

Proyecto

“Peligrosidad y riesgo sísmicos en Cuba y las regiones circundantes”

Tarea 2

Peligrosidad sísmica, principios y herramientas (2015)

Proyecto de colaboración CENAIIS – NORSAR. En esta tarea participó por NORSAR Conrad Lindholm en la actividad principal. Las otras 3 actividades en que no participó fueron preparatorias de datos y de procesamiento de resultados obtenidos con el programa CRISIS. Se confeccionaron 4 informes en español, y solo uno en inglés (el de la actividad principal, que fue objeto de una publicación posterior – BSSA, vol 107, pp. 229-239)

Indice

Informe principal confeccionado como final de tarea	2
Catálogo de terremotos de Cuba y regiones aledañas 1502-2012	94
Programas para el procesamiento de los resultados de árbol lógico obtenidos con el programa CRISIS	120
Sistema de aplicaciones web para sismólogos	131

Proyecto
**“Peligrosidad y riesgo sísmicos en Cuba y las regiones
circundantes”**

Tarea 2: Peligrosidad sísmica, principios y herramientas

Informe principal confeccionado como final de tarea

Autores: Leonardo Alvarez, Madelín Villalón, Conrad Lindholm

Noruega y Cuba, 2015

Nota: El informe que se adjunta es una traducción del original en inglés que se confeccionó como informe de tarea. Solo se le han realizado pequeños cambios para corregir errores detectados en el proceso de discusión en el CENAIIS.

Peligrosidad sísmica para Cuba



Reporte

CENAI, NORSAR

Autores: Leonardo Alvarez, Madelín Villalón, Conrad Lindholm

Noruega y Cuba, 2015



Indice

Resumen.....	4
1 Presentación.....	4
2 Enfoque técnico de la estimación de la probabilidad sísmica probabilística	4
2.1 Metodología del análisis de la probabilidad sísmica determinística	6
2.2 Algunos pasos en el análisis.....	9
2.3 El uso de la relación modificada de Gutenberg-Richter	11
3 Contexto sismotectónico.....	15
4 Actividad sísmica histórica.....	20
4.1 Terremotos mas fuertes sentidos en Cuba.....	21
4.2 Otros terremotos de intensidad VII con daños significativos.....	25
4.3 Terremotos fuertes en La Española.....	26
4.4 Terremotos en Cuba y sus alrededores. Catálogos recientes.....	26
5 Estudios de peligrosidad anteriores.....	28
5.1 Los trabajos del IGA-CENAI.....	28
5.2 El mapa de peligrosidad sísmica global del GSHAP.....	32
6 Geología de Cuba y zonas aledañas.....	33
7 Sismicidad de Cuba.....	38
7.1 El catálogo de terremotos.....	39
7.1.1 Intervalos de completitud del catálogo.....	49
7.1.2 Parámetros de recurrencia.....	51
8 Zonación.....	54
8.1 Zonación grosera; 9 “zonas madre”	54
8.2 Zonación fina; 39 “zonas hijas”	56
8.3 El modelo de fallas activas.....	57
8.4 El modelo de la sismicidad en celdas.....	59
9 Obtención de los parámetros de la recurrencia de terremotos.....	61
9.1 Fuentes en forma de áreas.....	61
10 Selección de las relaciones de atenuación.....	63

11 El modelo computacional.....	66
11.1 Los modelos en forma de áreas.....	66
11.2 El modelo de fallas.....	69
11.3 El modelo de celdas.....	70
12 Resultados.....	71
13 Conclusiones.....	80
Agradecimientos.....	82
Referencias.....	82
Anexo 1.....	89
Anexo 2.....	90

Resumen

Hemos obtenido un nuevo modelo de peligrosidad sísmica para Cuba basado en el cálculo de un árbol lógico. Se prepararon 4 ramas principales y 4 subramas. Las principales consisten en un modelo de zonación general, un modelo de zonación detallada, un modelo de fallas y un modelo de sismicidad distribuida usando modelos de recurrencia poissoniana generalizada. Para cada una de las 4 ramas principales existen 4 subramas que corresponden a 4 combinaciones diferentes de relaciones de atenuación.

Todas las 16 ramas del árbol lógico han sido combinadas en varias variantes de pesos arrojando resultados algo menores que el 30% de g para un 10% de probabilidad de excedencia. Estos resultados son comparables con los obtenidos en investigaciones anteriores (García, 2007), pero menores que los resultados del GSHAP que cubren todo el mundo. Los nuevos resultados se apartan de los mapas usados en el código de construcciones antisísmicas (Norma Cubana, 1995) en lo que respecta a la distribución geográfica del peligro.

Al igual que los estudios anteriores, éste también caracteriza al sur de Cuba como la zona más peligrosa del país.

1 Presentación

El NORSAR de Noruega y el CENAIIS de Cuba de forma conjunta con la Universidad de Bergen y SWECO han cooperado desde 2012 en un proyecto dirigido a cartografiar y eventualmente reducir, el riesgo sísmico en Cuba. El proyecto tiene varios componentes, uno de los cuales es la evaluación de la peligrosidad sísmica que se reporta a continuación.

2 Enfoque técnico de la estimación de la probabilidad sísmica probabilística

La estimación de la peligrosidad sísmica probabilística (PSHA - siglas de su nombre en inglés que se usarán en el resto de este informe) parte del trabajo clásico de Cornell (1968). La peligrosidad sísmica es definida aquí como la probabilidad anual de excedencia de las

oscilaciones del terreno que puede ser expresada en términos del período de retorno a través de la relación siguiente:

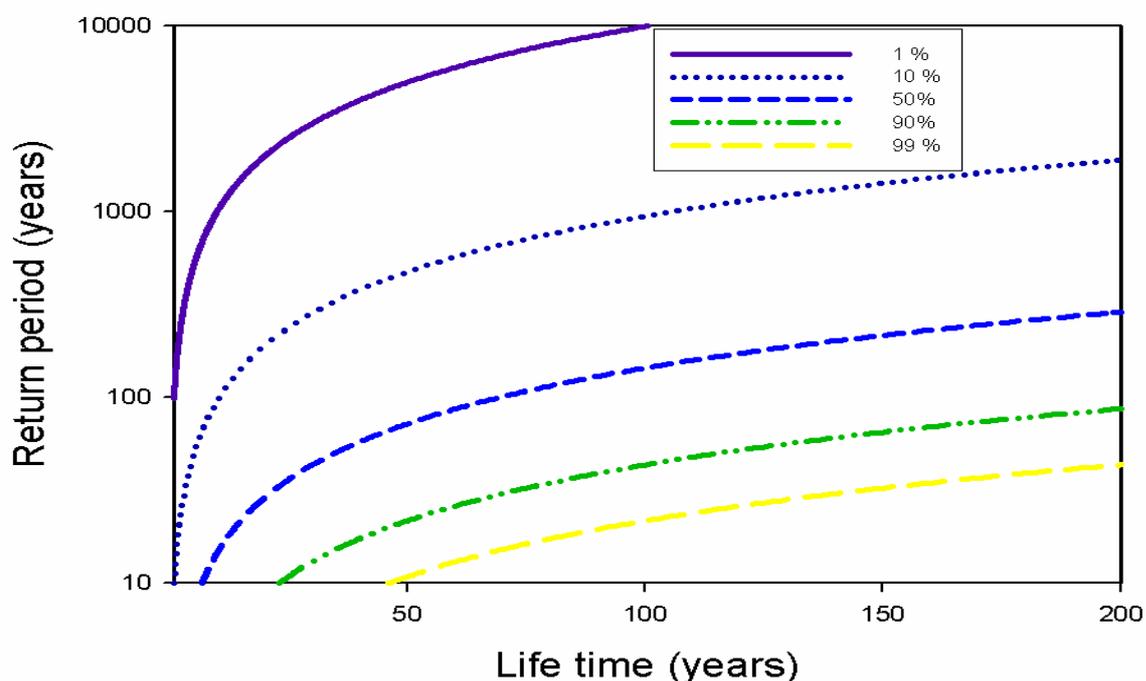


Figura 2.1. Relación entre el período de retorno (inverso de la probabilidad anual de excedencia), tiempo de vida útil (o período de interés y probabilidad deseada de excedencia (leyenda) durante el período de interés (Reiter, 1990).

La selección del nivel apropiado de riesgo es esencialmente una cuestión de las consecuencias de fallo. El nivel de riesgo es generalmente especificado lo mismo como la probabilidad anual de excedencia que como la probabilidad de excedencia durante el tiempo de vida útil de la estructura.

La discusión de los niveles de riesgo se basa en la siguiente conexión entre el período de retorno T_R y el tiempo de vida T , donde P es la probabilidad anual de excedencia.

$$T_R = \frac{-T}{\ln(1 - P(Z > z))}$$

Si por ejemplo, el tiempo de vida esperado de una estructura es $T = 200$ años, y se requiere un 95% de probabilidad de no excedencia (5% de probabilidad de excedencia), entonces este

requerimiento de seguridad corresponde a un período de retorno $TR = 3900$ años, o a una probabilidad de excedencia anual equivalente de $3 \cdot 10^{-4}$.

2.1 Metodología del análisis de la probabilidad sísmica determinística

Es bien conocido que las incertidumbres son esenciales la definición de todos los elementos que entran en un análisis de peligrosidad sísmica. En particular debido a que las incertidumbre frecuentemente sesgan los resultados, sobre todo para las bajas probabilidades de excedencia. Como se puede imaginar, esto puede conducir algunas veces a elecciones difíciles para los tomadores de decisión. Las soluciones racionales a los dilemas planteados por la incertidumbre pueden estar basadas en la utilización de alguna forma de análisis de probabilidad sísmica probabilística. En contraste con el análisis determinístico típico que (en su forma más simple) hace uso de eventos discretos univaluados para llegar a la descripción requerida de la peligrosidad sísmica, el análisis probabilístico permite el uso de parámetros multivaluados o continuos de los modelos. Lo más importante es que la probabilidad de ocurrencia de terremotos de diferente magnitud o intensidad se incluye en el análisis. Otra ventaja del análisis de la peligrosidad sísmica probabilística es que resulta en un estimado de la verosimilitud de movimiento del terreno debido a terremotos u otras medidas del daño que ocurre en el lugar de interés. Esto permite una incorporación más sofisticada de la peligrosidad sísmica en los estimados de riesgo sísmico; los estimados de probabilidad sísmica probabilística pueden ser expandidos para el riesgo sísmico.

La metodología usada en la mayoría de los trabajos de estimación de la peligrosidad sísmica probabilística (PSHA) fue definida inicialmente por Cornell (1968). Hay 4 pasos básicos para la PSHA:

- **Paso 1.** Definición de las fuentes de terremotos. Estas pueden variar entre pequeñas fallas hasta grandes provincias sismotectónicas con sismicidad uniforme.
- **Paso 2.** Definición de la recurrencia de la sismicidad en las fuentes. Donde cada fuente se describe por una distribución de probabilidad de ocurrencia de terremotos o una relación de recurrencia. Dicha relación de recurrencia indica el chance de que un terremoto de una medida dada

ocurra en cualquier lugar dentro de la fuente durante un intervalo temporal específico. Un terremoto máximo o un límite superior a la medida de los terremotos se elige para cada fuente, el cual representa el evento máximo a ser considerado. Debido a que esos terremotos se asume que ocurren en cualquier lugar dentro de la fuente de terremotos, la distancia desde desde todas las posibles localizaciones dentro de dicha fuente debe ser considerada.

- **Paso 3.** Estimación del movimiento del terreno como función de la magnitud, la distancia y el período, donde el rango de la medida de los terremotos considerados requiere una familia de curvas de atenuación o de predicción del movimiento del terreno, cada una de ellas relacionada con un parámetro particular del movimiento del terreno, como la la aceleración pico o la espectral del terreno.
- **Paso 4.** Determinación de la peligrosidad en el lugar, la cual es sustancialmente diferente a al procedimiento usado en llegar a una estimación determinística. En este caso los efectos de todos los terremotos de e diferente medida y que ocurren en localizaciones diferentes dentro de fuentes diferentes con diferentes probabilidades de ocurrencia, son integrados en una curva que muestra la probabilidad de exceder diferentes niveles del nivel del movimiento del terreno (como la aceleración pico) en el lugar durante un período específico. Esto, con algunas asunciones puede ser escrito como:

$$E(Z) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \int_{m_o}^{m_u} \int_{r=0}^{m_a} f_i(m) f_r(r) P(Z > z | m, r) dr dm$$

done $E(Z)$ es el número esperado de excedencias del movimiento del terreno de un nivel z durante un período específico t , α_i es la tasa media de ocurrencia de los terremotos entre unas magnitudes límite inferior y superior (m_o y m_u), $f_i(m)$ es la distribución de la densidad de

probabilidad dentro de la fuente I , $f_i(r)$ es la distribución de la densidad de probabilidad de la distancia epicentral entre varias localizaciones dentro de la fuente I y el lugar para el que se estima la peligrosidad, mientras que $P(Z > z | m, r)$ es la probabilidad que un terremoto dado de magnitud m y distancia epicentral r exceda un nivel de movimiento del terreno de z .

Se asume usualmente que cuando se lleva a cabo un a PSHA, los terremotos se distribuyen según la FD de Poisson y por tanto no tienen memoria; esto implica que los terremotos fuertes ocurran independientemente de cualquier otro terremoto.

Uno de los mas importantes desarrollos recientes de la PSHA corresponde al modelado de las fuentes. Originalmente, las fuentes sísmicas eran burdamente representadas por fuentes lineales (Cornell, 1968) y después por zonas en forma de áreas que podían ser estrechadas para representar la emergencia superficial de las fallas como en en el programa EQRISK de McGuire (1976). Un modelo mejorado, que incluye los efectos de la ruptura de la falla, fue propuesta por Der Kiureghian y Ang (1977), y en forma modificada implementado por McGuire (1978) en su programa de modelación de fallas FRISK, escrito como un suplemento a su programa anterior, y muy popular, EQRISK de fuentes en forma de áreas.

Mientras que la práctica estándar fue por largo tiempo la de presentar los resultados de la PSHA en términos de una curva sencilla del mejor estimado de peligrosidad, la creciente comprensión de la importancia de la variabilidad paramétrica y las tendencia a consultar la opinión de expertos sobre materias de duda científica, condujo después a la formulación de modelos bayesianos de análisis de peligrosidad (Mortgat and Shah, 1979) que busca cuantificar la incertidumbre a través de la asignación de parámetros en términos probabilísticos. Este enfoque fue después formalizado en una metodología de árbol lógico (Kulkarni et al., 1984; Youngs y Coppersmith, 1985), que representa el rango de valores de los parámetros como ramas de un árbol computacional que son pesadas individualmente y cuyas contribuciones a la peligrosidad sísmica se evalúan separadamente y se combinan estadísticamente.

En los cálculos presentes hemos aplicado el programa CRISIS (Ordaz et al., 2014, 2015). El código implementa los mismos principios probabilísticos que EQRISK, pero con una implementación ligeramente diferente de la mecánica de integración. La diferencia entre CRISIS y programas similares su interfase gráfica amigable basada en PC. Además, hemos expandido el árbol lógico tradicional para incluir también modelos de sismicidad en mallas.

2.2 Algunos pasos en el análisis

Los criterios desarrollados en este estudio, como se ha explicado se basan en técnicas de análisis probabilístico de la peligrosidad sísmica, diseñadas para incorporar las incertidumbres y cuantificar las mismas en las caracterizaciones finales de la peligrosidad (límites de confianza).

El procedimiento para identificar fuentes sísmicas potenciales en la región estudiada en el proyecto comprende:

- Una evaluación de la historia tectónica de la región a la luz de la información y datos geológicos disponibles.
- Una evaluación de la sismicidad histórica y de los datos instrumentales recientes de la región con enfatizando que esos datos son la base primaria para conducir un análisis de peligrosidad sísmica.

El estudio presente está construido en el conocimiento y la experiencia dentro del campo del desarrollo de criterios sísmicos para numerosos sitios en ambientes tectónicos diferentes, asegurando por tanto que los resultados son comparables a gran escala.

Este enfoque requiere los siguientes pasos básicos:

- **Geología:** El enfoque general aquí es revisar la información geológica relevante disponible con vistas a localizar y caracterizar estructuras geológicas activas y potencialmente activas. Sin embargo, como la presencia de una gran falla no siempre implica una fuente potencial de terremotos, las fallas son consideradas como potencialmente activas solo si han experimentado una ruptura relativamente reciente.
- **Sismología:** Un análisis de peligrosidad sísmica debe basarse tanto en la historia, tanto geológica como sismológica, incluyendo las sismicidades reciente e histórica, complementadas con información paleosismológica si está

disponible. Esencialmente la calidad de este trabajo depende de la calidad del catálogo de terremotos utilizados.

- **Sismotectónica:** La información sismológica y geológica se usa para definir modelos para las fuentes potenciales de terremotos que pueden influenciar la peligrosidad en un lugar. Los aspectos fundamentales de la caracterización de la fuente son modelar fuentes en forma de áreas basadas en la historia geológica de la región en general y de la ocurrencia de terremotos en particular, así como modelar fuentes de fallas específicas con geometría tridimensional si está disponible tal información.
- **Modelos del movimiento del terreno:** Un estudio actual de peligrosidad sísmica requiere la disponibilidad de modelos de movimiento del terreno (atenuación) para la aceleración pico y la aceleración espectral en el rango de frecuencia de interés ingenieril. Esencialmente, tal relación se usa para predecir el movimiento del terreno para una magnitud específica a una distancia dada de la fuente.
- **Modelo computacional:** Los cálculos actuales de peligrosidad sísmica se basan en una contribución probabilística integrada al movimiento del terreno de fuentes areales o de fallas específicas, modificada por la atenuación de ondas sísmicas. Las incertidumbres de algunos de los parámetros iniciales se consideran en los cálculos.
- **Peligrosidad sísmicas y resultados de carga:** La relación entre un rango de niveles de movimiento del terreno y la probabilidad de excedencia anual asociada (curva de peligrosidad) se establece a través de valores medios para cada frecuencia. Un elemento esencial aquí es que los criterios de carga sísmica pueden ser evaluados en términos de espectros de igual probabilidad. Esto significa que cada frecuencia es evaluada de forma independiente y con su propio estimado de incertidumbre. Los criterios de carga sísmica son desarrollados específicamente para afloramientos rocosos (lugares sin suelo).

La peligrosidad sísmica es un cálculo empírico en el cual los datos complejos e incompletos de varias fuentes observacionales se cuantifican en un modelo computacional. Debido a la diversidad de las fuentes y a la incertidumbre de algunos parámetros derivados is

habitual usar un árbol lógico con pesos que reflejen la confianza del modelo usado. Esto es incluso más importante porque la peligrosidad sísmica permite predecir movimientos del terreno futuros basada en datos pasados. En este estudio nosotros hemos aplicado el cálculo por árbol lógico.

2.3 El uso de la relación modificada de Gutenberg-Richter

Desde los trabajos originales de Gutenberg y Richter sobre la relación magnitud - frecuencia de los terremotos, numerosos investigadores han propuesto diferentes variantes de como puede ser aplicada esta relación en PSHA. En el presente trabajo hemos usado un enfoque desarrollado por Alvarez (1985). Este enfoque está basado en dos hipótesis:

1. La ley exponencial de Gutenberg-Richter es válida para una "densidad de ocurrencia de terremotos" (Utsu, 1971)
2. La existencia de una M_{max} fuerza una curvatura hacia abajo en las frecuencias acumulativas según nos aproximamos a M_{max} (Cosentino et al., 1977).

Sea $n(m)$ la densidad de ocurrencia de terremotos, entonces $n(m)dm$ es la cantidad de terremotos en el intervalo $[M-dM/2$ a $M+dM/2]$. Esta generalización matemática de un proceso discreto en forma de una función continua es muy conveniente para resolver integrales de la forma

$$N(\Delta M) = \int_{\Delta M} n(M) \cdot dM$$

la cual es la forma apropiada para usar en PSHA. La forma general de la ley de Gutenberg-Richter es entonces:

$$\begin{aligned} n(M) &= 10^{a-b(M-M_0)} & M &\leq M_{max} \\ n(M) &= 0 & M &> M_{max} \end{aligned}$$

la cual es comúnmente representada como:

$$\lg [n(M)] = \lg (A^*) - b \cdot (M - M_0)$$

Se asume que el valor de $n(M)$ está normalizado en tiempo (normalmente anual). Algunos autores prefieren llamarlo "tasa". Se puede hacer una normalización espacial (una práctica común en la escuela soviética). El valor M_0 es una magnitud de referencia a la cual es conveniente referirse como tasa de actividad. En la escuela soviética la misma es llamada "actividad sísmica" (Riznichenko, 1959).

La forma mas común de estudiar la ley de Gutenberg-Richter es construir las variantes distributiva y acumulativa de gráfico. El gráfico distributivo se construye contando los terremotos en intervalos de ancho ΔM y el acumulativo mediante la suma de esos valores desde un intervalo hasta el último. En cualquier caso, usando este modelo, esos gráficos son el resultado de integrar la densidad entre límites finitos:

$$N(M_1, M_2) = \int_{M_1}^{M_2} 10^{\alpha - b(M - M_0)} \cdot dM = \frac{10^{\alpha + bM_0}}{b \cdot \ln 10} [10^{-bM_1} - 10^{-bM_2}]$$

a) Gráfico distributivo

Los terremotos se cuentan dentro de intervalos de ancho ΔM y ese valor se asigna al valor central de M dentro del intervalo: (N_i, M_i) donde $N_i = N(M_i - \Delta M/2, M_i + \Delta M/2)$. Sustituyendo dichos límites en la fórmula anterior se obtiene:

$$N(M_i) = 10^{\alpha - b(M_i - M_0)} \cdot [10^{b \cdot \Delta M/2} - 10^{-b \cdot \Delta M/2}] / (b \cdot \ln 10)$$

Denominemos por F a la parte derecha de la relación anterior:

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

En principio ΔM puede variar de un intervalo a otro, en cuyo caso tendríamos $F(b, \Delta M_i)$, pero esto no es común. Se puede demostrar que para pequeños ΔM se cumple:

$$F(b, \Delta M_i) \approx \Delta M_i$$

Considerando esta aproximación y normalizando por los tiempos de completitud T_i , es fácil ver que el gráfico distributivo puede ser usado para estimar los parámetros "a" y "b" del modelo, realizando una regresión del conjunto $\{ M_i, \lg[N(M_i)/(T_i \cdot \Delta M_i)] \}$.

b) Gráfico acumulativo

Como el gráfico se construye sumando los terremotos del primero al último intervalo, la integral se calcula desde el límite izquierdo del primer intervalo hasta M_{\max} . Llamémosle $N_{\Sigma}(M)$:

$$N_{\Sigma}(M) = 10^{\alpha - b(M - M_0)} / (b \cdot \ln 10) \cdot 10^{b \cdot \delta} \cdot \left\{ 1 - 10^{-b(M_{\max} - M + \delta)} \right\}$$

donde $\delta = \Delta M/2$. Esta fórmula se ajusta a los datos experimentales para las frecuencias acumulativas. Si queremos considerar el caso en el cual la integral se obtiene en el intervalo $N(M, M_{\max})$, la fórmula anterior se transforma en:

$$N_{\Sigma}^*(M) = 10^{\alpha - b(M - M_0)} / (b \cdot \ln 10) \cdot \left\{ 1 - 10^{-b(M_{\max} - M)} \right\}$$

En el enfoque común Esteva-Cornell para la PSHA, la ley de Gutenberg-Richter se expresa en términos de una función de densidad de probabilidad (fdp) del valor $\lambda = N_{\Sigma}^*(M_{\min})$. Para obtener la fdp a partir de este modelo consideremos que:

$$P(m \geq M) = N_{\Sigma}^*(m \geq M) / N_{\Sigma}^*(M_{\min})$$

La función de distribución (FD) correspondiente será:

$$F_M(M) = P(M > m) = 1 - P(m \geq M) = \frac{10^{-bM_{\min}} - 10^{-bM}}{10^{-bM_{\min}} - 10^{-bM_{\max}}}$$

mientras que la función de densidad de probabilidad será:

$$f_M(M) = \frac{dF_M(M)}{dM} = \frac{(b \cdot \ln 10) \cdot 10^{-bM}}{10^{-bM_{\min}} - 10^{-bM_{\max}}}$$

Considerando que $\beta = b \cdot \ln(10)$ y $10^b = e^\beta$ se obtiene:

$$f(M) = \begin{cases} \frac{\beta \cdot e^{-\beta(M)}}{\{1 - e^{-\beta(M_{\max} - M_{\min})}\}} & M_{\min} \leq M \leq M_{\max} \\ 0 & M > M_{\max} \end{cases}$$

En la última fórmula se simplifica la dependencia de M_0 .

Esto en principio conduce a una forma funcional consistente con los requerimientos estadísticos y una función de distribución como se muestra en la Fig. 2.2.

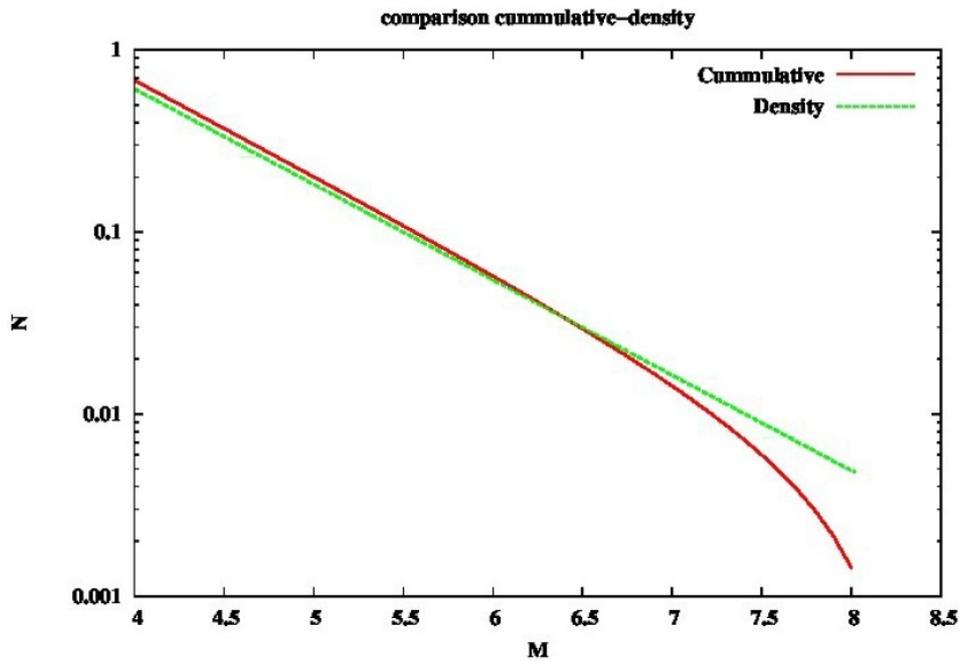


Figura 2.2. Relación entre la densidad simple de la ocurrencia por magnitud y la relación acumulativa modificada de Gutenberg-Richter.

El proceso general de como se origina a partir de la densidad de ocurrencia de terremotos y es usado después para la cuantificación se muestra en la Fig. 2.3.

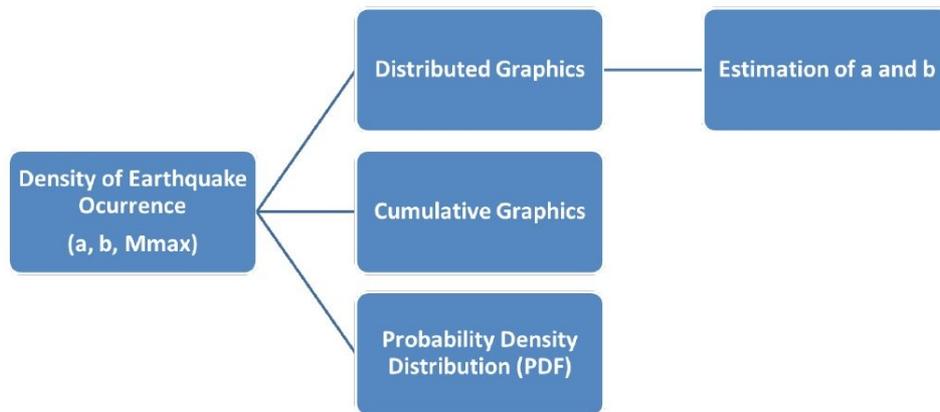


Figura 2.3. Relación entre la densidad de ocurrencia de terremotos en magnitud y los gráficos distributivo y acumulativo, así como la estimación de los parámetros "a" y "b" son estimados a partir del gráfico distributivo.

3 Contexto sismotectónico

Cuba está ubicada al norte del borde sur de la placa Norteamericana. La parte sur de Cuba bordea la placa del Caribe

con influencia desde la estructura principal que rodea el norte de la placa del Caribe según se muestra en la Fig 3.1.

Geodynamic context of the Caribbean and seismics

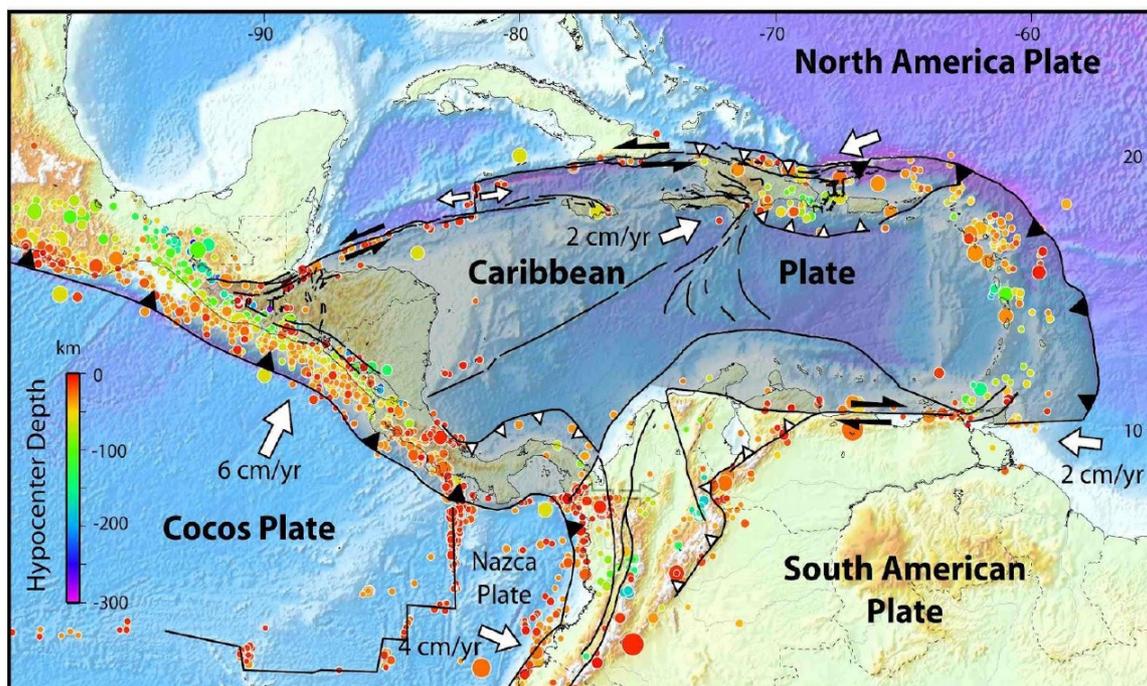


Figura 3.1. Contexto sismotectónico del Caribe y Cuba mostrando también las características fundamentales.

Mientras que la isla de Cuba se caracteriza por una actividad sísmica de baja a moderada, su parte sur está fuertemente influenciada por la tectónica reflejada en la Fig. 3.2. La falla Oriente corre al sur de Cuba y delinea una depresión profunda que puede ser subdividida en 5 segmentos como se indica en la Fig 3.2. El tipo de deformación sísmica transita desde inversa/subducción y transpresión en el este hacia corrimiento por el rumbo y transpresión en el oeste. En este sentido Arango (1996) identifica 4 sectores bien diferenciados al sur de Cuba: Cabo Cruz (transtensión), Pilón (corrimiento por el rumbo puro), Oriente (extensión) and Santiago (transpresión).

