidumbre aleatoria (desviación estándar de las leyes de atenuación, sd_i): a) modelos S1, Z1, A1; b) S2, Z1, A1; c) S1, Z2, A1; d) S2, Z2, A1; e) S1, Z3, A1; f) S2, Z3, A1; g) S1, Z2, A2; h) S2, Z1, A2; i) S1, Z2, A2; j) S2, Z2, A2; k) S1, Z3, A2; l) S2, Z3, A2.

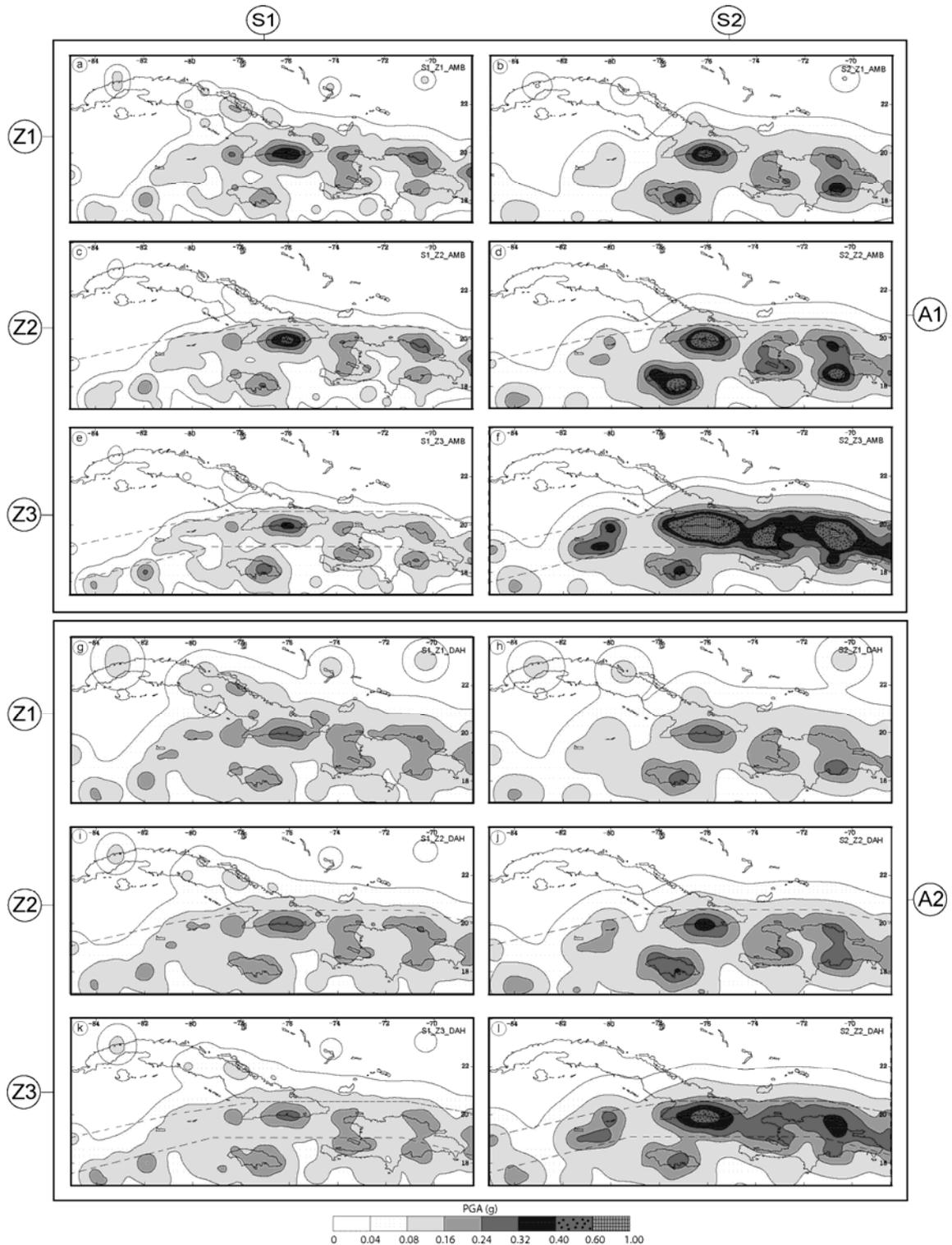


Fig. 2.16 – Aceleración horizontal pico (PGA) en suelo blando para un período de retorno de 475 años (en g), considerando el aporte de la incertidumbre aleatoria (desviación estándar de las leyes de atenuación, sd_T): a) modelos S1, Z1, A1; b) S2, Z1, A1; c) S1, Z2, A1; d) S2, Z2, A1; e) S1, Z3, A1; f) S2, Z3, A1; g) S1, Z2, A2; h) S2, Z1, A2; i) S1, Z2, A2; j) S2, Z2, A2; k) S1, Z3, A2; l) S2, Z3, A2.

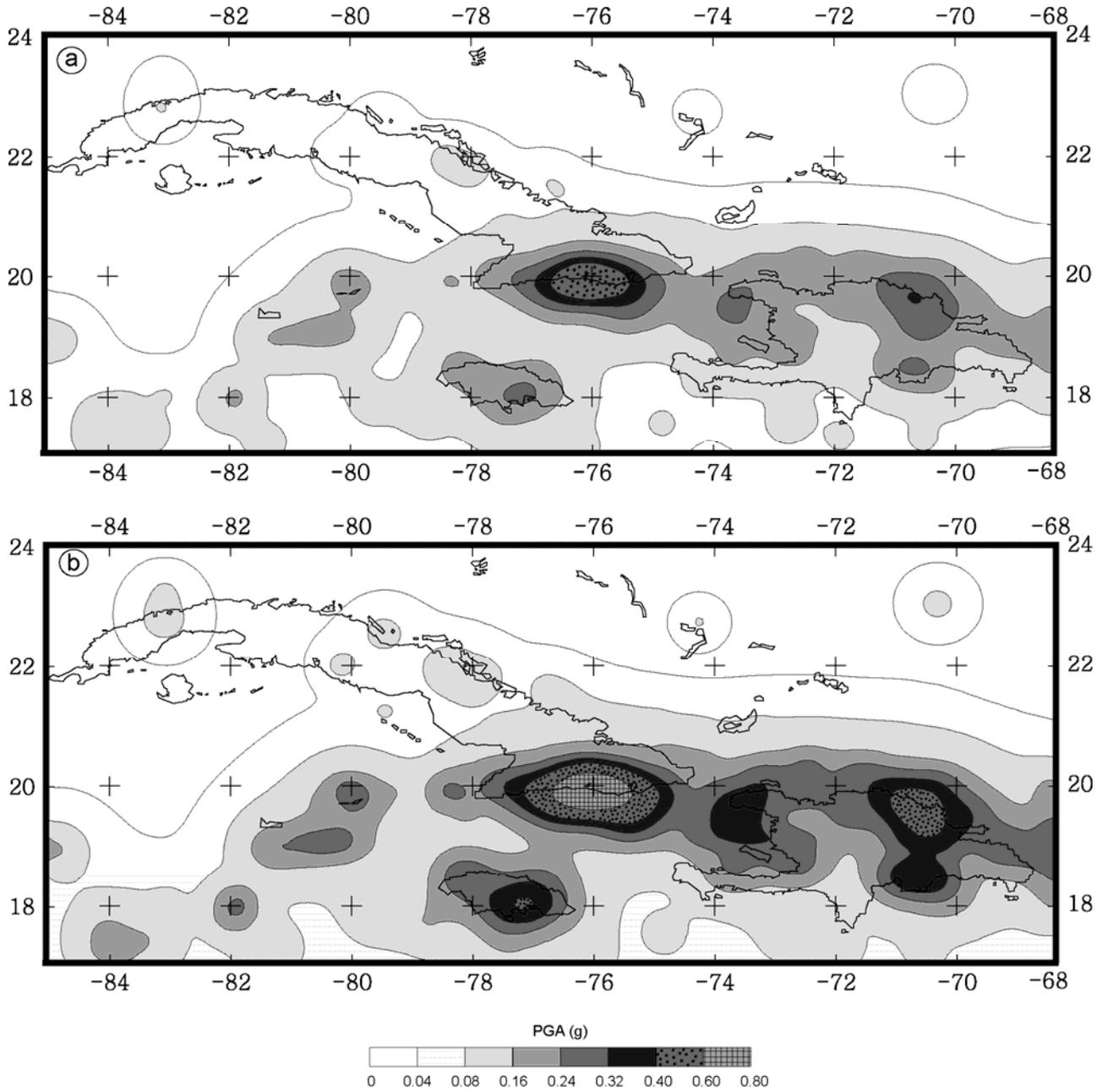


Fig. 2.17 Mapa agregado de aceleración horizontal pico (PGA) en roca a partir de los resultados obtenidos con el método no zonificado, (a)- teniendo en cuenta la incertidumbre aleatoria (sd_T) y (b)- valor medio teniendo en cuenta las incertidumbres aleatoria y la epistémica ($sd_T + \sigma$)

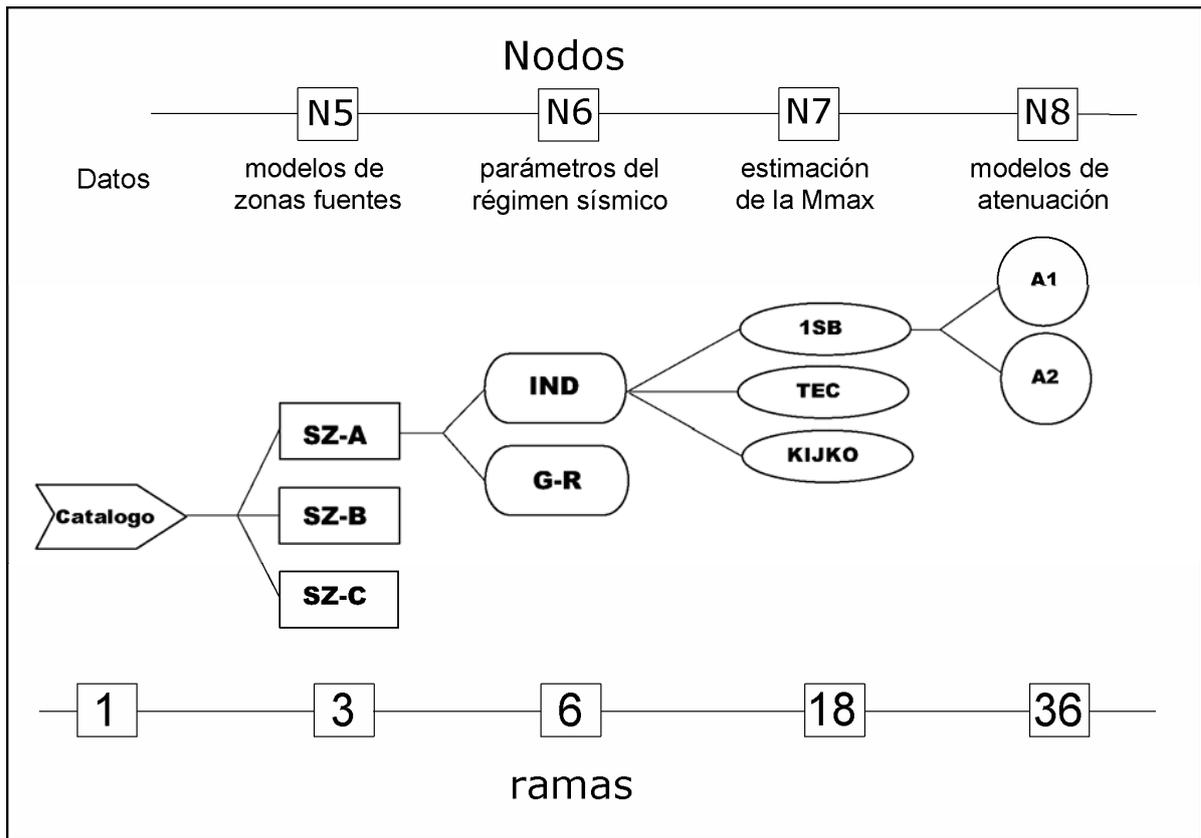


Fig. 2.18- Árbol lógico zonificado, ver más detalles en el texto.

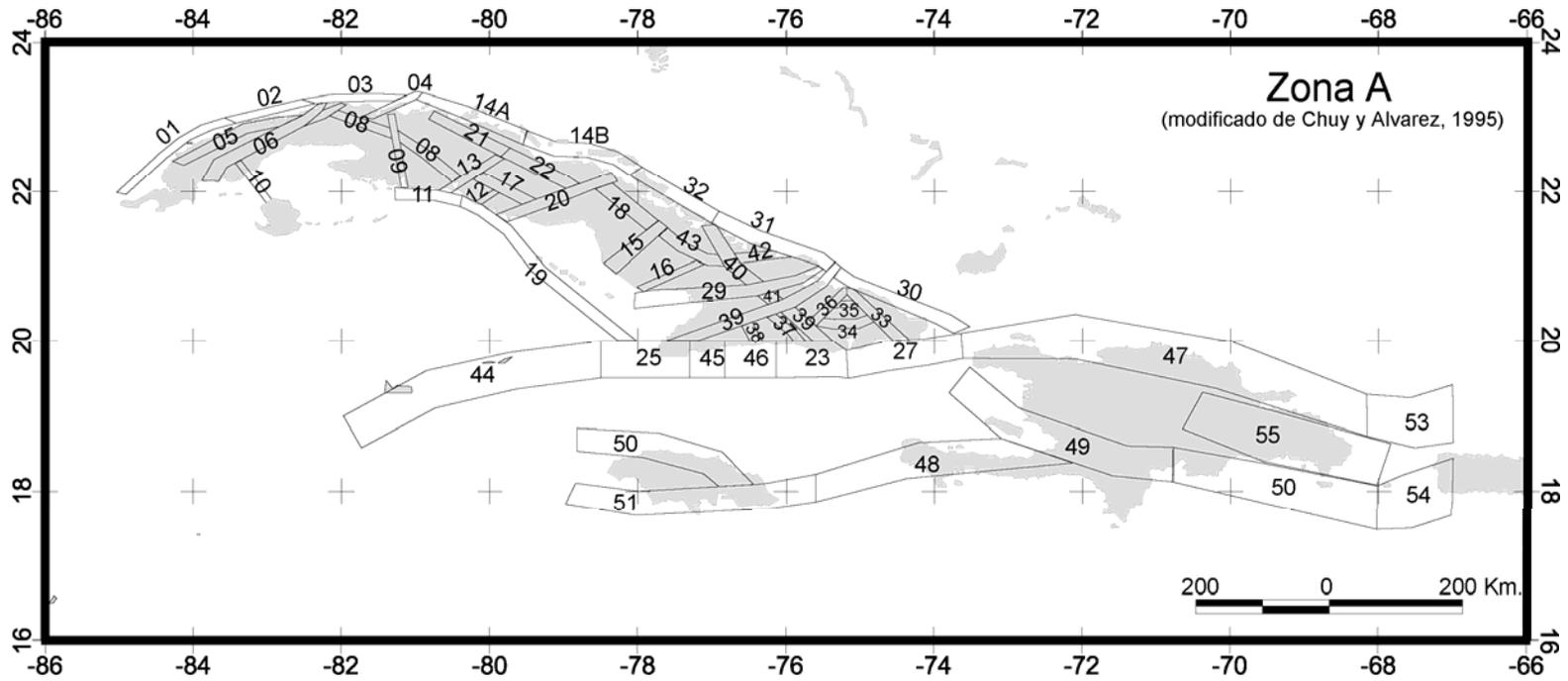
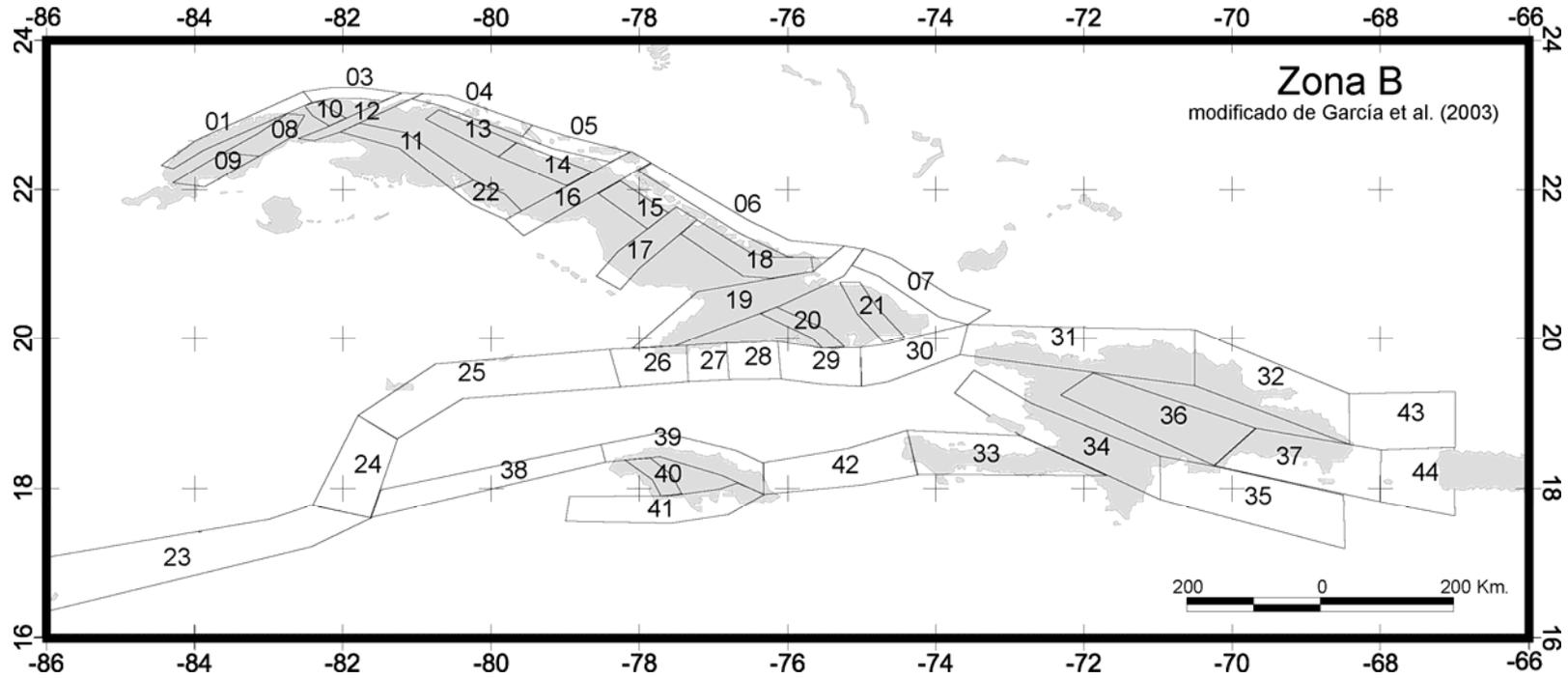


Fig. 2.19 Modelo de zonas sismogeneradoras: ZONA-A [modificado de Chuy y Alvarez (1995)].

Fig. 2.20 Modelo de zonas sismogeneradoras: ZONA-B [modificado de García et al. (2003)].



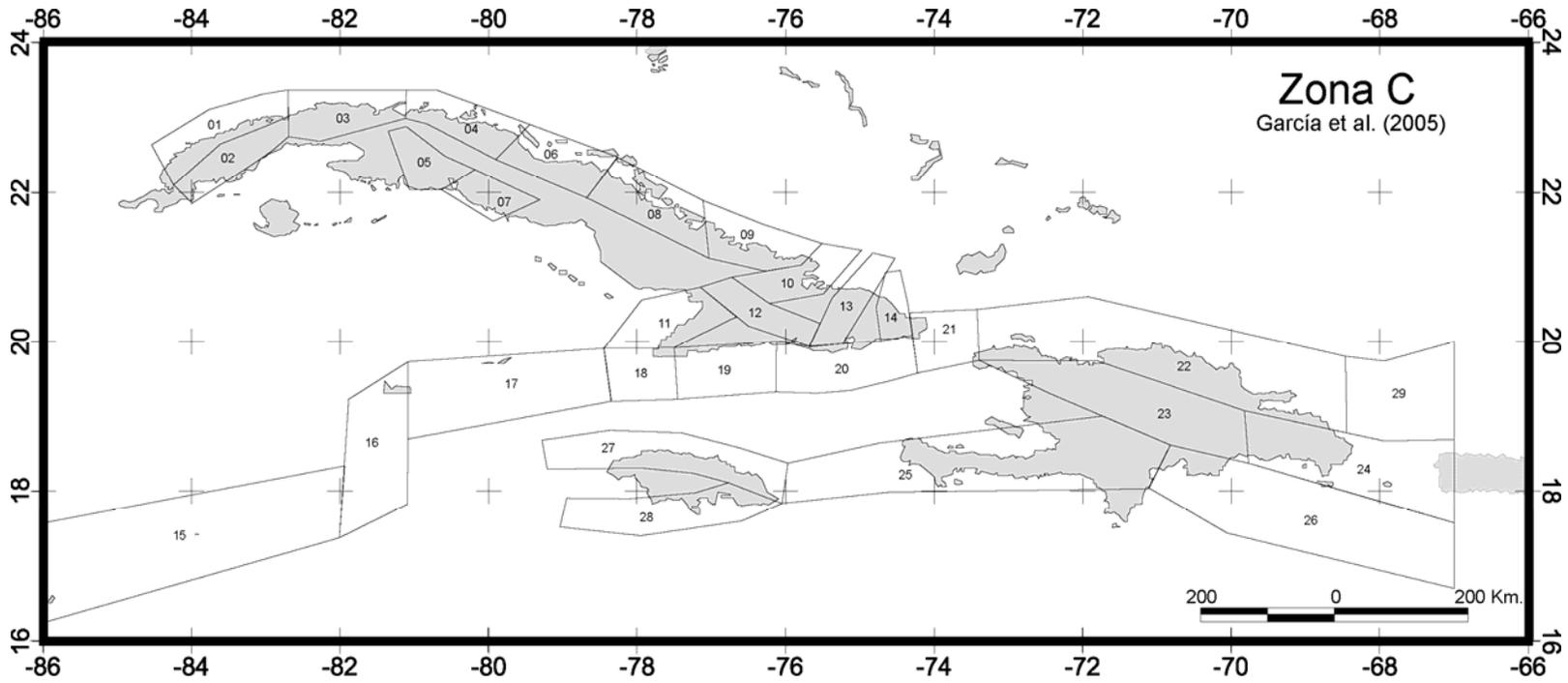


Fig. 2.21 Modelo de zonas sismogeneradoras: ZONA-C [García et al. (2006)].

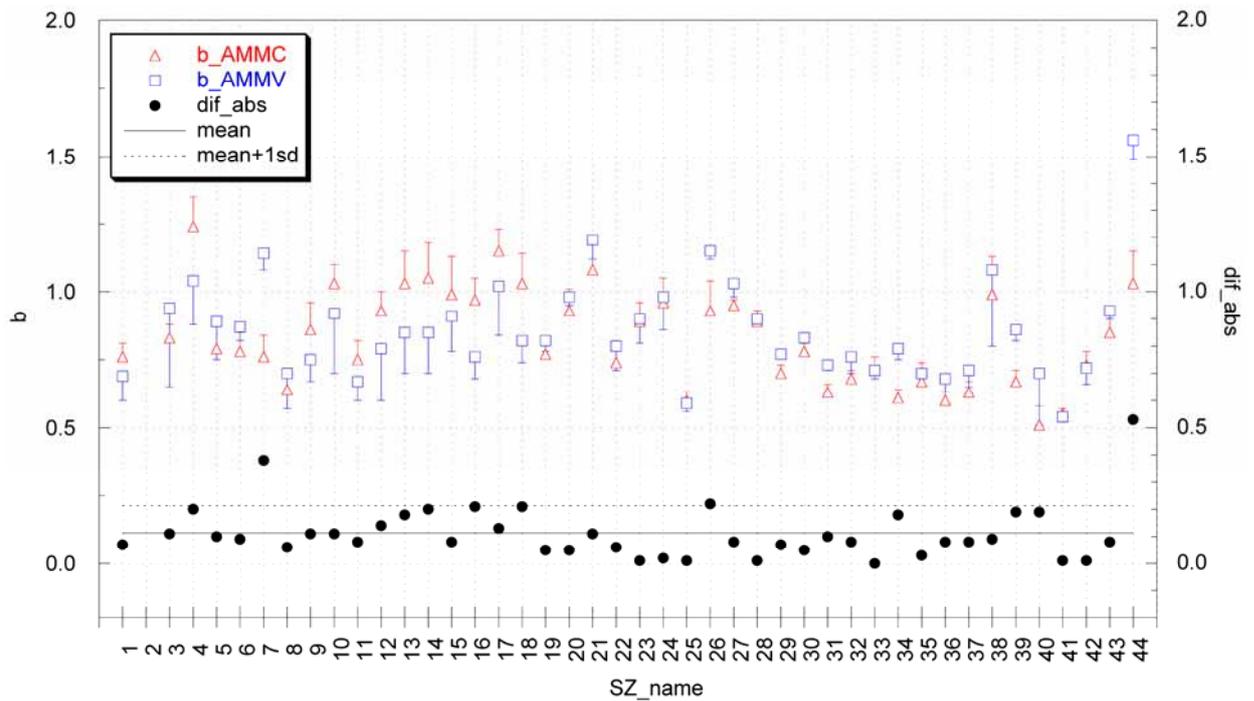


Fig. 2.22 – Valores del parámetro b del gráfico magnitud – frecuencia obtenidos para las zonas del modelo ZONA-B, utilizando para el ajuste el método: mínimos cuadrados (b_{AMMC}) y máxima verosimilitud (b_{AMMV}); las barras inferior o superior del símbolo representan la desviación estándar de la determinación 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).

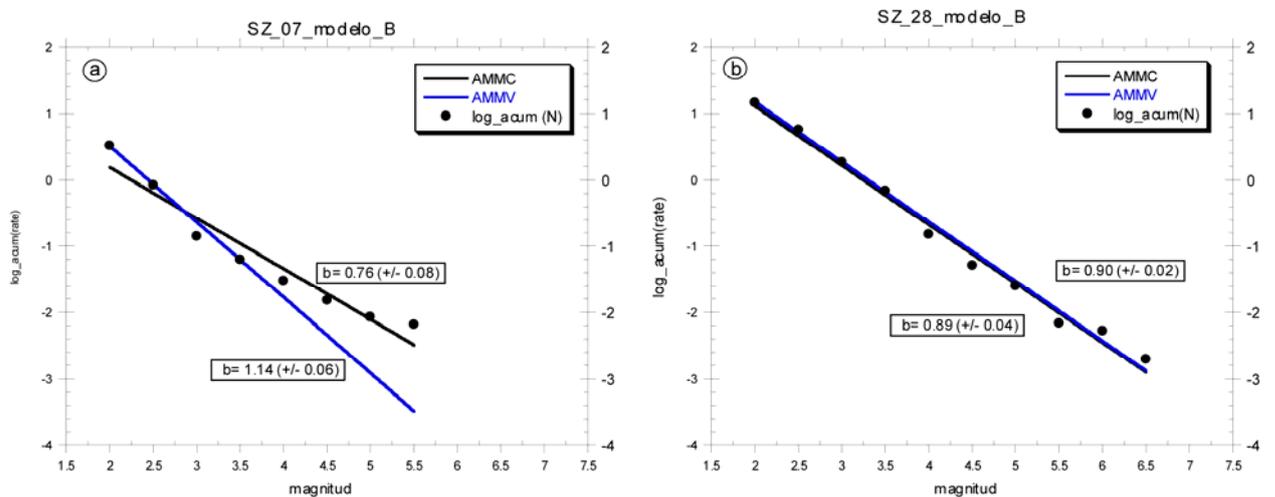


Fig. 2.23 - Gráficos magnitud – frecuencia obtenidos para las zonas 7 (a) y 28 (b) del modelo ZONA-B, utilizando dos métodos de ajustes diversos: mínimo cuadrados (AMMC) y máxima verosimilitud (AMMV). Se muestran además, las frecuencias acumulativas para cada clase de magnitud, el valor del parámetro b y la incertidumbre de su determinación.

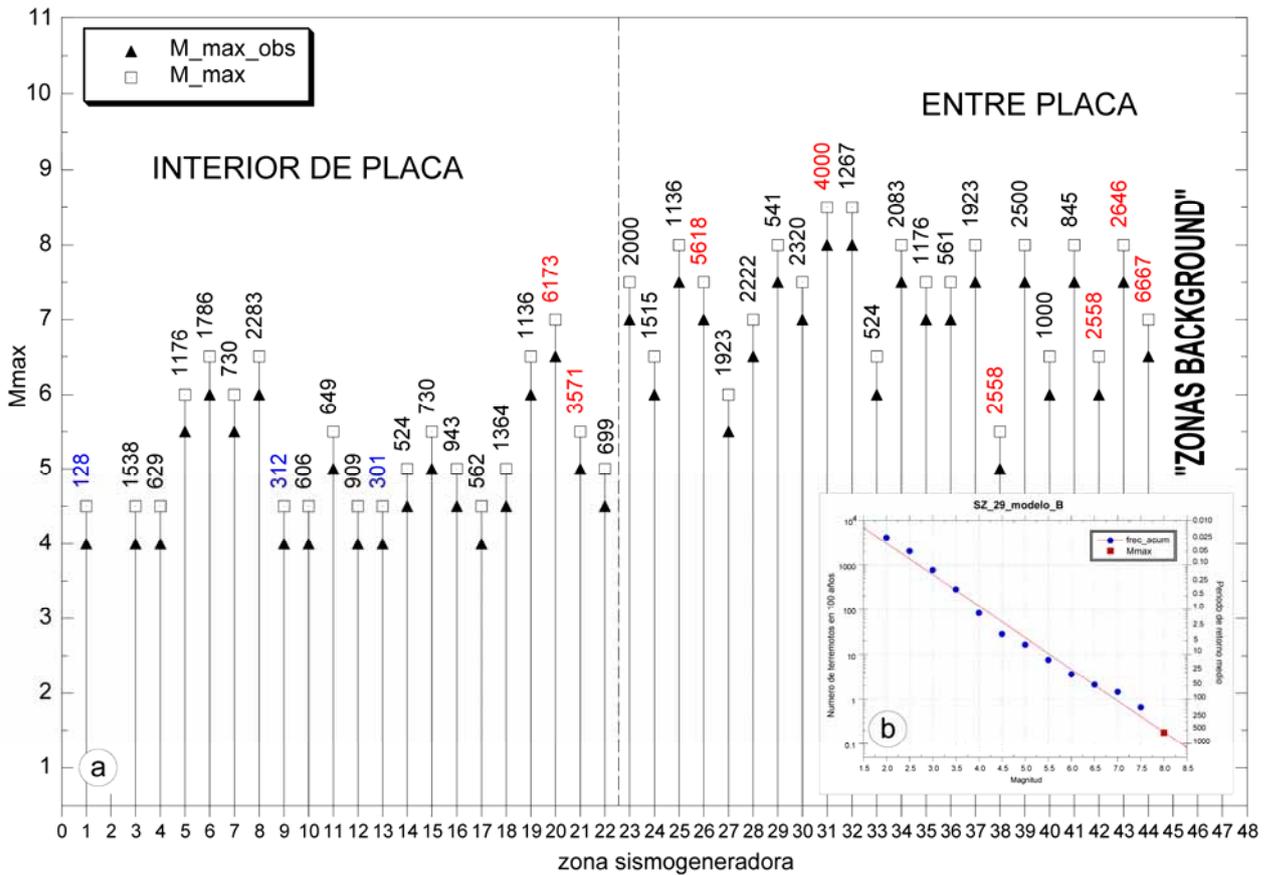


Fig. 2.24 - Resultado de la aplicación del método “One step beyond” (Slejko et al., 1998) en el modelo ZONA-B; (a) - valores de magnitud máxima obtenidas (M_{max}) por zona, valores de magnitud máxima observada por zona, (b) - ajuste de la zona 29.

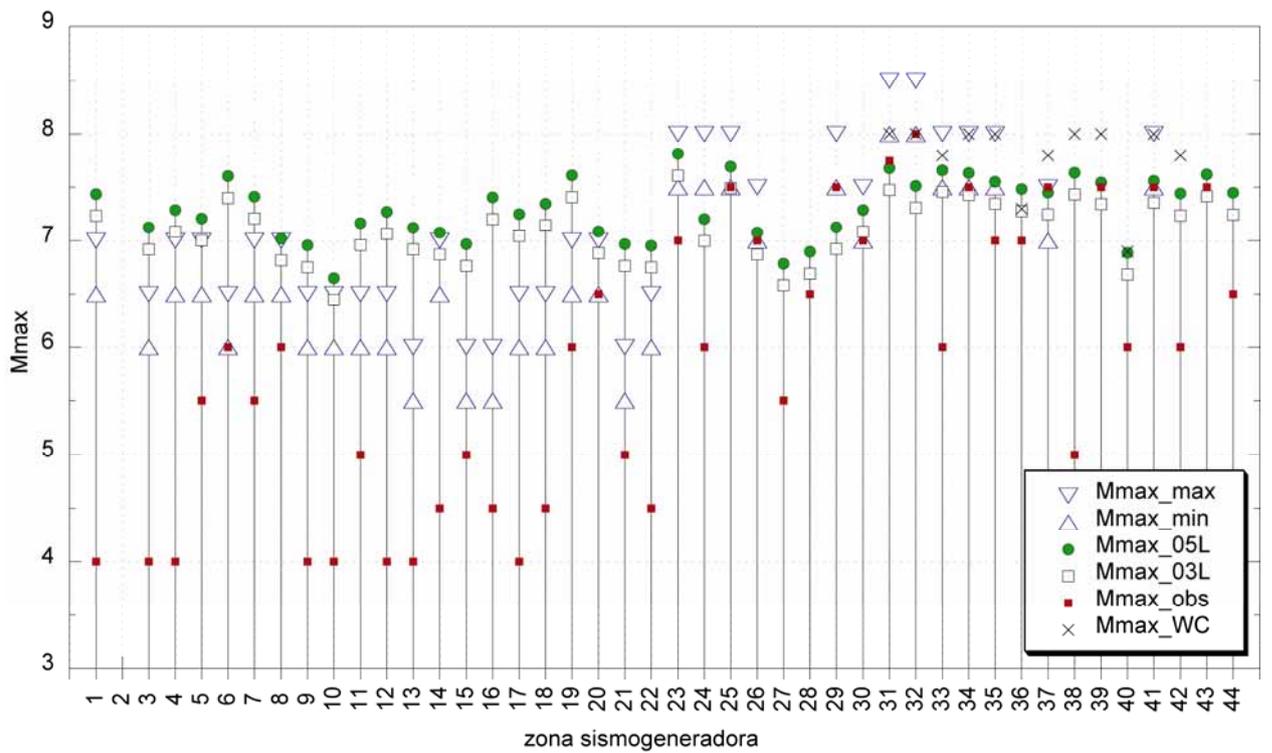


Fig. 2.25- Magnitudes máximas por zona sismogeneradora para el modelo ZONA-B: Mmax_max y Mmax_min: límite máximo y mínimo de la categorización sismotectónica propuesta por Cotilla et al. (1996); Mmax_05L y Mmax_03L: magnitudes obtenidas usando la fórmula (1.17), Mmax_obs: magnitud máxima observada y Mmax_WC: magnitud máxima obtenida por otros autores utilizando las relaciones de Wells y Coppersmith (1994).

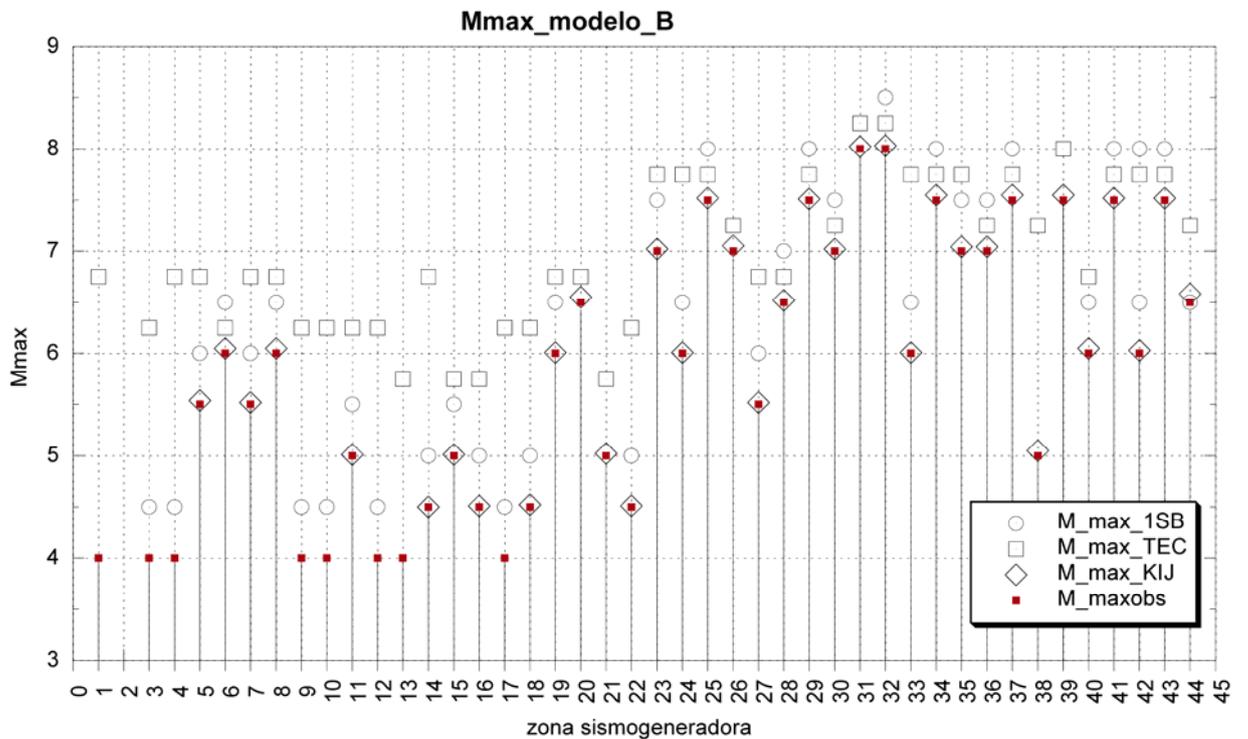


Fig. 2.26- Magnitudes máximas por zona sismogeneradora (ZONA-B).

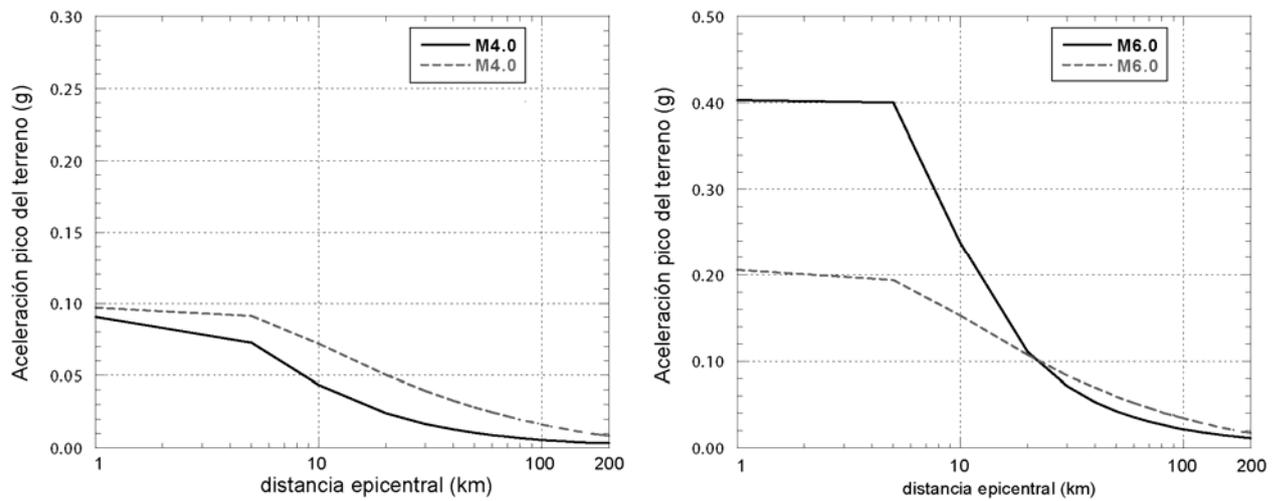


Fig. 2.27- Comportamiento de las relaciones de atenuación utilizadas, para dos clases de magnitud: (a) $M=5.0$ y (b) $M=7.5$. Trazo continuo Ambraseys et al. (1996), trazo discontinuo Dahle et al. (1995).