Más específicamente el margen sur de Cuba está en contacto con la microplaca Gonave propuesta inicialmente por Rosencrantz y Mann, (1991), y confirmada por DeMets y Grandison, (2007) a través del análisis de series de mediciones GPS en Jamaica. La microplaca de Gonave está limitada por el centro de expansión de Caimán al

oeste, la zona de fallas Oriente al norte, las zonas de fallas de Walton y Enriquillo al sur y La española central al este.

A una escala regional el régimen tectónico al sur de Cuba está gobernado por el movimiento relativo entre la placas de Norteamérica y el Caribe, mientras que a una escala mas local la interacción de la microplaca de Gonave entre las placas de Norteamérica y el Caribe influencia el régimen tectónico de Cuba, Jamaica y el occidente de La Española.

La característica tectónica fundamental hacia el sur de Cuba suroriental es la falla Oriente (Fig. 3.3); una falla transformante siniestra que domina la actividad sísmica en esa parte del país. De acuerdo a Calais y Lepinay (1991), la misma tiene una traza discontinua y algunas cuencas de tipo pull-apart se localizan entre los segmentos de falla (cuencas de Cabo Cruz, Chivirico y Baitiquirí).

La cuenca de Cabo Cruz es muy activa, tiene una sismicidad somera pronunciada y está dominada por fallas normales con pequeñas componentes de corrimiento por el rumbo. Otras estructuras que forman la falla Oriente son la Fosa de Oriente y el Cinturón Deformado de Santiago, características de deformación compresiva subparalelas al sur de la estructura fundamental Oriente. El Cinturón Deformado de Santiago es también una estructura tectónica muy activa donde ha sido observada sismicidad profunda.

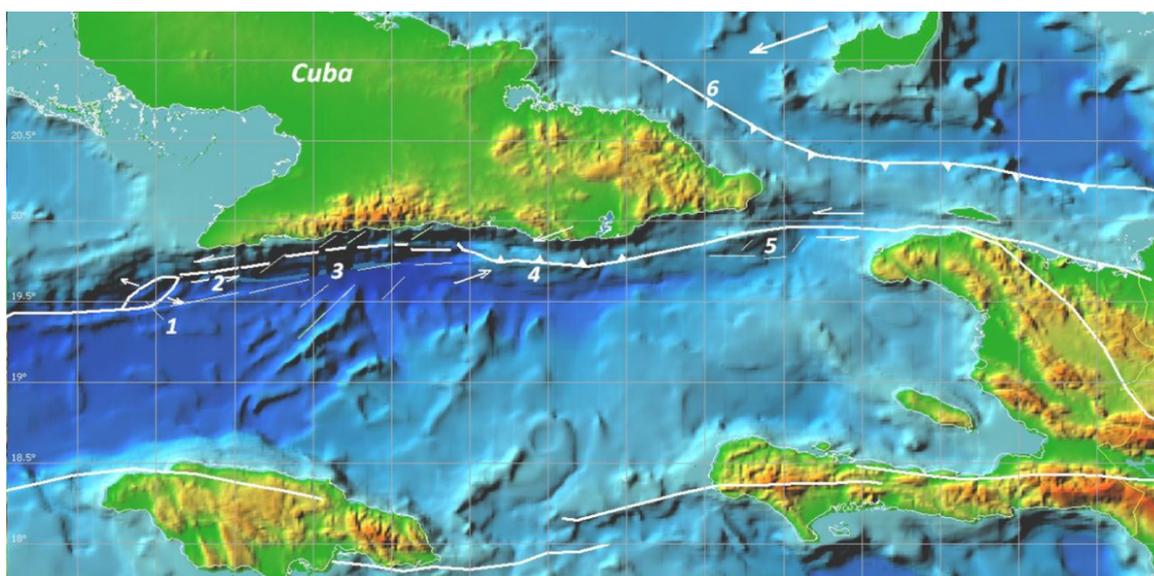


Figura 3.2. Contexto sismotectónico de Cuba suroriental, La Española y Jamaica: 1 cuenca de pull-apart de Cabo Cruz, 2 corrimiento por el

rumbo puro, fosa de Oriente, Cinturón Deformado de Santiago (transpresión), 5 Cuenca de San Nicolás (transtensión). Según Arango (1996).

La Figura 3.3 evidencia la sismicidad y otras características principales. La depresión de Puerto Rico constituye una zona de subducción que también produce terremotos tsunamogénicos. Los tsunamis han sido experimentados en el norte de La Española en particular, pero también en varias localidades del triángulo Jamaica-Haití-Cuba. Aunque la depresión de Puerto Rico es activa, es en particular la falla Septentrional que corre parcialmente en tierra al norte de La Española (antes de transformarse en la falla Oriente) la que deviene muy activa.

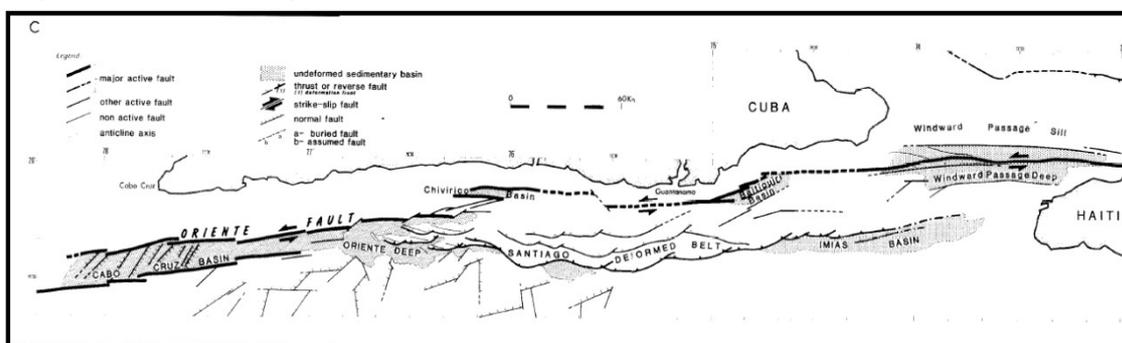


Figura 3.3. Principales características tectónicas en Cuba suroriental (Calais y Lepinay, 1991).

La Fig. 3.4 (tomada de Calais et al., 2012) muestra también la sismicidad y se pueden observar dos características en la distribución geográfica:

- Una actividad aparentemente reducida en la región donde la falla septentrional se encuentra con la falla Oriente. Se puede plantear la cuestión de si esta es una característica natural y consistente o si grandes terremotos transpresoriales en esta región pueden estar precedidos por extensos períodos de silencio.
- El agrupamiento de terremotos en la cuenca de Cabo Cruz y en Cinturón Deformado de Santiago Deformed Belt. (ver Fig. 3.4)

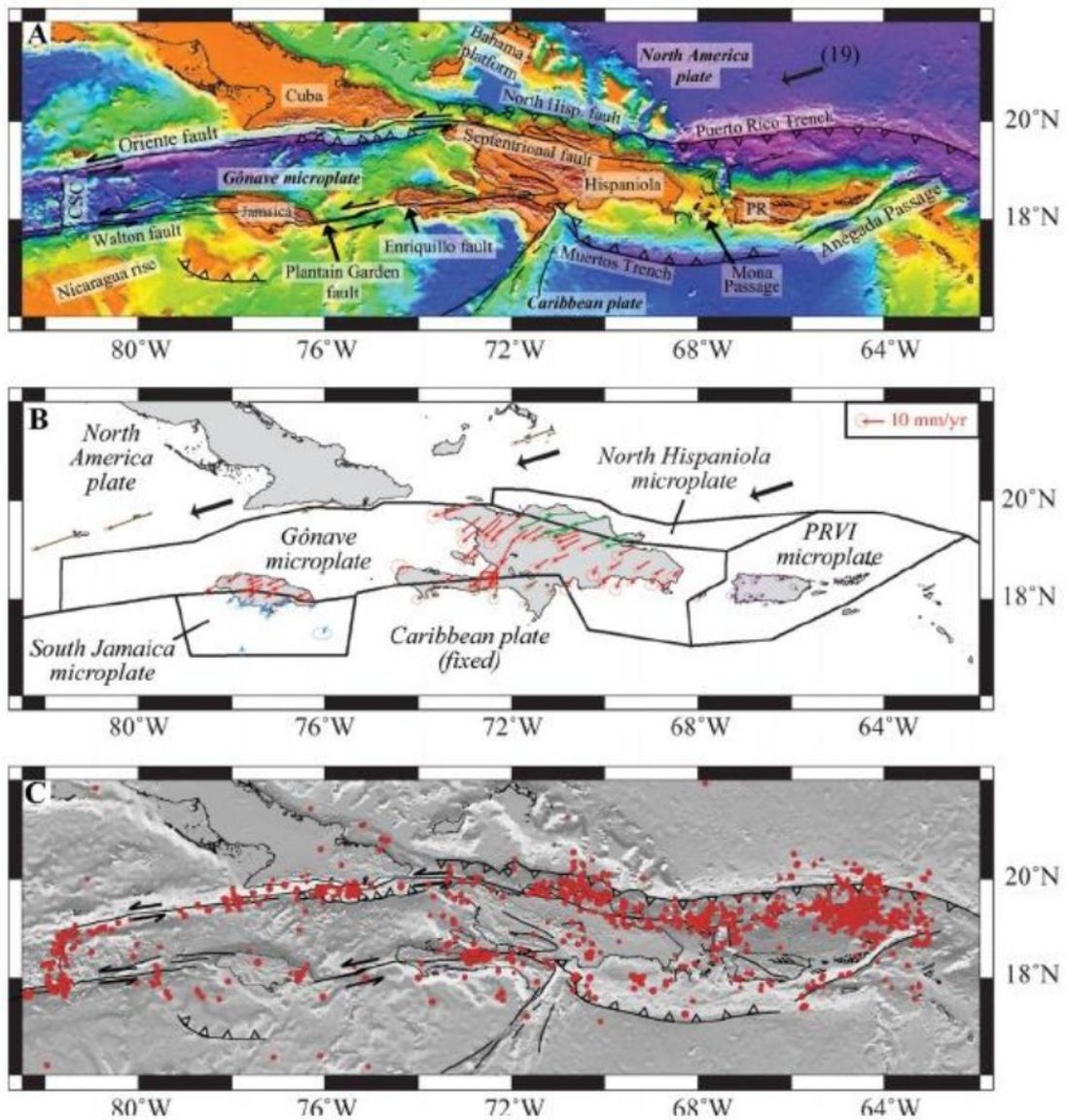


Figura 3.4. Contexto sismotectónico de Cuba suroriental, La Española y Jamaica. Tomado de Bendford et al. 2012.

Para Jamaica (Fig. 3.5), existe una gran tendencia a un fallamiento de corrimiento por el rumbo (Grandison y Atakan, (2005). La parte central de la isla es atravesada por el borde sur de la microplaca Gonave, lo cual crea una situación tectónica compleja. Los principales sistemas de falla son el Walton en el mar hacia el oeste, el Rio Minho - Crawle River en Jamaica central, el Duanvale en Jamaica norte, el South Coastal en Jamaica sur y el Plantain Garden hacia el este, el cual está conectado con la falla Enriquillo en La Española.

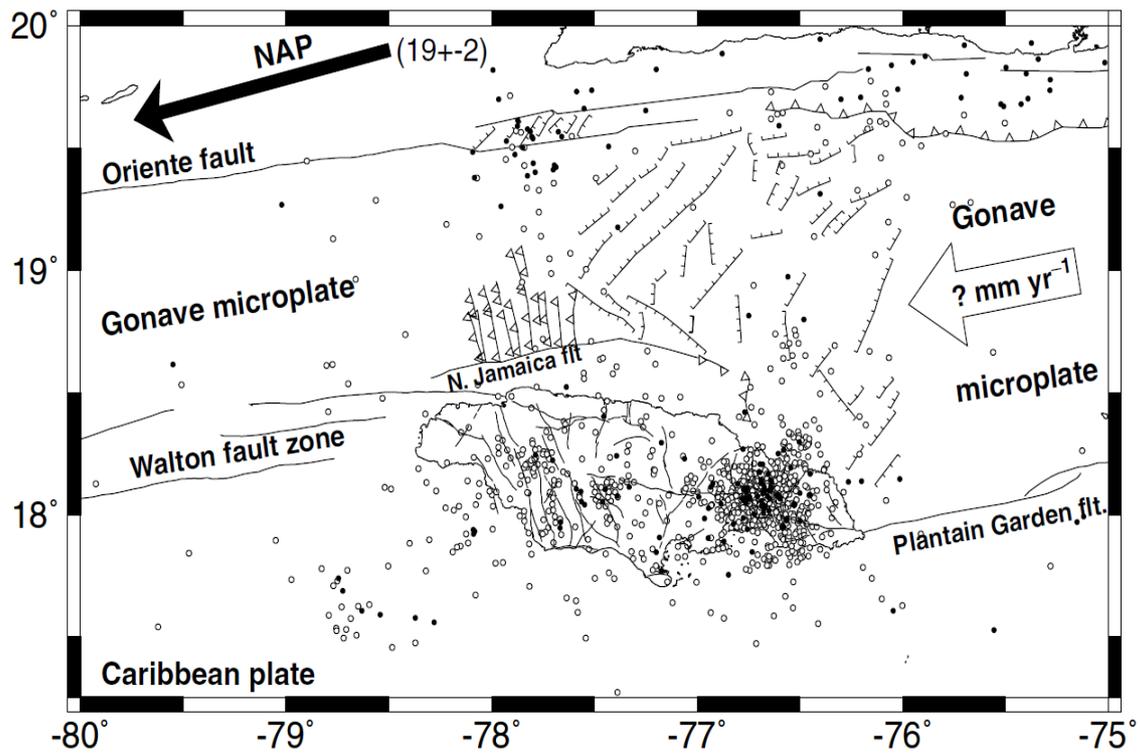


Figura 3.5. Principales estructuras marinas y terremotos alrededor y al norte de Jamaica. Tomado de DeMetz y Wiggins-Grandison (2007).

4 Actividad sísmica histórica

El conocimiento de la sismicidad en las Antillas Mayores comienza con el arribo de los colonizadores españoles. El primer reporte de un terremoto data de 1502 en la isla de La Española. En Cuba el primer terremoto reportado afectó la villa de Baracoa en 1528. Con la ampliación de la colonización hacia otras partes de la isla se reportaron varios terremotos (Bayamo, 1551, Santiago de Cuba, 1578 y otros). La ciudad de Santiago de Cuba es la que históricamente ha sido más afectada por terremotos en Cuba.

Hasta finales del siglo 19 Santiago de Cuba ha sufrido daños por 2 terremotos con intensidad IX (MSK), 4 con intensidad VIII y 8 con intensidad VII (Chuy, 2000). En la figura 4.1 se muestran los epicentros de los terremotos ocurridos entre el siglo 16 y el 19 determinados a partir de datos macrosísmicos.

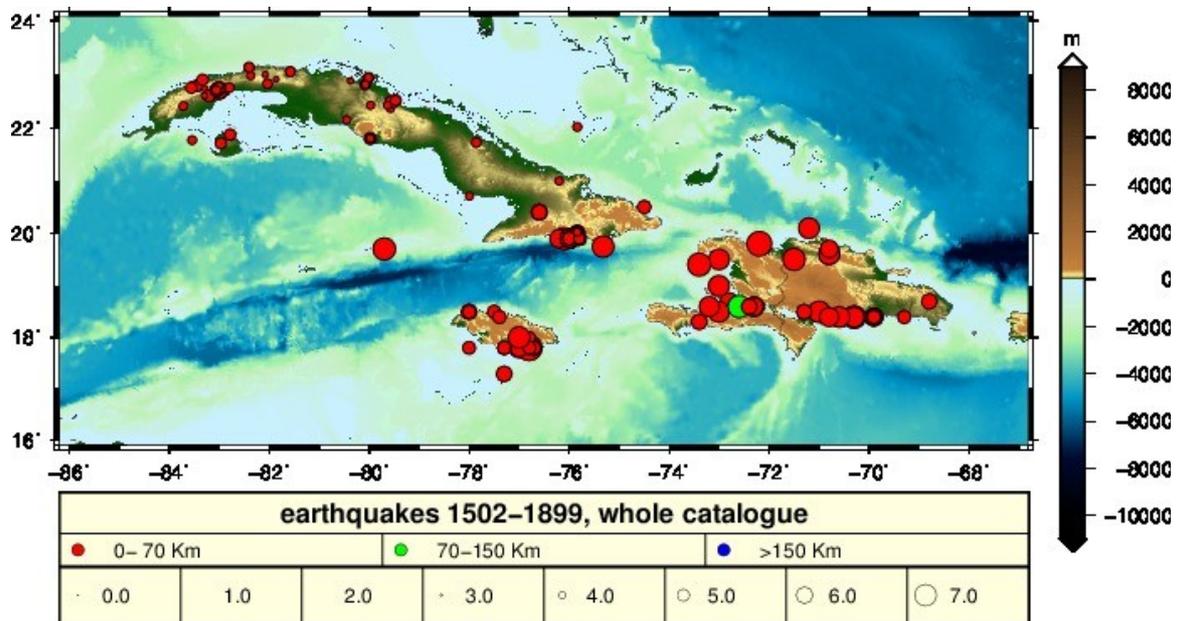


Figura 4.1. *Terremotos históricos importantes en el noroeste del Caribe.*

4.1 Terremotos mas fuertes sentidos en Cuba

En esta sección se presenta una breve descripción de los efectos y daños más significativos de los terremotos históricos fuertes (Tabla 4.1) en Cuba. Se han usado como referencia los trabajos de Chuy, (1999), Cotilla (2003), Cotilla y Córdoba, (2010) y Portuondo, (2014).

El terremoto del 18 de octubre de 1551 en Bayamo, sureste de Cuba:

ste terremoto se conoce como el terremoto de Bayamo ya que fue la villa más importante donde se reportaron las afectaciones. Luego de revisar documentos históricos (Actas Capitulares y Archivo de Indias) Chuy, (1999) y Cotilla y Córdoba, (2010) encontraron evidencias de extensos daños en Bayamo y sus alrededores. Varias personas fueron heridas, hubo daños en barracas de soldados españoles, en un hospital y en la iglesia parroquial, así como 16 casas colapsadas. El daño se extendió hacia asentamientos costeros como Niquero, Manzanillo y Cabo Cruz, como también hacia las zonas montañosas como Las Mercedes donde ocurrieron grandes caídas de rocas. También ocurrió la licuación del suelo debido a las condiciones del sitio en Bayamo, localizada en las llanuras fluviales del río Cauto. La intensidad máxima en la Escala MSK fue de IX grados en Cabo Cruz, zona epicentral, donde se reportó el volcamiento de pesados cañones.

El terremoto del 11 de febrero de 1678 en Santiago de Cuba, sureste de Cuba:

En esta época este terremoto fue conocido como “el Gran temblor”. Causó un extenso daño en la ciudad de Santiago de Cuba, donde alcanzó intensidad de VIII en la Escala MSK. Según Portuondo (2014), el impacto social negativo fue comparable con el del terremoto de 1578 que ocurrió cerca de Santiago. La iglesia de Santa Catalina, el Convento de San Francisco y la Catedral fueron dañados severamente. Las fortalezas militares, recientemente construidas, el castillo de La Estrella, la Plataforma Santa Catalina y el Castillo San Pedro de La Roca fueron destruidos parcialmente.

El terremoto del 11 de junio de 1766 en Santiago de Cuba, sureste de Cuba:

Este terremoto es considerado como uno de los eventos más fuertes que afectaron a la ciudad de Santiago de Cuba. Tuvo una intensidad de IX grados en la Escala MSK y se sintió tan lejos como en la ciudad de La Habana a 960 km de distancia. Según Cotilla, (2003), este hecho causó 34 a 40 muertes y 700 resultaron heridas en Santiago de Cuba. Algunos edificios fueron destruidos cerca de la zona epicentral, el Castillo del Morro y el Fuerte La Socapa en la entrada de la Bahía; el Castillo de San Francisco, el Hospital y la casa del Gobernador, entre otros en la zona centro. La catedral fue dañada y un número desconocido de casas se derrumbó.

El terremoto del 7 de mayo de 1842 en Cabo Haitiano, norte de Haití:

Este catastrófico terremoto tuvo una intensidad máxima de X grados en la Escala MSK en Cabo Haitiano. La zona epicentral quedó en ruinas y causó 5000 víctimas mortales. Las ciudades de Fort Liberté, Port de Paix y Mole Saint Nicolás sufrieron intensidad IX - X y quedaron en ruinas también. En la República Dominicana otras localidades fueron severamente dañadas; en Santiago de los Caballeros muchos edificios fueron dañados y alrededor de 500 personas perdieron la vida, surgieron nuevos manantiales y se observó alteraciones en el lecho de los ríos. El daño fue generalizado en ambos países y también se sintió en la villa de Baracoa, al este de Cuba, con intensidad VIII. Allí produjo grandes caídas de rocas y grietas. En Santiago de Cuba se sintió con intensidad VII. El terremoto tuvo una magnitud estimada de 8.1 y provocó un tsunami destructivo.

El terremoto del 20 de agosto de 1852 en Santiago de Cuba, sureste de Cuba:

Este terremoto también se considera uno de los eventos más fuertes que afectaron a la ciudad de Santiago de Cuba; alcanzó una intensidad máxima de VIII grados en la Escala MSK y causó gran destrucción en la ciudad y sus alrededores. Fue sentido hasta en Ciego de Ávila en el centro-este de Cuba. El daño de este terremoto fue descrito extensamente en documentos de prensa y por varios autores en Cuba y en el extranjero. Durante la sacudida, 8 iglesias fueron dañadas o se derrumbaron y la Catedral fue severamente dañada. Notablemente, el terremoto causó muy pocas muertes (2) y 200 heridos. El 85% de los edificios civiles fue afectado (todos con una pobre construcción y situados en los suelos sueltos de la ciudad). A diferencia de fuertes terremotos anteriores, las fortalezas defensivas que custodiaban la entrada de la ciudad estaban en buen estado y no fueron dañadas. Estas fueron construidas de bloques sólidos y pesados de piedra caliza. Algunas carreteras en las zonas rurales hacia las zonas costeras cercanas al epicentro fueron bloqueadas por grandes rocas. La magnitud de este terremoto podría haber sido 7.2.

El terremoto del 23 de enero de 1880 en Pinar del Río, occidente de Cuba:

Este terremoto causó 3 muertes y tuvo una intensidad máxima de VIII grados en la Escala MSK. Se sintió en las provincias de Pinar del Río, La Habana, Matanzas y parte de Cienfuegos, y tan lejanos como los Cayos de la Florida. Aunque el área perceptible fue bastante grande, el daño más significativo se concentró en las zonas llanas de Pinar del Río. La infraestructura de la industria azucarera fue severamente dañada, causando la ruina económica a los habitantes locales. Todas las casas de mampostería sufrieron colapso de techos y paredes y una iglesia fue destruida. Se observaron efectos de sitio consistentes con la licuación del terreno. Este evento es el terremoto más fuerte en la región noroccidental de Cuba.

El terremoto del 23 de septiembre de 1887 en Mole San Nicolás, norte de Haití:

Este terremoto tuvo intensidad de VII grados en la Escala MSK en la ciudad de Santiago de Cuba, donde muchos edificios sufrieron grietas y otros edificios situados en suelos desfavorables sufrieron graves daños. 2 personas resultaron heridas. En el área epicentral

en Mole San Nicolás tuvo intensidad IX en la Escala MSK, muchas casas se derrumbaron y edificios sufrieron daños. El daño se extendió ampliamente a Port de Paix, Gonaives, Cabo Haitiano, Puerto Príncipe, entre otros. El terremoto provocó un tsunami. Las áreas afectadas quedaron en ruinas.

El terremoto del 3 de febrero de 1932 en Santiago de Cuba, sureste de Cuba:

Este terremoto tuvo una intensidad máxima de VIII grados en la Escala MSK en la ciudad y es bien conocido como el terremoto más fuerte en el siglo 20 en Cuba. Causó graves daños a muchos edificios y el colapso de estructuras de diferentes tipos. El 80% de los edificios de la ciudad sufrió algún tipo de daños. 14 personas murieron y alrededor de 300 resultaron heridas. El temblor se sintió en toda la región oriental, incluyendo la provincia de Camagüey.

Tabla 4.1. Resumen de los terremotos más importantes que afectaron a Cuba (Intensidad mayor e igual que VII).

Localidades	Fecha	Magnitud	Profundidad (km)	Intensidad (MSK)
Bayamo	18/10/1551	6.6	15	IX
Santiago de Cuba	-/08/1578	6.8	30	VIII
Santiago de Cuba	11/02/1675	5.8	30	VII
Santiago de Cuba	11/02/1678	6.8	30	VIII
Santiago de Cuba	11/07/1760	6.8	30	VIII
Santiago de Cuba	-/1682	5.8	30	VII
Santiago de Cuba	12/06/1766	7.6	35	IX
Santiago de Cuba	18/09/1826	6.4	30	VIII
Santiago de Cuba	07/07/1842	6.8	30	VIII
Santiago de Cuba	20/08/1852	7.3	30	IX
Santiago de Cuba	26/11/1852	7.0	35	VIII
Santiago de Cuba	28/01/1858	6.5	30	VII
San Cristóbal	23/01/1880	6.2	32	VIII
Santiago de Cuba	22/09/1903	5.7	30	VII
Santiago de Cuba	22/06/1906	6.2	30	VII
Gibara	28/02/1914	6.2	32	VII
Santiago de Cuba	25/12/1914	6.7	30	VII
Santiago de Cuba	03/02/1932	6.7	35	VIII

Santiago de Cuba	07/08/1947	6.6	35	VII
Santiago de Cuba	19/02/1976	6.8	20	VIII
Cabo Cruz	25/05/1992	6.9	23	VII

El terremoto del 19 de febrero de 1976 en Pilón, Granma, sureste de Cuba:

Este evento tuvo una intensidad máxima de VIII grados en la Escala MSK en el poblado de Pilón de la provincia Granma. En esta zona el temblor causó daños en el 80% de los edificios, pero sólo 1 persona murió. Se abrieron grietas en la tierra que causaron la deformación en las líneas férreas a lo largo de un puente. La escuela y los centros comerciales fueron dañados considerablemente. Otras localidades se vieron afectadas; el nivel freático cambió en los pozos y surgieron nuevos manantiales; se abrieron grietas largas en el suelo. En el Pico Turquino, las montañas más altas del país, ocurrieron grandes caídas de roca, probablemente incrementadas por el efecto topográfico. Muchos sitios en la provincia como Las Mercedes, Marea del Portillo, el Pico Turquino, Ocuja, entre otros sufrieron intensidad de VII grados.

4.2 Otros terremotos de intensidad VII con daños significativos

El terremoto del 28 de febrero de 1914 en Gibara, provincia de Holguín, región nororiental:

Este evento fue localizado en la zona de sismicidad intraplaca de Cuba. En Gibara muchos edificios de mampostería sufrieron daños y muchas iglesias fueron dañadas, así como los ingenios azucareros. No hubo víctimas mortales. También se observó caídas de rocas. El temblor se sintió en provincias vecinas como Santiago de Cuba, Granma, Guantánamo y al oeste en Camagüey y Las Villas.

El terremoto del 7 de agosto de 1947 en Santiago de Cuba, sureste de Cuba:

Este fue el segundo evento sísmico más grande del siglo 20 en Cuba. La intensidad máxima fue de VII grados en la Escala MSK en la ciudad de Santiago de Cuba. Causó graves daños a los edificios ubicados en terrenos desfavorables y colapso parcial en algunas zonas. No se reportaron víctimas mortales. Los relojes de péndulo

dejaron de oscilar. En el municipio de La Maya provocó caídas de rocas.

4.3 Terremotos fuertes en La Española

La Fig. 4.2 muestra la tectónica regional y los terremotos fuertes de La Española. Los grandes terremotos históricos con epicentro en el borde noroeste de la Falla Septentrional han tenido efectos dañinos en Cuba suoriental (terremotos de 1842 y 1887). En Chuy y Alvarez (1988) se presenta una evaluación de las intensidades sentidas en La Española, Cuba, Puerto Rico y otras islas, debida a terremotos fuertes originados en La Española de 1502 a 1971.

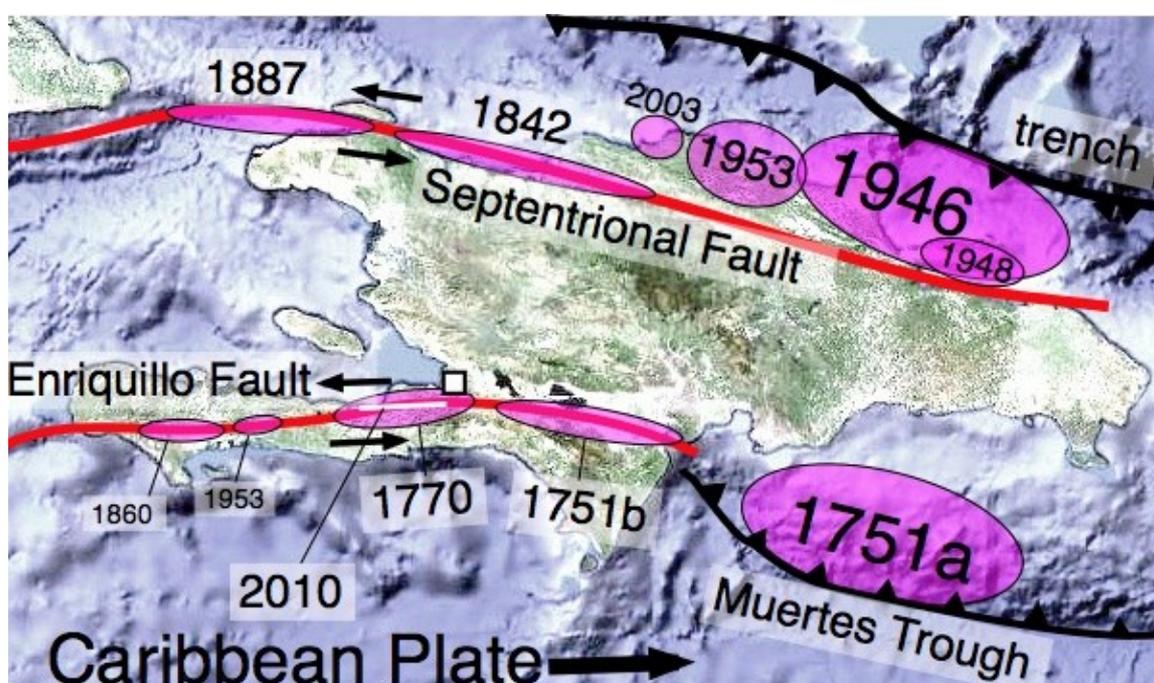


Figura 4.2. Terremotos históricos importantes en el norte y el sur de La Española. Los terremotos de la falla Septentrional continúan en la falla Oriente, que es especialmente relevante para el sur de Cuba. En particular, el terremoto de 1887 afectó el sur de Cuba. De Muñoz, (2012).

4.4 Terremotos en Cuba y sus alrededores. Catálogos recientes.

En el presente trabajo se preparó un nuevo catálogo regional para el período 1502-2012. El área no solo cubre la isla de Cuba sino también las regiones aledañas, incluyendo las Islas Caimán, Jamaica y La Española. Este catálogo está formado por datos pre-instrumentales derivados de información macrosísmica histórica entre los siglos XVI y XIX, y datos instrumentales de fuentes

regionales internacionales y de redes locales, principalmente la cunbana.

Las principales fuentes utilizadas son las siguientes: United States Geological Survey (USGS), International Seismological Centre (ISC), *ISC-GEM Reference Global Instrumental Earthquake Catalogue*, *Global Centroid Moment Tensor Database (GCMT)*, *compilaciones globales de la NOAA*, *catálogo "Centennial"* y *datos de la red nacional de estaciones sismológicas de Cuba (SSN)*.

Los tipos de magnitud presente son la mb de ondas de cuerpo, la Ms de ondas superficiales , la Mw de momento y la Mc de codas. Sin embargo, cada catálogo tiene al menos un tipo de ellas predominante. En el epígrafe 7.1 se presenta una descripción detallada de las fuentes y del proceso de generación del catálogo. Las figuras 4.3 y 4.4 muestran los terremotos registrados por el USGS y el ISC.