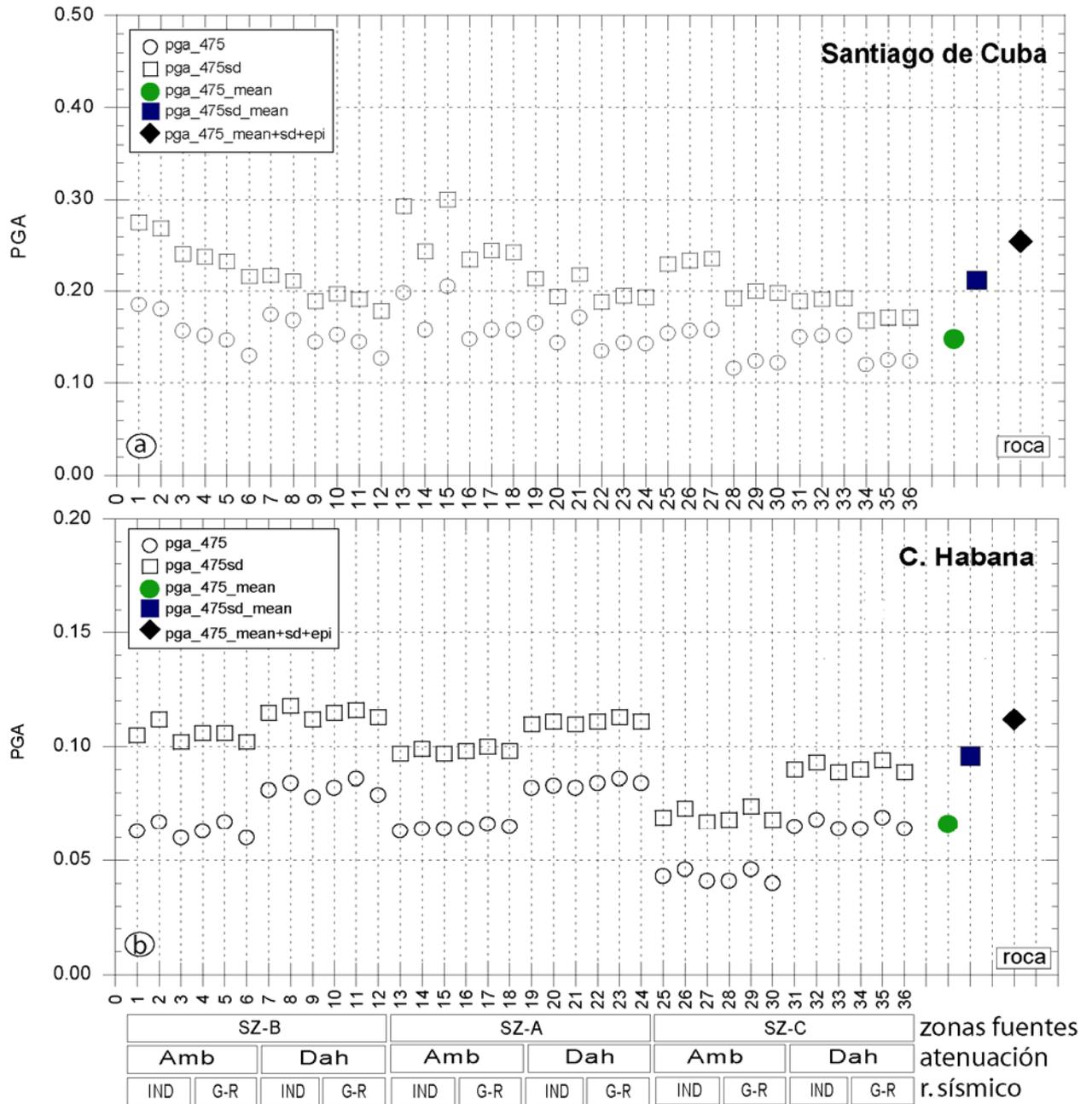


Fig. 2.28 –Valores de aceleración pico del terreno (PGA) obtenidos en cada una de las 36 ramas del árbol lógico en Santiago de Cuba (a) y Ciudad de la Habana (b) para un período de retorno de 475 años y referidos a roca. En cada rama se obtienen dos valores: PGA sin tener en cuenta la incertidumbre aleatoria (sd_T , círculo “vacío”) y PGA teniendo en cuenta la misma (cuadrado “vacío”). El círculo “lleno” representa el valor medio de los resultados obtenidos en cada rama sin tener en cuenta la sd_T (pga_475), el cuadrado “lleno” el valor medio de PGA teniendo en cuenta la sd_T (pga_574sd, con $sd = sd_T$), 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. En el eje X, se muestra de manera abreviada la estructura del árbol lógico.

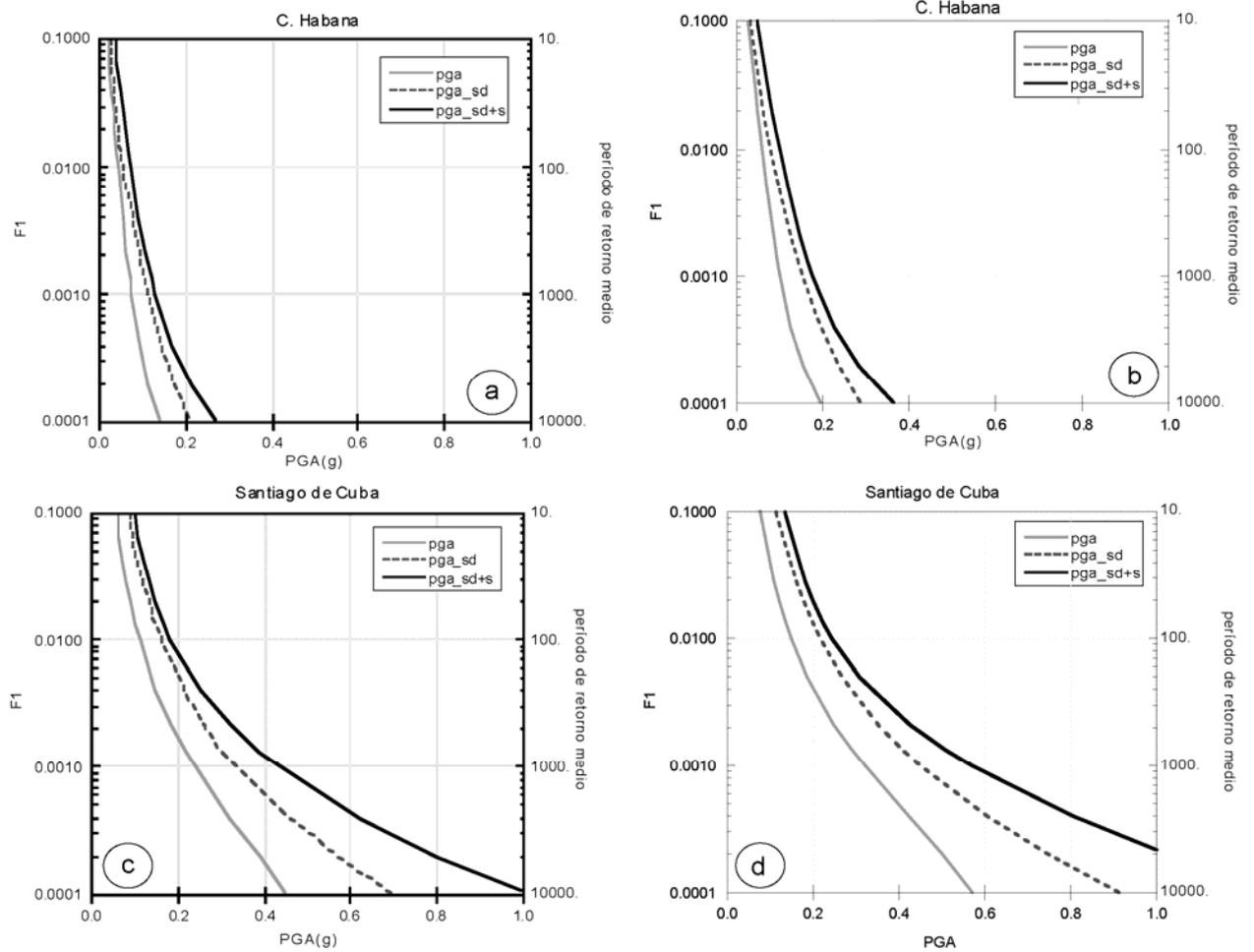


Fig. 2.29- Curvas de peligrosidad sísmica para Ciudad de la Habana (a: roca y b: suelo blando) y Santiago de Cuba (c: roca y d: suelo blando). El parámetro que caracteriza las sacudidas sísmicas es la aceleración pico del terreno (PGA) en g (aceleración de la gravedad); F1 representa la probabilidad 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 $s = \sigma$).

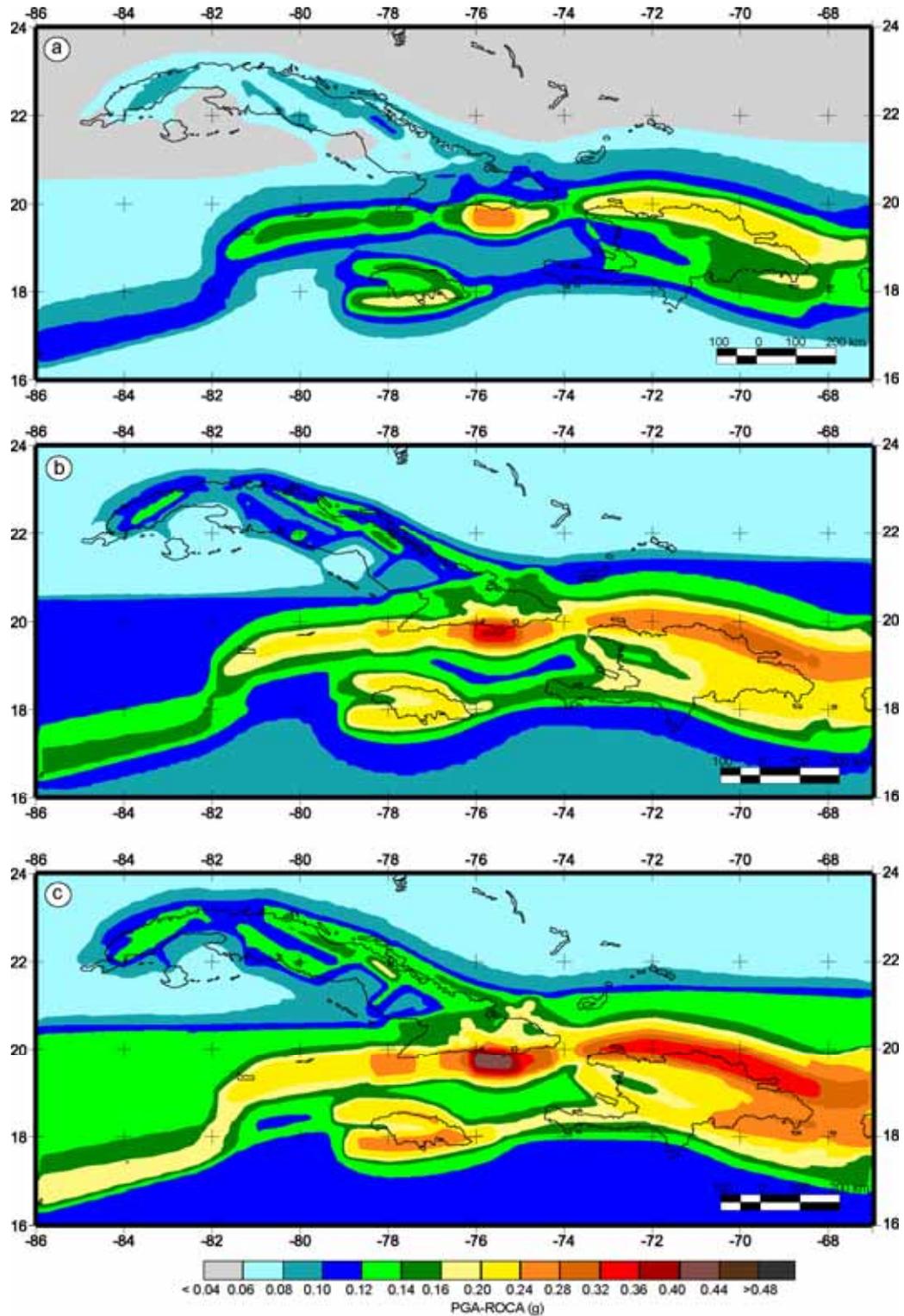


Fig. 2.30- Aceleración pico del terreno (PGA) en roca para un período de retorno de 475 años (en unidades de g: aceleración de la gravedad): (a) - valor medio de PGA, (b) - valor medio teniendo en cuenta la incertidumbre aleatoria (sd_T) y (c) - valor medio teniendo en cuenta las incertidumbres aleatoria y la epistémica ($sd_T + \sigma$).

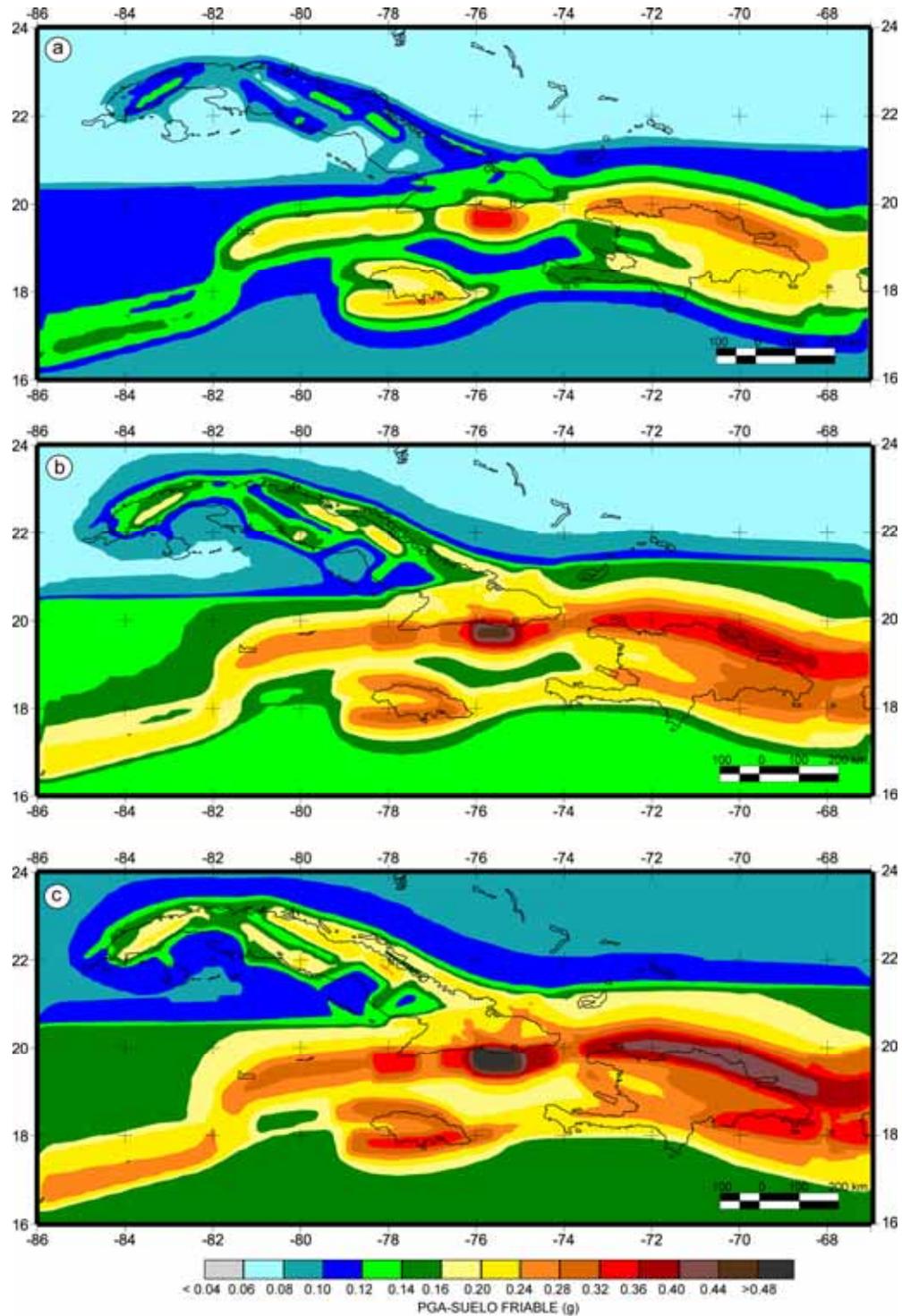


Fig. 2.31- Aceleración pico del terreno (PGA) en suelo blando para un período de retorno de 475 años (en unidades de g: aceleración de la gravedad): (a) - valor medio de PGA, (b) - valor medio teniendo en cuenta la incertidumbre aleatoria (sd_T) y (c) - valor medio teniendo en cuenta las incertidumbres aleatoria y la epistémica ($sd_T + \sigma$).

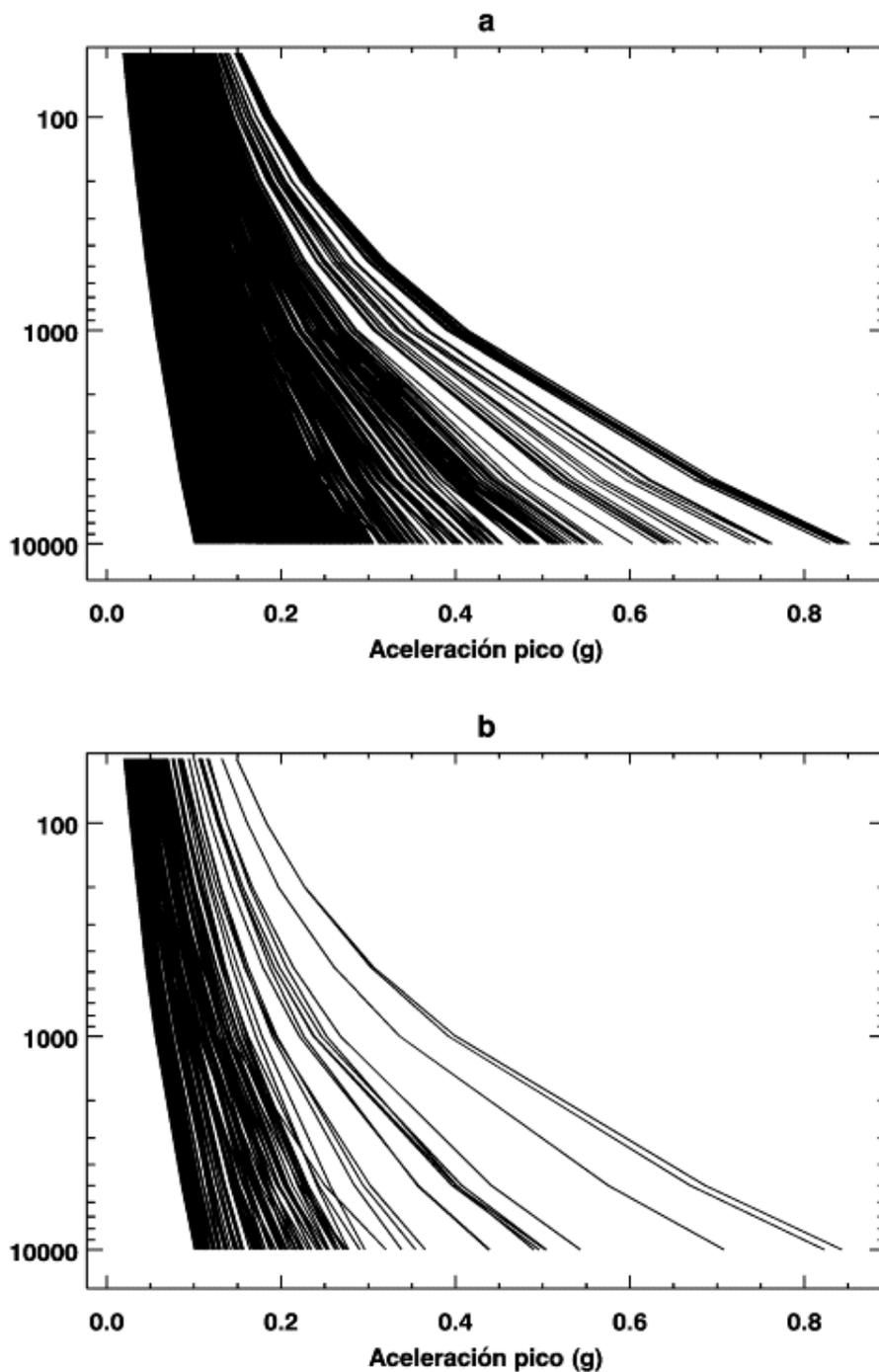


Fig. 2.32. Curvas de período de retorno vs. aceleración pico para roca en el intervalo de 35 a 10000 años para el caso de “valor medio de PGA +SD”. a) muestra completa (897 puntos), b) muestra reducida (145 puntos).

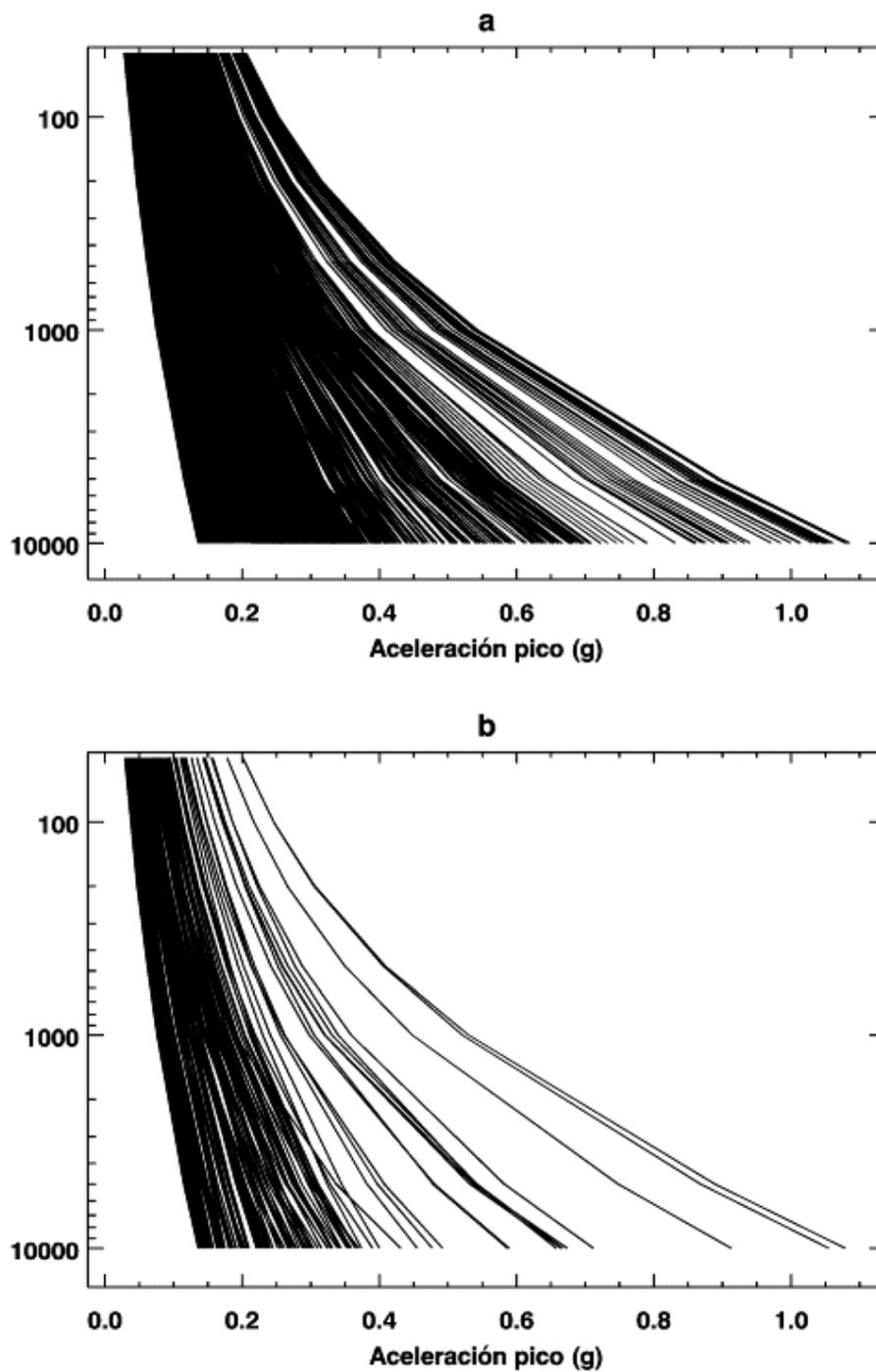


Fig. 2.33. Curvas de período de retorno vs. aceleración pico para suelo blando en el intervalo de 35 a 10000 años para el caso de “valor medio de PGA +SD”. a) muestra completa (897 puntos), b) muestra reducida (145 puntos).

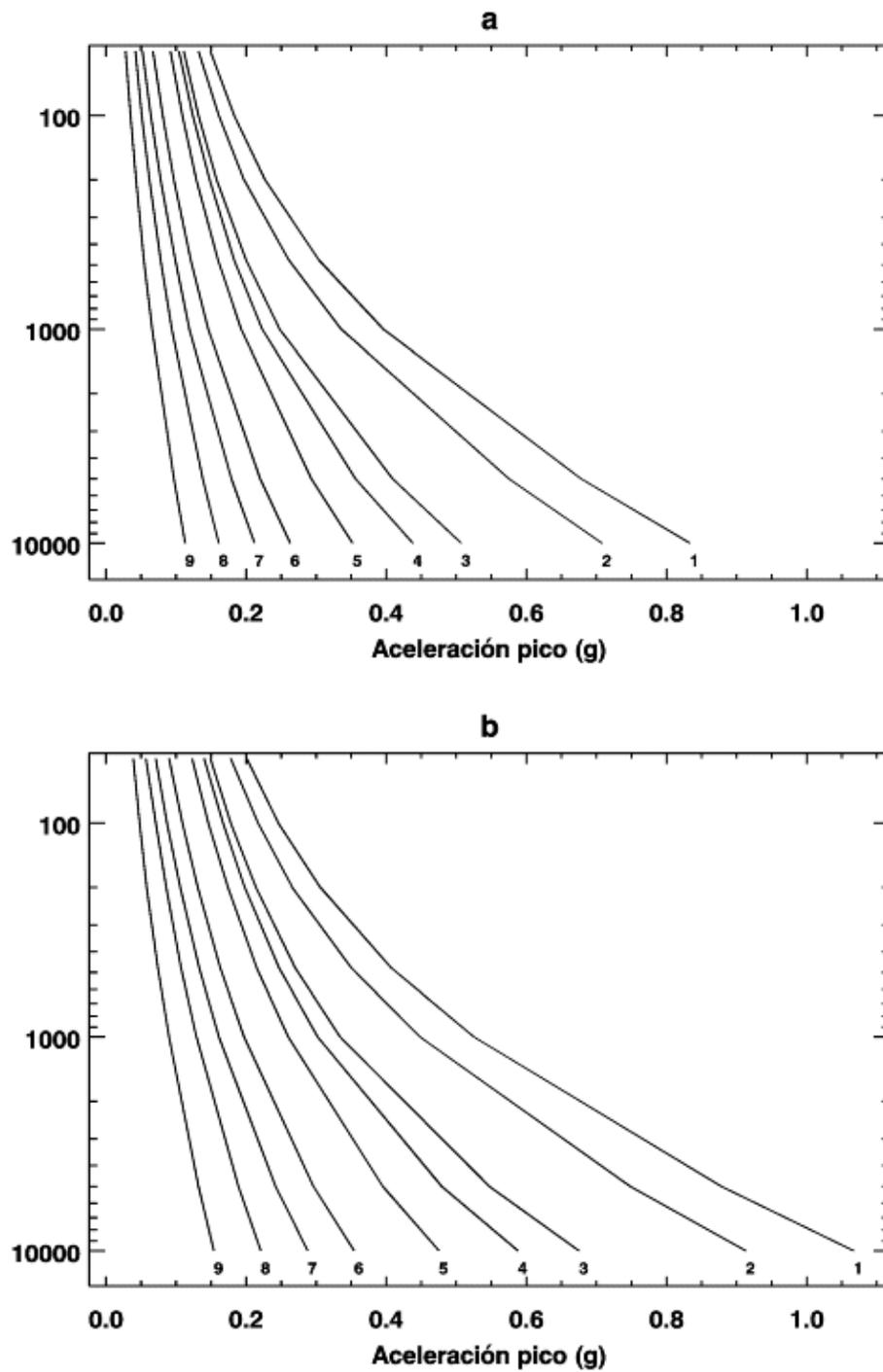


Fig. 2.34. Resultado de la clasificación de las muestras reducidas. (a) caso de roca y (b) caso de suelos blandos. Estas curvas corresponden a los patrones encontrados en las muestras reducidas de 145 puntos.

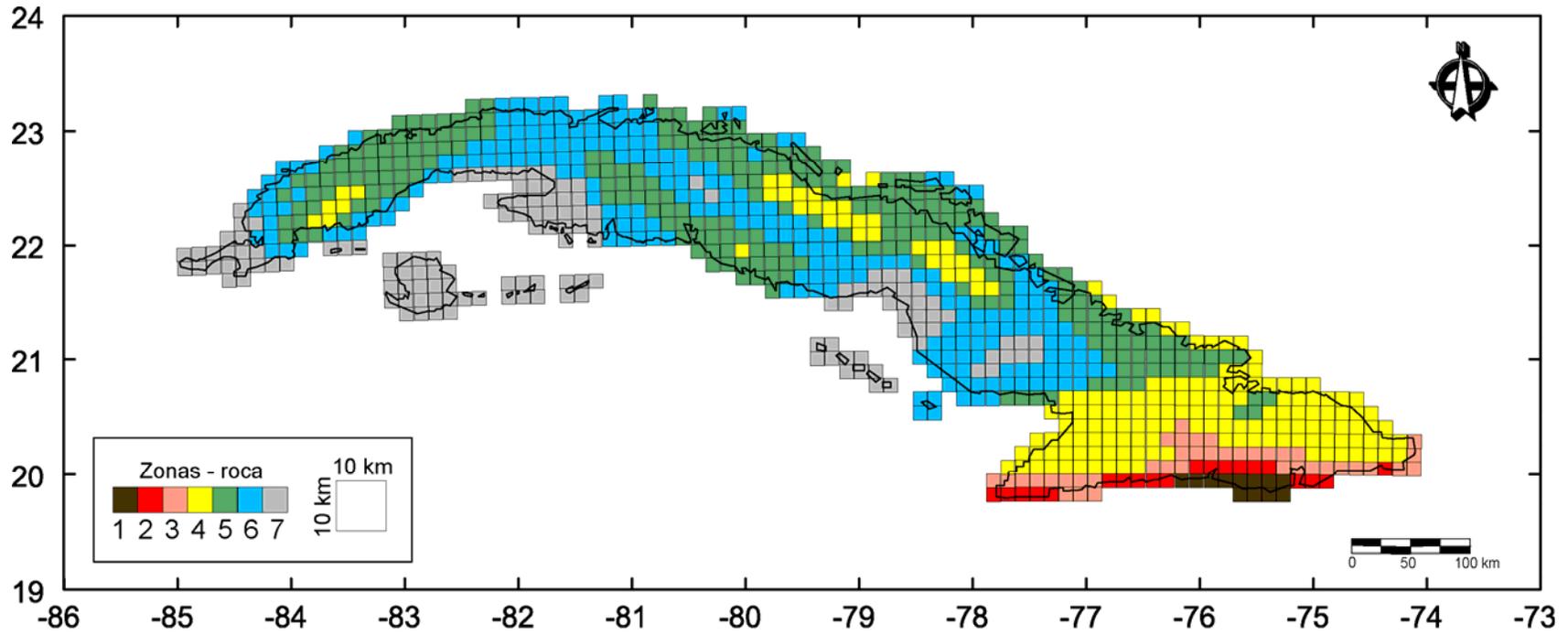


Fig. 2.35. Mapa de zonación sísmica para roca. Los números en la leyenda corresponden a la numeración seleccionada en orden descendente del nivel de peligro sísmico. La peligrosidad sísmica asociada a cada una de las zonas se presenta en la figura 3.37.

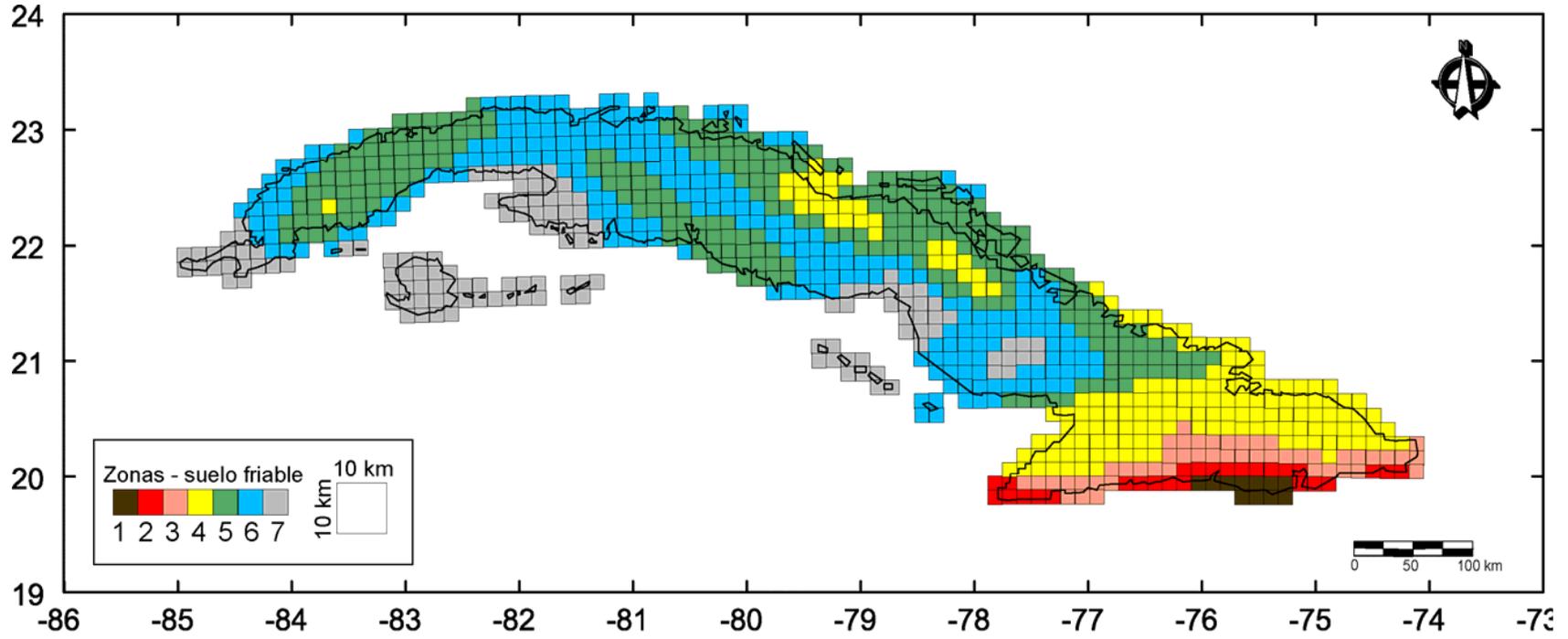


Fig. 2.36. Mapa de zonación sísmica para suelo blando. Los números en la leyenda corresponden a la numeración seleccionada en orden descendente del nivel de peligro sísmico. La peligrosidad sísmica asociada a cada una de las zonas se presenta en la figura 3.38.

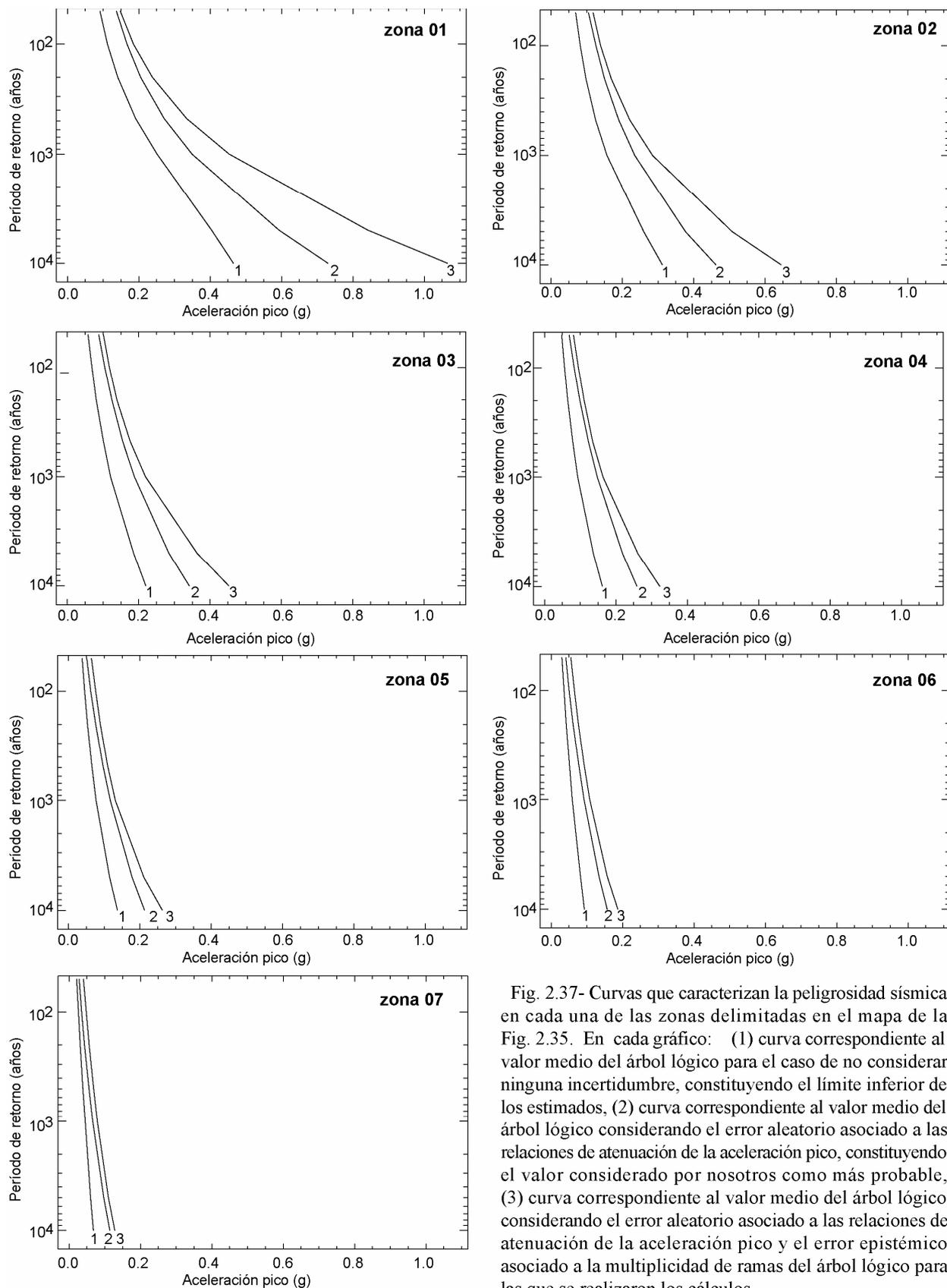


Fig. 2.37- Curvas que caracterizan la peligrosidad sísmica en cada una de las zonas delimitadas en el mapa de la Fig. 2.35. En cada gráfico: (1) curva correspondiente al valor medio del árbol lógico para el caso de no considerar ninguna incertidumbre, constituyendo el límite inferior de los estimados, (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.

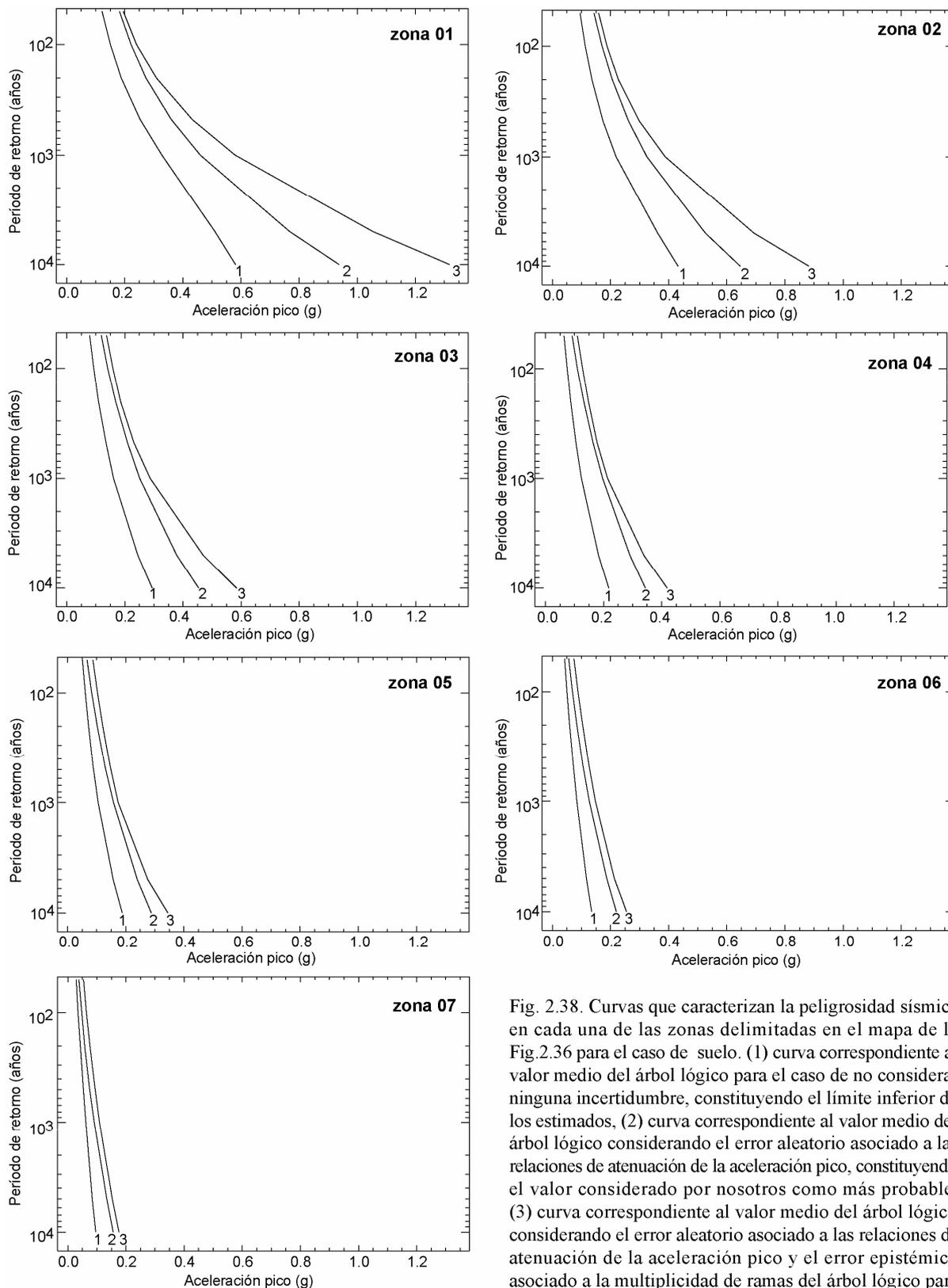


Fig. 2.38. Curvas que caracterizan la peligrosidad sísmica en cada una de las zonas delimitadas en el mapa de la Fig.2.36 para el caso de suelo. (1) curva correspondiente al valor medio del árbol lógico para el caso de no considerar ninguna incertidumbre, constituyendo el límite inferior de los estimados, (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.