Figure 4.3. *Terremotos desde 1973 registrados por el USGS*

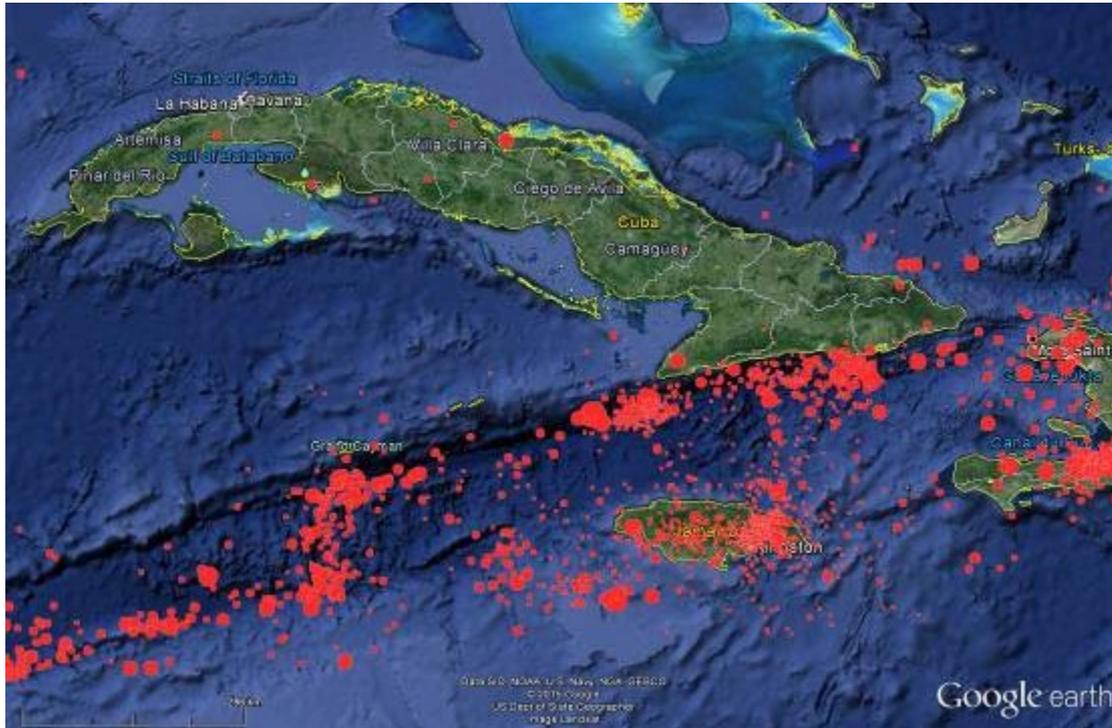


Figure 4.4. Terremotos desde 1973 registrados por el ISC.

5 Estudios de peligrosidad anteriores

5.1 Los trabajos del IGA-CENAI

Las primeras incursiones en la estimación de la peligrosidad sísmica en Cuba fueron hechas en términos de intensidad sísmica por métodos determinísticos, siendo el más importante el incluido en la norma de construcciones sismorresistentes de 1985 (Norma Cubana, 1985). Desde mediados de los 80 fue realizado el análisis de la peligrosidad sísmica probabilística por métodos modernos, tanto en términos de intensidad como de PGA para diferentes zonas del país, siendo los más detallados los realizados con vistas a posibles emplazamientos de CEN. Estos fueron unidos en un mapa que fue incluido en una nueva versión de código de construcciones sismorresistente de Cuba (Norma Cubana, 1999). Para esos estudios fue usado un programa confeccionado al efecto (Alvarez y Bune, 1985, Alvarez, 1995). Algunos de los mapas de ese período se presentan en la Fig. 5.1.

Un nuevo estudio de peligrosidad sísmica probabilística, en términos de PGA fue realizado después, esta vez usando el programa de cómputo seisrisk3. En dicho estudio fue aplicado un enfoque de

árbol lógico que se caracterizó por el uso de dos enfoques diferentes para la zonación sismotectónica, dos leyes de atenuación, dos métodos diferentes de estimación de los parámetros de la sismicidad y 3 métodos de estimación de M_{max} . También se preparó un mapa de zonación que muestra zonas con curvas (PGA, T_{ret}) similares (Alvarez et al., 2005; García, 2007). En ese trabajo también fue aplicado un enfoque no zonificado (“actividad sísmica” - “sismicidad distribuida”). En las Fig. 5.2 y 5.3 se presentan algunos resultados de ese trabajo.

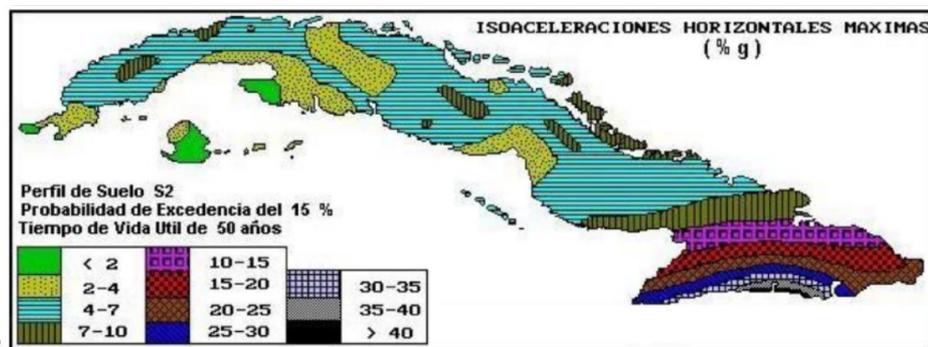
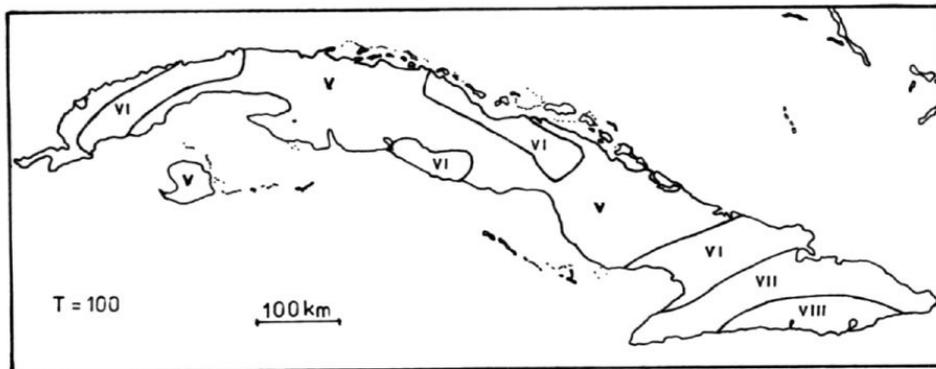


Figura 5.1. Algunos mapas de peligrosidad sísmica obtenidos en el período 1980-1995. Arriba: Mapa usado en la preparación de la norma para construcciones sismorresistentes de 1985 en términos de intensidad MSK (Norma Cubana, 1985). Centro: Primer mapa de probabilidad sísmica de Cuba en intensidad (Alvarez et al. 1985). Abajo: Mapa usado en la preparación de la última norma para construcciones sismorresistentes (Norma Cubana, 1995).

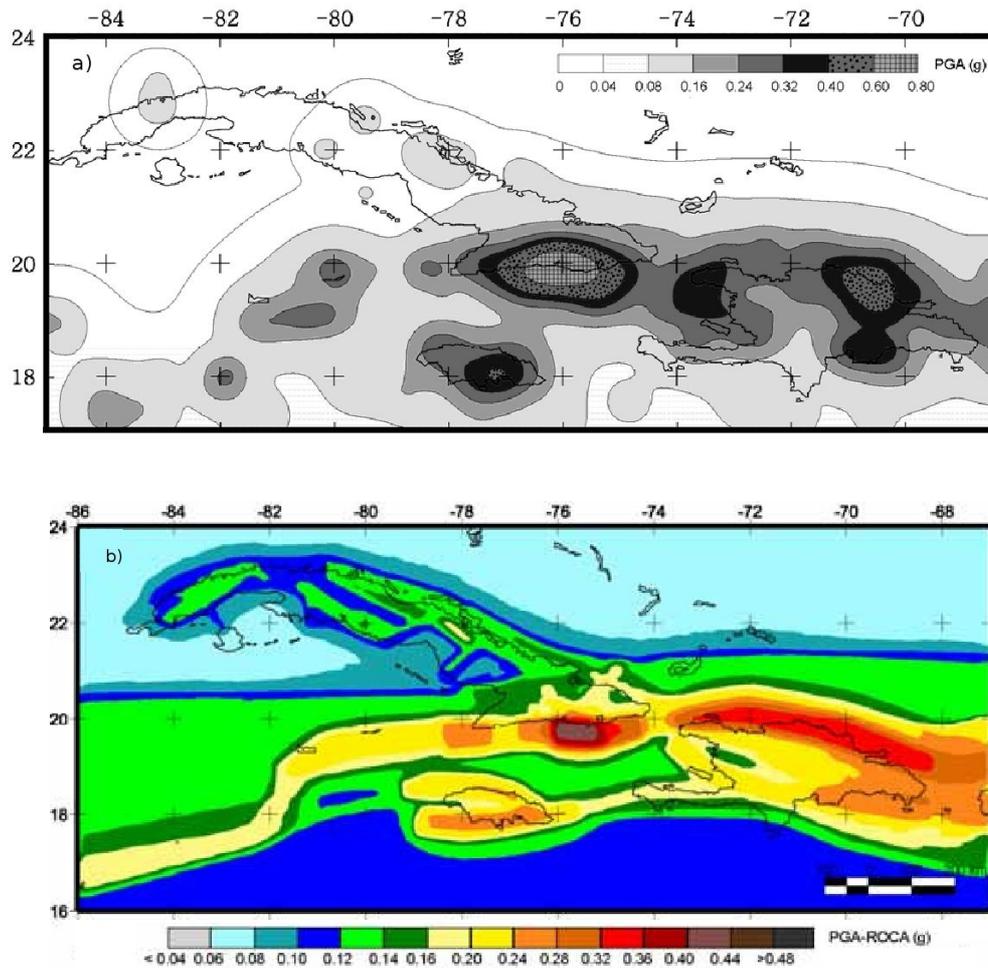


Figura 5.2. Resultados de la estimación de peligrosidad sísmica hecha por (Alvarez et al., 2005, García, 2007) usando el enfoque de árbol lógico. Arriba: Método no zonificado (3 ramas), Abajo: Método zonificado estándar de Cornell (36 ramas).

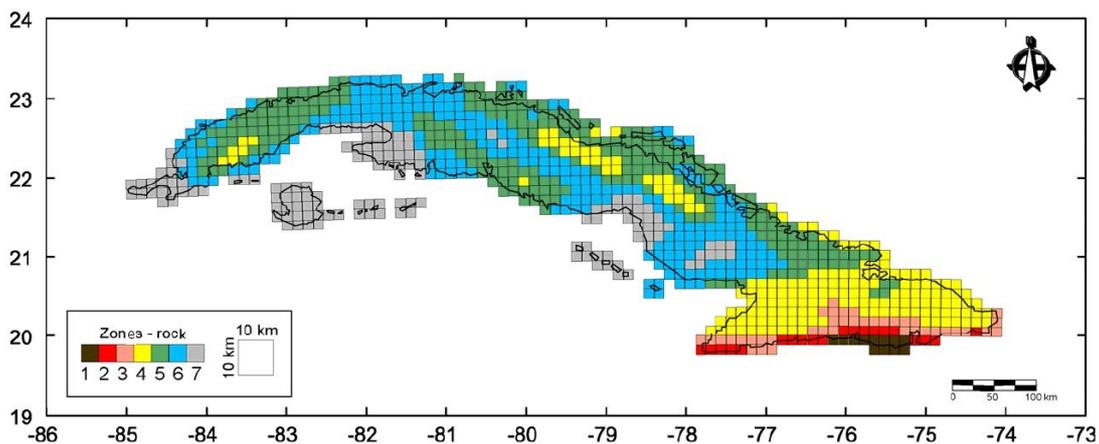


Figura 5.3. Resultados de la estimación de peligrosidad sísmica hecha por (Alvarez et al., 2005, García, 2007) usando el enfoque de árbol lógico. Zonas caracterizadas por una curva de peligro particular, obtenidas mediante clasificación con un algoritmo lógico-combinatorio.

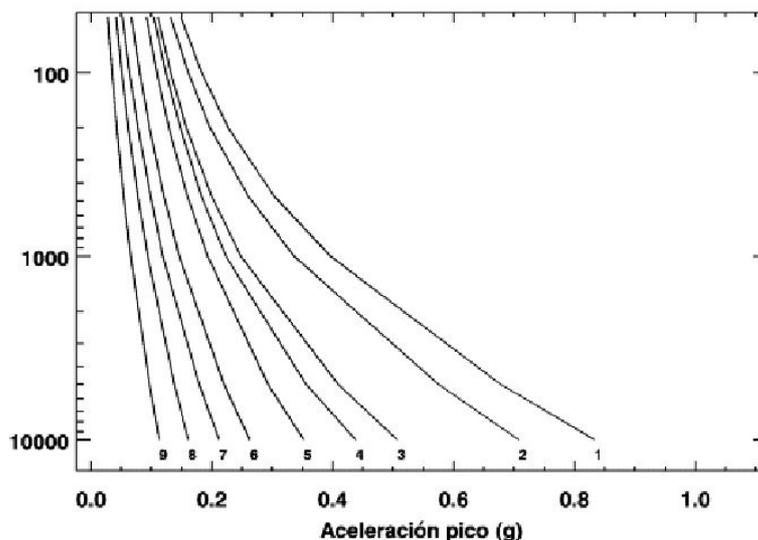


Figura 5.4. Resultados de la estimación de peligrosidad sísmica hecha por (Alvarez et al., 2005, García, 2007) usando el enfoque de árbol lógico. Arriba: Curvas de peligro correspondientes a cada una de las 7 zonas presentadas en la Fig. 5.3.

5.2 El mapa de peligrosidad sísmica global del GSHAP

Los datos del mapa de peligrosidad sísmica global pueden ser descargados de <http://www.seismo.ethz.ch/GSHAP/global/> (Giardini et al., 1999), aunque los mismos se presentan a un a escala global y por tanto la resolución es muy grosera (ver Fig. 5.5).

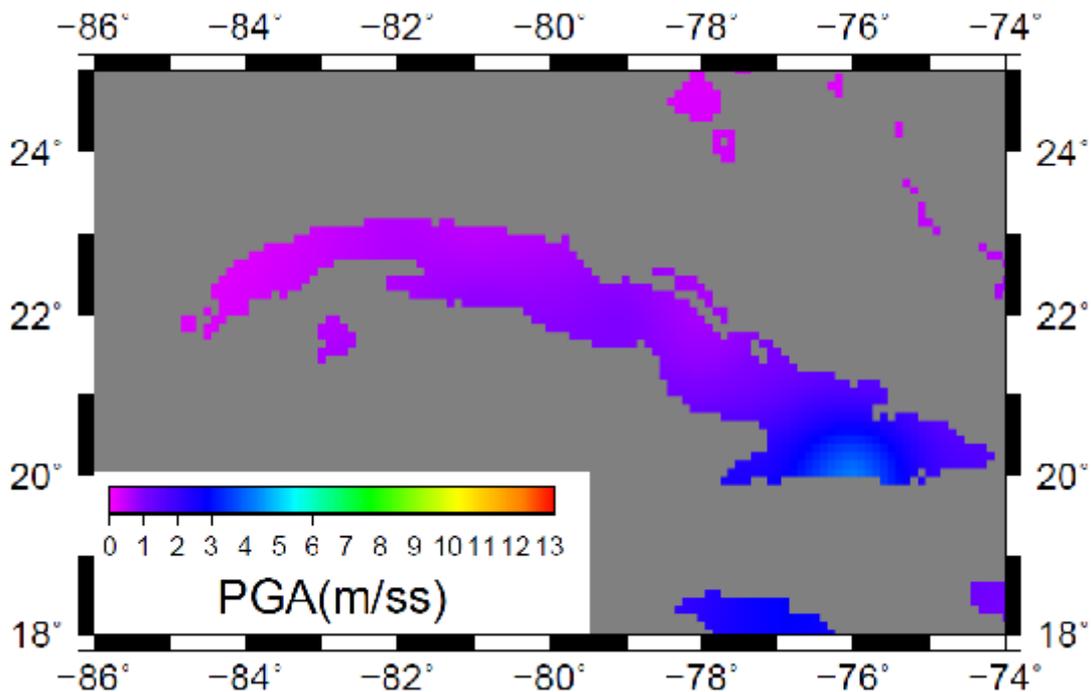


Figura 5.5. Valores de PGA presentados en el mapa de peligrosidad sísmica global - GSHAP (Giardini et al., 1999).

6 Geología de Cuba y zonas aledañas

De acuerdo a a Molnar y Sykes 1969), el Caribe y América Central forman una pequeña placa litosférica insertada entre América del Norte y del Sur que se mueve hacia el este con relación a Norteamérica.

La frontera de las placas Caribe-Norteamericana hacia el este del centro de expansión de Caimán (CSC - siglas en inglés - en lo que sigue se señalarán también siglas de los nombres en inglés para facilitar su localización en las figuras anexas) se divide en 2 ramas: La norte consiste en el extremo superior del CSC, la zona de fallas Oriente (OFZ) y la falla Septentrional (SFZ); la rama sur comienza en el límite inferior del CSC y comprende la zona de fallas Walton(WFZ), la del Plantain Garden (PFGZ), la de Enriquillo (EFZ) and y la fosa de Los Muertos (LMT). Este ambiente tectónico complejo ha determinado la división de la región en 3 microplacas: Gonave, Septentrional y La Española (Fig. 6.1).

Las mediciones GPS llevadas a cabo por DeMets et al. (2000) muestran que la placa del Caribe se mueve a una tasa de 18 - 20 (± 3) mm/año en una dirección E - NE (70°) relativa a la placa Norteamericana. Por otra parte, DeMets y Grandison, (2007) estimaron una tasa de 13 (± 1) mm/año para el movimiento Gonave - Caribbean y una tasa máxima de 11 (± 1) mm/año para el movimiento Gonave - Nortemérica.

La geología del Caribe es muy compleja y se han propuesto diferentes modelos acerca de su origen y evolución. En el caso de Cuba, el modelo geológico propuesto por Iturralde-Vinent (1996, 1998) reconocía dos niveles estructurales en la estructura geológica de Cuba: El Cinturón Plegado y el Neoautóctono (Fig. 6.2). La diferencia fundamental entre ambos descansa en el hecho de que el Cinturón plegado contiene elementos separados de varias placas tectónicas viejas (Norteamérica, Caribe y probablemente Pacífico), mientras que el Neoautóctono evolucionó completamente en un segmento pasivo del borde de la placa Norteamericana, después que terminó el proceso acrecionario que condujo a la formación del Cinturón Plegado (Iturralde-Vinent, 1998).

El Cinturón Plegado está formado por diferentes unidades terrígenas de naturaleza continental, oceánica o mixta, desde el Eoceno Temprano a Medio, incluyendo algunos elementos pequeños Neoproterozoicos. Se extiende desde la provincia de La Habana hasta la de Holguín. El Neoautóctono, desde el Eoceno Tardío hasta el Reciente, se caracteriza por una serie de cuencas sedimentarias que están ligeramente deformadas y descansan en el tope del Cinturón Plegado.

La mayor parte de Cuba pertenece a la provincia carbonatada Florida-Bahamas, mientras que la mayoría de su parte sur consiste en sedimentos metamorfoseados y rocas ígneas ácidas. En el intermedio, como resultado del contacto entre la plataforma de Bahamas y el arco de isla cubano, existe un cinturón relativamente estrecho, extremadamente plegado y fallado, el cual contiene rocas ígneas ultra-básicas y muchos tipos de sedimentos volcánicos y volcano-derivados (Pardo, 1975 en González et al., 2012).

Por otra parte, como se vio en la sección 3, la estructura tectónica fundamental al sur de Cuba es la falla Oriente. Su geometría y régimen tectónico fueron definidos mejor por Calais y Lepinay,

(1991, 1992) a través de la interpretación de datos geofísicos marinos. Moreno et al., (2002) caracterizaron la actividad en fallas locales y el régimen de esfuerzos en el área, específicamente en la Cuenca de Cabo Cruz (CCB) y el Cinturón deformado de Santiago (SDB).

Con respecto al territorio de Cuba la situación es compleja. No hay datos suficientes para determinar el potencial sismogénico de las fallas existentes, lo que ha determinado la existencia de dos modelos sismotectónicos completamente diferentes. En la Fig. 6.2 muestran los sistemas de fallas principales presentes en Cuba según Iturralde-Vinent (1996), y los dos modelos tectónicos ya mencionados (Chuy y Alvarez, 1995; Cotilla y Alvarez, 1991).

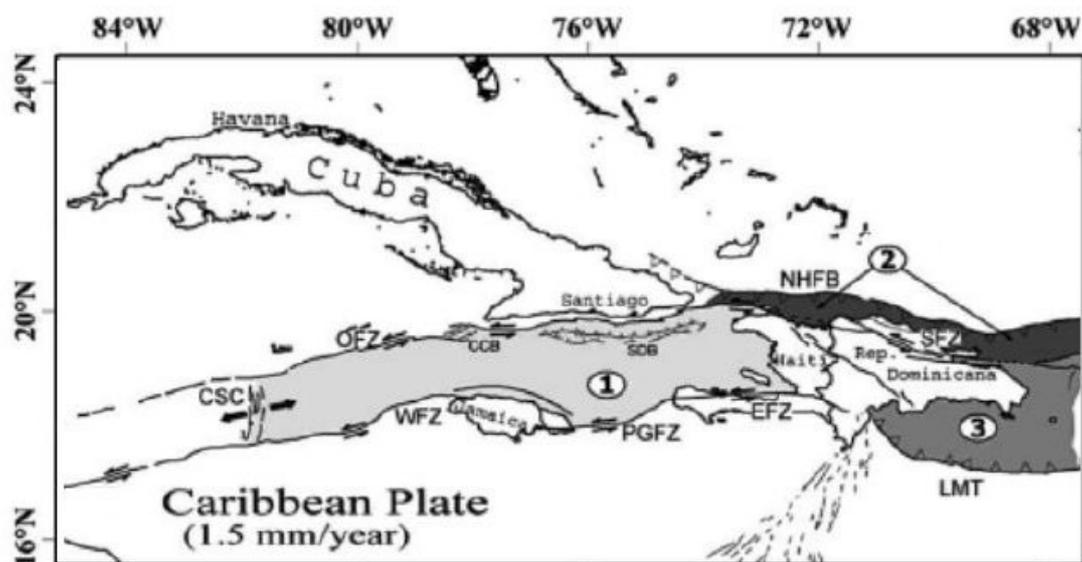


Figura 6.1. Contexto tectónico regional (modificado de García, 2007). Las abreviaturas se explican en el texto. Las microplacas se simbolizan por números: (1) Gonave, (2) Septentrional, (3) La Española

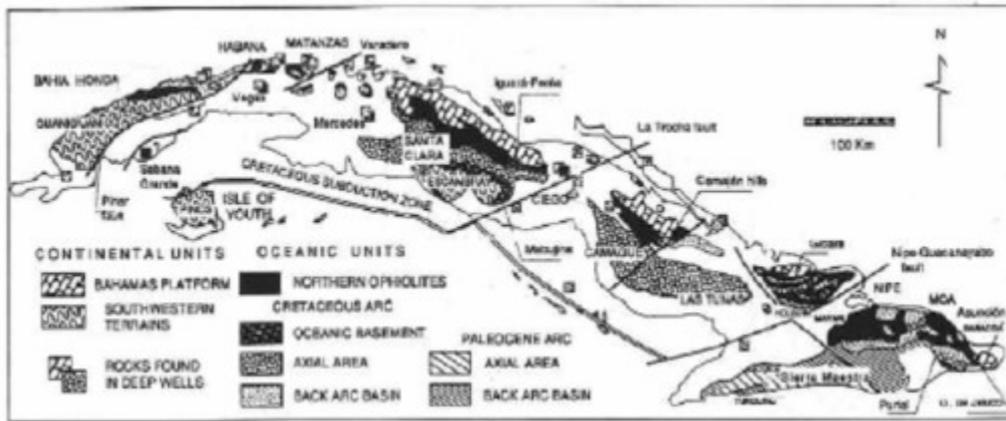


Figure 6.2. Mapa geológico esquemático de Cuba que representa las unidades del Cinturón Plegado y el Neoautóctono. Los afloramientos del Cinturón Plegado se distinguen por varios patrones, mientras que la parte del Neoautóctono se representa sin patrón. (Iturralde-Vinent, 1996).

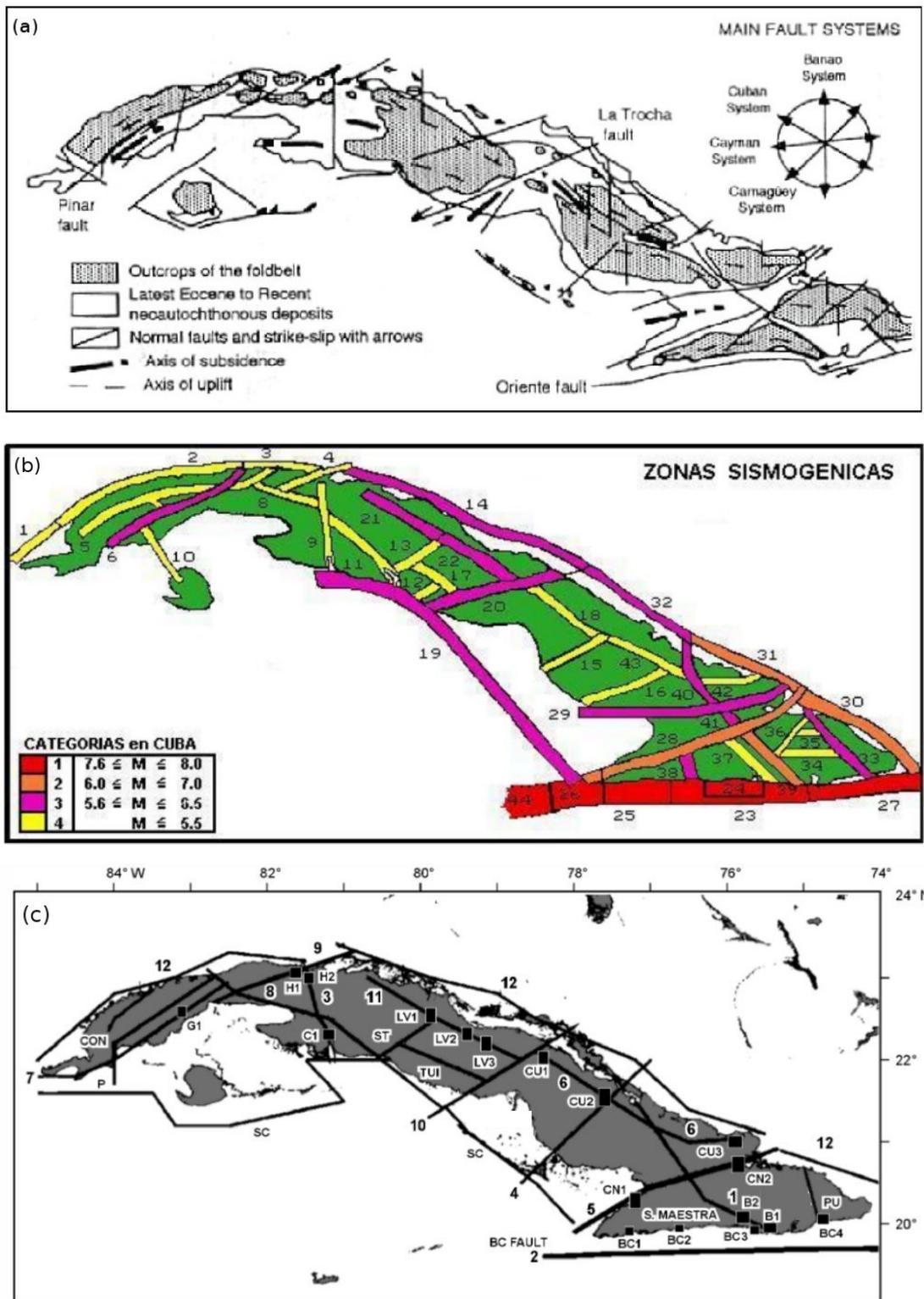


Figura 6.3. Sismotectónica del territorio de Cuba. (a) Sistemas de fallas principales según Iturralde-Vinent (1994), (b) Resumen de trabajos sismotectónicos hechos para emplazamientos de CEN (Chuy y Alvarez, 1995) (c) Resultados sismotectónicos de Cotilla y Alvarez (1991)

7 Sismicidad de Cuba

La información sobre la sismicidad de las Antillas mayores comienza desde el siglo XVI. En el siglo XX la fuente principal de datos es instrumental, pero la macrosísmica continúa siendo importante, fundamentalmente para los terremotos relativamente débiles. En el proyecto fue compilado, partiendo de diferentes fuentes, un catálogo para la región $[16^\circ \text{ a } 24^\circ, -86^\circ \text{ a } -67^\circ]$ para el período 1502-2012, que contiene 64541 eventos (Fig.1). Se realizó un análisis detallado de esos datos, el cual mostró que la magnitud local de la red cubana (después de 1997) y de la de Puerto Rico tiene una gran dispersión cuando se compara con mb y Ms. La mayor parte de las diferencias entre ambos catálogos es para magnitudes menores que 4.

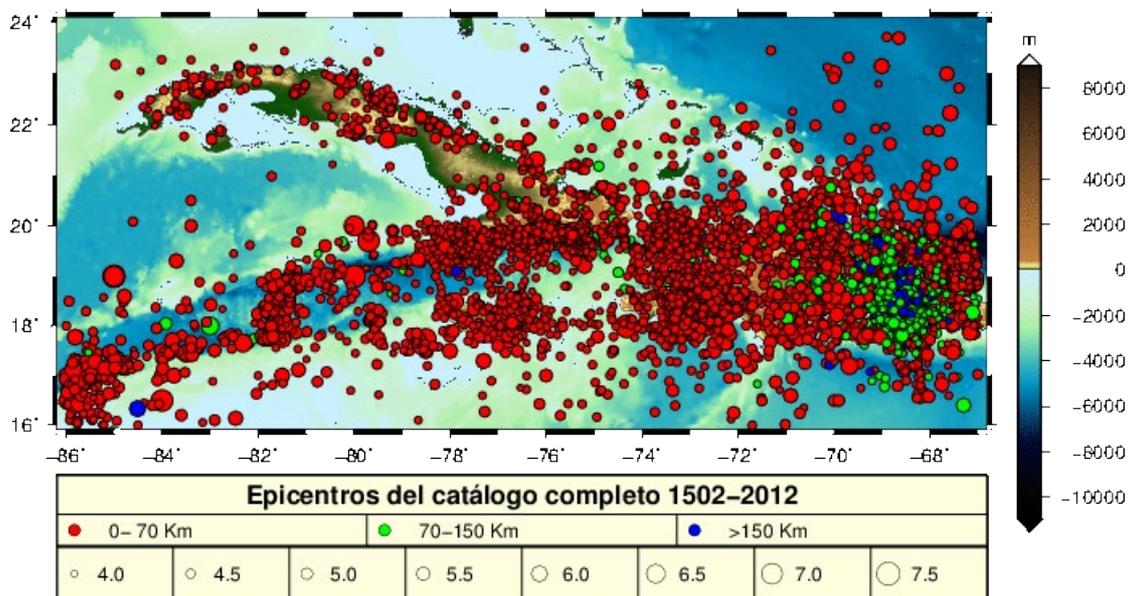


Figura 7.1. Mapa de epicentros confeccionado con el nuevo catálogo

Este catálogo fue analizado para determinar la completitud del registro dentro de cada intervalo de magnitud. La parte del catálogo que contiene solo a Cuba tiene períodos de completitud mayores para diferentes intervalos de magnitud, debido a un mejor estudio macrosísmico y la ubicación temprana de estaciones sismológicas. Si consideramos solamente los terremotos que corresponden a esos períodos de completitud, su cantidad se reduce a 803 eventos. En la Fig. 7.2 están representados aquellos terremotos que finalmente fueron usados para la estimación de la peligrosidad sísmica en el

caso del modelo de Poisson. Mas adelante se explica en detalle este proceso.