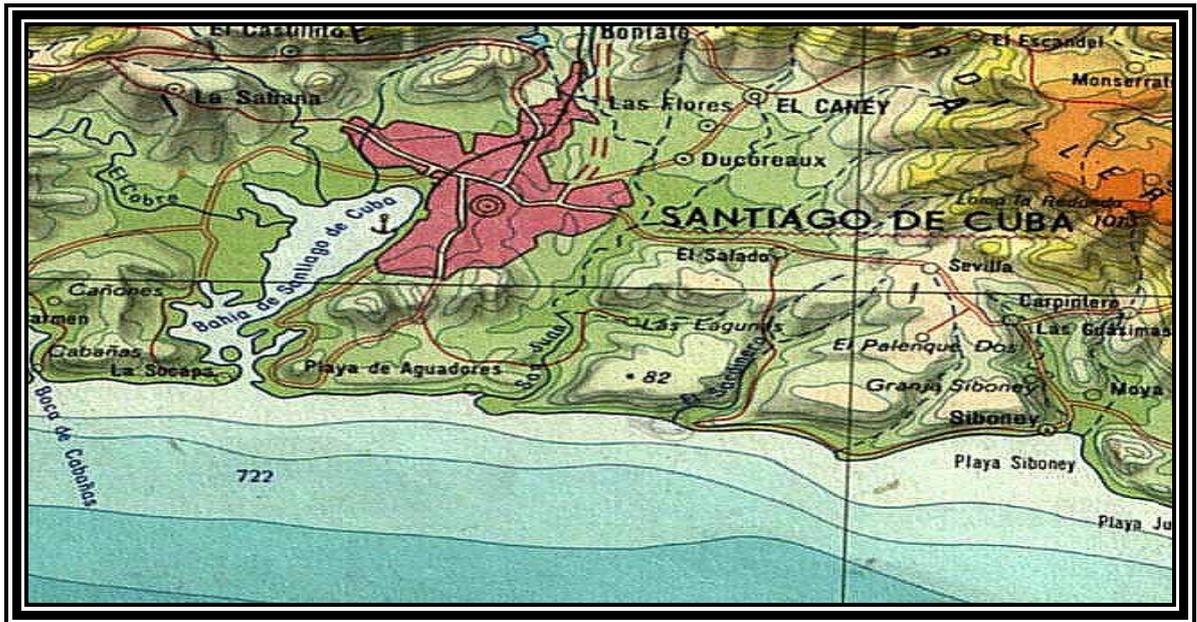


Fig. 3.1. Ubicación de la ciudad de Santiago de Cuba dentro de la Cuenca del mismo nombre, modificado de Nuevo Atlas Nacional de Cuba (1985).

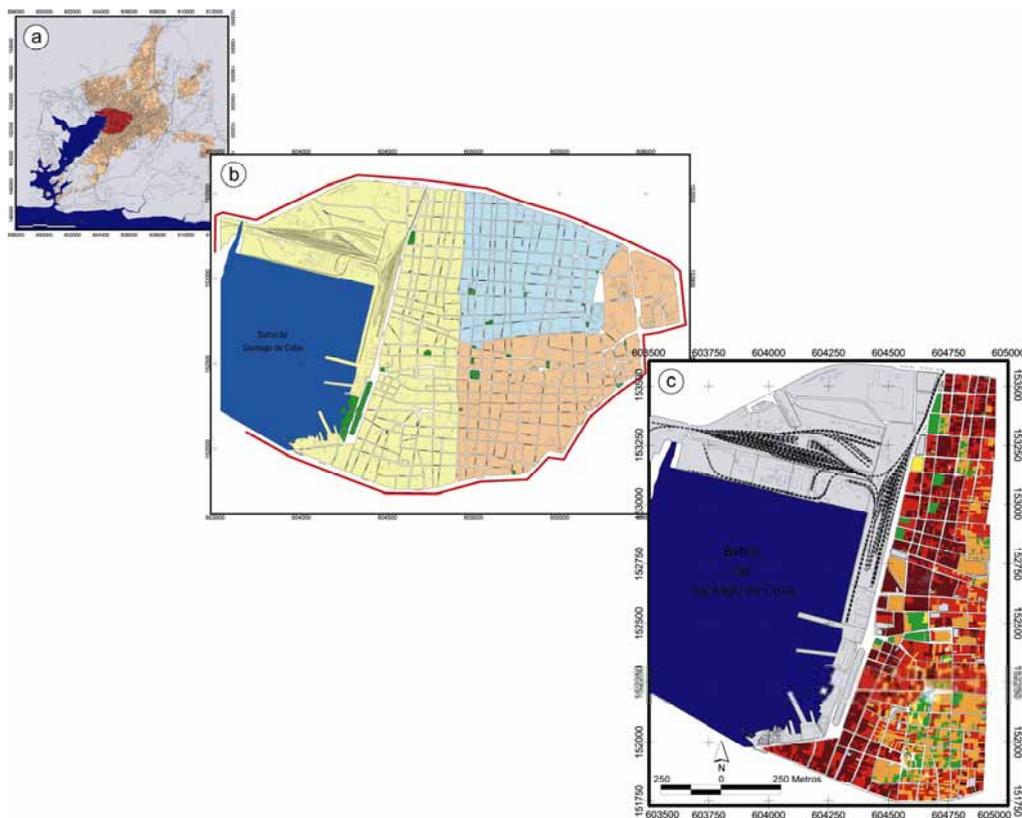


Fig.- 3.2. Escalas de trabajo utilizadas para la estimación del riesgo: a)- toda la ciudad, b)- distrito 26 de Julio y c)- consejo popular Guillermón Moncada.

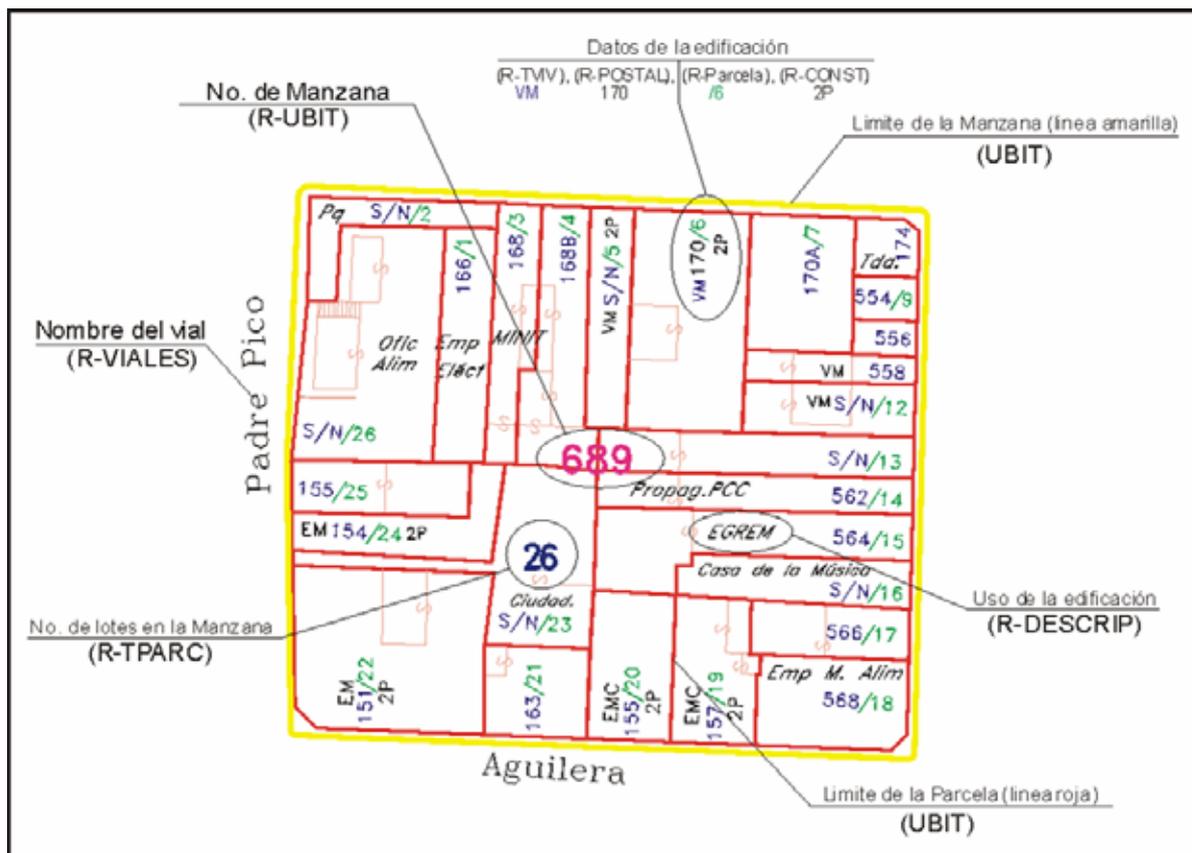


Fig. 3.3- Datos existentes en los archivos del catastro confeccionado por GEOCUBA Santiago. La información de la edificación resaltada corresponde a: VM-Vivienda Multifamiliar; 170-número postal, /6-número de la parcela dentro de la manzana y 2P-número de niveles de la edificación.

Fig. 3.4-. Distrito 26 de Julio y límites de sus los consejos populares.

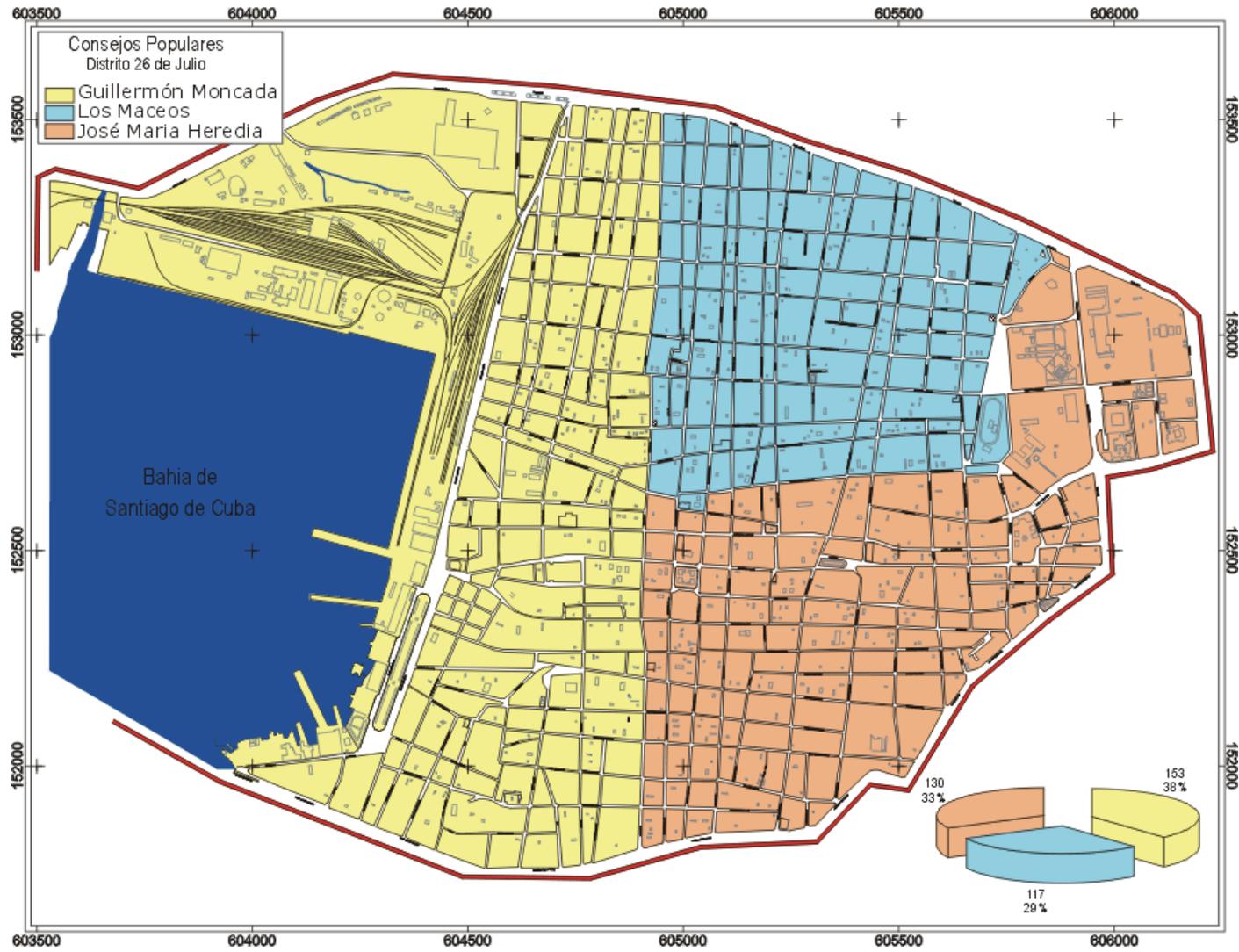
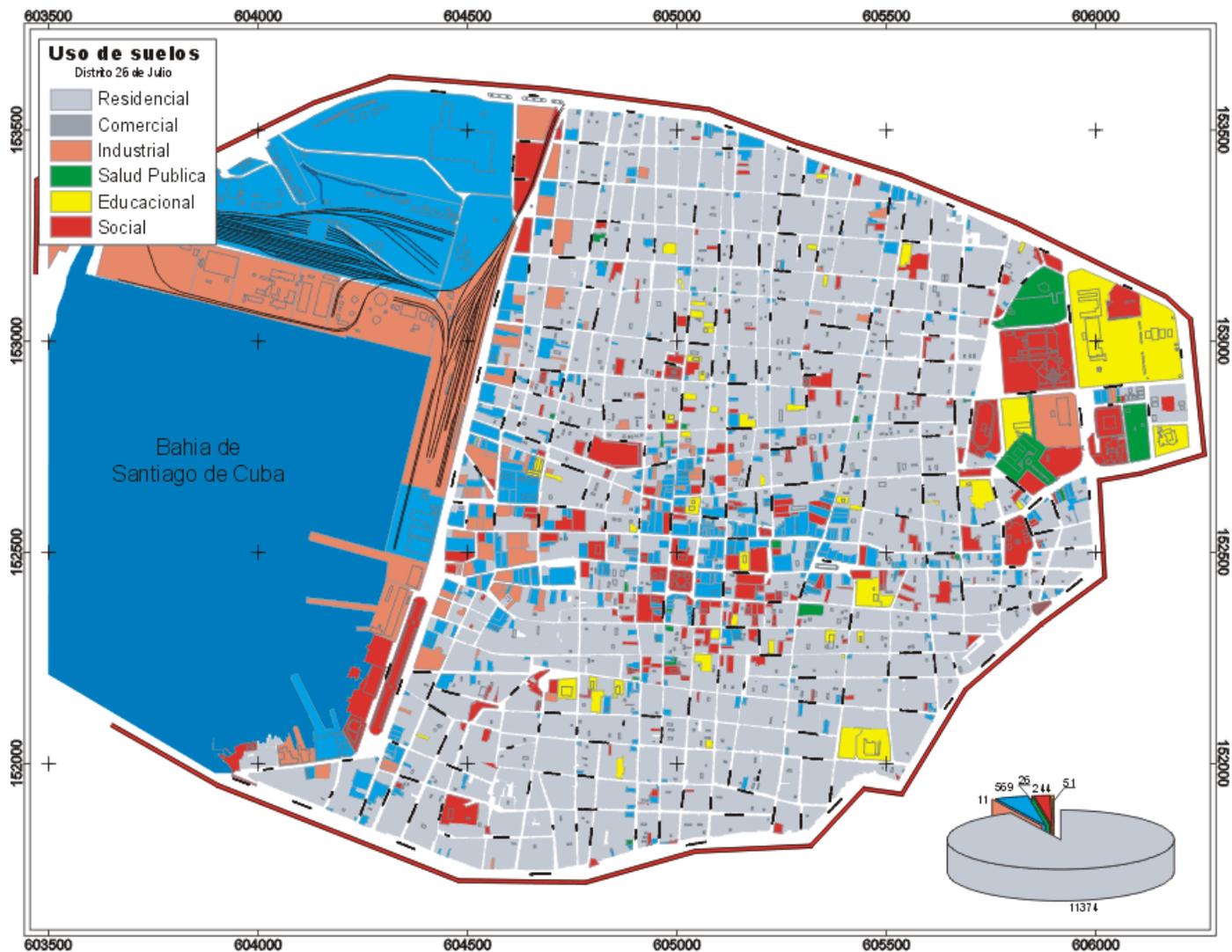


Fig. 3.5-. Distrito 26 de Julio. Uso de suelos. En el gráfico se muestra el número de edificaciones en cada categoría, se usaron los mismos colores que en la leyenda. .



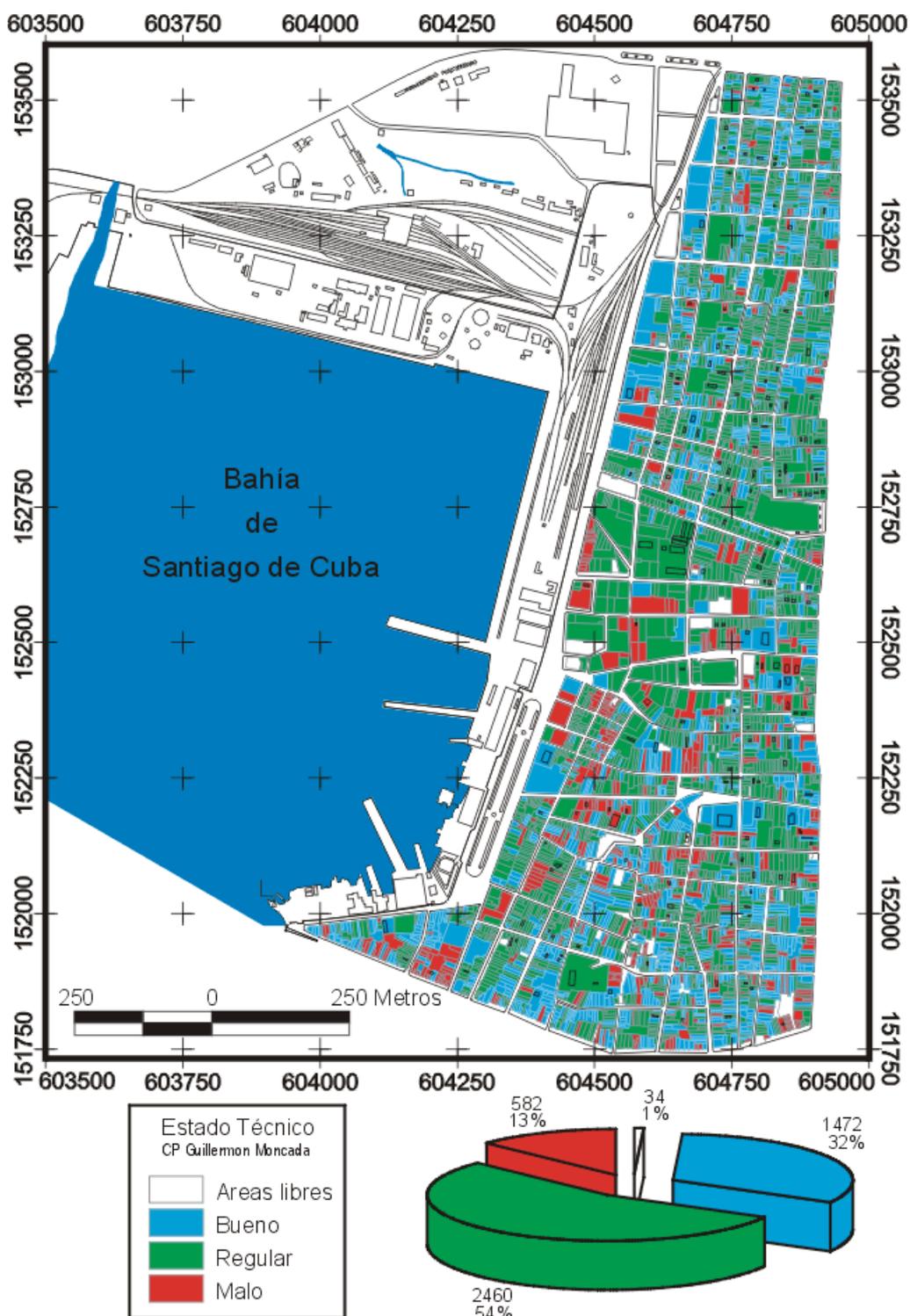


Fig. 3.6- Consejo popular “Guillermón Moncada”. Estado técnico de las edificaciones (Nivel I). En el gráfico se muestra el número de edificaciones (y el por ciento) en cada categoría, se usaron los mismos colores que en la leyenda.

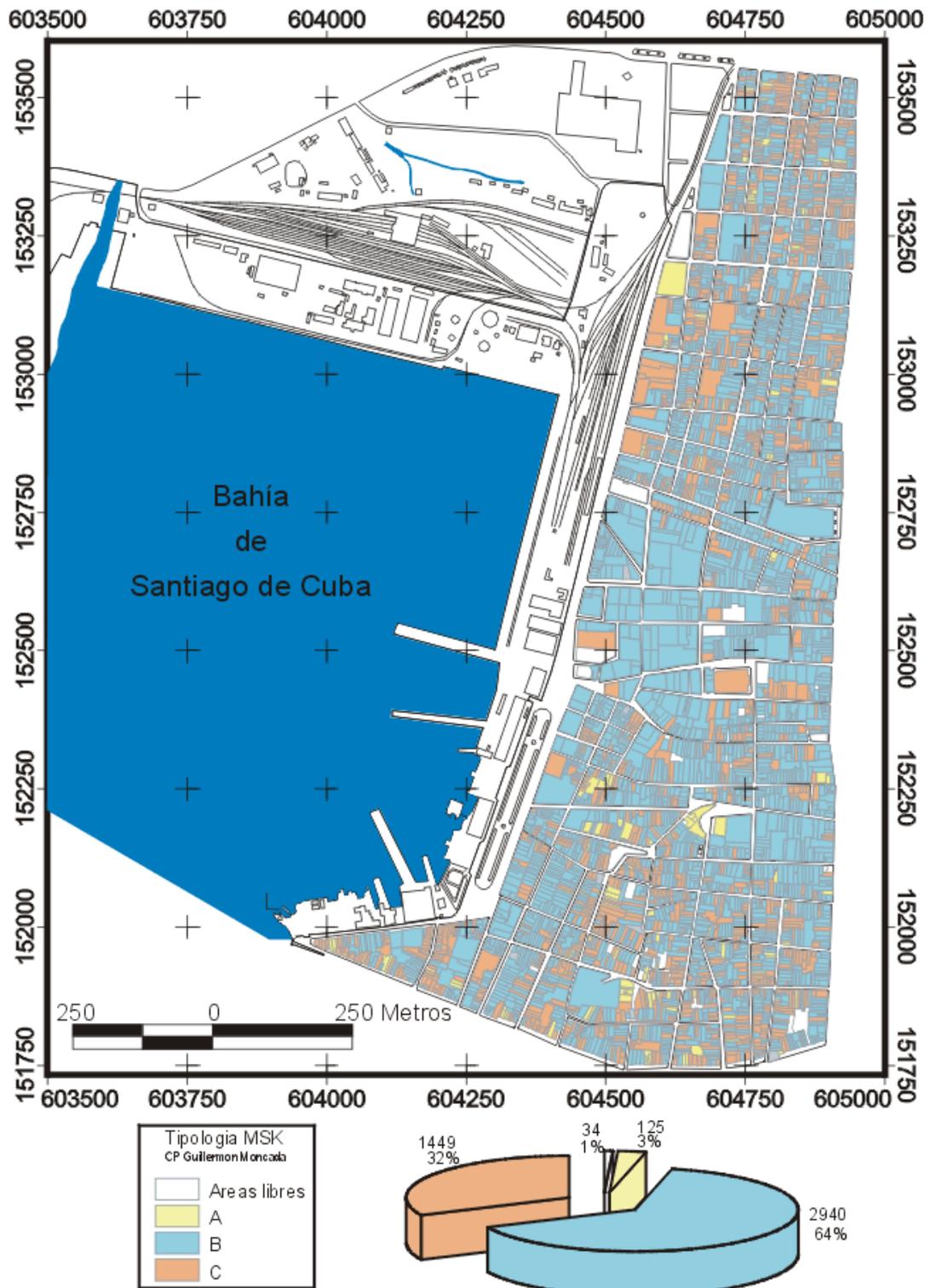


Fig. 3.7- Consejo popular “Guillermo Moncada”. Clasificación de las edificaciones según la escala MSK. En el gráfico se muestran el número de edificaciones (y el por ciento) en cada categoría, se usaron los mismos colores que en la leyenda.