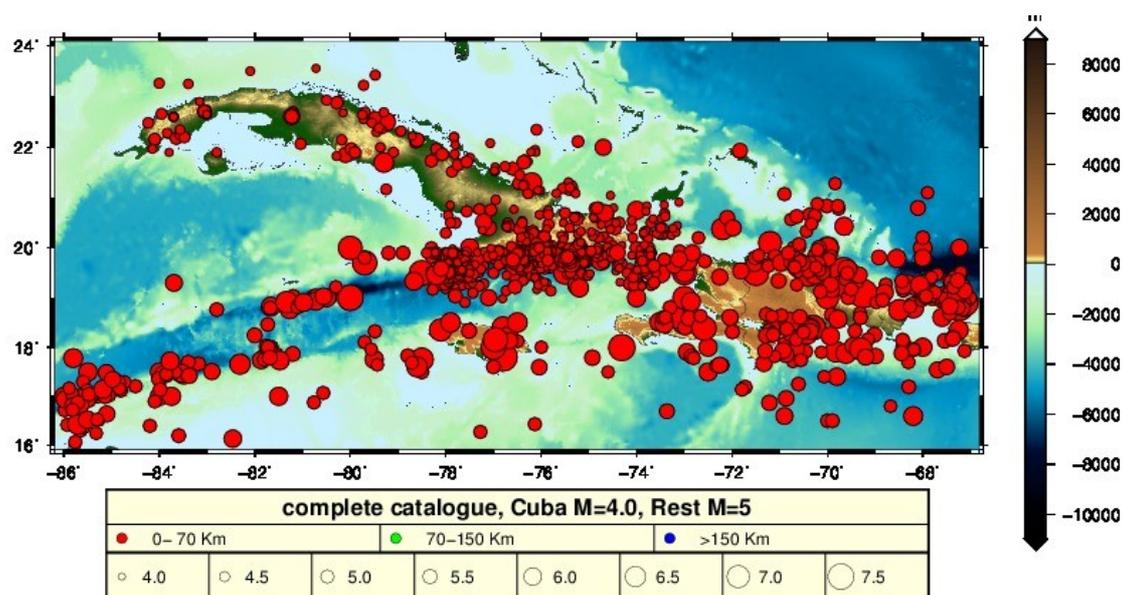


Figura 7.2. Mapa de epicentros en el caso del catálogo preparado para el análisis de la peligrosidad sísmica, considerando solamente los eventos incluidos dentro de los períodos de completitud

7.1 El catálogo de terremotos

El catálogo de terremotos es la base para el análisis estadístico que se hace en los estudios de peligrosidad sísmica probabilística. Es una limitante evitable que los catálogos de terremotos se creen a lo largo del tiempo con grados variables de precisión y a partir de varias agencias. Por tanto es un reto el establecer un catálogo homogeneizado para una región. Algunas veces los reportes de diferentes agencia se superponen y se debe elegir el reporte mas confiable, mientras que otras veces los reportes de las agencias no se superponen y se deben usar los reportes de diferentes agencias. Aquí que se cree un catálogo que es en esencia inhomogéneo, y se debe al menos homogeneizar las magnitudes en magnitudes de momento (M_w) sobre las cuales se puedan establecer relaciones, que estén en correspondencia con las fórmulas de atenuación que se usarán en los cálculos. Un catálogo homogeneizado completamente completamente confiable siempre puede hacerse para una pequeña ventana temporal y una región pequeña, pero no es posible cuando lo que se necesita es generar un catálogo para el

mayor rango temporal posible y que cubra una región grande como es el Caribe noroeste.

En el presente trabajo se preparó un nuevo catálogo [ara el noroeste del Caribe y para el período 1502-2012. Las fuentes principales fueron: USGS, NOAA, ISC y GEM, las que contienen múltiples agencias reportadoras. Todas las agencias han reportado algo útil y se hizo un examen cuidadoso para evitar repeticiones del mismo evento por diferentes agencias. Al final el catálogo contiene reportes de las siguientes agencias: BAT, BCI, BEL, BLA, CEN, CFR, CEN, CGS, CH1. CHU, CUB, DNA, DUD, EDR, EH, EHB, EQH, G-R, GS, GUT, IDC, IGA, IS, ISC, ISS, JSN, NEI, PDE, RAU, RCC, RSP, SSN, SYK y TRN. Al mismo tiempo fueron excluidos los reportes de las siguientes agencias: CAD, CAR, EID, HFS, LAO, MOS, NAO, SHE, USC, USE, VIL o “blanco (sin identificación)”.

A continuación daremos una descripción mas detallada de las fuentes y del procesamiento realizado para obtener el catálogo homogéneo.

Introducción

Un catálogo de terremotos para la misma región para el período 1502-1995 fue presentado en una publicación anterior (Alvarez et al., 1999). Después de 1995 hay un cambio que caracteriza el registro de terremotos en la región: la modernización de las redes de estaciones sismológicas en Jamaica, Cuba y Puerto Rico. Esto ha incrementado el volumen de información disponible. Con respecto a las redes internacionales se ha mejorado la determinación de las magnitudes de momento M_w y se ha realizado un gran esfuerzo en la reestimación de las magnitudes y las coordenadas de los terremotos fuertes e intermedios pasados. Con respecto a la estimación del riesgo sísmico, el uso de M_s para las fórmulas de atenuación se sustituyó por el de M_w . Por las razones anteriores fue necesario actualizar el catálogo anterior y extenderlo a los años mas recientes.

Descripción de los datos

Para la preparación del catálogo para cada terremoto se consideró el conjunto completo de parámetros (coordenadas epicentrales, profundidad, tiempo de origen, magnitud, datos macrosísmicos, errores, etc.). La calidad de estos parámetros era muy variable en el tiempo, comenzando por menos confiables reconstrucciones de terremotos sentidos en el pasado, y finalizando con la mas

confiables determinaciones por computadora usando datos de redes de estaciones sismológicas. Las fuentes originales de datos incluidos en el catálogo presentado son:

- Datos macrosísmicos. Varias compilaciones parcialmente publicadas parcialmente depositadas en los fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS) de Cuba. Todos ellos tienen evaluación de intensidades y cada terremoto tiene un estimado de magnitud y coordenadas.
- Datos instrumentales de agencias internacionales. Fundamentalmente los catálogos del ISC y del CGS-NEIS, y parcialmente compilaciones de estimados realizados por computadoras y que están disponibles desde los 70 en centros mundiales de datos, los cuales han sido reunidos por la NOAA en una publicación en CDROM.
- Datos instrumentales de la red cubana (CENAIIS), y de las redes de estaciones sismológicas de Jamaica y Puerto Rico, accesibles a través de Internet.
- Relocalizaciones de epicentros y reevaluaciones de magnitudes publicadas por diferentes autores o hechas expresamente para este trabajo.

Redes Locales:

El catálogo inicial cubano: El catálogo básico inicial es el ya mencionado 1502-1995. Fue usado a partir de la base de datos inicial del trabajo de (1995). El catálogo de Cuba contiene diferentes magnitudes y para los períodos iniciales el parámetro energético "K" fue usado como una alternativa a la magnitud. La presencia de datos jamaicanos para el período anterior a 1997 fue a través de la agencia TRN de Trinidad-Tobago, pero después de la modernización de la red aparecen en las compilaciones globales no solo como estaciones contribuyentes sino como agencia que da coordenadas y magnitud (MC, MD, MW). El catálogo de Puerto Rico comenzó al final de 1986. Esa red ha sido ampliada y su contribución aparece ahora como la agencia principal para el este de La Española. Las magnitudes son principalmente MD.

Compilaciones internacionales:

Las agencias mas importantes que contribuyen a la la localización en la región son el USGS (y todos sus predecesores) y el ISC (previamente ISS) La mayor contribución a las magnitudes (y a la

localización en los primeros años) es frecuentemente debida a los catálogos de Gutenberg y Richter (1954) y Rothè (1969).

El USGS ofrece las siguientes compilaciones: 1) EQH-PDE (1638-1995): Combina datos históricos de la vieja publicación seriada "Earthquake History of the United States" con determinaciones instrumentales. Contiene información sobre localización, magnitudes, macrosísmica, etc.; 2) EHDF (desde 1990): estas son las últimas versiones de la determinación de parámetros. Aparecen con cierta demora incluyendo incluso el "rms" de las determinaciones hipocentrales; 3) PDE - soluciones inmediatas (por lo general no usadas en este trabajo).

El ISC ofrece las siguientes compilaciones: 1) Boletines tradicionales del ISS (hasta 1963, sin magnitudes; 2) Boletines del ISC (desde 1964 hasta el presente), 3) compilaciones globales, 4) relocalizaciones globales de terremotos. Las compilaciones globales son accesibles a través de Internet en un modo de selección en varias variantes (todos los terremotos o solo los revisados, boletines y catálogos). El catálogo tiene información sobre los epicentros (sin error) y un amplio rango de magnitudes determinadas por varias agencias.

Relocalizaciones de epicentros

Esto se ha realizado en varias escalas:

a) Regional

- Sykes y Ewing (1965): Las primeras determinaciones por computadora de terremotos en la región del Caribe, cubre el período 1950-1963.
- Russo y Villaseñor (1983): Relocalización de terremotos en la isla de La Española.
- Especialmente para este trabajo se realizó la relocalización de terremotos en la parte central del área de estudio, usando datos recopilados por el ISC mas los datos de las estaciones cubanas. En total, para el período 1998-2012, se relocalizó un total de 262 terremotos.

b) Global

- Engdahl et al. (1998): El algoritmo EHB introducido por esos autores, incrementa la precisión por el uso de las fases profundas. Se ha usado para relocalizar terremotos en el

período 1960-2008. Para el área de estudio fue relocalizado un total de 383 terremotos.

- Engdahl y Villaseñor (2002): El “Centennial Catalog” es un catálogo global de relocalizaciones y magnitudes de terremotos grandes registrados instrumentalmente entre 1900 y 2007. Para el área de estudio contiene un total de 48 terremotos.
- Storchak et al. (2013): El catálogo ISC-GEM catalogue contiene relocalizaciones de terremotos para el período 1900-2009 usando el algoritmo EHB y el modelo de Tierra “ak135”.

Otras compilaciones de terremotos

- Los CDROMs de la NOAA (NOAA, 1996): Una colección de catálogos desarrollados por diferentes autores, estaciones y agencias. Todas fueron llevadas a un formato común e incluidas en dos ediciones en CD.
- Pacheko y Sykes (1982): Principalmente reevaluaciones de magnitudes.
- Abe, Kanamori y otros: una colección de artículos con reestimaciones de magnitudes de terremotos grandes (1977 - 1984)

Construcción de un catálogo para la región de estudio

Se decidió preparar un catálogo que contuviese la máxima información posible. Se seleccionó una modificación del formato del “Centennial Catalogue” con 12 valores diferentes posibles de magnitud, así como otros datos y campos de control. Para procesar la enorme cantidad de datos de las fuentes originales se escribió un conjunto de programas de cómputo. Esto incluye varios programas para cambios de formato, unión, división y comparación, así como otros para selección de datos, conversión de magnitudes, etc. También se prepararon programas para importar el catálogo a una base de datos y viceversa. Se procesaron los datos con estos programas, en algunos casos automáticamente, y en otros de forma interactiva, con vistas a formar un catálogo con solo un registro para cada terremoto (sin repeticiones). Al final, el catálogo contenía 64,541 terremotos.

En el proceso de selección de diferentes fuentes todas las magnitudes fueron incorporadas, mientras que para las coordenadas se usó el siguiente orden de prioridad:

1. relocalizaciones locales de terremotos
2. relocalizaciones globales de terremotos
3. datos de las redes locales si el terremoto está dentro del área de máxima confiabilidad de las determinaciones de la red
4. terremotos revisados del ISC
5. terremotos del USGS
6. otros terremotos del ISC
7. datos de otras fuentes

Sobre las conversiones de magnitud

Desde el comienzo del catálogo hasta el final están presentes los datos macrosísmicos. Durante los siglos XVI-XIX son los únicos datos disponibles, y durante el siglo XX su importancia relativa va disminuyendo continuamente, así como la máxima magnitud asociada. Incluso en la segunda mitad del siglo XX los datos de intensidad constituyeron la única vía para estimar la magnitud y las coordenadas en áreas con una pobre cobertura de estaciones sismológicas.

Nosotros empleamos un procedimiento particular para el análisis de los datos macrosísmicos. Basado en un estudio de los patrones de isosistas de terremotos en las Antillas Mayores, Alvarez y Chuy (1985) demostraron que el conjunto completo de isosistas puede ser ajustado a un modelo de elipses concéntricas en el cual la atenuación con la distancia viene dada por una fórmula del tipo de Koveslighety. Se obtuvo un buen ajuste con una fórmula determinada por Fedotov y Shumilina (1971) para Kamchatka, y ninguna otra de validez local ha sido investigada hasta el presente:

$$I = 1.5 M_s - 2.63 \log r - 0.0087 r + 2.5$$

Usando el método de prueba y error se puede realizar una estimación simultánea de coordenadas (incluyendo la profundidad) y magnitud en casos de terremotos bien documentados. En el caso de terremotos que posean solo pocos datos de intensidades

sentidas, la calidad del ajuste disminuye y algunas veces es imposible de determinar. Entonces es necesario asignar coordenadas a partir de las intensidades sentidas usando dicha fórmula (apoyándose en el conocimiento sobre las características de las zonas sísmicas). Las magnitudes determinadas por datos de intensidad son nombradas MI y se considera que en general $MI \approx Ms$.

Debe señalarse que este procedimiento ha sido extrapolado hacia las pequeñas intensidades, resultando en valores de Ms incluso < 3 , donde la escala de magnitud Ms no existe en realidad. En la conversión de esas magnitudes a Mw hay que realizar un tratamiento especial.

La parte del catálogo que está basada en datos de las agencias internacionales tiene las mismas características que para la mayoría del mundo, y debido a la posición geográfica de la región no están presentes variaciones temporales debido a las guerras y otros fenómenos locales. Las magnitudes originales hasta 1953 son fundamentalmente del catálogo de Gutenberg-Richter (Gutenberg y Richter, 1954). A pesar del hecho bien conocido que la magnitud G-R no es comparable con una verdadera magnitud Ms , se considera que la magnitud G-R = Ms . Para el período 1954-1965 la mayor fuente de magnitudes fue el catálogo de Rothè (Rothè, 1969) donde se aplica el mismo principio. Una gran parte de los terremotos con magnitudes de tal tipo han sido objeto de una reestimación de magnitudes por varios autores en términos de Ms o Mw .

La inclusión de magnitudes por ondas de volumen de corto período caracteriza el catálogo después de 1963, y por largo tiempo fue la única magnitud instrumental presente para la mayoría de los eventos. Se conoce que existe una pequeña diferencia en las calculadas por el International Seismological Centre (ISC) con respecto a las calculadas por las agencias de los EE.UU. (USCGS-NEIS), pero para nuestra región no hay datos suficientes para separar esas magnitudes, por lo que fueron consideradas como una sola: mb .

$$mb(ISC) = 0.973mb(PDE) - 0.039$$

La magnitud Ms está presente en toda la extensión del catálogo. La magnitud Mw , a pesar de los esfuerzos realizados por diferentes autores, es escasa para esta región.

Una parte importante de los datos corresponde a los datos de redes locales. Para la mayoría del tiempo hasta 1978, los datos son de una

sola estación (RCC) ubicada en Cuba oriental. En Lillienberg et al. (1995) se presenta un análisis de la calidad de los datos obtenidos en el período 1968-1978. La magnitud se presenta fundamentalmente en términos de la clase energética Kr (Rautian, 1964). Esta representación (equivalente a la energía en ergios liberada por los terremotos), fue usada hasta 3003, pero desde 1990 fue gradualmente sustituida por Mw u otras magnitudes. Se basa en las mediciones de la suma de las amplitudes máximas de las ondas P y S en registros de desplazamiento de corto período. Se dedujo la relación con Ms (Alvarez et al., 1990) siguiente:

$$MK \equiv Ms(Kr) = 0.48 Kr - 1.5$$

y se considera equivalente a Ms ($MK \approx Ms$). Durante el período 1979-1988 se creó una red local en Cuba oriental. Las características de los materiales obtenidos fueron estudiados en gran detalle por Alvarez et al. (1990). En ese período se prefirió la determinación de magnitud en términos de la duración promediada D de las señales en todas las estaciones registradoras (magnitud por duración, MD). La estimación de MD se hace por la relación (Alvarez et al., 1990):

$$MD = 3.2 \text{ Log } D - 4.5$$

y se considera equivalente a M ($MD \approx Ms$) para magnitudes bajas. Para obtener estas relaciones se prepararon muestras de MK y MD vs. Ms usando Ms de agencias internacionales, y en muchos casos la Ms se determinó por registros de las estaciones cubanas.

Generalmente fue empleada una colección grande de fórmulas de conversión que cubre diferentes intervalos de magnitud y tiempo:

Para magnitudes ML y de duración, se obtuvieron en este estudio las relaciones locales para Cuba en el período de 1998 a 2012:

$$mb = 0.554MD + 2.112$$

$$mb = 0.426ML + 2.457$$

y para Puerto Rico (el mismo período):

$$mb = 0.976ML + 0.792$$

Estas relaciones, basadas en datos locales de Cuba y Puerto Rico, mostraron una dispersión significativa (y por tanto una incertidumbre), lo que al final obligó a tomar la decisión de no incluir los eventos del período 1998-2012 que solo contuviesen magnitudes locales ML o MD en el procesamiento posterior del catálogo magnitudes.

Se aplicaron las relaciones ampliamente utilizadas de Scordilis (2006):

$$M_w = 0.67(\pm 0.005)M_s + 2.07(\pm 0.03), \quad 3.0 \leq M_s \leq 6.1$$

$$M_w = 0.99(\pm 0.02)M_s + 0.08(\pm 0.13), \quad 6.2 \leq M_s \leq 8.2$$

$$M_w = 0.85(\pm 0.04)m_b + 1.03(\pm 0.23), \quad 3.5 \leq m_b \leq 6.2$$

Basado en lo anterior, la homogeneización de magnitudes se realizó usando las relaciones de Scordilis las obtenidas para la red cubana antes de 1998.

Limpieza de premonitores y réplicas

Se acepta que para la estimación probabilística de la peligrosidad sísmica es necesario limpiar el catálogo de eventos dependientes, lo que significa premonitores y réplicas. Un procedimiento ampliamente utilizado se debe a Gardner y Knopoff (1974). En este enfoque de “declusterización”, un evento es considerado una réplica si (1) su magnitud no excede la del terremoto principal, (2) la distancia entre su epicentro y el del terremoto principal es mas pequeña que $L(M)$, y (3) la diferencia entre su tiempo de origen y el del terremoto principal es menos que $T(M)$, donde $T(M)$ y $L(M)$ son funciones empíricas del tipo $\lg X = a \cdot M + b$. En los programas de cómputo esto se expresa como un conjunto de ventanas espacio-temporales. Cuando este procedimiento se aplica con las ventanas espacio-temporales que ellos propusieron para el sur de California, se elimina del catálogo un número significativo de terremotos, más de lo que podría esperarse razonablemente. Esto motivó a Rodríguez et al. (1996) a investigar el comportamiento real de este problema en nuestra región. Con una muestra de 11 terremotos de magnitud $M_s > 3.5$ estos autores investigaron la extensión y duración del proceso de ocurrencia de réplicas y obtuvieron ventanas espacio-temporales diferentes, mas pequeñas que las propuestas por los primeros. Usando esto valores también para los premonitores, el catálogo fue limpiado con el programa “cluster” del paquete SEISAN (Ottermoller et al, 2013).

Tras la limpieza, donde también algunas de las agencias reportadoras fueron eliminadas y la homogeneización de magnitud resultó un catálogo de 3430 terremotos con $M \geq 3.0$. En las figuras que siguen (Fig. 7.2 y 7.3) se muestra la distribución de la sismicidad para dos umbrales de magnitud.

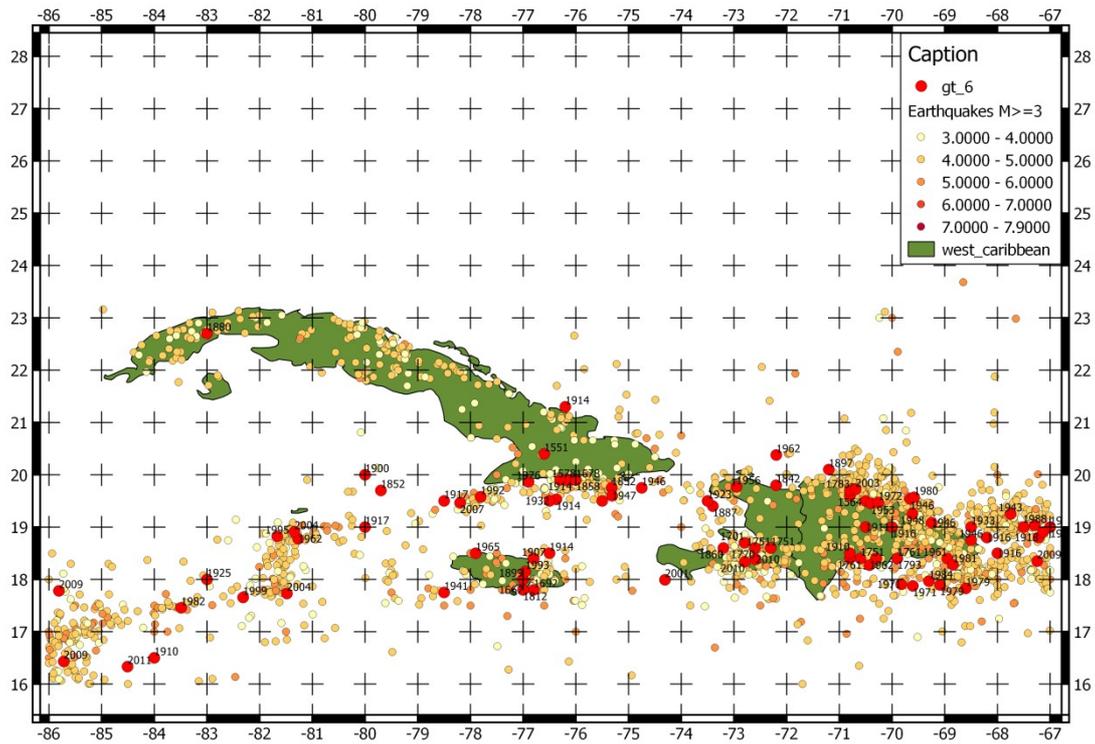


Fig. 7.2: Terremotos con $M \geq 3.0$ desde 1502 hasta 2012.

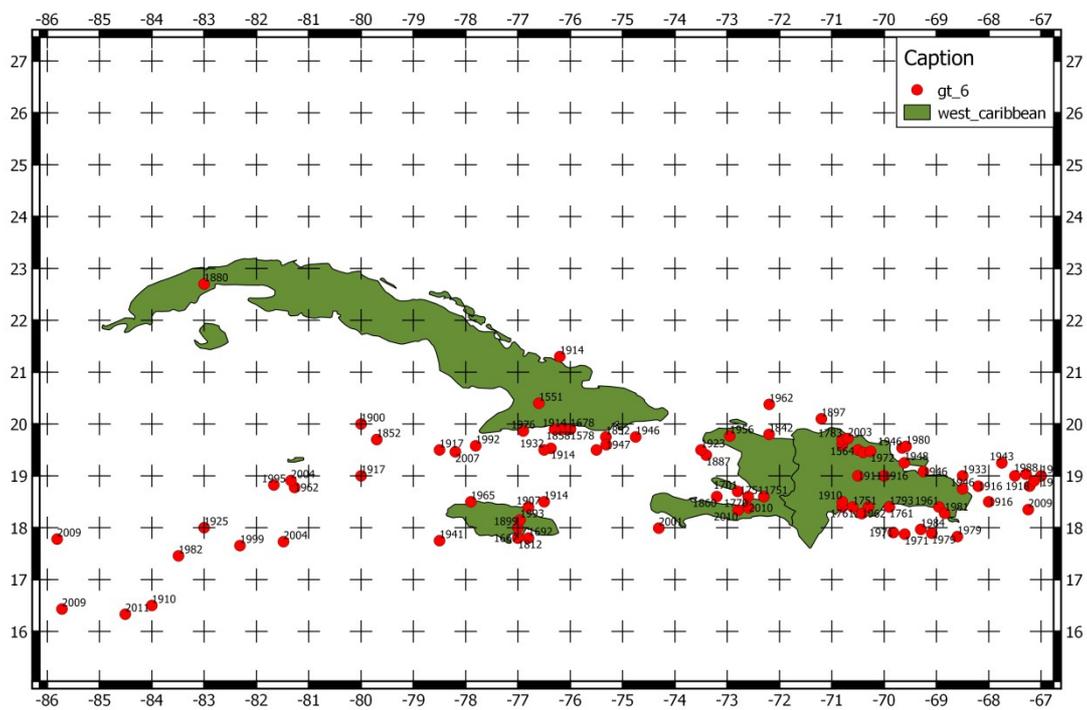


Fig. 7.3: Terremotos con $M \geq 6.0$ desde 1502 hasta 2012.

7.1.1 Intervalos de completitud del catálogo

La completitud del catálogo es un prerrequisito para calcular parámetros de recurrencia confiables. En el presente estudio usamos los métodos sugeridos por Stepp (1972) para el análisis de completitud.

El catálogo fue subdividido en varios subcatálogos: a) Toda la región (todo el Caribe noroeste), b) los terremotos de Cuba y finalmente) los terremotos fuera de Cuba. Los datos fueron exportados en tablas del número de terremotos dentro de intervalos (ΔT , ΔM) que fueron usados para determinar el nivel de completitud para diferentes intervalos de magnitud y tiempo. Fueron hechas 3 pruebas para toda la región con diferentes intervalos de tiempo, el primero desde 1502 con $\Delta T=40$ años, el segundo desde 1903 con $\Delta T=10$ años y el último desde 1953 con $\Delta T=5$ años.

Con estos resultados fueron determinados los niveles de completitud a ser usados en la estimación de los parámetros de los gráficos de G-R para toda la región. Diferentes gráficos con los datos se muestran en las Figs. 7.4 y Fig. 7.5. Una observación obvia de primer orden en estas figuras es primeramente que el umbral de detección ha ido creciendo con el tiempo, pero también que hay períodos de monitoreo mejorado que han cesado, por lo que deben ser usado de nuevo umbrales de detección mas altos.

Los datos para cada región fueron tabulados en matrices $\Delta T, \Delta M$ según se muestra en la Tabla 7.1, y entonces se decidieron los umbrales de completitud para varios intervalos temporales.

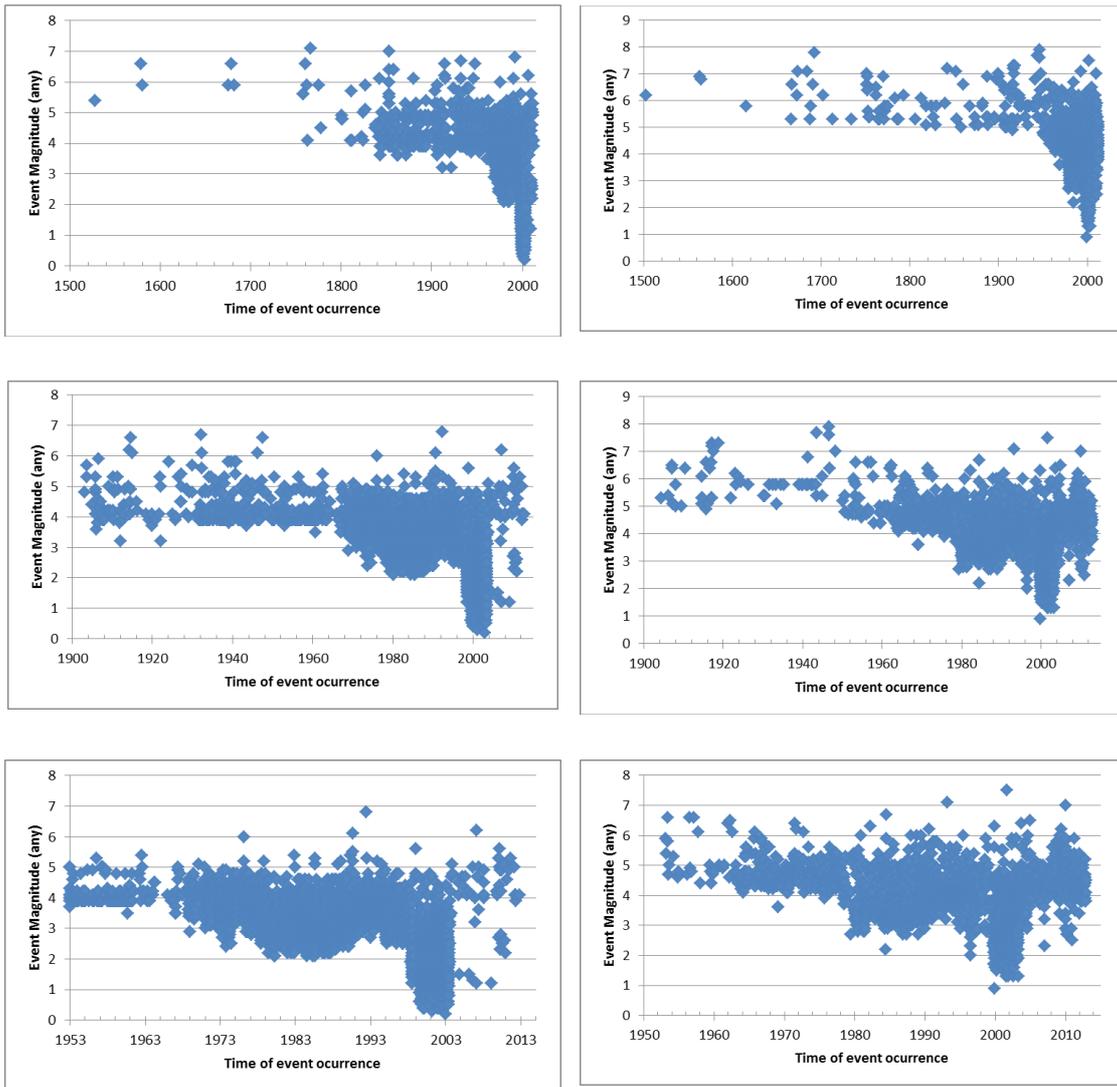


Figura 7.4. Distribución magnitud-tiempo del catálogo completo desde 1502 hasta 2012, desde 1903 hasta 2012 y desde 1953 hasta 2012. Panel izquierdo: Cuba; Derecho: las otras zonas. Incluidas todas las magnitudes y eliminados los premonitores y réplicas.

Tabla 7.1. La distribución magnitud-tiempo para la región de Cuba usando $\Delta T=40$ años y $\Delta M=0.5$. Los números marcados en rojo indican los períodos de completitud. Nota: La razón de considerar $M6.5$ como el límite inferior para la completitud, incluso para tiempos recientes es que las magnitudes menores para los tiempos mas cercanos no se consideraron confiables.

Periodo	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
1502 - 1541	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
1542 - 1581	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
1582 - 1621	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1622 - 1661	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1662 - 1701	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0
1702 - 1741	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1742 - 1781	0	1	1	0	2	2	1	1	0	0
1782 - 1821	0	2	0	3	1	0	0	0	0	0
1822 - 1861	1	37	9	9	4	3	3	1	0	0
1862 - 1901	4	64	12	25	4	1	0	0	0	0
1902 - 1941	2	137	27	32	14	9	2	0	0	0
1942 - 1981	375	471	149	53	3	2	1	0	0	0
1982 - 2021	1351	618	121	31	10	2	0	1	0	0

Para cada una de las 3 regiones fueron definidas matrices similares a la tabla 7.1 con $\Delta T = [5, 10 \text{ y } 40 \text{ años}]$. Para cada matriz los umbrales de completitud fueron determinados a través de una combinación de criterio de experto sobre el monitoreo de las regiones y los valores en cada celda $\Delta T, \Delta M$ siguiendo el prerrequisito de Stepp (1972) de obediencia a una distribución log-lineal en el dominio acumulativo.

7.1.2 Parámetros de recurrencia

Para obtener valores robustos de los valores de recurrencia partimos de definir dos zonas principales:

1. Una gran zona cubriendo Cuba y la parte principal de la zona de la falla Oriente.
2. El resto de la región.

Esta zonación principal se muestra en la Fig. 7.6. La razón para esta definición de zona extraña es porque cubre la sismicidad que influencia mayormente el territorio de Cuba, mientras que el resto de la sismicidad tiene menos influencia sobre la peligrosidad en su territorio. La sismicidad de Cuba y regiones marítimas cercanas se determina con mayor precisión debido a los estudios detallados conducidos por el. Además, la sismicidad de Cuba insular es generalmente de baja magnitud y “desaparece” si un valor alto de

magnitud mínima, lo cual puede conducir a valores inestables de β . Nosotros chequeamos la diferencia en el valor de β para Cuba insular y la falla Oriente, resultando que dichos valores son bastante similares, lo que es una justificación adicional para dicha zonación. En lo que sigue los valores mas estables de β y λ fueron determinados para esas zonas principales (llamadas Cuba y no-Cuba) y los mismos fueron usados como base para la cuantificación de la actividad de las zonas pequeñas y las fallas.

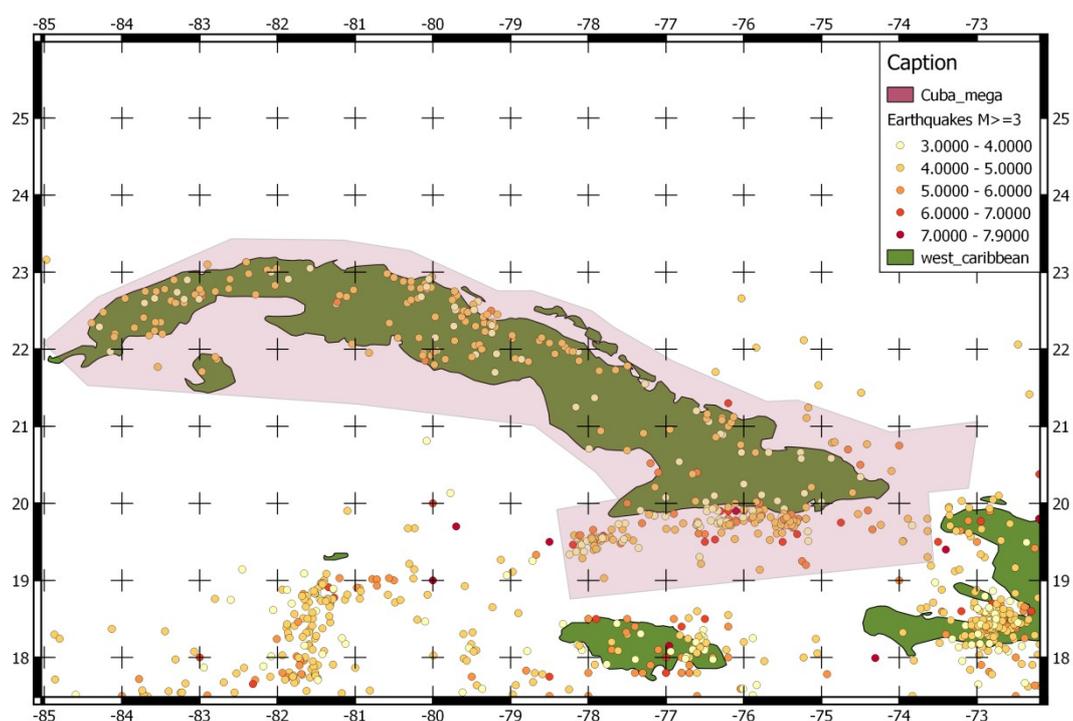


Figura 7.6. La definición de las zonas principales Cuba y el resto.

Basados en el análisis anterior, pudieron ser determinados los parámetros de recurrencia finales (G-R) para las regiones Cuba y no-Cuba, y los mismos fueron usados en los modelos computacionales de forma tal que los datos en cada zona (zonaciones fina y grosera) sumados correspondieran a la recurrencia total definida en las Fig. 7.7, 7.8 y 7.9 que se muestran mas abajo.

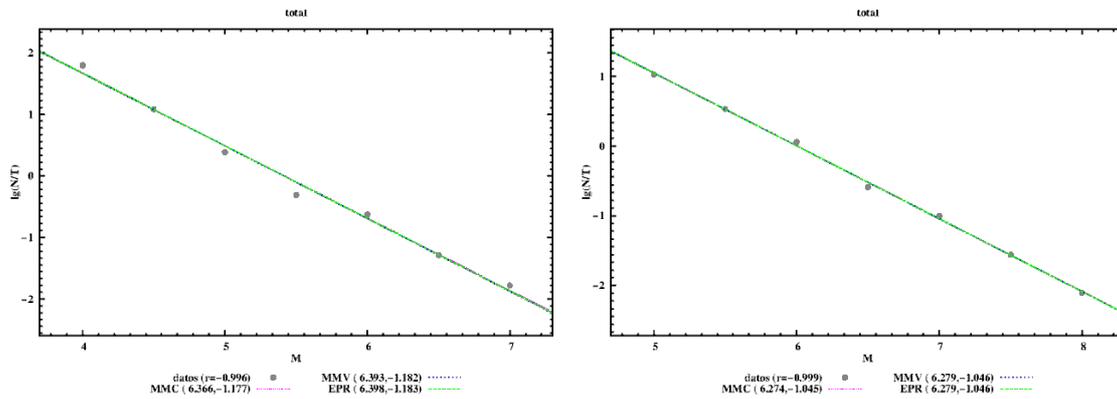


Figura 7.7. Ocurrencia de terremotos distributiva (no acumulativa) para las regiones de Cuba (izquierda) y no-Cuba (derecha). Nótese que el límite inferior de magnitud es diferente para las dos regiones.

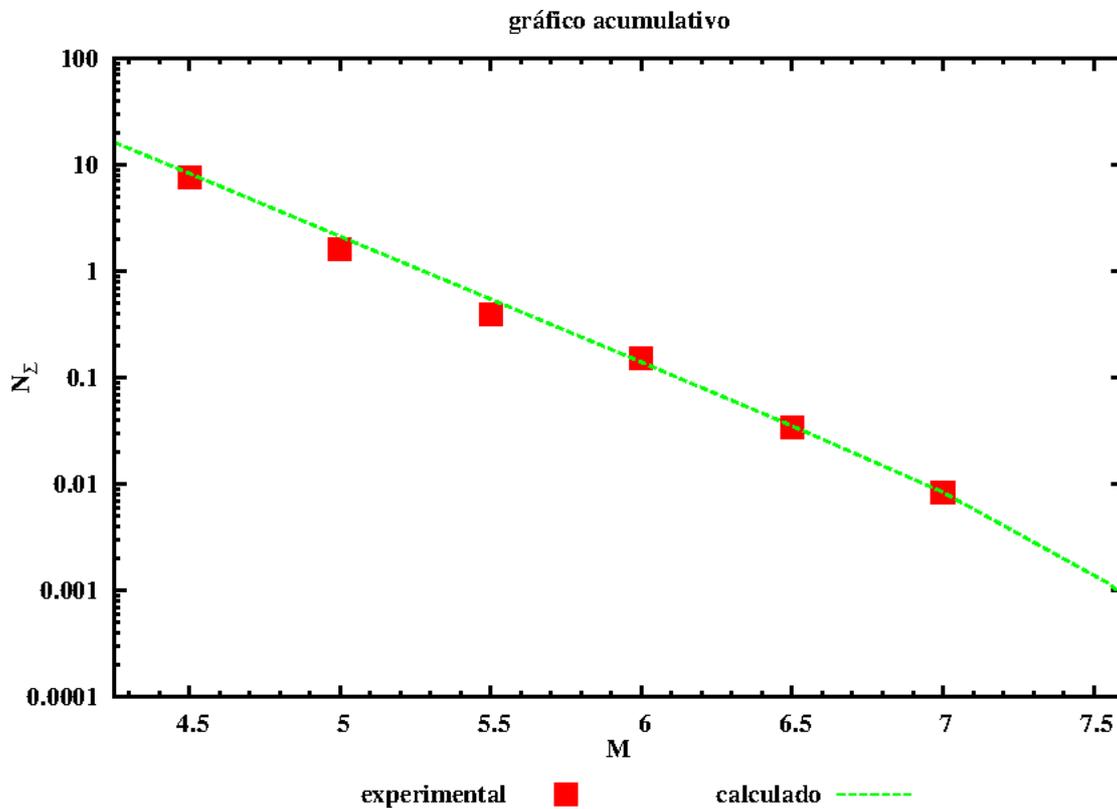


Figura 7.8. La distribución modificada de Gutenberg-Richter para la región de Cuba derivada de varios segmentos temporales del catálogo histórico de terremotos.

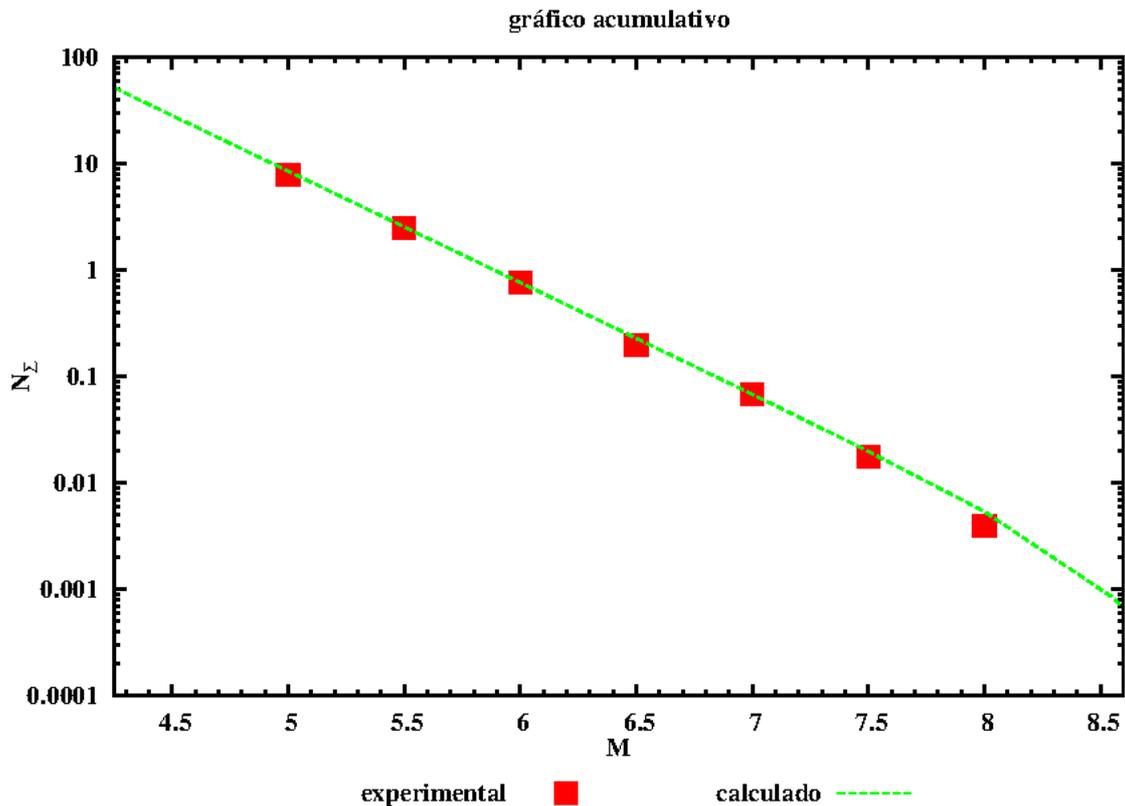


Figura 7.9. La distribución modificada de Gutenberg-Richter para la región exterior a Cuba derivada de varios segmentos temporales del catálogo histórico de terremotos .

8 Zonación

8.1 Zonación grosera; 9 “zonas madre”

De acuerdo a la distribución de la actividad sísmica hemos definido en este proyecto 9 “zonas madre” (grandes zonas en las cuales los parámetros de la recurrencia de los sismos puede ser definida con cierta confiabilidad). Esas 9 zonas representan el esqueleto en la zonación (muchas están tan lejos de Cuba que su influencia es mínima). Adicionalmente se definieron 6 zonas grandes de sismicidad de fondo que cubren los mares al norte y sur de Cuba y la sismicidad profunda al sudeste de Cuba. Las 9 zonas se muestran en la Fig. 8.1. La zonas de mayor importancia en el contexto presente son por supuesto las que cubren a Cuba y la falla Oriente al sur de Cuba.

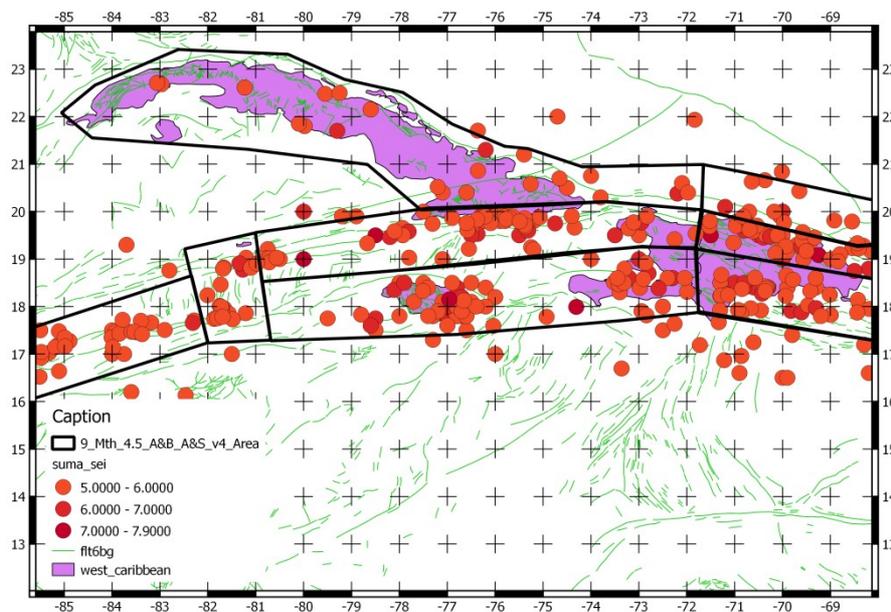


Fig. 8.1: Definición de 9 zonas principales (zonas madre) usadas en el proceso de cuantificación de los terremotos. Las fallas corresponden a las principales cartografiadas en la región (USGS Open File Report 97-470-K).

Las 9 “zonas madre” de la Fig. 8.1 son:

- **Oeste de Caimán.** Esta zona pertenece a la frontera entre las placas y muestra una actividad repetida y grandes terremotos.
- **Caimán.** Esta zona cubre la cresta del Caimán, una pequeña zona de expansión del fondo marino que exhibe una actividad intensa, algunas veces con fallamiento normal.
- **Jamaica.** Cubre Jamaica y el sur de Haití. Muestra una actividad intensa con terremotos fuertes y destructores repetidos, lo mismo en Haití que en Jamaica. Esta zona se considera como la rama sur de la frontera entre las placas del Caribe y Norteamericana.
- **Oriente.** Esta zona cubre la falla Oriente y la rama norte de la frontera entre las placas. Es la zona activa que afecta más a Cuba en términos de peligrosidad sísmica.
- **Sur de la República Dominicana.** Cubre la sismicidad al sur de la República Dominicana (incluyendo los eventos profundos a lo largo de la zona de subducción “Fosa de Muertos”).

- **Centro de la República Dominicana.** Esta zona cubre la sismicidad principal la República Dominicana y tiene poca influencia sobre Cuba.
- **Norte de la República Dominicana.** Cubre también los terremotos de la zona de subducción. Los mismos son muy fuertes pero debido a la distancia tienen una influencia limitada sobre la peligrosidad en Cuba.
- **Cuba.** Esta zona por supuesto es la que más influencia tiene sobre el país. En general la sismicidad es baja a intermedia con algunas excepciones noTablas.

Fueron definidas también seis zonas grandes de sismicidad de fondo tanto superficiales como profundas para cubrir regiones donde está disponible poca (o ninguna) información para la cuantificación de la sismicidad, donde la sismicidad puede, no obstante, influenciar en las zonas de Cuba insular.

8.2 Zonación fina; 39 “zonas hijas”

El conocimiento detallado de la sismicidad no se cubre con la zonación grosera, y un estimado basado solamente en la zonación grosera conducirá a valores promediados no reales, ignorando los patrones diferenciados de sismicidad dentro de cada una de las zonas grandes. Por esta razón se realizó una subdivisión en 39 zonas más pequeñas tomando en consideración la sismotectónica y la geología cartografiada (Cuba insular). En la Fig. 8.2 se muestran las 39 zonas más pequeñas.

La zonación fina es más detallada dentro del territorio insular de Cuba donde la influencia es más importante y el conocimiento de la sismotectónica está mejor desarrollado.

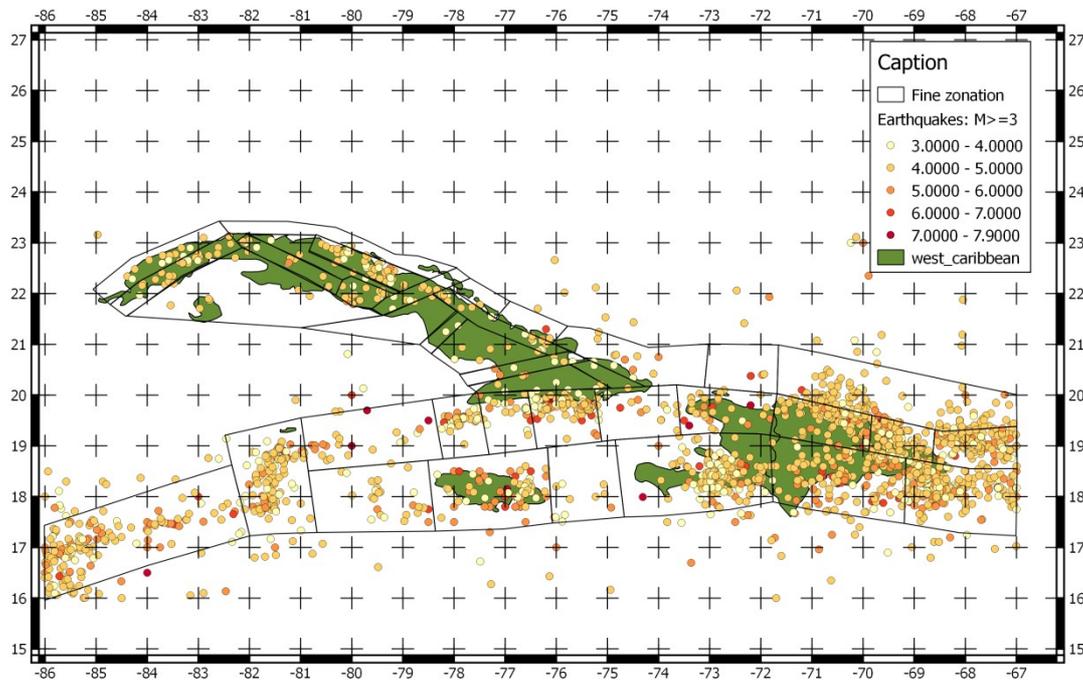


Fig. 8.2: Definición de las 39 zonas mas pequeñas “zonas hijas” usadas en el proceso de cuantificación de los terremotos. No está representada una zona que cubre la zona de subducción profunda al norte de la República Dominicana para evitar sobrecargar la figura.

De nuevo se incluyen las 6 zonas adicionales con sismicidad de fondo tanto superficial como profunda para cubrir las regiones donde hay poca o ninguna información para la cuantificación de la sismicidad, pero que no obstante puede influenciar en zonas de Cuba insular.

8.3 El modelo de fallas activas

Las fallas en el Caribe occidental no están particularmente bien cartografiadas, no obstante las estructuras fundamentales son bien conocidas. En la Fig. 8.3 se muestra el modelo de fallas completo según está descrito por el Open File Report 97-470-K (URL: http://pubs.usgs.gov/of/1997/ofr-97-470/OF97-470K/spatial/doc/faq/flt6bg_faq.html).

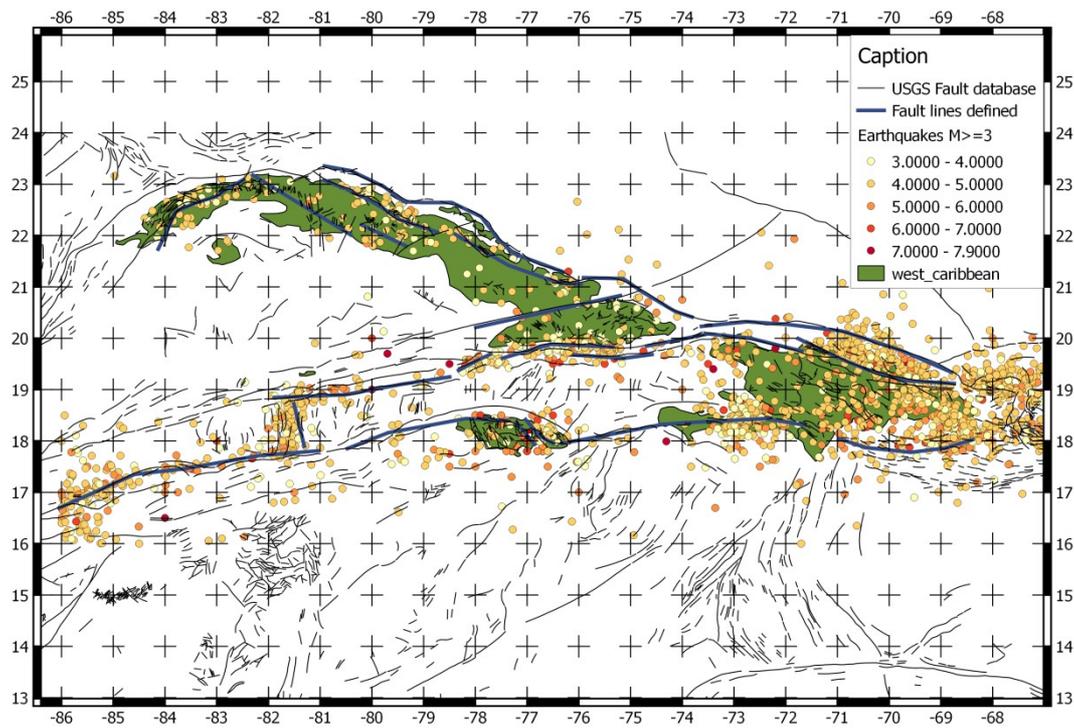


Fig. 8.3: Fallas cartografiadas en Caribe noroccidental. La base de datos principal es del USGS Open File Report 97-470-K, mientras que algunas fallas para Cuba son tomadas de Cotilla and Alvarez (1991).

A partir del cuadro general de fallas representado en la figura 8.3, definimos un conjunto de 22 fallas como representativas para la modelación. Debido a que los terremotos pueden ocurrir en la falla sin que sean exactamente cartografiados sobre la línea de falla (expresión superficial) se modelaron esas fallas con áreas envolventes que se extienden hasta 33km de la línea de falla. De aquí que la falla sea definida a través de su traza superficial con un área que rodea a la misma (la zona de falla potencial). En la Fig. 8.4 se muestra el modelo simplificado de fallas usado en el presente estudio.

¿Por qué un modelo de fallas? El modelo de fallas primero que todo refleja la identificación geométrica de las fallas principales. Si la información geológica hubiese estado disponible para cada una de las fallas hubiera sido usada para cuantificar el potencial sísmico. En el caso presente hemos usado la sismicidad dentro de las zonas de fallas. Como fue descrito mas arriba las fallas fueron definidas con la

envolvente de 33km desde la traza de la falla, pero en ningún caso se superpusieron las envolventes. Se definieron 21 zonas de falla alrededor de 22 fallas (una zona de fallas cubre dos fallas en Jamaica). La validez de este modelo es que es complementario a las fuentes de áreas donde el registro histórico de terremotos es la entrada primaria y la razón de la zonación. El modelo de fallas es complementario porque refleja la geometría de las fallas cartografiadas que se sospecha sean activas.

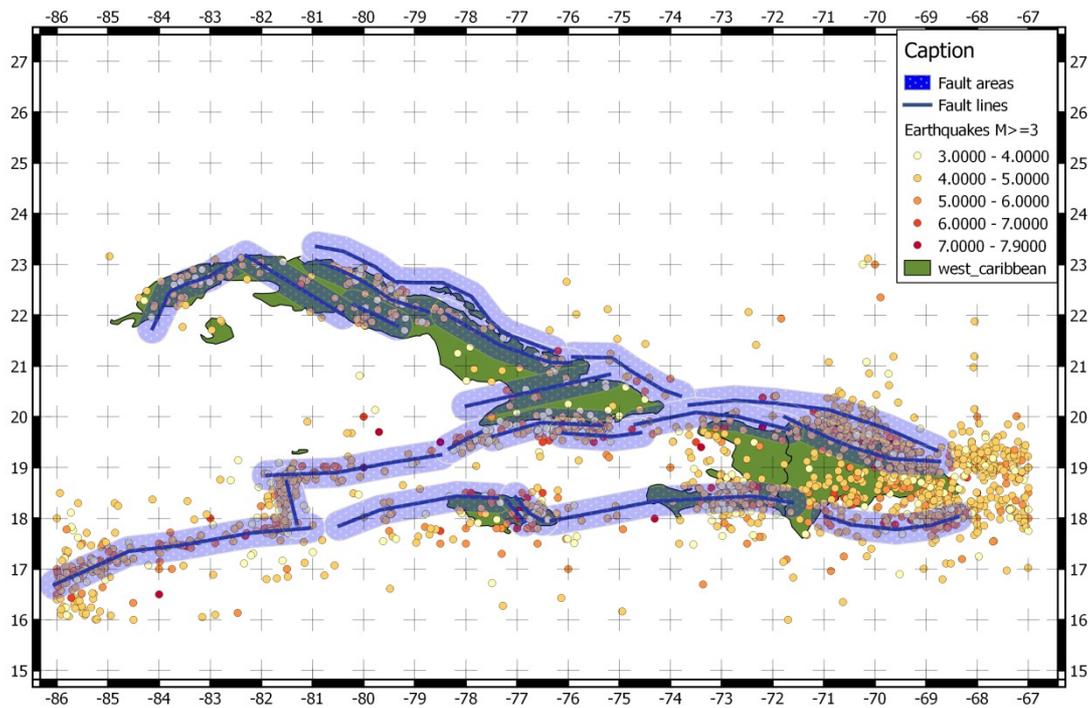


Fig. 8.4: Definición de las 22 fallas usada en el proceso de cuantificación de los terremotos. Cada falla fue definida 2 veces , una como una fuente lineal y otra como un área alrededor de la traza superficial de la falla.

8.4 El modelo de la sismicidad en celdas

El método no zonificado propuesto por Woo (1996) no ha sido muy usado hasta ahora desde Molina et al. (2001), pero solo recientemente ha ganado algún interés (Ornthammarath et al., 2008; Crespo et al., 2014). El principio fundamental es bien conocido: un uso mas directo del catálogo de terremotos en lugar de usar parámetros de recurrencia parametrizados y simplificados. El nuevo enfoque es que cada terremoto se trate como el centro de una fuente sísmica tal que un kernel de función de probabilidad de ocurrencia sea construido alrededor de ella. Además, el estimado

norma de la completitud de un catalogo (que la mayoría de las veces excluye los datos mas viejos de ser cuantitativamente usados) se sustituye por una función de probabilidad de reporte de magnitud tal que se construye una matriz que para diferentes ventanas e intervalos temporales indica la probabilidad de detección. Con este enfoque se puede establecer una observabilidad acumulativa y el catálogo completo al máximo de su valor informativo.

El enfoque original de Woo (1996) fue posteriormente llevado a un programa de cómputo (KERGRID) donde además se estableció una interfase para el programa CRISIS: Un conjunto diferente de tasas de actividad en celdas se calcula con un método basado en el kernel para un conjunto discreto de magnitudes, utilizable en la formulación general de sismicidad en celdas del CRISIS. El resultado es una combinación altamente flexible de los dos enfoques: tasas de actividad en celdas de una malla basadas en el método no zonificado del kernel y sismicidad en celdas que puede entrar en una combinación de árbol lógico con otros (mas convencionales) enfoques y usando una variedad de fórmulas de atenuación. En la combinación nuestra solo se utilizó un modelo en celdas. Esto tiene la consecuencia lógica de usar solo un fórmula de atenuación a la vez para la malla completa (ver los detalles abajo).

Lo autores no tienen conocimiento de muchas publicaciones (con la posible excepción de (Crespo et al., 2014 y Ornthammarath et al., 2008) donde se haya combinado de la misma forma el enfoque de Woo (1996) con enfoques mas convencionales.

Nuestro modelo de sismicidad en celdas toma su punto de partida del método del kernel definido inicialmente por Woo (1996). Este modelo tiene dos ventajas fundamentales:

- 1) Usa la información completa del catálogo (no solo dentro de límites de completitud predefinidos). El concepto de observación efectiva significa que se pueden incluir secciones incompletas del catálogo de terremotos, pero asignando a cada período la la probabilidad de que eventos de cierta magnitud sean registrados.
- 2) Usa cada terremoto como la fuente de una función de densidad de probabilidad aplicable a la recurrencia de terremotos en la región que lo rodea.

Basado en el programa (KERGRID) se pudo establecer un modelo de sismicidad en celdas. La malla establecida consiste en 1800 puntos con densidad 0.2 y 0.2 en latitud y longitud que cubren toda cuba y

las regiones adyacentes, usando la información de sismicidad desde M4.5 hasta M7.5 con saltos de $\Delta M=0.5$. Para cada rango de magnitud se estableció una tabla de período de observación efectivo tal que pudo ser usado el catálogo completo con $M \geq 4.5$.

9 Obtención de los parámetros de la recurrencia de terremotos

9.1 Fuentes en forma de áreas

El catálogo de terremotos descrito más arriba el esqueleto para cuantificar la actividad sísmica futura. En este punto, el catálogo original de 64541 terremotos entre 1502 y 2012 fue limpiado de premonitores y réplicas y sus magnitudes convertidas a M_w . El catálogo resultante para nuestras regiones contiene 3430 terremotos con $M \geq 3$ y 117 terremotos con $M \geq 6.0$. Con este catálogo de terremotos reducido se realizó el procesamiento para la obtención de los parámetros de recurrencia.