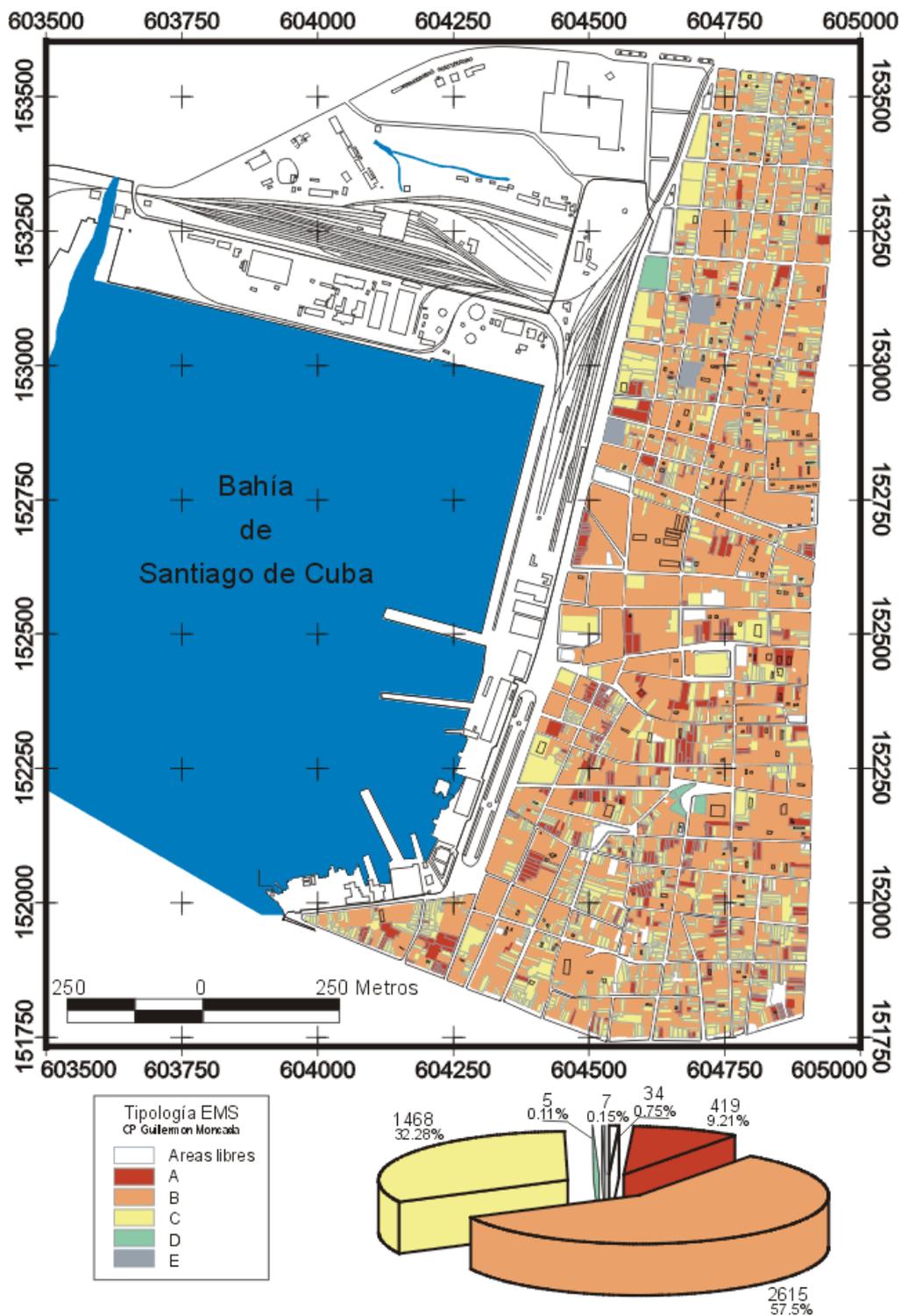


Fig. 3.8- Consejo popular “Guillermón Moncada”. Clasificación de las edificaciones según la escala EMS. En el gráfico se muestran el número de edificaciones (y el por ciento) en cada categoría, se usaron los mismos colores que en la leyenda.

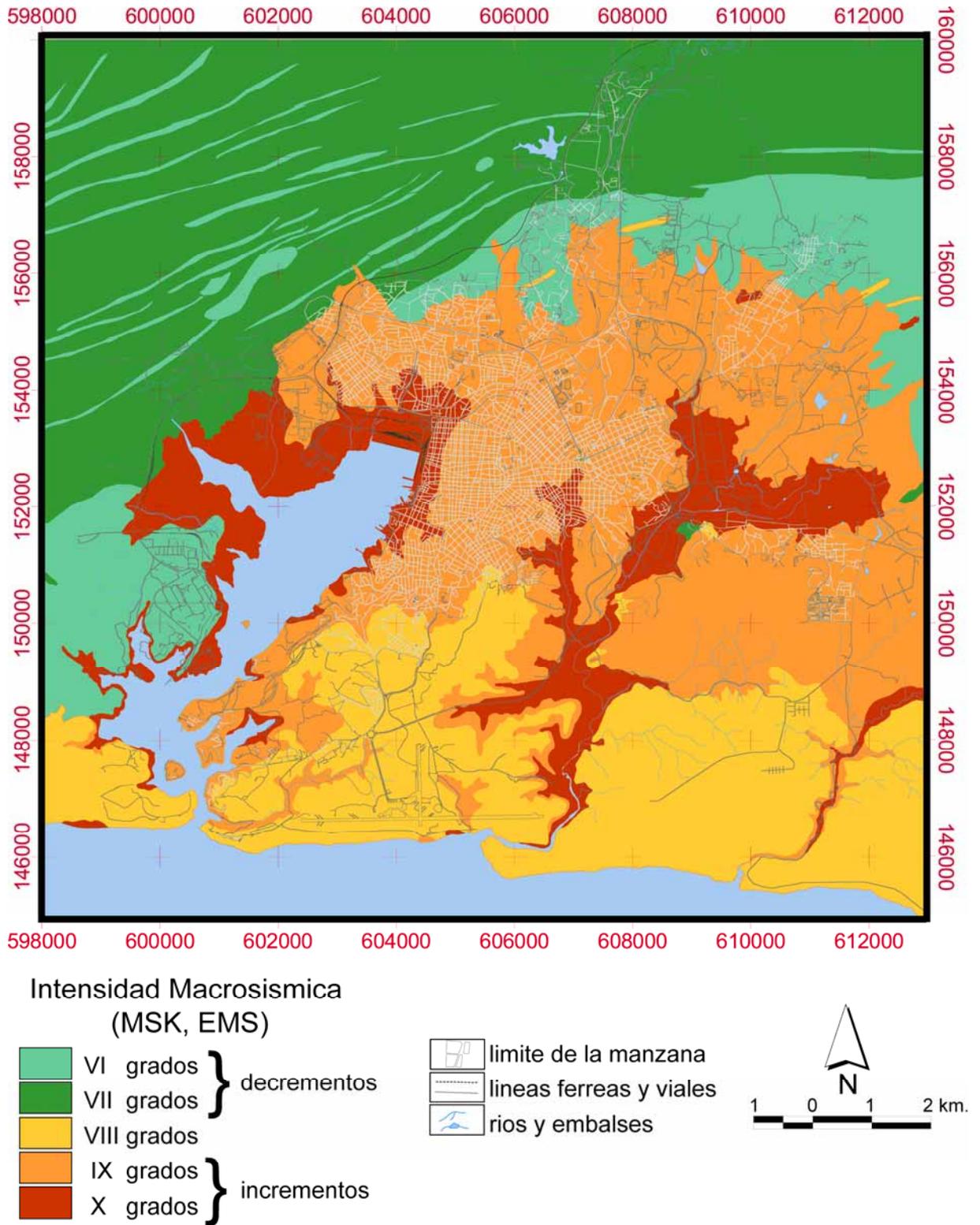
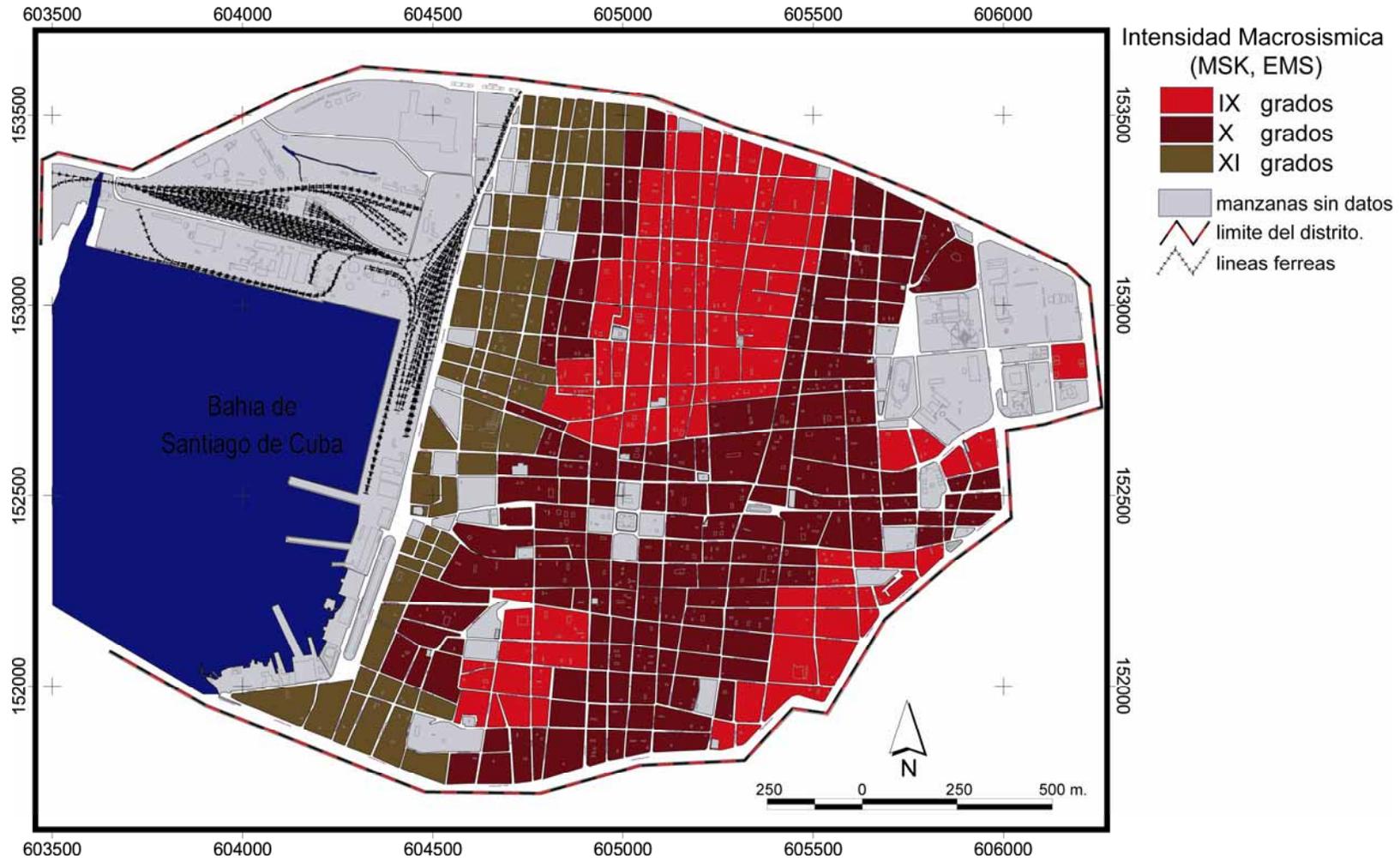


Fig. 3.9- Mapa de efecto de sitio, modificado de García et al. (2002a).

Fig. 3.10- Mapa de respuesta de sitio para el distrito 26 de Julio.



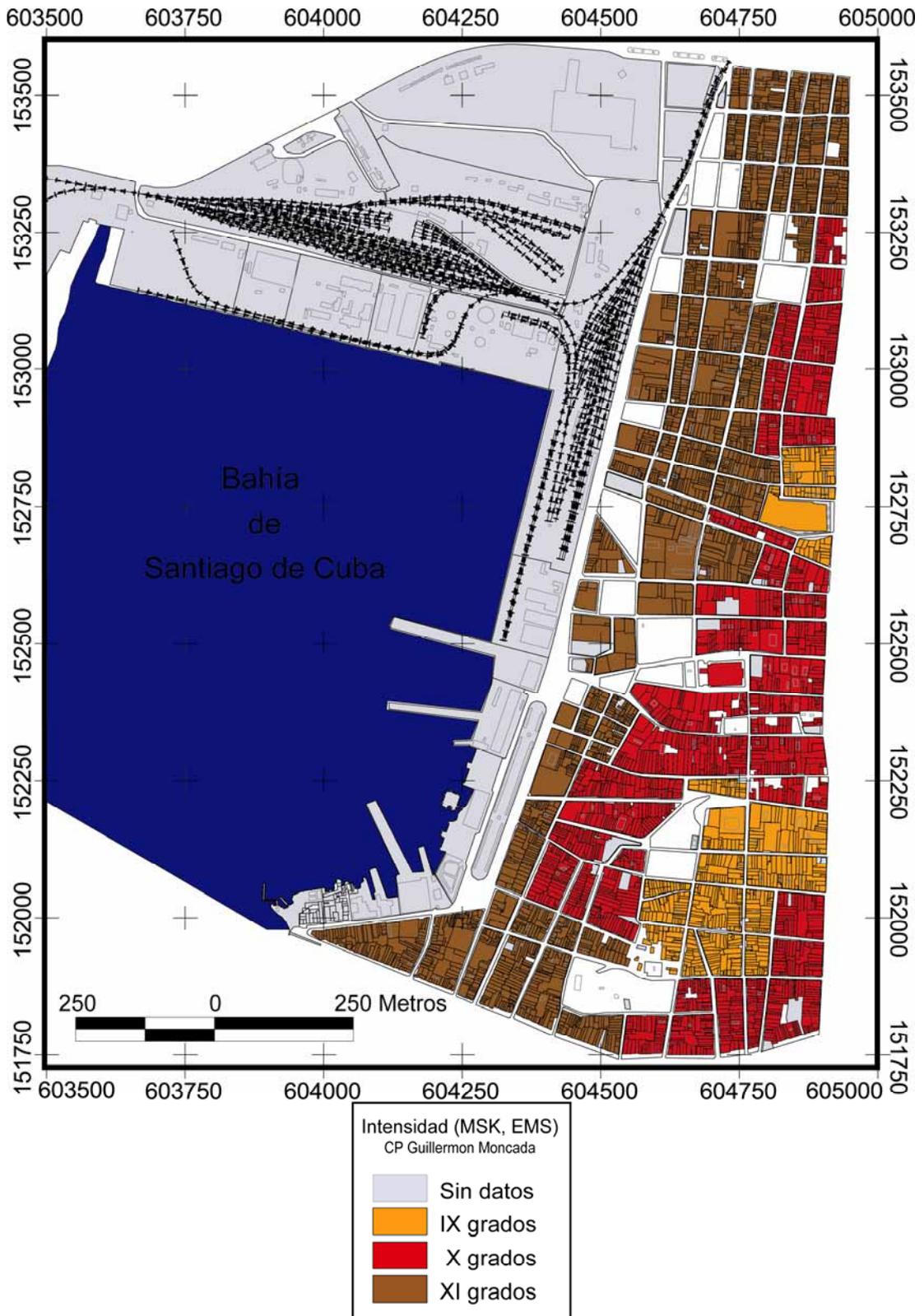
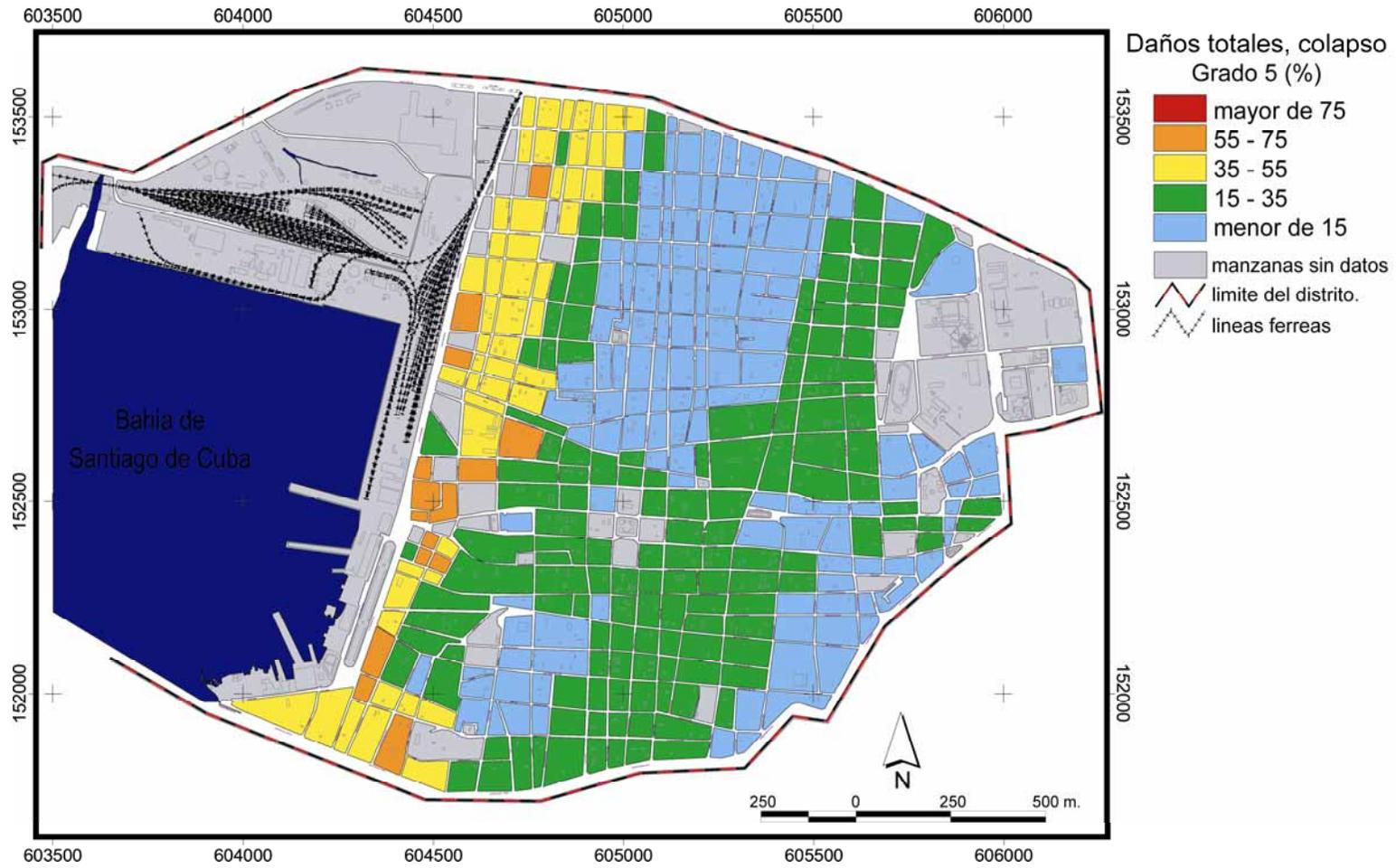


Fig. 3.11- Mapa de respuesta de sitio para el consejo popular Guillermón Moncada.

Fig. 3.12. Porcentaje de edificaciones dentro de la manzana (con respecto al total) donde ocurren daños de grado 5, independientemente de su tipología constructiva.