La primera división se hizo en dos regiones: Cuba y el resto. Dentro de esas 2 megaregiones se tienen suficientes datos históricos para establecer relaciones de recurrencia confiables. Se siguió el siguiente proceso para cada megaregión:

- 1) Primeramente el catálogo fue representado en forma de una matriz de intervalos de tiempo y magnitud y se determinaron para cada intervalo de magnitud los límites de completitud. Esto se realizó siguiendo el procedimiento de Stepp (1972), pero a la misma vez se utilizó el conocimiento sobre la variabilidad del monitoreo en el tiempo. Se establecieron los períodos de completitud para cada intervalo de magnitud y se prepararon los gráficos distributivos de la sismicidad que se muestran en las Fig. 9.1 y 9.2.
- 2) El siguiente paso fue calcular los valores de λ y β para esas dos regiones. Siguiendo el criterio de calcular esos valores a partir de la relación modificada de Gutenberg-Richter, se usó la β de las regresiones de los gráficos distributivos y se calculó λ de acuerdo a la relación que sigue (descrita también con anterioridad).

$$N_{\Sigma}^*(M) = 10^{\alpha - b(M - M_0)} / (b \cdot \ln 10) \cdot \left\{ 1 - 10^{-b(M_{\max} - M)} \right\}$$

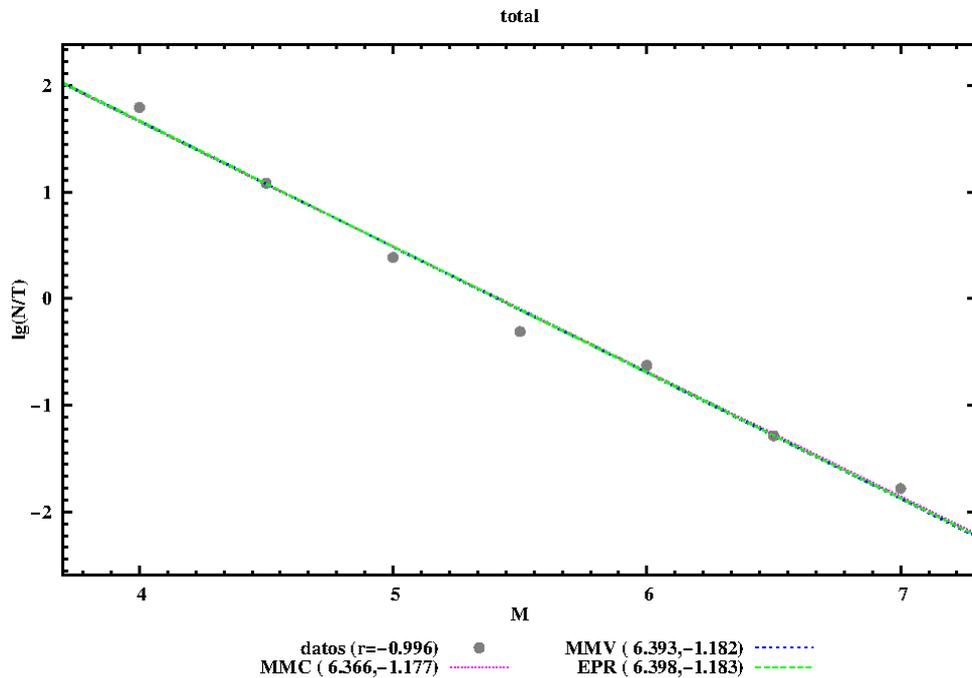


Fig. 9.1: Ocurrencia distributiva (no-acumulativa 5,70) de terremotos para la región de Cuba.

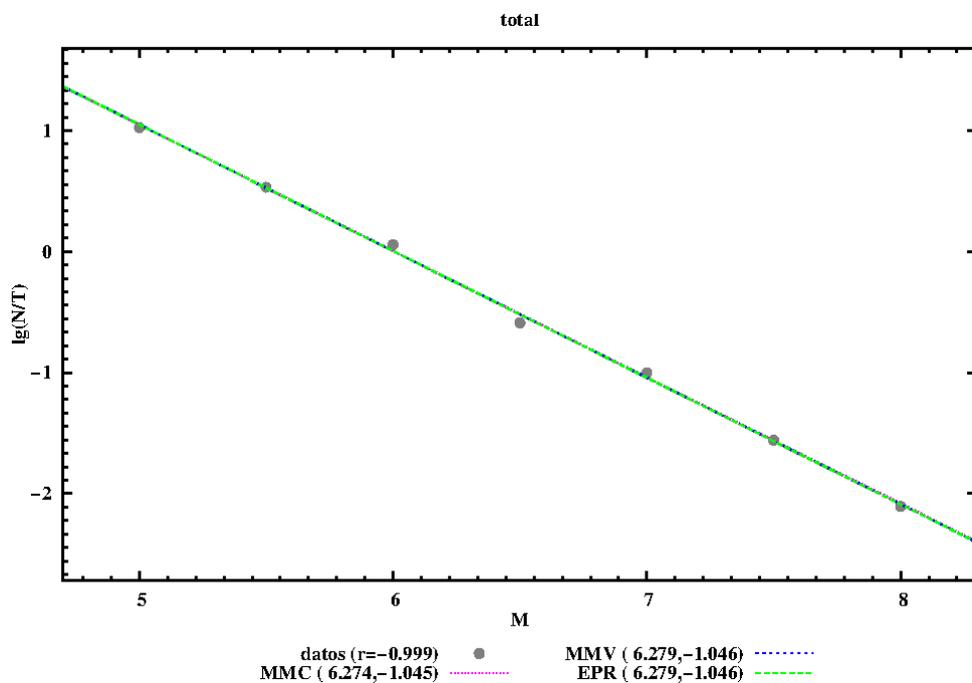


Fig. 9.2: Ocurrencia distributiva (no-acumulativa) de terremotos para la región exterior a Cuba.

10 Selección de las relaciones de atenuación

La selección de modelos de atenuación del movimiento del terreno adecuados para usar en la modelación del peligrosidad sísmica probabilística es un reto constante, debido fundamentalmente a la escasez de de datos de alta calidad del movimiento del terreno para la región en cuestión, y la no menor escasez de registros de movimientos del terreno de terremotos fuertes a cortas distancias. En el estudio presente nos encontramos con un reto adicional: en Cuba y sus alrededores encontramos tanto corteza continental estable (SCR) y corteza sujeta a una deformación presente activa al sur, donde la falla de orientación E-O Oriente corre paralela a la costa y constituye la zona de deformación que separa el continente norteamericano de la placa del Caribe. En esa situación donde usamos múltiples modelos en varios ambientes diferentes hemos usado la experiencia y el criterio de experto de otros.

El proyecto GEM (www.globalquakemodel.org) tuvo un grupo de expertos internacionales evaluando las relaciones de atenuación disponibles globalmente. Las recomendaciones del grupo de expertos discuten el uso de varias relaciones desarrolladas tanto para zonas activas como para regiones de tipo SCR. En el presente estudio hemos usado una combinación de las siguientes relaciones de atenuación (Douglas et al., 2013):

- Campbell y Bozorgnia (2008) para corteza activa (zonas de deformación relacionadas con la frontera de las placas)
- Abrahamson y Silva (2008) para corteza activa (zonas de deformación relacionadas con la frontera de las placas)
- Pezeshk et al. (2011) para regiones estables continentales (fundamentalmente dentro y alrededor de Cuba)
- Atkinson y Boore (2006) para regiones estables continentales (fundamentalmente dentro y alrededor de Cuba)

Las Figs. 10.1 a la 10.3 muestran algunas de las características de las 4 relaciones elegidas. Ellas son bastante diferentes y por supuesto, han sido desarrolladas para condiciones tectónicas diferentes, y esto fue también una motivación para la elección. Mientras que el escalado de de magnitud es muy pronunciado para la (Fig. 10.2) resulta casi similar para $S_a(1 \text{ seg.})$ (Fig. 10.3).

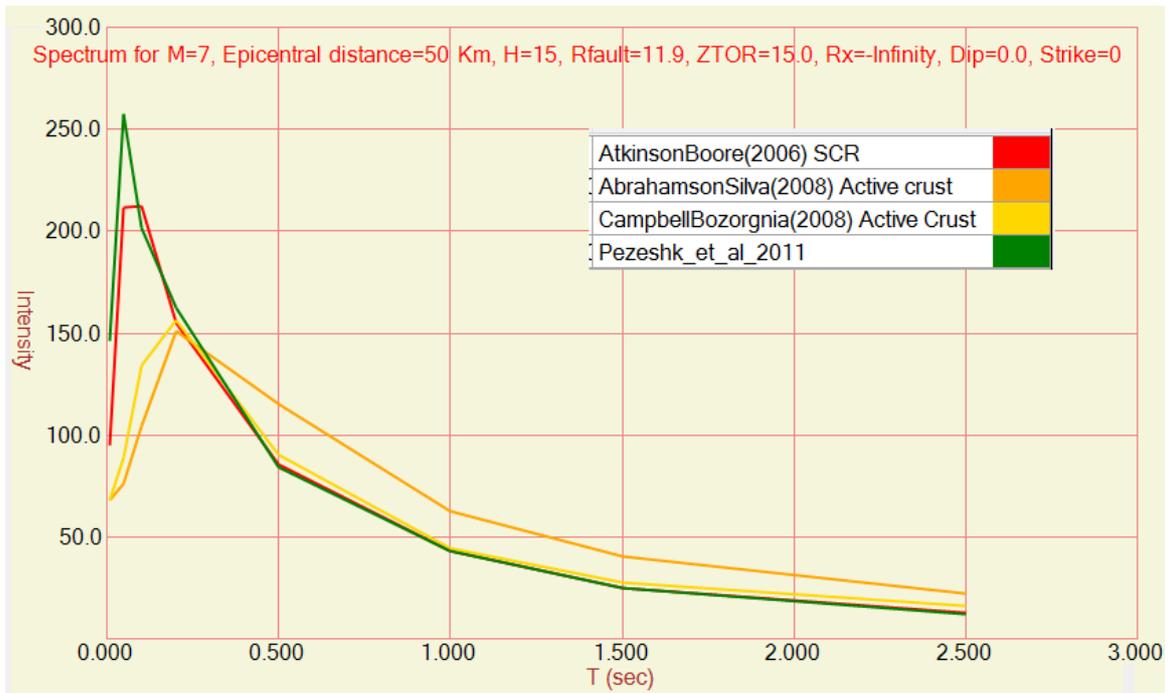


Fig. 10.1: Aceleración espectral de las 4 relaciones de atenuación elegidas para un terremoto de M7 a 50 km de distancia.

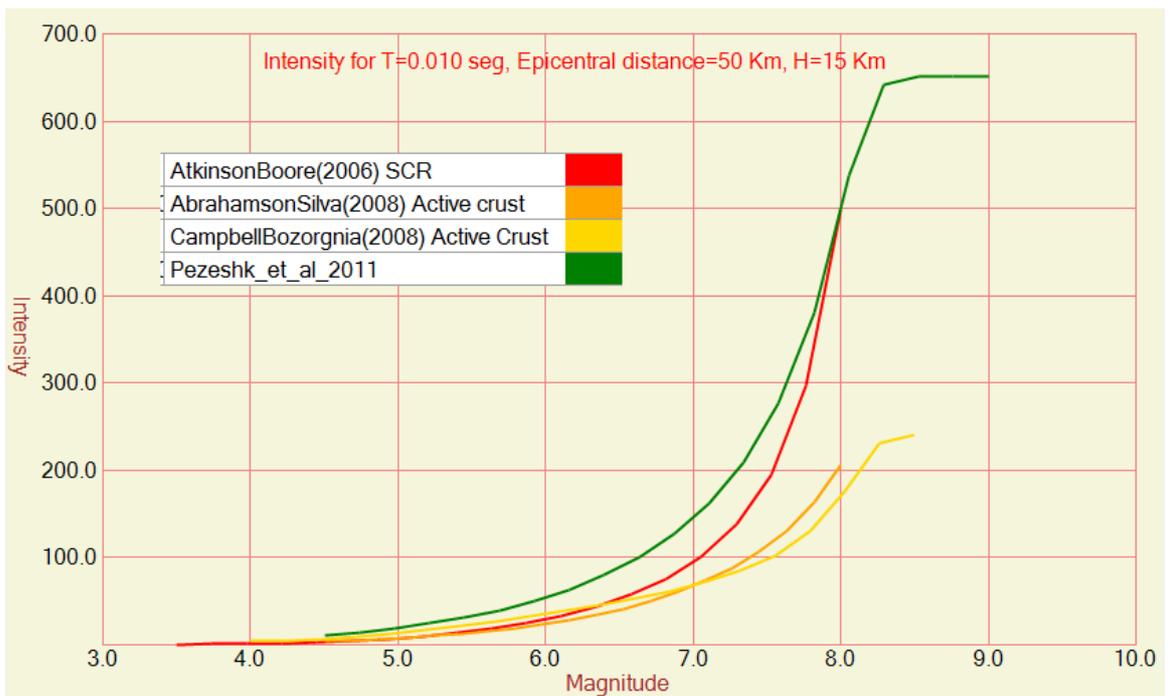


Fig. 10.2: Características del escalado por magnitud de las 4 relaciones usadas (para PGA).

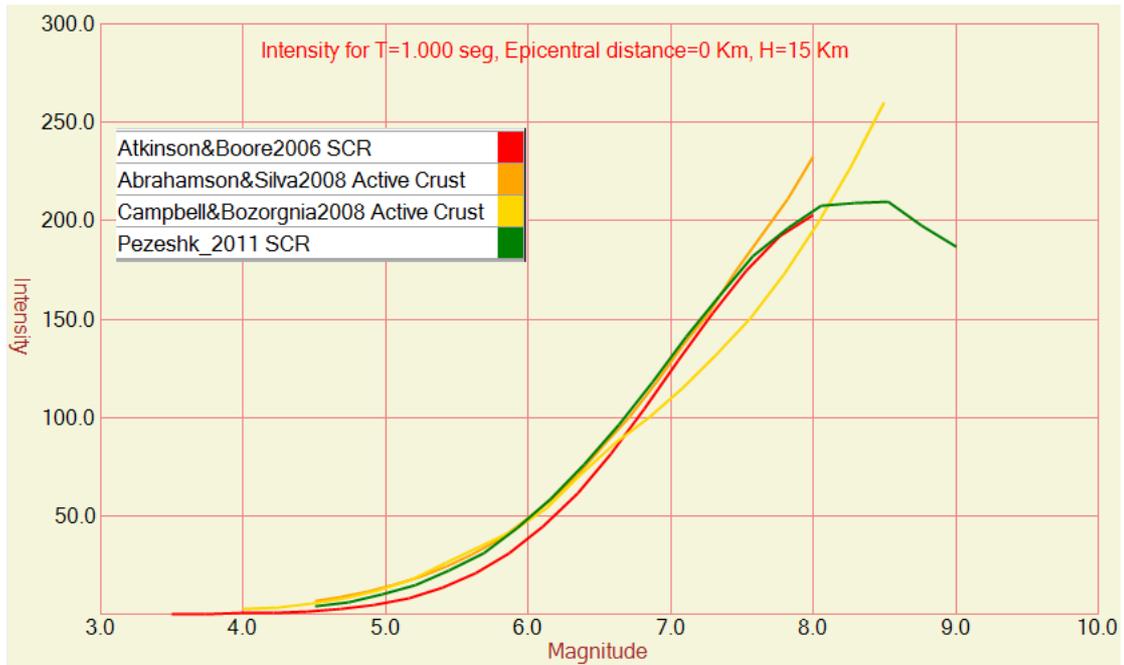


Fig. 10.3: Características del escalado por magnitud de las 4 relaciones usadas (para $T = 1$ seg.).

Estas fueron las cuatro relaciones de atenuación que se usaron en combinación con pesos en la investigación presente. Para todas las relaciones usadas adoptamos los valores de sigma aportados por sus autores. Para la sismicidad poissoniana generalizada por supuesto no es posible usar diferentes relaciones de atenuación para diferentes fuentes puntuales. Las relaciones fueron usadas en las siguientes combinaciones (Tabla 10.1):

Tabla 10.1: *Combinaciones de relaciones de atenuación usadas en este estudio.*

Tipo de modelo	Attenuation 1 (SCR)	Atten. 2 (regiones activas)
Zonación grosera (9 zonas)	Pezeshk et al (2011)	Campbell & Bozorgnia (2008)
Zonación grosera (9 zonas)	Pezeshk et al (2011)	Abrahamson & Silva (2008)
Zonación grosera (9 zonas)	Atkinson & Boore (2006)	Campbell & Bozorgnia (2008)
Zonación grosera (9 zonas)	Atkinson & Boore (2006)	Abrahamson & Silva (2008)
Zonación fina (39 zonas)	Pezeshk et al (2011)	Campbell & Bozorgnia (2008)
Zonación fina (39 zonas)	Pezeshk et al (2011)	Abrahamson & Silva (2008)
Zonación fina (39 zonas)	Atkinson & Boore (2006)	Campbell & Bozorgnia (2008)
Zonación fina (39 zonas)	Atkinson & Boore (2006)	Abrahamson & Silva (2008)
Fallas (45)	Pezeshk et al (2011)	Campbell & Bozorgnia (2008)
Fallas (45)	Pezeshk et al (2011)	Abrahamson & Silva (2008)
Fallas (45)	Atkinson & Boore (2006)	Campbell & Bozorgnia (2008)
Fallas(45)	Atkinson & Boore (2006)	Abrahamson & Silva (2008)
Sismicidad poissoniana generalizada (KERGRID)	Pezeshk et al (2011)	
Sismicidad poissoniana generalizada (KERGRID)	Atkinson & Boore (2006)	
Sismicidad poissoniana generalizada (KERGRID)	Abrahamson & Silva (2008)	
Sismicidad poissoniana generalizada (KERGRID)	Campbell & Bozorgnia (2008)	

11 El modelo computacional

Hemos aplicado un modelo computacional de PSHA basado en zonación por área, modelación de fallas (fuentes lineales) y un modelo de sismicidad poissoniana generalizada en el cual creamos los parámetros de recurrencia para el modelo poissoniano generalizado usando el modelo KERGRID tal como fue sugerido inicialmente por Woo (1996) e implementado por R Secanell (software no referenciado).

11.1 Los modelos en forma de áreas

Los modelos en forma de área fueron definidos mediante una combinación de la distribución de la sismicidad y las características tectónicas generales de la región. Estos modelos consisten en 2 diferentes: uno grosero de 9 zonas y uno detallado de 39 zonas.

Los valores de M_{max} se estiman para cada zona individualmente y generalmente por la opinión de experto sobre que magnitud de

terremoto puede ocurrir físicamente dentro de cada zona. Como una regla aproximada el valor asignado de M_{max} es al menos 5 decimales mayor que la M_{max} histórica.

Los parámetros de la recurrencia para las regiones de Cuba y no-Cuba como un todo fueron definidos usando la metodología modificada de Gutenberg-Richter. El valor de β se fijó entonces igual para todas las zonas mientras que el de λ para cada zona fue definido en función de la ocurrencia de terremotos dentro de ella (número de terremotos que excede diferentes umbrales). Los parámetros determinados se muestran a continuación:

Tabla 11.1: *Parámetros de recurrencia usados en los cálculos de peligrosidad con las zonas grandes ("zonas madre"). (Nota: esta tabla y las que siguen son imágenes, no se pueden traducir)*

Name of zone	λ	β	Mlow	Mmax
West Cayman	2.95	2.49	4.5	7
Cayman	0.842	2.49	4.5	6.5
Jamaica	1.99	2.49	4.5	7.8
Oriente	3.52	2.49	4.5	7.8
South Dominican Republic	2.42	2.49	4.5	7.5
Central Dominican Republic	3.79	2.49	4.5	8
North Dominican Republic	1.2	2.49	4.5	6.8
Cuba	0.89	2.49	4.5	6.7
Deep northern Dominican Republic	3.391	2.45	4.5	7.5

Tabla 11.2: *Parámetros de recurrencia usados en los cálculos de peligrosidad con las zonas pequeñas.*

Name of Zone	λ	β	Mlow	Mmax
Falla Septentrional	1.4	2.4	4.5	8
Bahia Samana	0.45	2.4	4.5	8
Paso Mona Norte	2	2.4	4.5	8
Azua Enriquillo	1.49	2.4	4.5	7.5
Paso Mona Sur	0.82	2.4	4.5	7.5
North Dominican	1.13	2.4	4.5	6.8
Leogane	0.88	2.4	4.5	7.8
Mar Jamaica Haiti	0.17	2.4	4.5	7.8
Jamaica	0.47	2.4	4.5	7.8
Cayman	0.79	2.4	4.5	6.5
Mar Cayman Jamaica	0.3	2.4	4.5	7.8
Falla Oriente Oeste	0.46	2.4	4.5	7.8
Cabo Cruz	0.44	2.71	4.5	7.8
Pilon	0.35	2.71	4.5	7.8
Santiago	2.14	2.71	4.5	7.8
Guantanamo	0.37	2.71	4.5	7.8
Mole St Nicol	0.6	2.4	4.5	7.8
Tortuga	0.14	2.4	4.5	6.2
West Cayman	2.76	2.4	4.5	7
Pinar	0.066	2.71	4.5	6.7
Trocha	0.07	2.71	4.5	6.2
Camaguey	0.007	2.71	4.5	6.2
Sutura Central	0.084	2.71	4.5	6.2
Cubitas	0.044	2.71	4.5	6.2
Gibara	0.07	2.71	4.5	6.7
Cauto Nipe	0.07	2.71	4.5	6.2
Cayo Romano	0.017	2.71	4.5	6.7
Moa	0.2	2.71	4.5	6.7
Consolacion	0.045	2.71	4.5	6.2
Norte Cubana	0.006	2.71	4.5	6.2
Purial	0.037	2.71	4.5	6.2
Trinidad	0.034	2.71	4.5	6.2
Habana - Cienfuegos	0.029	2.71	4.5	6.2
Isla Juventud	0.027	2.71	4.5	6.2
Zone Ciego	0.015	2.71	4.5	6.2
Zona Camaguey	0.05	2.71	4.5	6.2
Sierra Maestra	0.07	2.71	4.5	6.2
Habana - Manzanillas	0.003	2.71	4.5	6.2

11.2 El modelo de fallas

El modelo de fallas consiste en cuantificar 22 fallas activas como ya ha sido mostrado. La actividad asociada a cada una fue dividida a partes iguales entre las fuentes lineales y las áreas que las rodean. La actividad sísmica para cada falla se obtuvo contando el número de terremotos dentro de un área con una distancia máxima de 30 km de la traza de la falla, asumiendo que esos terremotos en realidad pertenecen a rupturas en las fallas cartografiadas o se asocian a ellas.

La cuantificación del modelo de fallas se hizo contando los terremotos dentro de todas las zonas que rodean a las fuentes lineales y multiplicando el valor de λ_T así obtenido para toda la región por una fracción que refleje el número de terremotos en diferentes intervalos de magnitud para cada una de las fallas.

Tabla 11.3: *Parámetros de recurrencia usados en los cálculos de peligrosidad con las fallas (elementos lineales).*

Name of Zone	λ	β	Mlow	Mmax
B6 Azua	0.838983	2.25	4.5	7.5
B4 Haití - Jamaica	0.450491	2.25	4.5	7.8
B2 Jamaica - Cayman	0.118818	2.25	4.5	7.8
B1 Western Cayman	0.464455	2.25	4.5	7
B13 Northern Hispaniola	0.407641	2.25	4.5	6.8
B12 Moa	0.091579	2.25	4.5	6.7
B11 Falla Septentrional	0.576084	2.25	4.5	8
B9 Haití Oriente	0.202348	2.25	4.5	8
B8 Guantanamo Pinar	1.817519	2.25	4.5	7.8
B7 Cabo Cruz Cayman	0.379236	2.25	4.5	7.8
B20 Sutura Central	0.08575	2.25	4.5	6.2
B19 Pinar	0.09748	2.25	4.5	6.7
B18 Sur Guantanamo	0.291732	2.25	4.5	7.8
B16 Cabo Cruz	0.373076	2.25	4.5	7.8
B14 Jamaica Centre	0.2196	2.25	4.5	7.8
B22 Norte Cubana	0.044667	2.25	4.5	6.2
B23 Cúbitas	0.08668	2.25	4.5	6.7
B5 CautoNipe	0.052062	2.25	4.5	6.2
B10 Escambray	0.027065	2.25	4.5	6.2
B15 Habana Cienfuegos	0.008933	2.25	4.5	6.2
B17 Cayman	0.070238	2.25	4.5	6.5

11.3 El modelo de celdas

El modelo de celdas fue definido exclusivamente basado en un modelo de sismicidad poissoniana generalizada (Woo, 1996) usando una malla de 0.2x0.2 grados y definiendo el umbral de detección efectiva para varias magnitudes que se indica a continuación:

Tabla 11.4: *Período efectivo de observación (Teff) para varios umbrales de magnitud obtenidos para y aplicados en el modelo KERGRID (el cual es la base del modelo poissoniano generalizado de la sismicidad; un modelo de fuentes puntuales)*

M	Tcomp	Ncomp	Tout	Nout	Teff
4.5	39	577	472	274	57.5
5	44	223	467	125	68.7
5.5	49	73	462	63	91.3
6	99	43	412	17	138.1
6.5	162	24	349	11	236.3
7	362	19	149	0	362
7.5	362	6	149	0	362
8	510	0	1	0	510

En los cálculos se usó un kernel finito con un índice de escalado fractal de 1.75 junto con un ancho de banda de los parámetros de 20 y 0.1 que ha sido recomendado como conveniente generalmente. Los radios máximo y mínimo del kernel se fijaron en 10 y 100 km respectivamente. No se introdujo sismicidad de fondo. Los cálculos cubrieron la región 17 - 24.5°N y 85 - 70°O.

Los resultados del se convirtieron en ficheros en formato capaz de ser leído por el CRISIS considerando el caso de modelo de recurrencia "Sismicidad poissoniana generalizada (SPG). En el modelo implementado para cada celda de la malla representa una fuente de sismicidad λ (calculado por el KERGRID) y asignada para cada rango de magnitud.

Un problema en el modelo KERGRID fue fijada la profundidad a ser usada por las fuentes puntuales. En los modelos en forma de áreas fueron fijados 20 km para zonas de corteza activas y 15 km las continentales estables. En este caso la diferenciación no es tan simple el modelo extiende uniformemente la sismicidad correspondiente a los terremotos ocurridos en la frontera entre los dos regímenes tectónicos. Se probaron varias variantes:

- h=15 km para toda la región - peligrosidad muy alta

- $h=20$ km para toda la región - peligrosidad muy baja para las zonas estables continentales
- $h=20$ km para latitud $\leq 20^\circ$ N. y 15 km para latitud $>20^\circ$ N. - valores irreales de la peligrosidad para Cuba oriental con isolíneas cerradas en tierra
- $h=20$ km para latitud $\leq 21^\circ$ N. y 15 km para latitud $>21^\circ$ N. - baja peligrosidad para Cuba oriental

Considerando este comportamiento se decidió usar un modelo en el cual hay una variación suave desde la profundidad de 20 km hasta la de 15 km según nos movemos desde los 20° N. hasta 21° N.

12 Resultados

Los modelos de peligrosidad probabilística se describen en mapas de PGA con un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años, junto que los espectros para ciudades seleccionadas con las mismas probabilidades de excedencia. Todos los resultados se refieren a roca (condiciones tipo B del NEHRP).

Algunos de los resultados para PGA con diferentes pesos de los modelos de entrada se muestran en las Figs. 12.1 y 12.3 hasta la 12.7, mientras que la Fig. 12.2 muestra el mapa de amplitud espectral $S_a(1 \text{ seg})$ con pesos similares que la Fig. 12.1.

Mientras que estos resultados varían en realidad se reconoce cierta estabilidad en los resultados, lo que indica que los diferentes modelos arrojan resultados comparables.

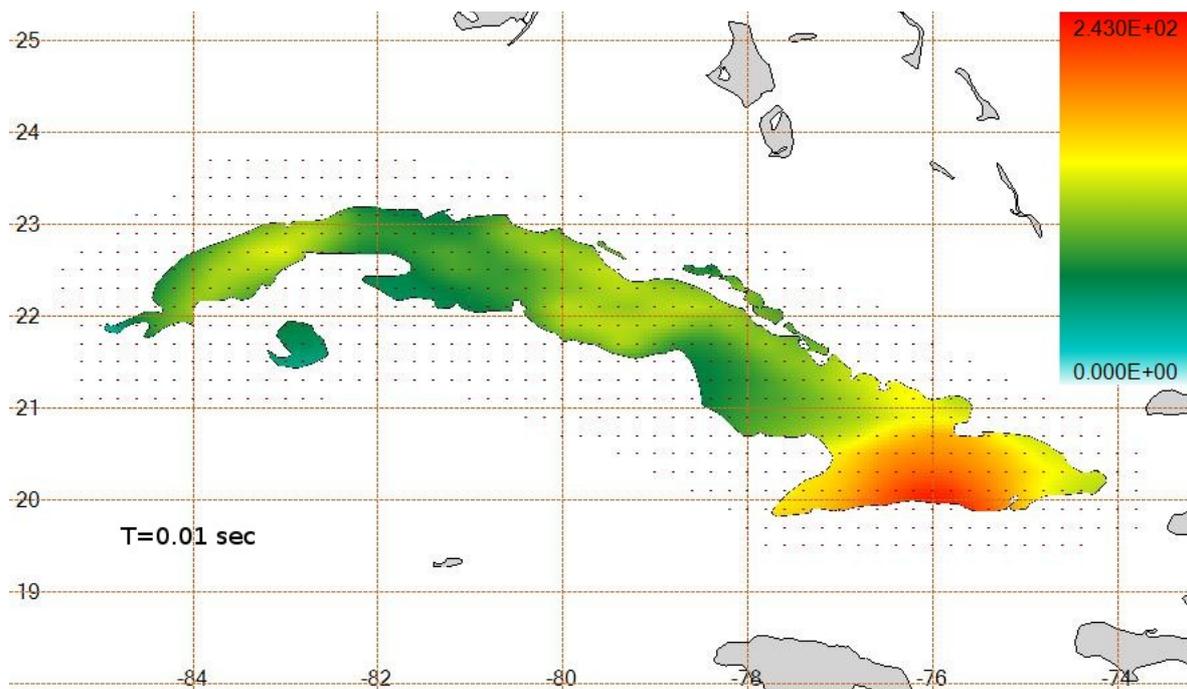


Fig. 12.1: Valores de PGA para una excedencia del 10% en 50 años. 16 modelos. Todos los modelos con igual peso. $Max_{PGA} = 237$ cm/seg en tierra.

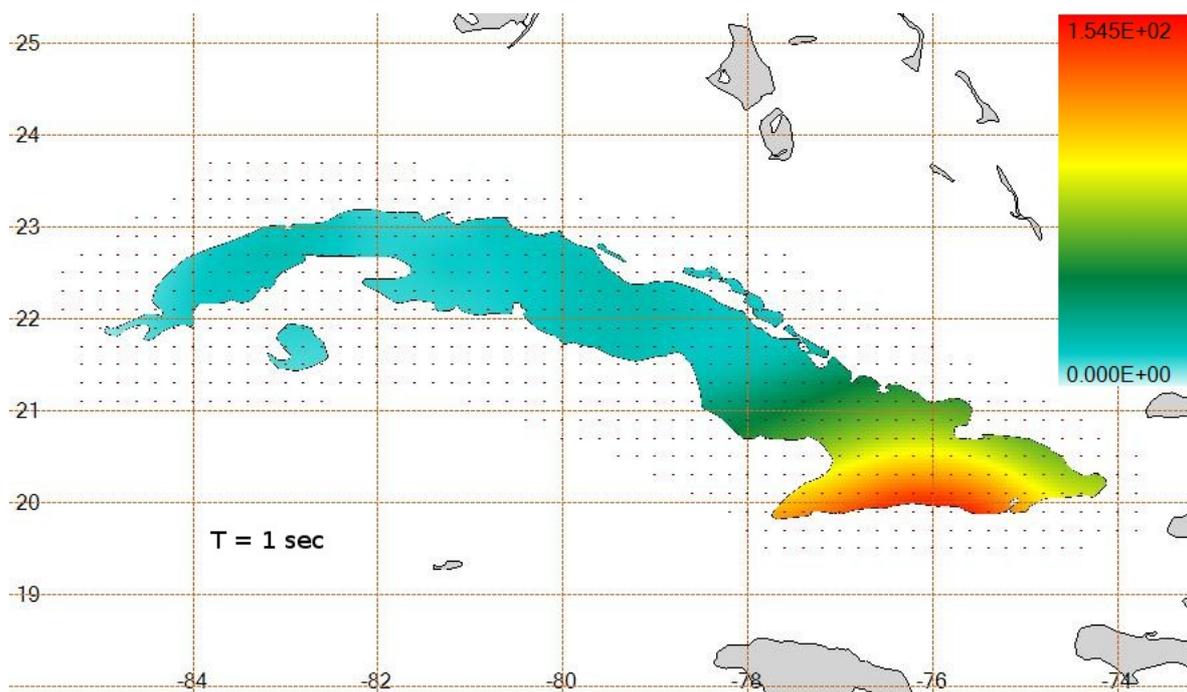


Fig. 12.2: Valores de $S_a(1$ seg) para una excedencia del 10% en 50 años. 16 modelos. Todos los modelos con igual peso. $Max_{S_a(1\text{ seg})} = 148$ cm/seg en tierra.