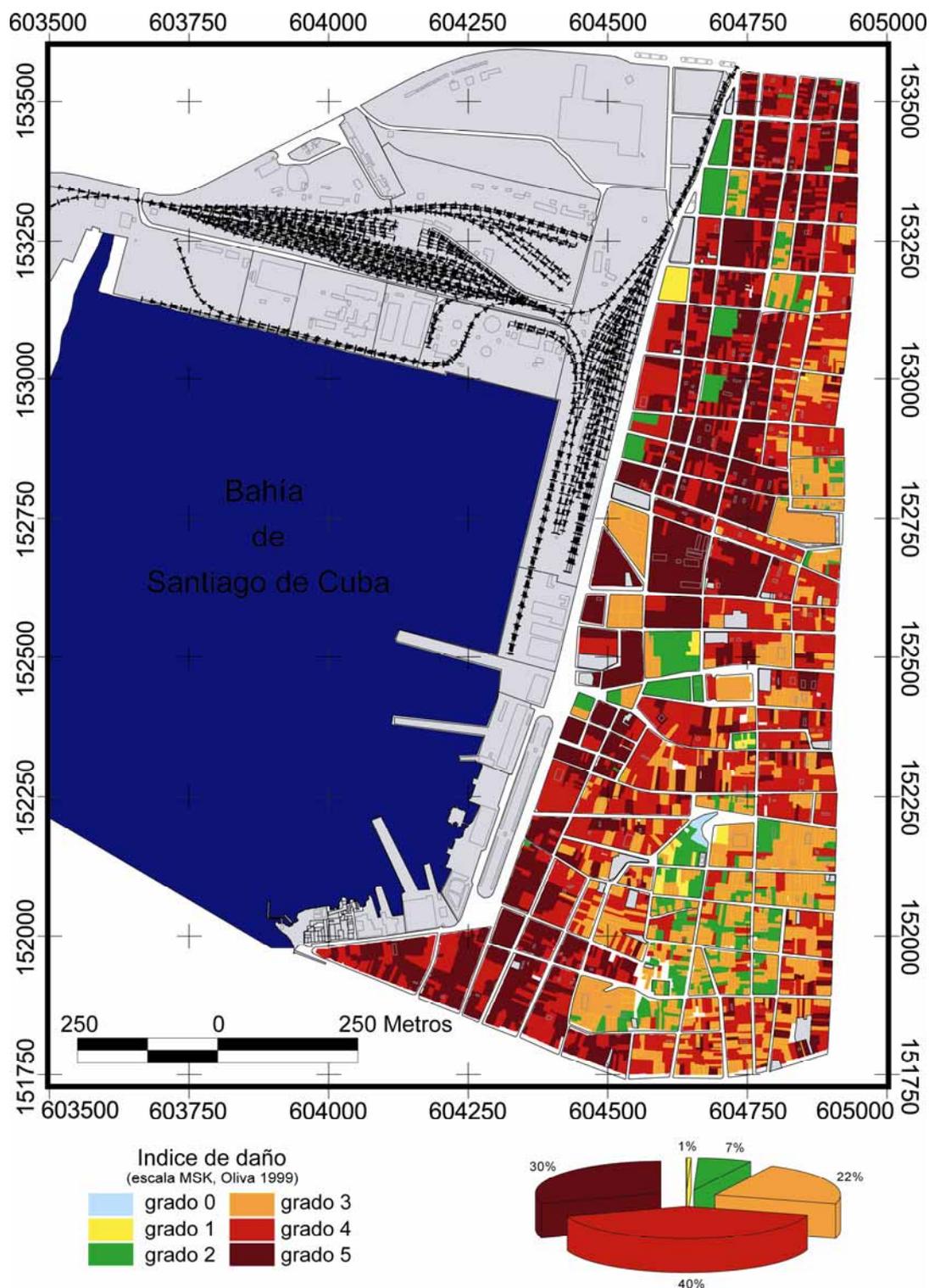


Fig. 3.13- Estimación de los daños en las edificaciones del consejo popular Guillermón Moncada, usando la MPD propuesta por Oliva (2000). En el gráfico se muestran el porcentaje de edificaciones en cada categoría, se usaron los mismos colores que en la leyenda.

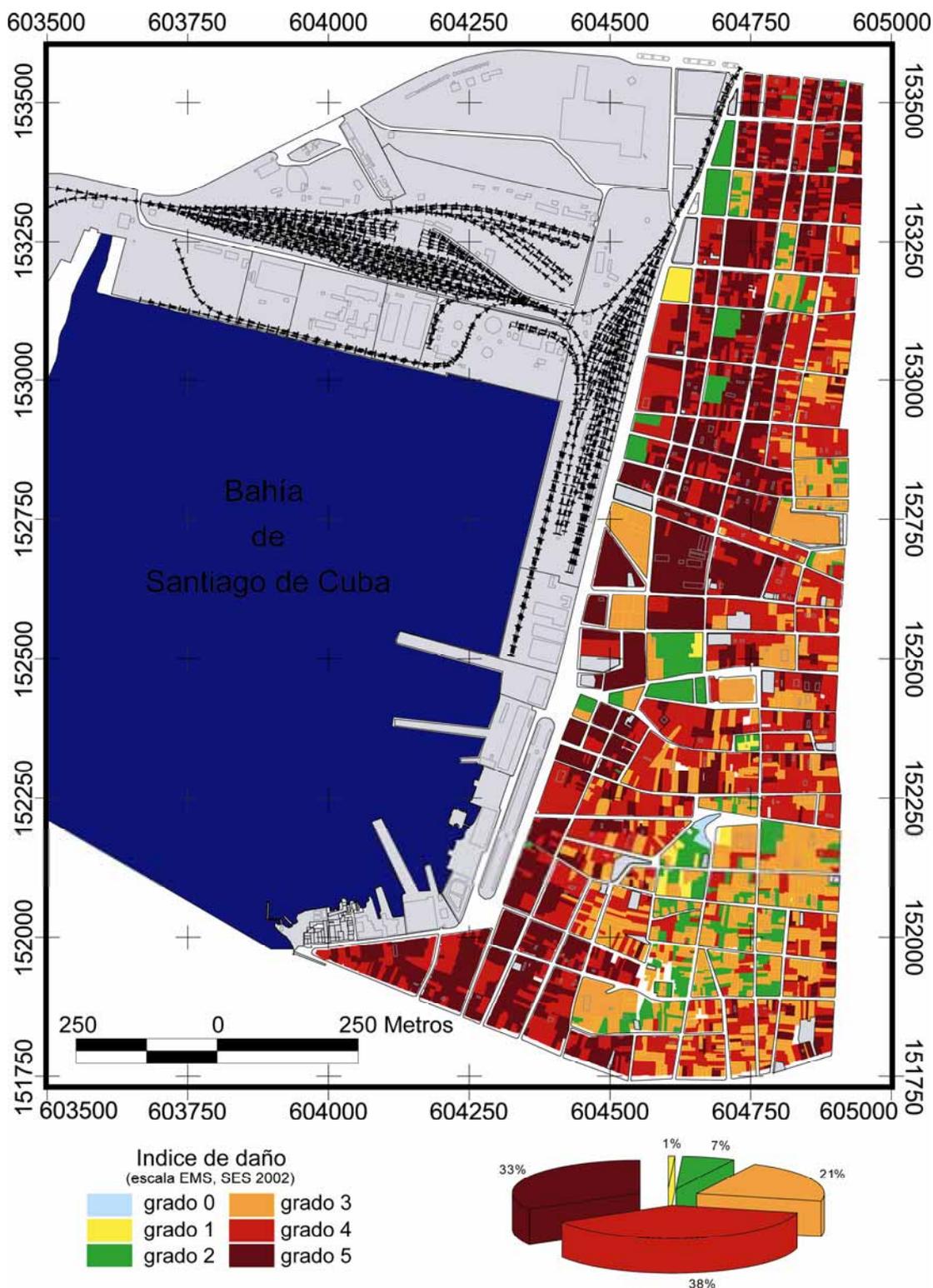
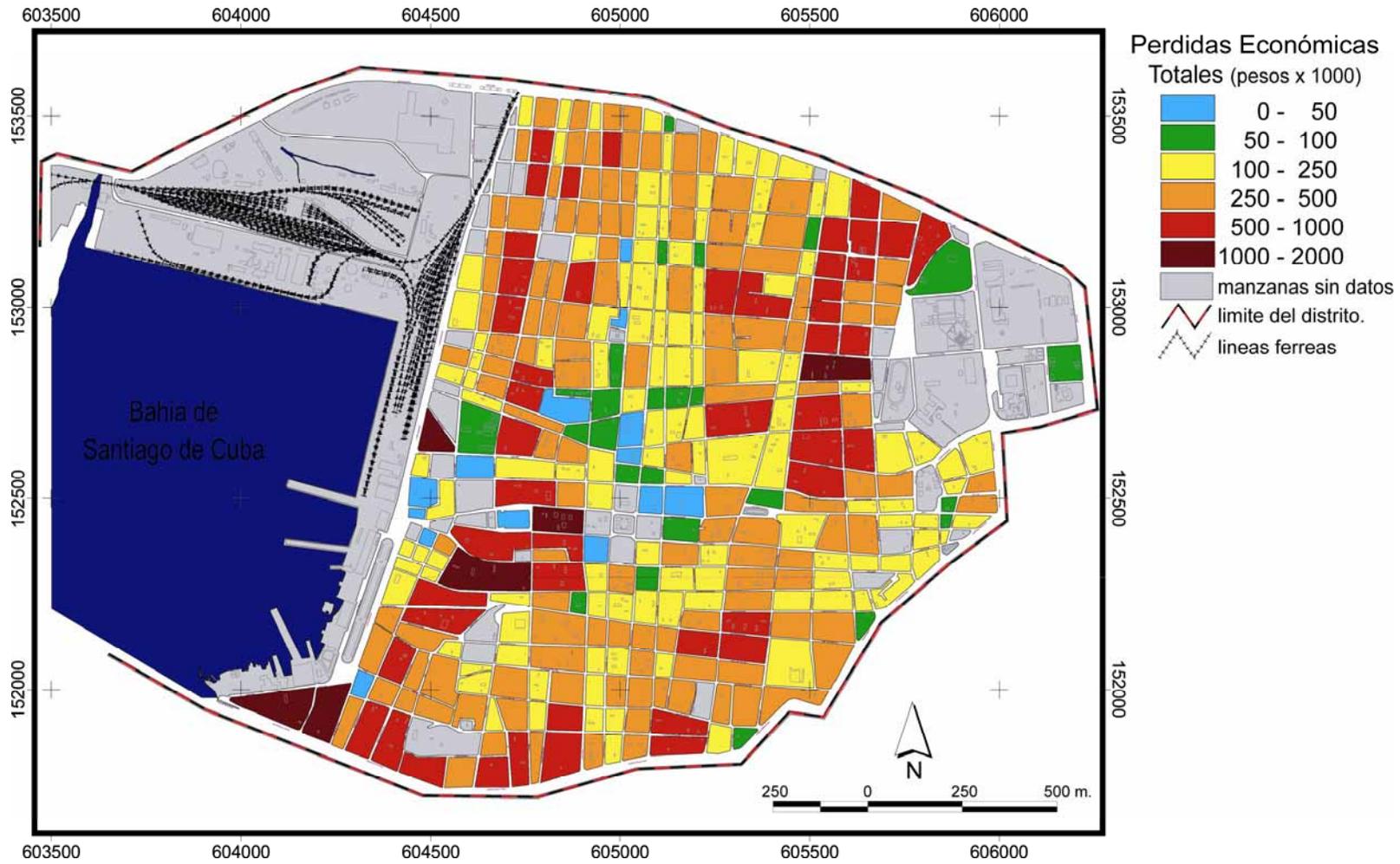


Fig. 3.14- Estimación de los daños en las edificaciones del consejo popular Guillermón Moncada, usando la MPD propuesta por SES (2002). En el gráfico se muestran el porciento de edificaciones en cada categoría, se usaron los mismos colores que en la leyenda.

Fig. 3.15- Mapa de pérdidas totales en las edificaciones del distrito 26 de Julio, expresadas en miles de pesos.



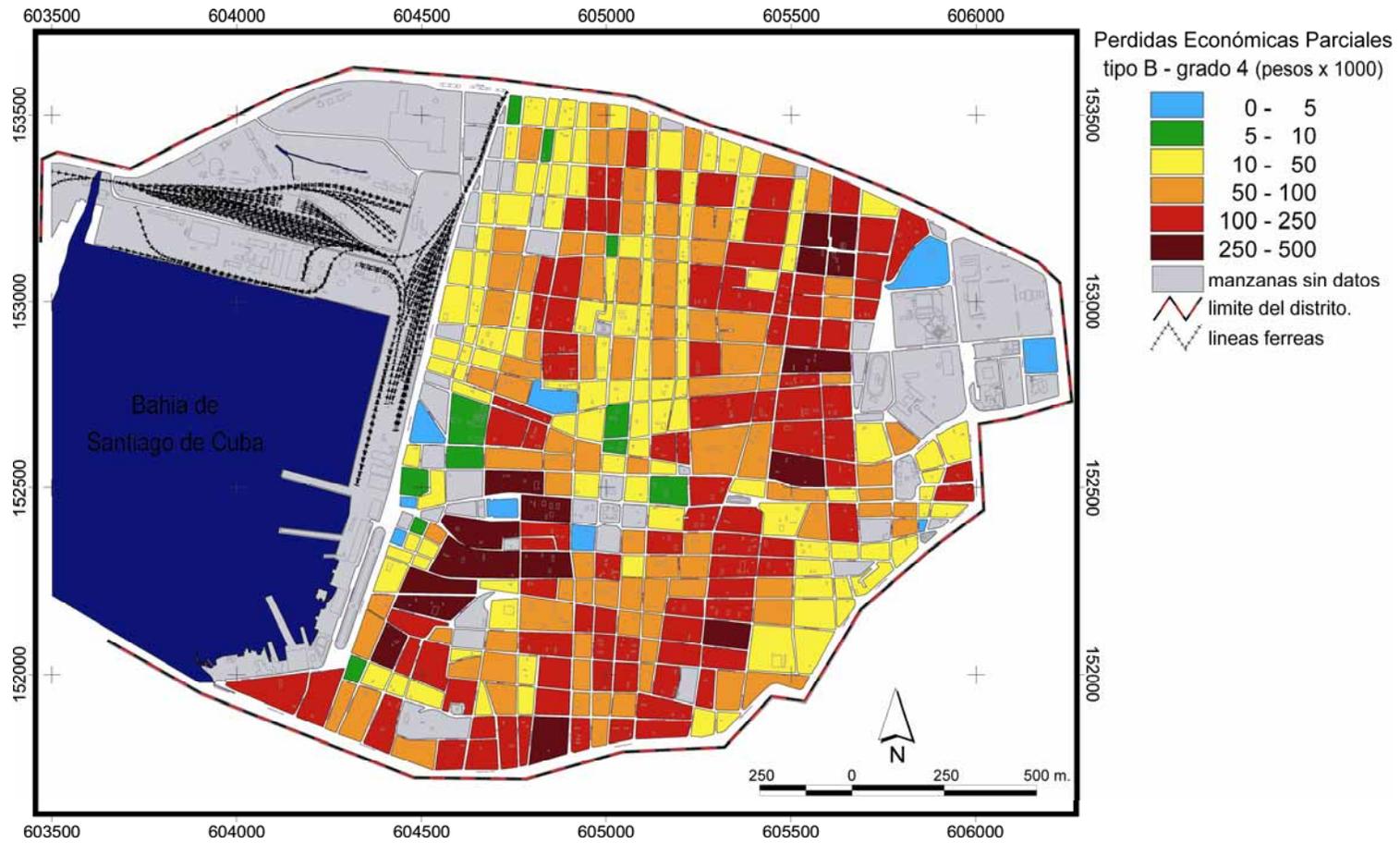


Fig. 3.16- Mapa de pérdidas parciales ocasionadas por daños de grado 4 en las edificaciones de tipología B (escala MSK) del distrito 26 de Julio, expresadas en miles de pesos.

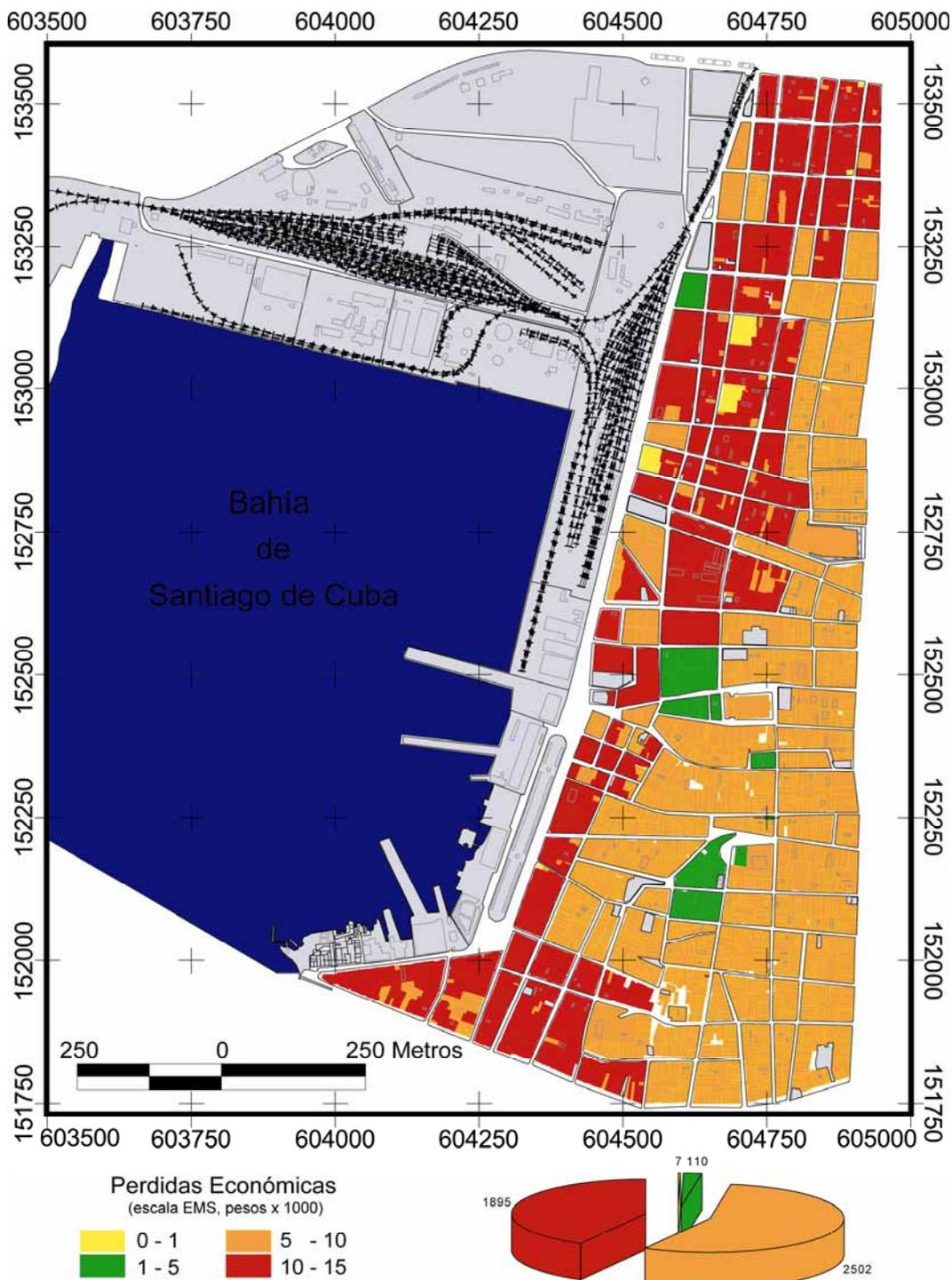


Fig. 3.17- Mapa de pérdidas totales en las edificaciones del consejo popular Guillermón Moncada obtenidas utilizando SES (2002). En el gráfico se presenta el número de edificaciones usando los mismos intervalos y colores que muestra la leyenda.

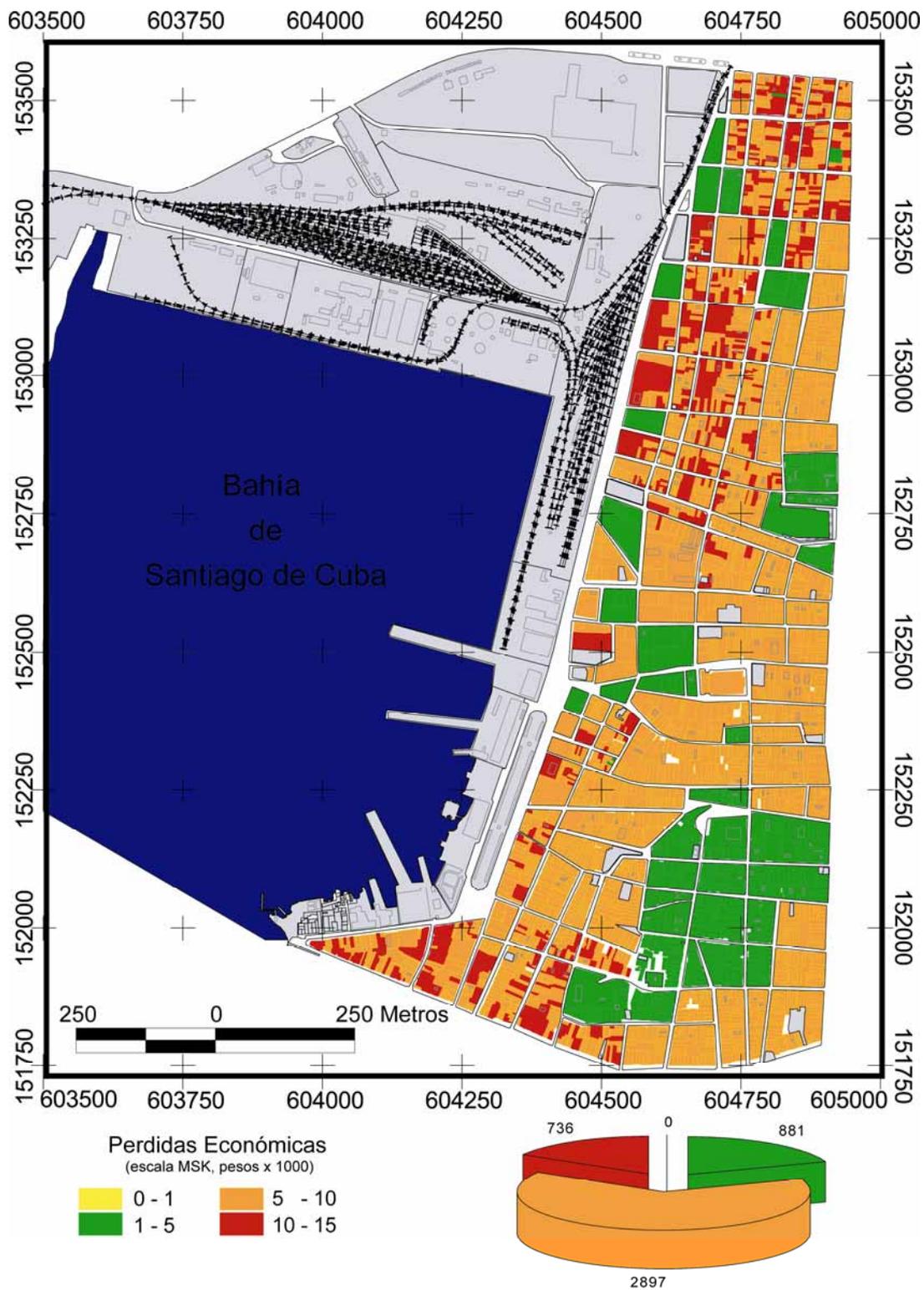


Fig. 3.18- Mapa de pérdidas totales en las edificaciones del consejo popular Guillermón Moncada obtenidas utilizando Oliva (2000). En el gráfico se presenta el número de edificaciones usando los mismos intervalos y colores que muestra la leyenda.

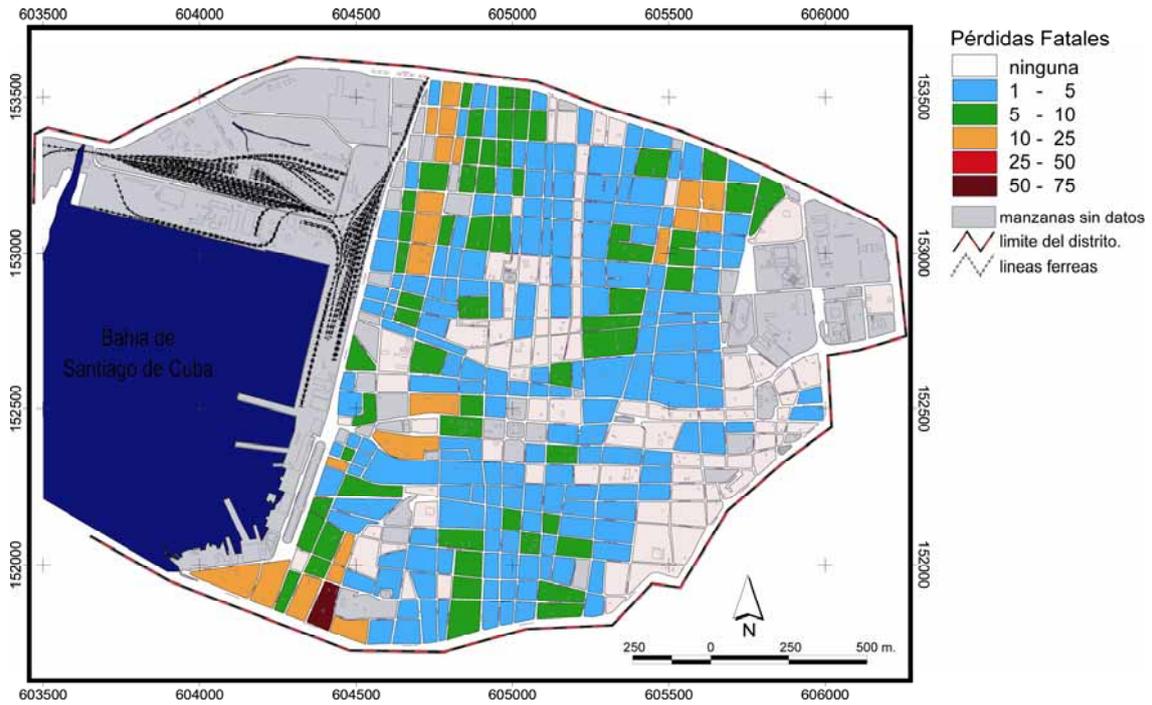


Fig. 3.19- Número de pérdidas fatales o fallecidos (por manzana), obtenidas a partir del uso de la MPD propuesta por Oliva (2000), dentro del distrito 26 de Julio.

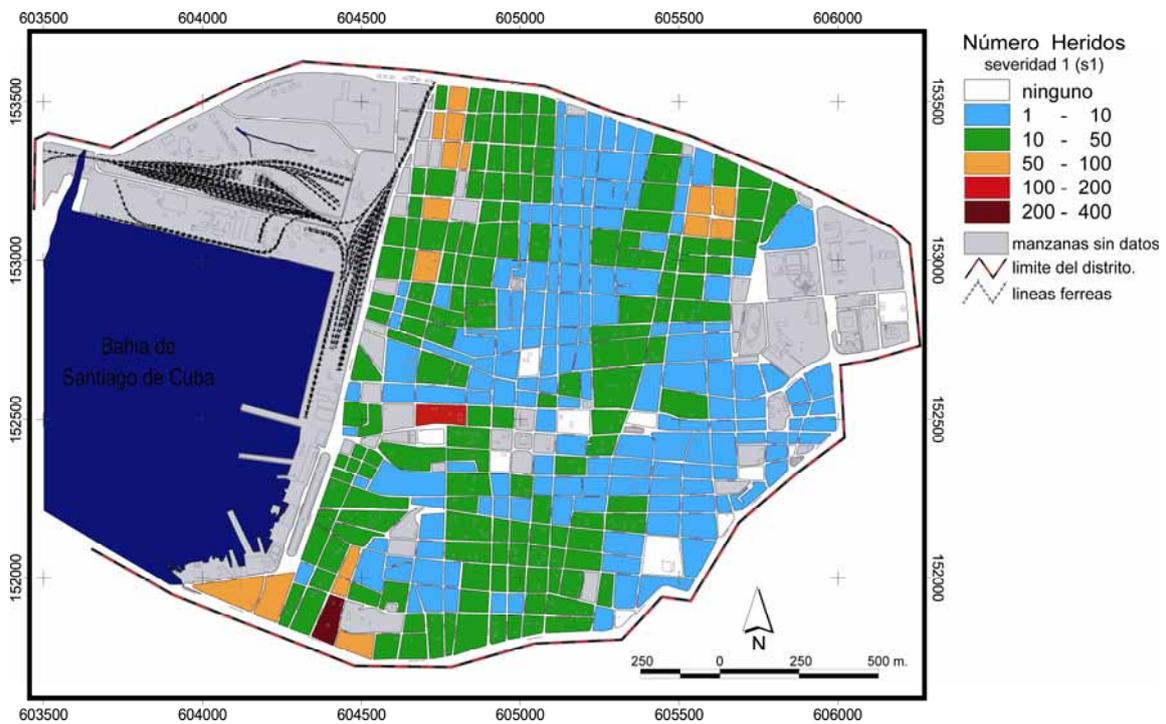


Fig. 3.20- Número de heridos leves (por manzana), obtenido a partir del uso de la MPD propuesta por Oliva (2000), dentro del distrito 26 de Julio.

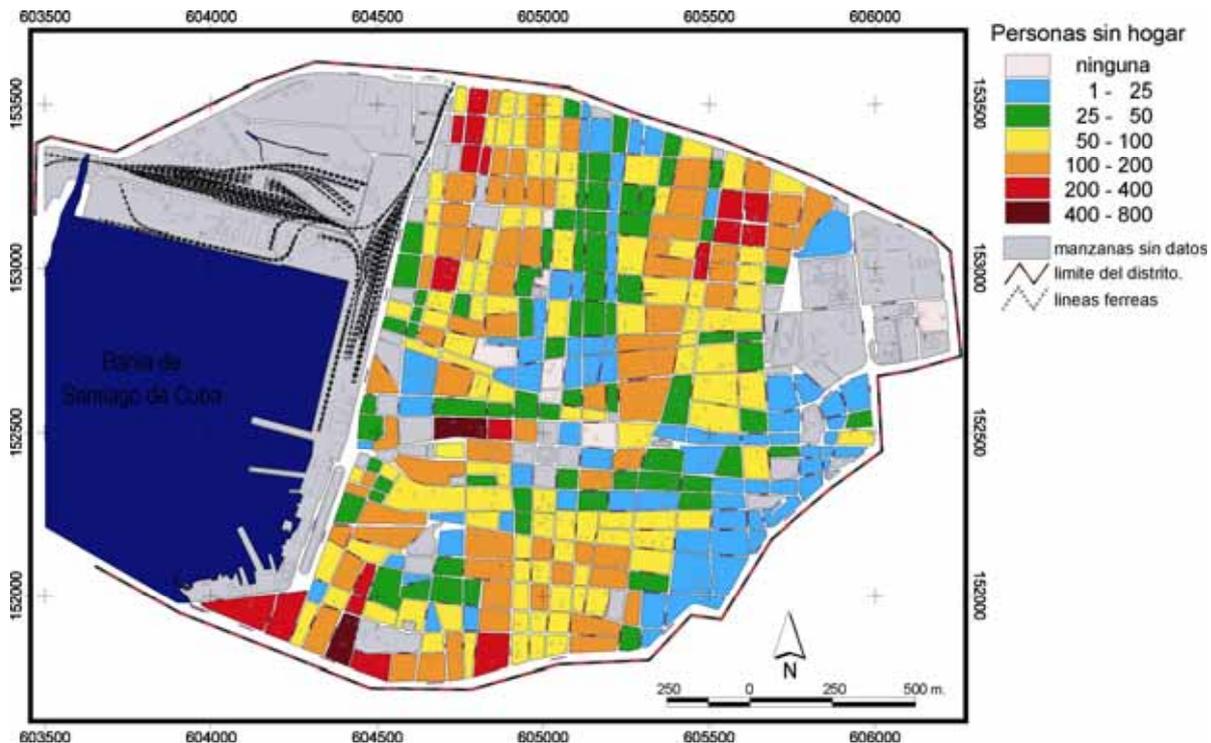


Fig. 3.21- Número de personas sin hogar (por manzana), obtenido a partir del uso de la MPD propuesta por Oliva (2000), dentro del distrito 26 de Julio.

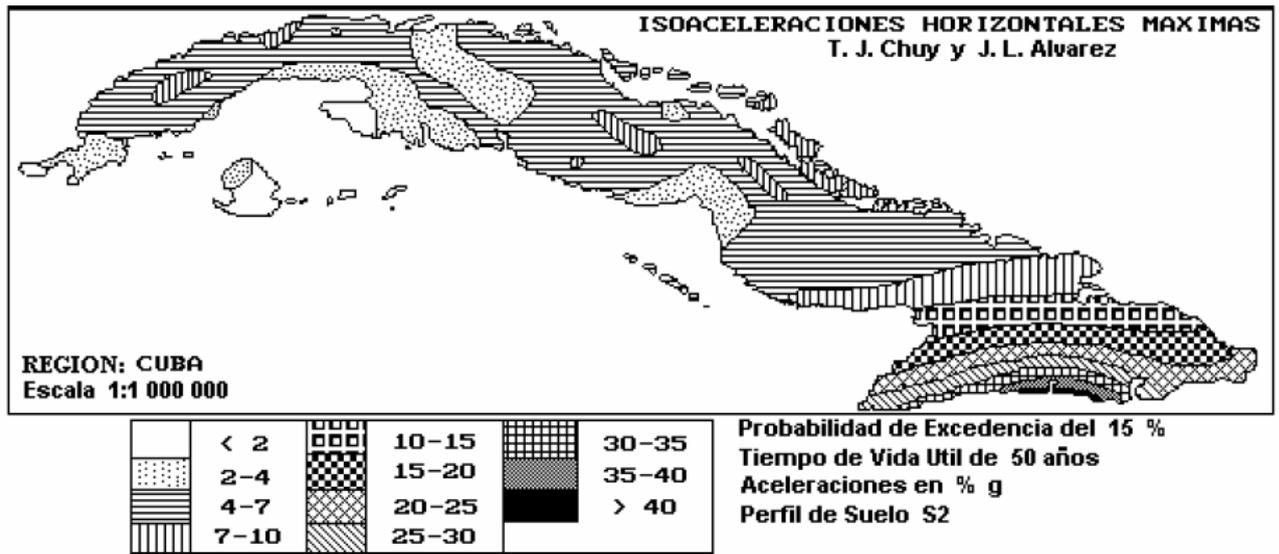


Fig. 4.1- Mapa de aceleraciones horizontales máximas referidas a un suelo tipo S2 obtenidas por Chuy y Alvarez (1995).

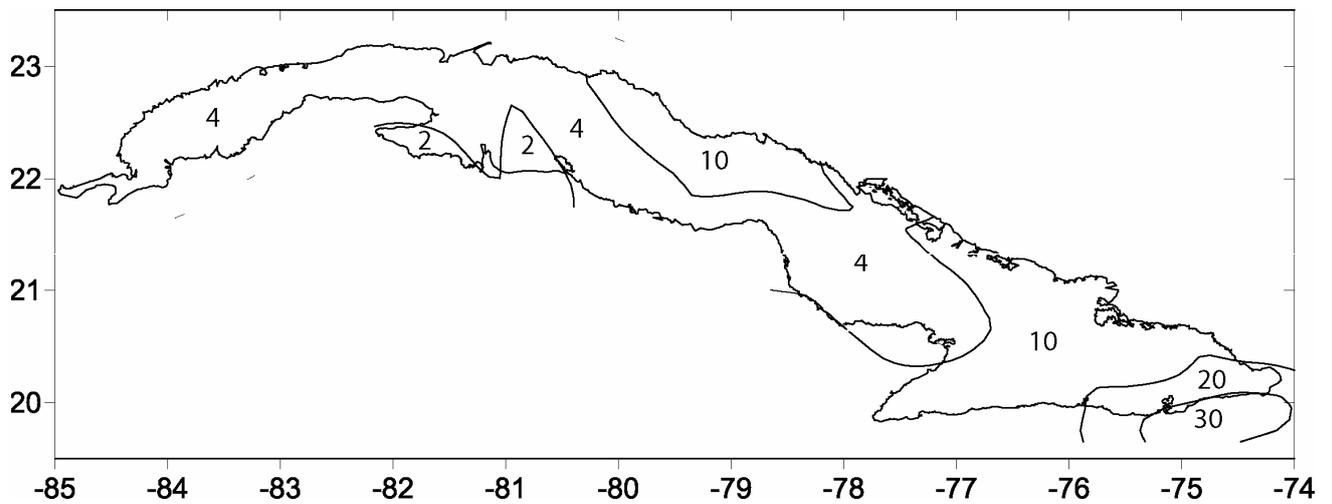


Fig. 4.1- Mapa de aceleraciones horizontales máximas (en % de g) referidas a un suelo tipo S2 obtenidas por Rodríguez et al. (1997).

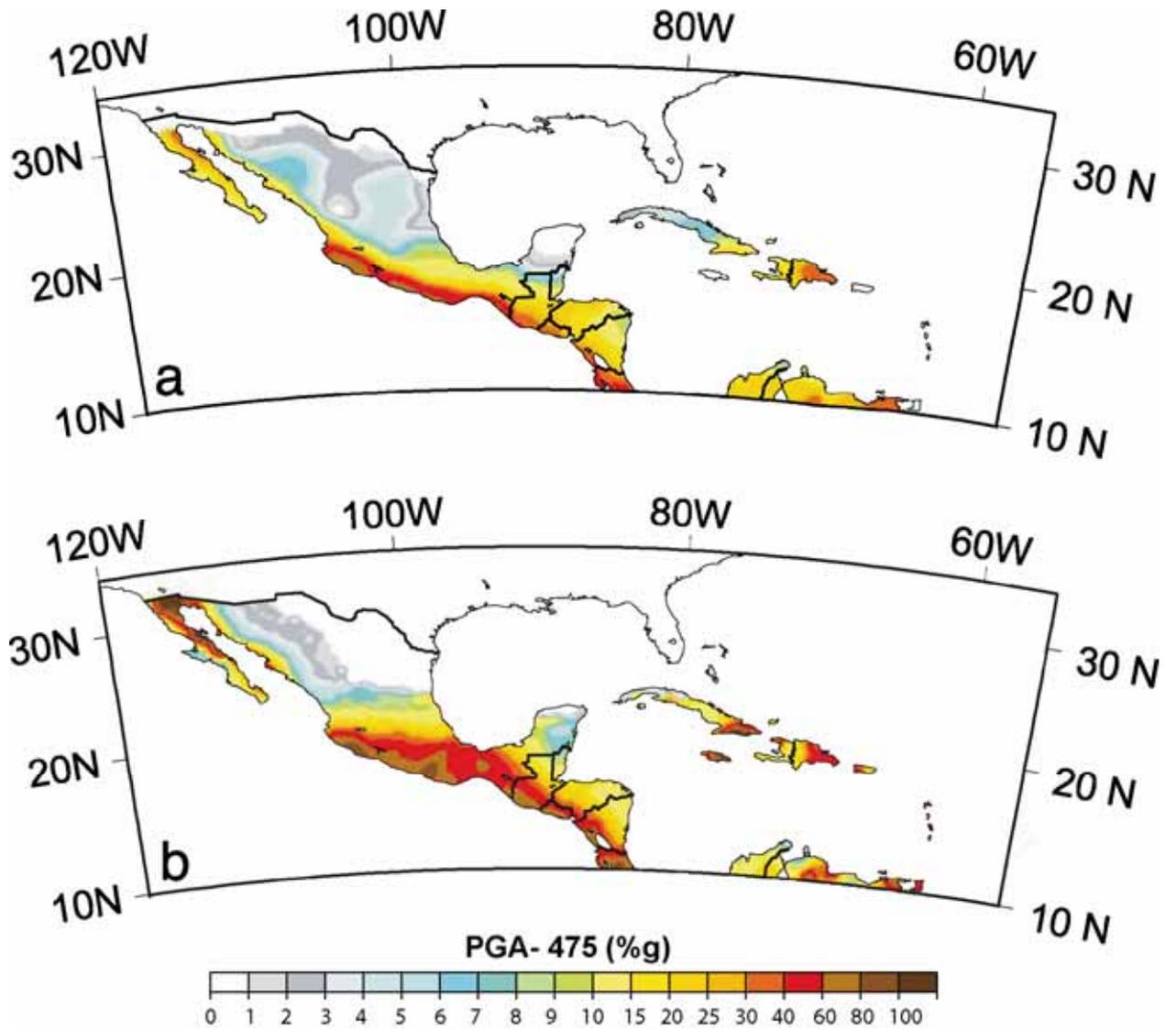


Fig. 4.3- Mapa de aceleraciones horizontales máximas (en % de g) referidas a roca obtenidos por: a- Shedlock y Tanner (1999) para el mapa mundial de peligrosidad sísmica (GSHAP, Giardini et al., 1999) y b- Tanner y Shedlock (2004).

Anexo II

**FORMULACIÓN GENERAL DEL CÁLCULO DE AFECTACIONES A LA
VIDA Y LA SALUD DE LAS PERSONAS POR LOS TERREMOTOS**

A n e x o I I

II. 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, α) – 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.

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.

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.

$p(m | T, \alpha)$, $p(h | T, \alpha)$ - 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:

$$p(m | T, \alpha) = \sum_G p(m | G, T) \cdot MPD(G | T, \alpha) \quad (a.1)$$

$$p(h | T, \alpha) = \sum_G p(h | G, T) \cdot MPD(G | T, \alpha) \quad (a.2)$$

$p(m | \alpha)$, $p(h | \alpha)$ - 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.

$$p(m | \alpha) = \sum_T p(T) \cdot p(m | T, \alpha) = \sum_T p(T) \cdot \sum_G p(m | G, T) \cdot MPD(G | T, \alpha) \quad (a.3)$$

$$p(h | \alpha) = \sum_T p(T) \cdot p(h | T, \alpha) = \sum_T p(T) \cdot \sum_G p(h | G, T) \cdot MPD(G | T, \alpha) \quad (a.4)$$

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:

$$N(m | \alpha) = \sum_T N(T) \cdot \sum_G p(m | G, T) \cdot MPD(G | T, \alpha) \quad (a.5)$$

$$N(h | \alpha) = \sum_T N(T) \cdot \sum_G p(h | G, T) \cdot MPD(G | T, \alpha) \quad (a.6)$$

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 $I \geq V$).

$$N(m) = \sum_I N(m | I) \quad (\text{a.7})$$

$$N(h) = \sum_I N(h | I) \quad (\text{a.8})$$

donde $N(m|I)$ y $N(h|I)$ se obtienen evaluando a.5 y a.6 para $a = I$. Las fórmulas a.2, a.4, a.6 y a.8 también son válidas para las 3 categorías de heridos (S1, S2, S3) mencionadas.