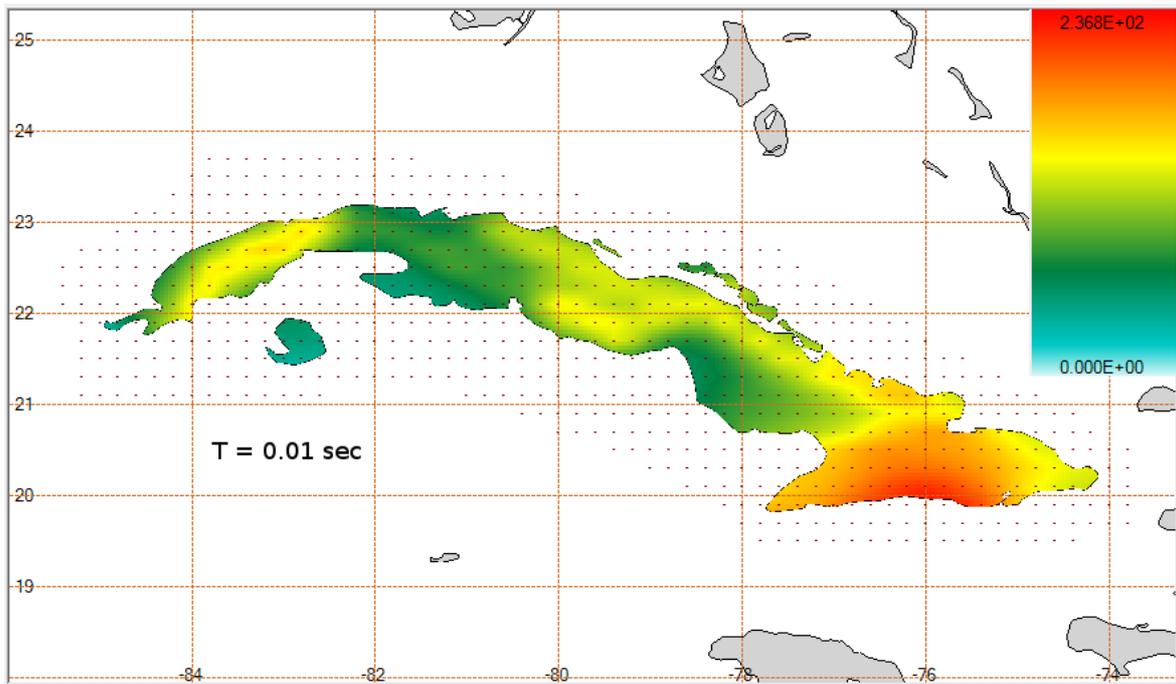


Fig. 12.3: Valores de PGA para una excedencia del 10% en 50 años. 16 modelos. Mitad del peso para las zonaciones groseras y los modelos de KERGRID. $Max_{PGA} = 230$ cm/seg.

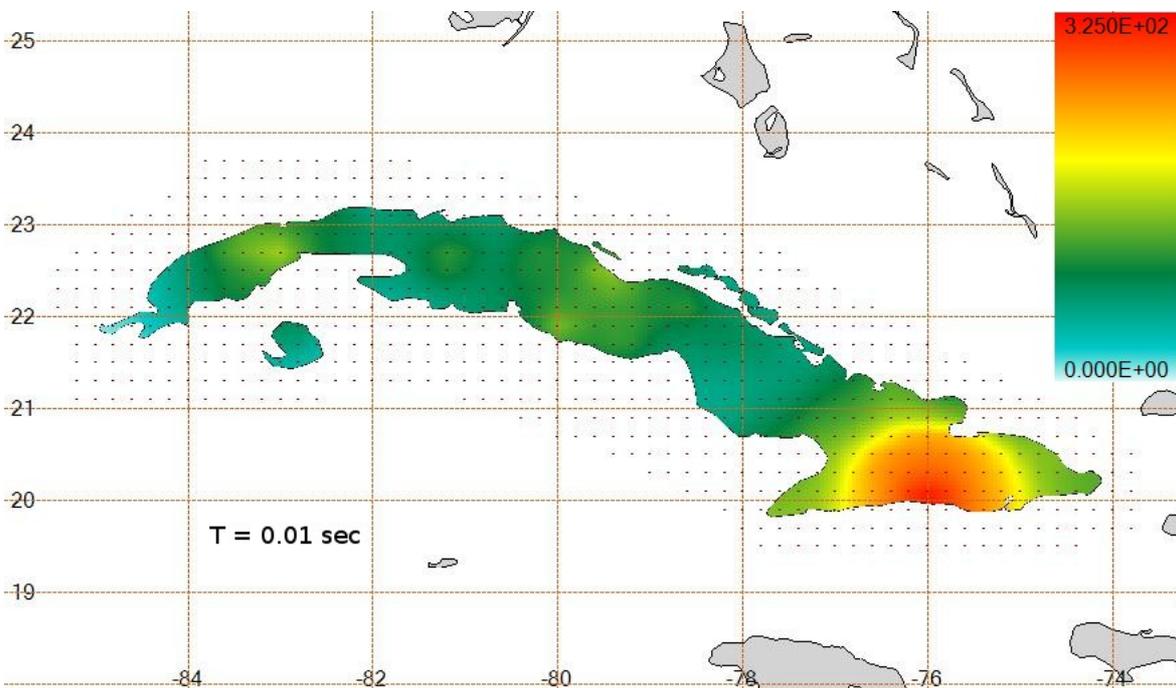


Fig. 12.4: Valores de PGA para una excedencia del 10% en 50 años. 4 modelos. Modelos del KERGRID con igual peso. $Max_{PGA} = 318$ cm/seg.

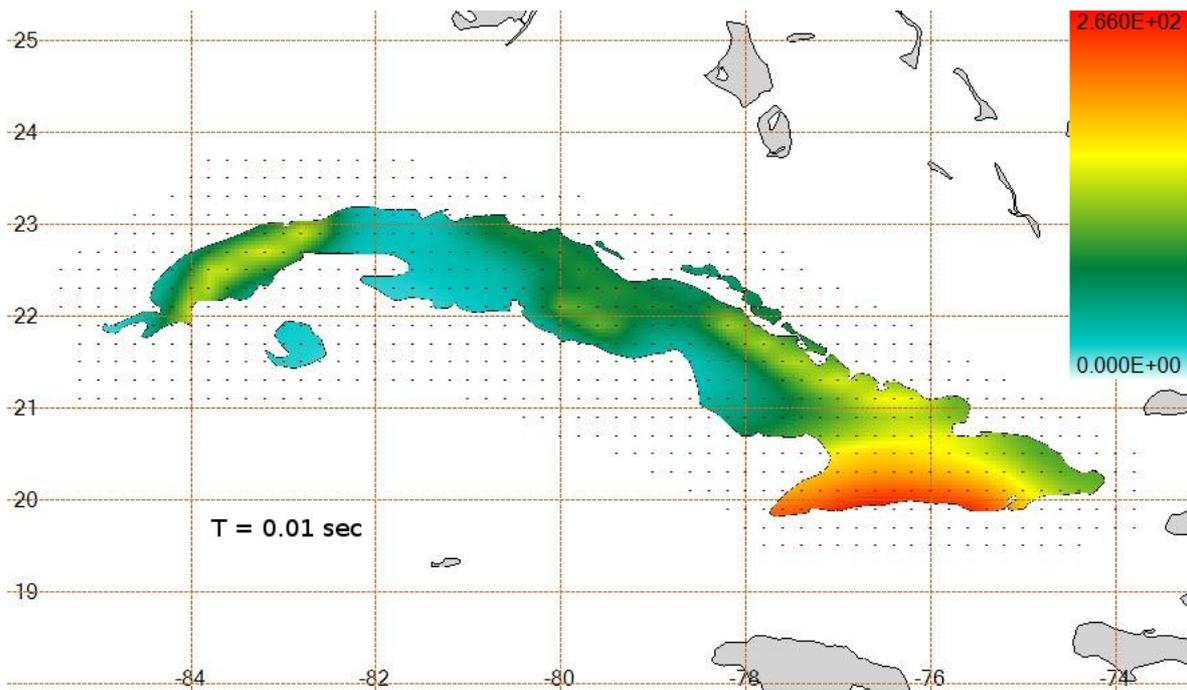


Fig. 12.5: Valores de PGA para una excedencia del 10% en 50 años. 4 modelos. Modelo de fallas con igual peso. $Max_{PGA} = 260$ cm/seg.

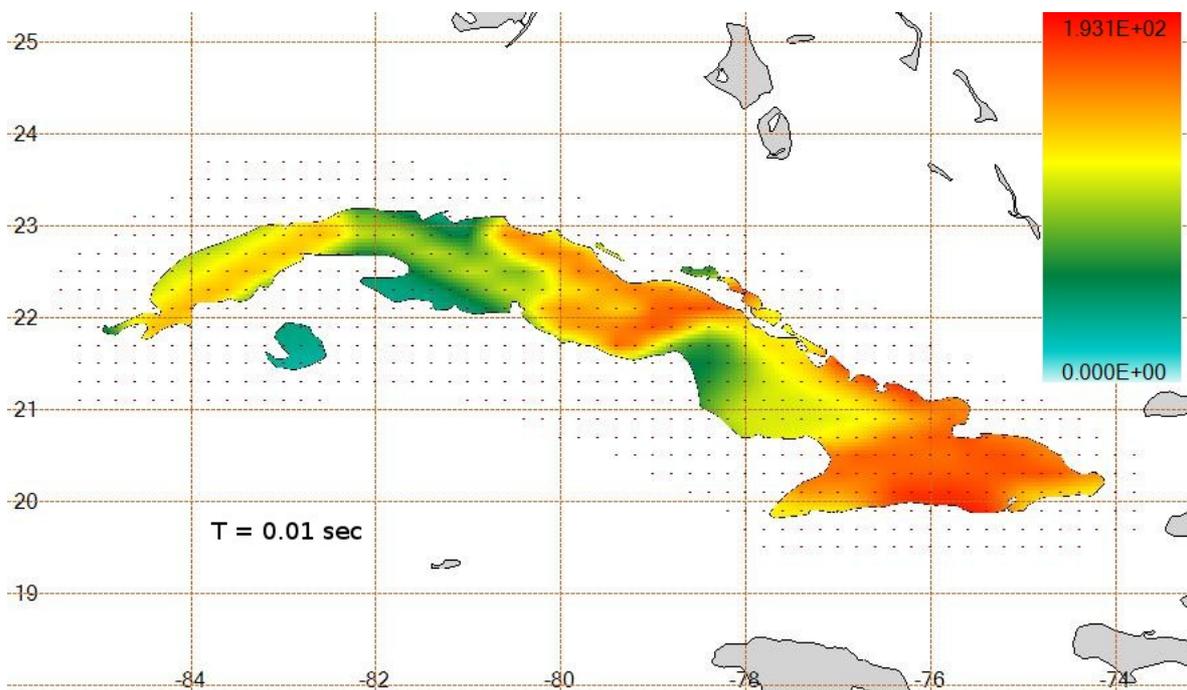


Fig. 12.6: Valores de PGA para una excedencia del 10% en 50 años. 4 modelos. Modelos de zonación detallada en áreas con igual peso. $Max_{PGA} = 185$ cm/seg.

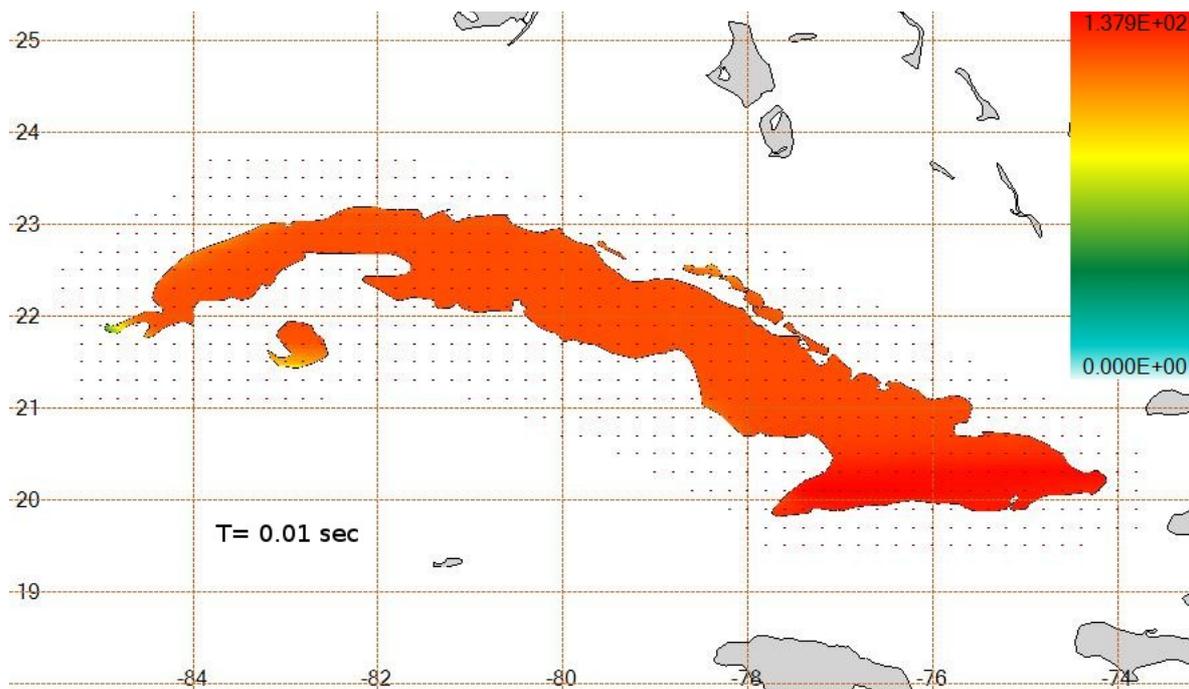


Fig. 12.7. Valores de PGA para una excedencia del 10% en 50 años. 4 modelos. Modelos de zonación grosera en áreas con igual peso. $Max_{PGA} = 137 \text{ cm/seg.}$

Las figuras anteriores indican una estabilidad significativa cuando se usan todos los modelos. El modelo de fallas (12.5) es complementario a los modelos de zonación e indica valores altos significativos de PGA para Cuba suroriental y para las fallas en el noroeste de Cuba, mientras que la zonación detallada (12.6) indica valores de PGA mucho mas bajos. La zonación grosera (12.7) muestra un alto grado de suavizado de la peligrosidad sísmica. También es complementario el modelo KERGRID (12.4) donde la peligrosidad en Cuba suroriental es alta y se expande hacia el norte mucho mas que con los otros modelos.

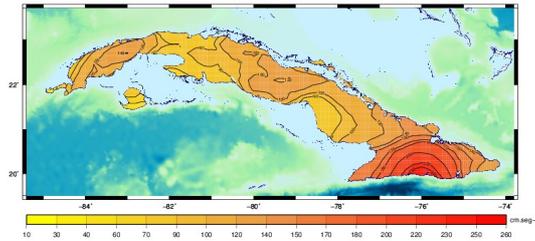
Hay un número infinito de posibles combinaciones de pesado en un cálculo de árbol lógico semejante. Lo importante es que creemos que todos los modelos representan modelos complementarios (no intersectantes), a pesar de que la zonación grosera está estrechamente conectada a la detallada. Entre las combinaciones posibles nuestro modelo preferido es el que se muestra en la Fig. 12.3 para PGA, donde consideramos el darle un peso menor a los modelos de zonación grosera y KERGRID. El efecto fundamental es disminuir la expansión hacia el norte de las isolíneas en Cuba

oriental y la peligrosidad en zonas donde esos modelos reflejan un máximo. Dando un peso menor a modelos de zonación grosera estamos minimizando el efecto de suavizado de la sismicidad, reflejado en un incremento de los valores mas altos y un decrecimiento en ellos mas bajos.

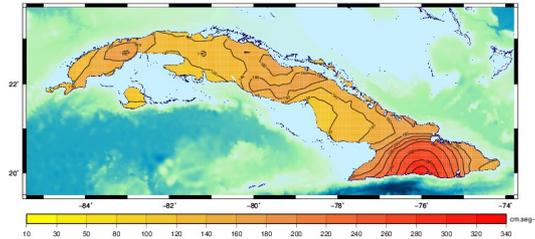
El programa CRISIS'20014 no realiza estimaciones del llamado "error epistémico", inherente al uso de árboles lógicos. Todas las figuras 12.1-12.7, excepto la 12.3, corresponden a la media de todas las ramas del árbol, se consideren pesos do no. En CRISIS'2015 está presente cierto tipo de tratamiento estadístico de las ramas (fichero ".pct") que no es suficiente para preparar figuras de la peligrosidad incluyendo el error. Hay dos formas posibles de hacer esto. La primera es es el común ajuste de los datos a una función de distribución normal, en cuyo caso se calculan la media (promedio) y la desviación estándar, que es llamada "epistémica" (Sde). La segunda es no ajustar una función de distribución a los datos y calcular los percentiles. El percentil 0.5 es la "mediana" y el "percentil 0.84" es una buena medida de la incertidumbre. Para el caso de una distribución normal de los datos, en el límite y para una muestra infinita, "media = mediana" y "media+SDe = percentil 0.84". Este procesamiento estadístico fue realizado usando algunos programas desarrollados especialmente en este proyecto. En el caso de la distribución normal se usa el procedimiento estándar para valores pesados, pero en el caso de datos no asociados a ninguna distribución fue desarrollado un algoritmo para calcular los percentiles (Anexo 2). Este algoritmo da valores muy próximos a los presentados en los ficheros ".pct" de CRISIS'20015, coincidencia que fue usada para su chequeo.

En la Fig. 12.8 se presentan los mapas de PGA para ambos enfoques estadísticos para el caso de 16 ramas de igual peso (el caso presentado en la Fig. 12.1), mientras que la Fig. 12.9 se presentan los correspondientes para a las 16 ramas con pesos diferenciados (mitad del peso para los modelos de zonación grosera y KERGRID - el caso presentado en la Fig. 12.3)

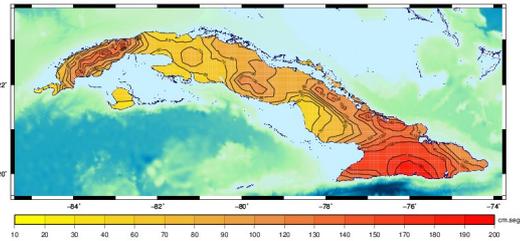
Ground motion values for sa (cm.sec⁻²), Tret 475 years, Tuhs 0.01 sec – Type: ave, equal weights



Ground motion values for sa (cm.sec⁻²), Tret 475 years, Tuhs 0.01 sec – Type: SDe, equal weights



Ground motion values for sa (cm.sec⁻²), Tret 475 years, Tuhs 0.01 sec – Type: med, equal weights



Ground motion values for sa (cm.sec⁻²), Tret 475 years, Tuhs 0.01 sec – Type: p84, equal weights

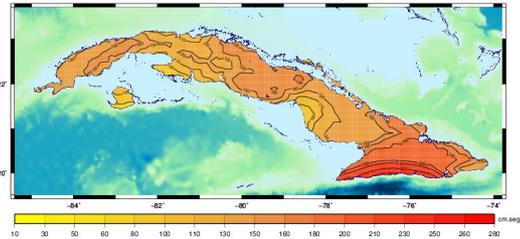
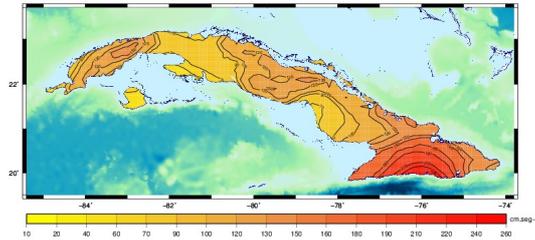
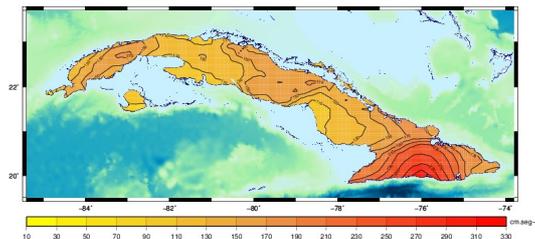


Fig. 12.8. Comparación de las dos variantes de procesamiento estadístico. En la columna izquierda están los correspondientes al uso de la distribución normal (media - "ave" y media + Sde) y en la derecha la correspondiente a la estadística de muestreo (mediana y percentil 0.84). La fila superior corresponde a los estimados sin incertidumbre y la inferior a los estimados con ella. Caso de 16 ramas con pesos iguales.

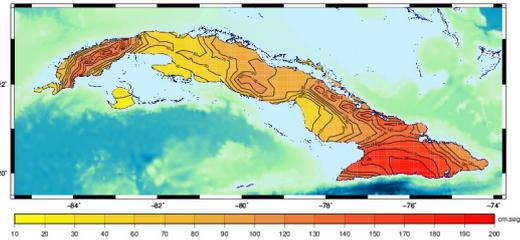
Ground motion values for sa (cm.sec⁻²), Tret 475 years, Tuhs 0.01 sec – Type: ave, different weights



Ground motion values for sa (cm.sec⁻²), Tret 475 years, Tuhs 0.01 sec – Type: SDe, different weights



Ground motion values for sa (cm.sec⁻²), Tret 475 years, Tuhs 0.01 sec – Type: med, different weights



Ground motion values for sa (cm.sec⁻²), Tret 475 years, Tuhs 0.01 sec – Type: p84, different weights

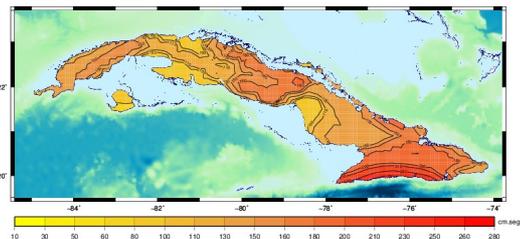


Fig. 12.9. Comparación de las dos variantes de procesamiento estadístico. En la columna izquierda están los correspondientes al uso de la distribución normal (media - "average" y media + Sde) y en la derecha la correspondiente a la estadística de muestreo (mediana y percentil 0.84). La fila superior corresponde a los estimados sin incertidumbre y la inferior a los estimados con ella. Caso de 16 ramas con pesos diferentes

Analizando las fig. 12.8 y 12.9 se ve que el enfoque estadístico de usar el ajuste a la distribución normal produce gráficos mas adecuados a la sismicidad real. Esto habla acerca de que el enfoque estadístico de calcular los percentiles no da valores buenos para muestras con una pequeña cantidad de eventos y no es conveniente usarlo en este caso. Por tanto se decidió usar el primer enfoque y en la figura 12.10 se presentan los mapas de PGA para ambos casos de pesado de las ramas.

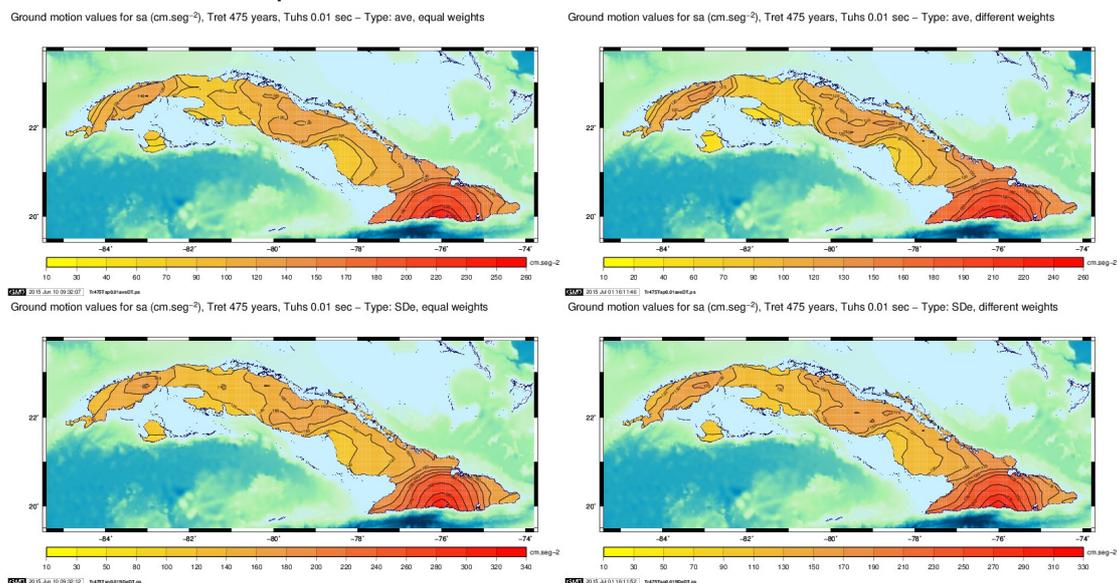


Fig. 12.10: Comparación de las dos variantes de. En la columna izquierda están los mapas de pesos iguales y en la derecha los de pesos diferentes. La fila superior corresponde a los estimados sin incertidumbre (media) y la inferior a los estimados con ella (media + SDe).

Como un complemento, los espectros uniformes de peligro (UHS) para seis ciudades en el caso de pesos iguales se presentan en la Fig. 12.11 y para pesos diferentes en la Fig. 12.2. Esos valores fueron obtenidos por interpolación a partir de los puntos mas cercanos en la malla donde se efectuaron los cálculos de peligrosidad.

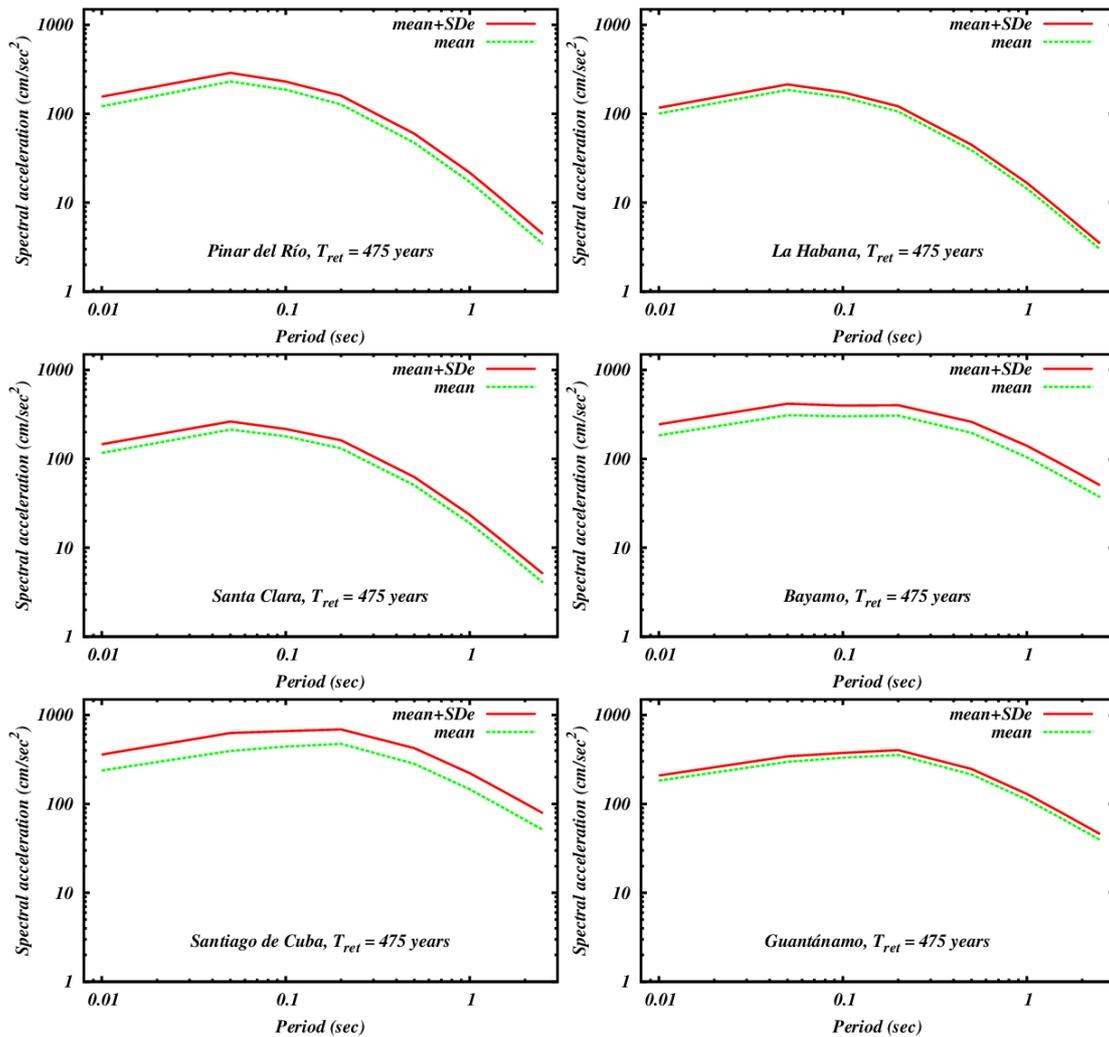


Fig. 12.11. Cálculos del espectro uniforme de peligro (UHS) para seis ciudades de Cuba, tres en la parte occidental (Pinar del Río, La Habana y Santa Clara) y 3 en la parte suroriental (Bayamo, Santiago de Cuba y Guantánamo). En verde están representados los valores medios sobre todas las ramas y en rojo esos valores mas la incertidumbre epistémica. Caso de pesado igual de las ramas.

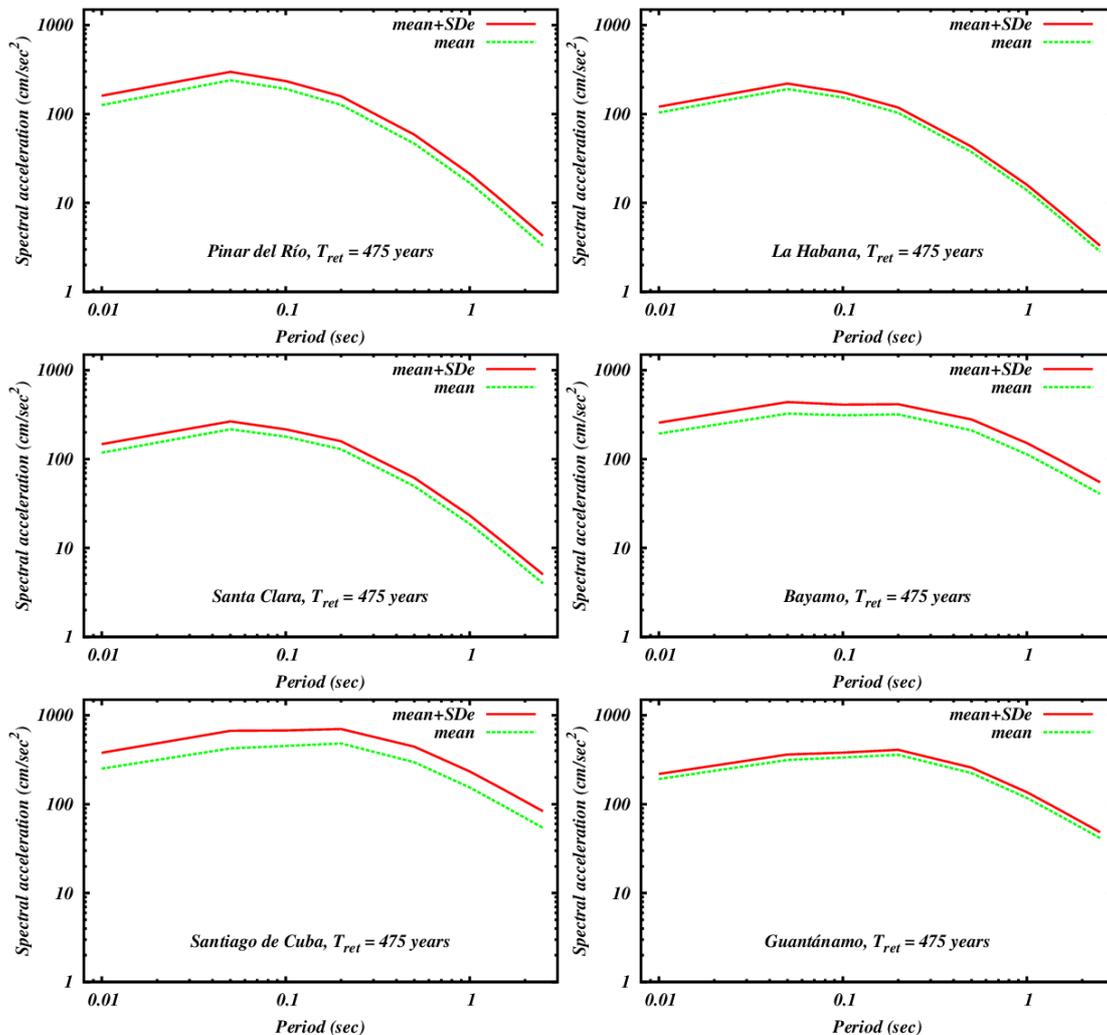


Fig. 12.12. Cálculos del espectro uniforme de peligro (UHS) para seis ciudades de Cuba, tres en la parte occidental (Pinar del Río, La Habana y Santa Clara) y 3 en la parte suroriental (Bayamo, Santiago de Cuba y Guantánamo). En verde están representados los valores medios sobre todas las ramas y en rojo esos valores mas la incertidumbre epistémica. Caso de pesado diferente de las ramas.

13 Conclusiones

Se realizó un estudio detallado de la peligrosidad sísmica en Cuba. Se puede ver como una continuación del último trabajo de este tipo finalizado en Cuba (Alvarez et al. 2005) en términos de PGA. Hay un mejoramiento cualitativo en el presente trabajo en el sentido de que se usó el registro histórico completo de terremotos de forma cuantitativa, y por primera vez en Cuba se han combinado los

modelos de zonación , de fallas y de sismicidad en celdas en un solo árbol lógico. Los resultados son no solo para PGA, sino para el espectro uniforme de peligro (UHS). Aunque nunca habrá una evaluación “correcta” del peligro (que por naturaleza es un ejercicio predictivo), el presente trabajo representa un gran avance en la evaluación del peligro sísmico.

El procesamiento de todos estos datos con el programa CRISIS2014 usando el método de árbol lógico nos permitió obtener un conjunto de mapas y gráficos que muestran representaciones diferentes de la peligrosidad sísmica. Aquí solo presentamos mapas de PGA y una ordenada del UHS, pero fueron calculadas 6 ordenadas adicionales, las que se muestran para 6 ciudades cubanas. Todos esos cálculos corresponden a un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años (correspondiente a un período de retorno de 475 años).

Se realizó un análisis estadístico del árbol lógico por 2 métodos, el tradicional de considerar que los datos están distribuidos normalmente con determinación de la media y la dispersión estándar, mientras que el otro considera que los datos no obedecen ninguna distribución con la determinación de los percentiles de la muestra. El segundo no parece dar buenos resultados por la inestabilidad debida a la dimensión insuficiente de la muestra.

La peligrosidad sísmica probabilística tiende a incluir la aleatoriedad inherente a la ocurrencia de terremotos y a los estremecimientos producidos por terremotos ocurridos a distancias y períodos dados. No obstante, depende críticamente de la información empírica (catálogos, magnitudes y localizaciones confiables, así como relaciones de atenuación confiables), y la información empírica es la base mas ambigua también para los cálculos de peligrosidad. El mejoramiento cuantitativo y cualitativo de la información histórica de terremotos debe tener la primera prioridad en el futuro; esto establecerá la base para cálculos predictivos y análisis de alta calidad en el futuro. A diferencia de esto, la expansión de la red de estaciones sismológicas garantizará que se obtengan resultados con alta calidad de los parámetro hipocentrales. Si las redes actuales no se comportan adecuadamente los cálculos futuros continuarán adoleciendo de datos de baja calidad.

Agradecimientos

El presente proyecto pudo ser completado gracias al financiamiento del Ministerio de Relaciones Exteriores de Noruega (MFA) administrado por el Directorio para la Protección Civil de Noruega (Direktoratet for Sivilt Beredskap, DSB).

Referencias

- Abrahamson, N. A., and Silva, W. J. (2008). Abrahamson & Silva NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters, Final report prepared for the Pacific Earthquake Engineering Research Center, February 2008.
- Alvarez, L. (1985): Seismicity of Eastern Cuba. Ph.D. Thesis (in Russian). Institute of Physics of the Earth, Academy of Sciences of the URSS, Instituto de Geofísica y Astronomía, Academia de Ciencias de Cuba, 162 pp.
- Alvarez, L. (1995): SACUDIDA, versión 2.0. Un programa para la estimación de la peligrosidad sísmica. La Habana, Editorial ACADEMIA, 64 p.
- Alvarez, L.; Chuy, T. (1985): Isoleismal model for Greater Antilles. In: Proceedings of the 3rd. International Symposium on the Analysis of Seismicity and on Seismic Risk, Liblice Castle, Czechoslovakia, June 17-22, pp. 134-141.
- Alvarez, L. and Bune, V.I. (1985) 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.
- Alvarez, L. Chuy, t., Garcia, J., Moreno, B., Alvarez, H., Blanco, M., Exposito, O., Gonzalez, O., Fernandez, A.I. (1999), An earthquake catalogue of Cuba and neighboring areas, ICTP Internal Report IC/IR/99/1, Miramare, Trieste, 60 pp.
- Alvarez, L.; García, J; Pico, R.; Márquez, I.; Morejón, G.; Vázquez, J.; Berenguer, Y.; Arango, E.; Slejko, D.; Peruzza, L.; Rebez, A.; Santulin, M. (2005): Nueva generación de estimados de Peligrosidad Sísmica con el error asociado para Cuba y cálculo

- de pérdidas para la ciudad de Santiago de Cuba usando técnicas SIG. Informe, Fondos del CENAI, 341 pp.
- Alvarez, L., Mijáilova, R. S., Vorobiova, E. O., Chuy, T. J., Zhakirdzhánova, G. N., Pérez, E. R., Rodiónova, L. M., Alvarez, H., Mirzoev, K. M. (2000): Terremotos de Cuba y áreas aledañas. In: Sismicidad de Cuba y estructura de la corteza en el Caribe. La Habana, Editorial Academia. ISBN 959-02-0242-X, pp. 7-35.
- Alvarez, L.; Rubio, M.; Chuy, T.; Cotilla, M. (1985): Estudio de la sismicidad de la región del aribe y estimacion preliminar de la peligrosidad sísmica en Cuba. Report, 570 pp.
- Ambraseys, N. N., Simpson, K. A., and J. J. Bommer (1996). Prediction of horizontal response spectra in Europe, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 25, 371-400.
- Arango, E.D. (1996). Geodinámica de la región de Santiago de Cuba en el límite de las placas de Norteamérica y el Caribe. M.Sc. Thesis. National Polytechnic Institute of Mexico. 110
- Atkinson G. M. and D. M. Boore (2006). Earthquake Ground-Motion Prediction Equations for Eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 6, pp. 2181-2205
- Bender B. And Perkins D.M. (1987). SEISRISK III. A computer program for seismic hazard estimation, U. S. Geological Survey Bulletin 1772, Denver, Colorado, 48 pp.
- Benford, B.; DeMets, C.; Calais, E. (2012): GPS estimates of microplate motions, northern Caribbean: evidence for a Hispaniola microplate and implications for earthquake hazard. *Geophys. J. Int.* (2012) 191, 481–490
- Calais, E. & de Lépinay, B. (1991): From transtension to transpression along the northern Caribbean plate boundary off Cuba: Implications for the recent motion of the Caribbean plate. *Tectonophysics* 186, 329–350.
- Calais, E., Béthoux, N. & de Lépinay, B. (1992): From transcurrent faulting to frontal subduction: A seismotectonic study of the northern Caribbean plate boundary from Cuba to Puerto Rico. *Tectonics* 11, 114–123.
- Campbell K. and Y. Bozorgnia (2008): NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods

- Ranging from 0.01 to 10 s. *Earthquake Spectra*, Volume 24, No. 1, pages 139-171.
- Chuy, T. (2000): Estimados de peligrosidad y microzonación sísmica de Cuba utilizando terremotos perceptibles. En: *Sismos perceptibles, peligro y vulnerabilidad sísmica en Cuba*. La Habana, Editorial ACADEMIA pp. 7-50.
- Chuy, T.; Alvarez, L. (1988). Sismicidad histórica de La Española. *Comunicaciones Científicas sobre Geofísica y Astronomía*, No. 16, 14 p.
- Chuy, T. and Alvarez, L.(1995): 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.
- Chuy, J.T. (1999): *Macrosísmica de Cuba y su utilización en los estimados de Peligrosidad y Microzonación Sísmica*. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Geofísicas. Fondos del MES y del CENAI.
- Cornell C. A. (1968): Engineering seismic risk analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 58, 1583-1606.
- Cosentino P., Ficarra V. and Luzio D. (1977): Truncated Exponential Frequency Magnitude Relationship in Earthquake Statistics. *BSSA*. 67. pp. 1615-1623
- Cotilla, M. and Alvarez, L.(1991): Principios del mapa sismotectónico de Cuba. *Revista Geofísica del Instituto Panamericano de Geografía e Historia*, 35, pp. 113- 124.
- Cotilla, M. (2003): The Santiago de Cuba Earthquake of 11th June 1766: Some new insights. *Geofísica Internacional*, Vol. 42, No. 4, 2003, pp. 589-602.
- Cotilla, M. and Córdoba, D. (2010): The Bayamo Earthquake (Cuba) of the 18 October 1551. *International Journal of Geosciences*, 2010. 10.4236/ijg.2010.11001 Published Online (<http://www.SciRP.org/journal/ijg>)
- Crespo M.J., F. Martínez, and J. Martí (2014): Seismic hazard of the Iberian Peninsula: evaluation with kernel functions. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, pp. 1309-1323.
- De Mets, C., Jansma, P.E., Mattioli, G.S., Dixon, T., Farina, F., Bilham, R., Calais, E. & Mann, P., (2000): GPS geodetic constraints on Caribbean-North America plate motion, *Geophys. Res. Lett.*, 27,437-440.

- De Mets, C.; Wiggins-Grandison, M. (2007) : Deformation of Jamaica and motion of the Gonâve microplate from a GPS and seismic data . *Geophys. J. Int.*, 168, 362–378
- Der Kiureghian A. and A. H. S. Ang (1977). A fault rupture model for seismic risk analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 67, 1173-1194.
- Douglas, J.; Cotton, F.; Abrahamson, N.A.; Akkar, S.; Boore, D.M.; Di Alessandro, C. (2013): Pre-Selection of Ground Motion Prediction Equations. Report produced in context of GEM GMPE project, version: 1.0.0. 77 pp., <http://www.nexus.globalquakemodel.org/gem>
- Engdahl, E. R., van der Hilst, R., and R. Buland (1998). Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, 722–743.
- Engdahl, E.R., and A. Villaseñor (2002). Global Seismicity: 1900–1999, in W.H.K. Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, and C. Kisslinger (editors), *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, Academic Press, Part A, Chapter 41, 665–690.
- First Microzonation Conference, Seattle, U.S.A., pp. 897-909
- García, J (2007): Estimados de peligrosidad sísmica con el error asociado para Cuba y cálculo de pérdidas para la ciudad de Santiago de Cuba usando técnicas SIG. PhD Thesis. La Habana, CENAI-IGA, 197 pp
- Giardini, D., G. Grünthal, K.M. Shedlock, and P. Zhang (1999). The GSHAP Global Seismic Hazard Map, *Annali di Geofisica*, 42 (6): 1225–1228.
- Gardner, J.K.; Knopoff, L. (1974): Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian?, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol 64, pp. 1363-1367.
- Grünthal, G., Bosse, C., Sellami, S., Mayer-Rosa, D., and D. Giardini (1999). Compilation of the GSHAP regional seismic hazard for Europe, Africa and the Middle East, *Annali di Geofisica*, 42 (6), 1215-1223.
- Iturralde-Vinent, M.A. Cuban Geology: A new plate tectonic synthesis: *Journal of Petroleum Geology*, 17 (1), pp. 39-71, 1994
- Iturralde-Vinent, M. (ed.) (1996): Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba, First Contribution of IGCP Project 364 “Geological

- Correlation of Ophiolites and Volcanic Arc Terrains in the Circum Caribbean Region, Miami, U.S.A", 265 pp.
- Iturralde-Vinent, M. (1998). Sinopsis de la Constitución Geológica de Cuba. *Acta Geológica Hispánica*, 33, pp 9-56.
- Kulkarni, R.B.; Young, R.R.; Coppersmith, K.J. (1984): Assessment of confidence intervals for results of seismic hazard analysis. In: *Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, 1, 263-270.
- McGuire, R. K. (1976): FORTRAN computer programs for seismic risk analysis. U.S. Geol. Survey Open File Report No 76-67.
- McGuire, R. K. (1978): FRISK: Computer program for seismic risk analysis using faults as Earthquake sources. U.S. Geol. Survey Open File Report 78-1007, 71 pp.
- De Mets, C., Jansma, P.E., Mattioli, G.S., Dixon, T., Farina, F., Bilham, R., Calais, E. & Mann, P., 2000. GPS geodetic constraints on Caribbean-North America plate motion, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 437-440. t No 78-1007.
- Molina S., C.D. Lindholm and H. Bungum (2001): Probabilistic seismic hazard analysis: zoning free versus zoning methodology. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, Vol. 42.
- Molnar, P.; Sykes, L. R. (1969): Tectonics of the Caribbean and Middle America Regions from Focal Mechanism and Seismicity, *Geol. Soc. Am. Bull*, 80, 1639 - 1684.
- Moreno, B.; Grandison, M; Atakan, K., (2002): Crustal velocity model along the southern Cuban margin: implications for the tectonic regime at an active plate boundary, *Geophys. J. Int.*, 151, 632-645
- Morgat, C. P.; Shah, H.C (1979): A Bayesian model for seismic hazard mapping. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 69, 1237-1251.
- Muñoz, S. (2012): The Seismotectonics of Hispaniola and Gonave Microplate. Joint ICTP/TWAS Conference and Advanced School on Quantification of Earthquake Hazards in the Caribbean: The Gonave Microplate, 10 - 21 December 2012, Santiago de Cuba, Cuba.
- Norma Cubana (1985): NC 53-114: Elaboración de proyectos de construcción, Construcciones sismo-resistentes. Especificaciones de proyecto y métodos de cálculo, 60 pp.

- Norma Cubana (1999): NC 46: Construcciones sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción, La Habana, Comité Estatal de Normalización, 100 pp.
- Ordaz M., A. Aguilar, and J. Arboleda (2008): CRISIS2007 Version 5.0. Program for computing seismic hazard, available at www.iingen.unam.mx.
- Ornthammarath, T, C.G. Lai, A. Menon, M. Corigliano, G.R. Dodagoudar and K. Gonavaram (2008): Seismic Hazard at the Historical Site of Kancheepuram in Southern India. The 14'th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008.
- Ottemöller, L.; Voss, P.; Havskov, J. (2013): SEISAN earthquake analysis software for Windows, Solaris, Linux and MacOSX. <https://www.uib.no/rg/geodyn/artikler/2010/02/software>
- Pacheco, J.F. and Sykes L.R. (1992): Seismic moment catalog of large shallow earthquakes, 1900 to 1989, Bull.Seism. Soc. Am., 82, 1306-1349.
- Pezeshk S., A. Zandieh, and B. Tavakoli (2011). Hybrid Empirical Ground-Motion Prediction Equations for Eastern North America Using NGA Models and Updated Seismological Parameters. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 101, No. 4, pp. 1859-1870
- Portuondo, O.(2014): *iMisericordia!* Editorial Oriente, 288 pp.
- Reiter, L. (1990). Earthquake hazard analysis, issues and insights. Columbia University Press.
- Riznishenko, Yu.V. (1959): On quantitative determination and mapping of seismic activity. Annali di Geofisica. Vol. XII, X-1862, pp. 227-237.
- Rodríguez, M.; Alvarez, L. (1996): Estimaciones Probabilísticas de la Peligrosidad Sísmica en Cuba. CENAI-MAPFRE, 1996, 94 pp.
- Rosencrantz, E. & Mann, P., (1991): SeaMARC II mapping of transform faults in the Cayman Trough, Caribbean Sea, Geology,19,690-693.
- Russo R. M. and Villasenor A. (1995): The 1946 Hispaniola Earthquakes and the Tectonics of the North America-Caribbean plate boundary zone, northeastern Hispaniola. J.G.R., Vol. 100, No. B4, pp. 6265-6280.
- Scordilis, E.M. (2006): Empirical global relations converting MS and mb to moment magnitude. J. Seismology, 10, pp. 225-236

- Stepp J.C. (1972): Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard, in Proceedings
- Storchak D.A., Di Giacomo D., Bondar I, Harris J., Engdahl E.R., Lee W.H.K., Villasenor, A., Bormann P., Ferrari G. (2012): Final Scientific Report: ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900-2009), 99 pp.
- USGS Open File Report 97-470-K (URL: http://pubs.usgs.gov/of/1997/ofr-97-470/OF97-470K/spatial/doc/faq/flt6bg_faq.html).
- Utsu, T. (1971): (3) Analyses of the Distribution of Earthquakes in Magnitude, Time and Space with Special Consideration to Clustering Characteristics of Earthquake Occurrence (1). Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Series 7, Geophysics, 3(5), pp. 379-441.
- Wiggins-Grandison, M.D. & Atakan, K., (2005): Seismotectonics of Jamaica, Geophys. J. Int., 160,573-580.
- Woo, G. (1996). Kernel Estimation Methods for Seismic Hazard Area Source Modeling, Bulletin of the Seismological Society of America 86:2, pp. 353-362.
- Youngs, R. R. and K. Coppersmith (1985). Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates. Bull. Seism. Soc. Am., 75, pp. 939-964.

Anexo 1

Conversión de escalas MSK MMI

A través de la historia de la sismología han sido desarrolladas diferentes escalas para medir la intensidad de los estremecimientos. Esas escalas han sido usadas en diferentes tiempos y en diferentes partes del mundo. La comparación que sigue representa un intento de establecer un puente entre dichas escalas.

MODIFIED MERCALLI	ROSSI FOREL	JMA	MERCALLI CANCANI SIEBERG	MEDVEDEV SPONHEUER KARNIK
I	I		II	I
II			III	II
III	II	I	IV	III
IV	III		V	IV
V	IV	II	VI	V
VI	V	III	VII	VI
VII	VI	IV	VIII	VII
VIII	VII	V	IX	VIII
IX	VIII		X	IX
X	IX	VI	XI	X
XI	X		XII	XI
XII		VII		XII

Fig. A1.1. Equivalencia entre diferentes escalas (Reiter, 1990).

Conversión de la escala MMI a aceleración pico

La relación que se muestra a continuación es usada por el USGS como indicativa. Nótese que la relación entre PGA y la intensidad (en este caso MMI - Mercalli modificada).

PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(%g)	<17	.17-1.4	1.4-3.9	3.9-9.2	9.2-18	18-34	34-65	65-124	>124
PEAK VEL.(cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-16	16-31	31-60	60-116	>116
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Fig. A1.2. Conversión de la escala MMI a aceleración pico y velocidad pico. USGS, disponible en: <http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/shakemap/background.php#intmaps>

Anexo 2

Algoritmo para el cálculo de los percentiles

Lo primero que se hace es ordenar la muestra, por lo que se tiene un conjunto de valores de PS ordenados de menor a mayor: $\{PS_1 \leq PS_2 \leq \dots \leq PS_N\}$. Cada una de esas ramas tiene un peso dado en el problema:

$$\text{peso}_i = \text{peso}(\text{ramaPS}_i)$$

Se calcula entonces la probabilidad asociada a cada uno de los puntos de la muestra:

$$\begin{aligned} \text{prob}_1 &= \text{peso}_1 & i=1 \\ \text{prob}_i &= \text{prob}_{i-1} + \text{peso}_i & i=2, N \end{aligned}$$

Sean v_{per_j} , $j=1, m$ los valores de los percentiles buscados y PS_{per_j} los valores de PS correspondientes a esos percentiles. El cálculo se hace como:

$$\begin{aligned} PS_{per_j} &= PS_i & \text{si } v_{per_j} = \text{prob}_i \text{ (orden } 1e-10) \\ PS_{per_j} &= v_{per_j} * PS_i / \text{prob}_1 & \text{si } v_{per_j} < \text{prob}_1 \\ PS_{per_j} &= PS_i + (v_{per_j} - \text{prob}_i) * (PS_{i+1} - PS_i) / (\text{prob}_{i+1} - \text{prob}_i) & \text{si } v_{per_j} > \text{prob}_i \text{ y } v_{per_j} < \text{prob}_{i+1} \end{aligned}$$

Este método se tomó parcialmente de Wikipedia (el caso de muestras no pesadas). No se encontró algo aceptable para "muestras pesadas". Entonces se modificó el método para muestras no pesadas para incluirle los pesos y el algoritmo resultante fue chequeado comparando con lo que aparece en las salidas "pct" de las corridas de árbol en CRISIS'2015. Las diferencias son muy pequeñas, y pueden achacarse a problemas de precisión y de complejidad de los algoritmos de interpolación usados en cada caso.

Proyecto “Peligrosidad y riesgo sísmicos en Cuba y las regiones circundantes”

Tarea 2: Peligrosidad sísmica, principios y herramientas

Informe de resultado

Catálogo de terremotos de Cuba y regiones aledañas 1502-2012

Leonardo Alvarez, Madelín Villalón, Bladimir Moreno - CENAIIS

Conrad Lindholm - NORSAR

Introducción

En la década de los 90 del siglo pasado se realizó un trabajo exhaustivo de revisión de los catálogos de terremotos, tanto de Cuba como regionales, y la conformación de un catálogo único que uniera el máximo de información posible sobre cada evento, excluyendo cualquier posible duplicación. Este trabajo se hizo combinando el tratamiento de ficheros secuenciales (mediante programas en FORTRAN) y de bases de datos (usando el programa FOXBASE). En (Rodríguez y Alvarez, 1996) se presenta una descripción del proceso de confección del catálogo final a partir de sus componentes. Este, que abarca desde 1502 hasta 1995, fue publicado en versión reducida en (Alvarez et al. 1999) mientras que en (Alvarez et al., 2000) se hace una descripción detallada del material incluido en el, con especial énfasis en la red de estaciones sismológicas de Cuba. El catálogo inicial preparado en aquella ocasión, en forma de base de datos constituye el punto de partida de este trabajo.

En 1998 se realiza una modernización del Servicio Sismológico Nacional (Diez, 1999) con nuevas estaciones y nuevos métodos de procesamiento de la información. En 2003 se introduce el uso del paquete de programas SEISAN (Ottemöller et al., 2011), lo que provocó algunos cambios, sobre todo en la forma de determinar las magnitudes. Una modernización posterior de la red de estaciones, en 2010, cambió también en algo los métodos de procesamiento (Diez et al., 2014).

Por otra parte, nuevos métodos de procesamiento fueron introducidos en la práctica sismológica internacional. En primer lugar, el método conocido como EHB (Engdahl et al., 1998) con un tratamiento novedoso de las fases profundas, y en segundo lugar, un nuevo algoritmo de determinación automatizada de hipocentros (Bondár y Storchak, 2011) han permitido obtener epicentros más precisos. Con el algoritmo EHB como base se han emprendido 2 proyectos de relocalización de hipocentros; el primero para terremotos muy fuertes, en un catálogo denominado “Centennial” (Engdahl y Villaseñor, 2002) y el segundo, con umbrales más bajos de magnitud, dentro del proyecto “ISC-GEM” (Storchack et al., 2012). Esto cambia los criterios de calidad de las fuentes usado en el catálogo de Cuba hasta 1995 y obliga a su revisión.

El objetivo del presente trabajo es obtener un catálogo de terremotos para Cuba y regiones aledañas desde 1502 hasta 2012, en una región que abarca desde los 16° hasta los 24° de latitud norte y desde los 86° hasta los 67° de longitud oeste, que contenga el máximo posible de la información existente para

cada terremoto con una selección adecuada entre las distintas fuentes. El mismo debe ser presentado tanto en formato secuencial como mediante bases de datos.

Base de datos de terremotos de Cuba

Datos iniciales

Catálogos de Cuba

El dato básico inicial es el catálogo de Cuba hasta 1995 mencionado en la introducción. Se tomó, en lugar de la versión reducida publicada (que solo tenía magnitudes M_s , m_b y una tercera seleccionada entre M_i , M_L , M_K y M_D), la base de datos final que se preparó en aquella ocasión, la cual contiene todas las magnitudes disponibles para cada terremoto, incluso la K de Rautian, así como los valores de intensidad máxima reportada, entre otros.

A continuación para un período que abarca desde 1996 hasta mayo de 2003, el catálogo combina un corto período de registro con la red anterior y magnitudes basadas en duración o K de Rautian, y la primera etapa de la red modernizada, donde las magnitudes son del tipo M_L o M_C , calculadas por un procedimiento suministrado por el fabricante (Diez, 1999). Este catálogo fue preparado por Julio García en el marco de los trabajos del GEM para la región del Caribe (Julio García, inédito).

Finalmente hay una etapa del catálogo fundamentalmente basada en el uso del sistema SEISAN, con magnitudes calculadas como M_L y M_C (no se calcularon las M_W) con un cambio al final del período otra vez al método suministrado por el fabricante de los nuevos equipos instalados en 2009-2010 (Diez et al, 2014).

Catálogos de Jamaica

Se dispone de los catálogos de Jamaica para el período 86-97, en un formato texto algo difícil de procesar.

Relocalizaciones de epicentros globales

Como se mencionó en la introducción, hay dos relocalizaciones básicas: los catálogos “Centennial” (1900-2007) e “ISC-GEM” (1900-2009), cada uno de ellos en un formato secuencial particular.

Compilaciones globales “clásicas”

Las compilaciones globales “clásicas” son debidas a las agencias USGS de los EE.UU. y al ISS-ISC ubicado en Gran Bretaña.

El USGS ofrece distintas compilaciones:

- 1) EQH-PDE (1638-1995): Combina los datos de terremotos históricos que se publicaban en una serie bajo el nombre “Earthquake History of the United States” y determinaciones instrumentales posteriores (por computadora desde 1963). La parte correspondiente al período 1904-1995 fue discutida en los trabajos que condujeron a la preparación del catálogo de Cuba hasta 1995. En aquella ocasión se consideró la fuente más confiable para datos telesísmicos en la región de estudio y era referido como “PDE”. El formato del mismo, que llamaremos “NOAA”, es de 80 caracteres, fue discutido en esos trabajos y ligeramente modificado fue usado como básico en los mismos.
- 2) EHDF(1990 en adelante): Desde 1990 comenzaron a aparecer estas compilaciones “finales”. Generalmente tienen dos años de retraso. Usan un formato diferente, de 99 caracteres, al denominan “ehdf”, por lo que así se denominó el catálogo. Para el período en que se solapa con el EQH-PDE, se prefiere a este por contener más información.
- 3) PDE (hasta el último determinado): Aquí aparecen las determinaciones preliminares de epicentros antes de que se pasen al EHDF. También usan el formato “ehdf” en lugar del viejo “NOAA” de 80 caracteres.

El ISC ofrece también distintas compilaciones

- 1) ISS- boletines de 1904 a 1963 con determinaciones no automatizadas y sin magnitud
- 2) ISC- boletines desde 1964 hasta la fecha, automatizadas, con magnitudes, inicialmente solo m_b , pero paulatinamente desde 1971 con magnitudes M_s y locales también. En el presente ya se incluye cualquier tipo de magnitud.

Nota: Ambos catálogos se distribuyeron en discos, en un formato ASCII propio “ffb”, que mediante un programa (iscbul) que se incluía en el mismo disco podía ser convertido a un fichero ASCII secuencial. Además, después de 1960 se encuentra disponible en ficheros anuales con un formato particular “hdf”. El fichero de salida del “iscbul” se convierte fácilmente a formato “hdf”

- 3) En estos momentos el ISC ofrece la mejor opción para obtener estos catálogos en-línea, donde se permiten dos variantes: ISS-ISC “completo”, e ISS-ISC “revisado”. El último incluye sólo lo que ellos llaman “revisiones”. Las selecciones se pueden obtener en ficheros tipo “csv formateado”, muy cómodos para el trabajo. Los terremotos en estos catálogos tienen un número único de identificación por el cual se puede acceder a otros datos disponibles, como las fases reportadas en las estaciones y los mecanismos focales. Este catálogo es actualmente el más completo que se puede obtener, comienza en 1910 y ya incluye, para cada terremoto, una selección de datos de diversas fuentes. El formato de los datos es idéntico en ambas variantes.

Otras compilaciones de datos de terremotos

En el proceso de preparación del catálogo 1502-1995 (Alvarez et al. 1999) se consultaron varias fuentes adicionales, en algunos casos artículos, en otros boletines de redes regionales o globales obtenidas del Centro Mundial de Datos B-2 de Moscú, y fueron referenciados en el catálogo los datos tomados de ellas. La mayor parte de esos catálogos primarios fueron compiladas por el National Earthquake Information Center de los EE.UU., como parte de la “Global Hypocenter Database”, en diferentes formatos, entre ellos en ficheros secuenciales en formato NOAA (ver mas adelante). Finalmente se reunieron en unos CD distribuidos por la NOAA (NOAA, 1996) que están accesibles via Internet. Se incluye también un catálogo preparado por Pacheco y Sykes (1992) con revisión de magnitudes. En el caso de las magnitudes se tomó en cuenta el proceso de redeterminación de ellas llevado a cabo por varios autores en los años 70 y 80 del pasado siglo, fundamentalmente Abe y Kanamori, y que se reflejó en varias artículos.

Mecanismo focal y tensor de momento

La introducción del procedimiento conocido por CMT (centroide - tensor de momento) por Dziewonski et al. (1981) abrió una fase en la compilación de catálogos de terremotos. Actualmente el USGS, la Universidad de Harvard y el ISC mantienen catálogos actualizados donde se incluyen las soluciones CMT y las clásicas de planos de falla, los cuales pueden ser consultados en línea. Para los terremotos con $M_s > 5.5$ se obtienen de forma rutinaria actualizando los catálogos periódicamente. A esto se unen los datos de solución de planos de falla obtenidos por diversos autores y publicados esporádicamente. En el anexo 2 se presenta el formato seleccionado para los catálogos de mecanismos focales (que llamaremos “mec”), el cual es una ligera modificación del que trae el fichero “csv formateado” del ISC.

El procesamiento de los catálogos en formato ASCII

a) Selección de un formato

Para comparar catálogos de terremotos entre si es imprescindible que los mismos se encuentren expresados en el mismo formato, por lo que es necesario seleccionar un formato de trabajo. Los distintos catálogos utilizados como base se presentan en formatos diferentes, por lo que se llevó a cabo un análisis de la información contenida en ellos y la posibilidad de incluirla completamente en el

formato seleccionado para este trabajo. Se consideró como fundamental disponer del máximo posible de determinaciones de magnitud, así como de la precisión de las determinaciones hipocentrales. Una cantidad “razonable” de información adicional también se encontraba en los requerimientos. De todos los formatos de los datos de partida, el más cercano a los requerimientos era el del catálogo Centennial, que admitía hasta 12 valores de magnitud. Los formatos “pde” antiguo, “seisan”, “ehdf” y “hdf” poseen campos con precisión de las localizaciones y datos adicionales que era conveniente incluir en el catálogo también por estar presentes en una buena cantidad de terremotos. El catálogo ISC-GEM también incluye datos de mecanismo focal, pero se consideró que deberían ser tratados aparte.

Un elemento clave en este formato debería ser algún código único que permitiera ser enlace con otra información en un un tratamiento de bases de datos relacionales. Para ello el mejor resultó el identificador de terremoto del ISC, un código de 9 números que no se repite. También para realizar comparaciones entre diversos catálogos o entre registros de un mismo catálogo era necesario un código que englobase la información de fecha y hora de origen. Para ello se incluyó uno formado por “día juliano y fracción” que se calcula como una variable de doble precisión, con 7 cifras decimales, el cual permite una precisión de entre décima y centésima de segundo, mucho menos que el tiempo en que se puede diferenciar la ocurrencia de dos terremotos en el mismo lugar. El formato seleccionado, que denominaremos “*cat*” se detalla en el anexo1.

b) Conversión de formatos

Una vez seleccionado el formato de trabajo se preparó un conjunto de programas en FORTRAN (en lo adelante, a menos que se diga lo contrario, todos los programas son en ese lenguaje) para llevar los catálogos iniciales a ese formato “cat”. El nombre de los programas sigue la convención “desde2cat”, donde “desde” indica el formato inicial. Para evitar que se pongan en los catálogos valores de “0” donde en realidad no existe información, la lectura y escritura de las variables incluidas en cada catálogo se hace en formato de caracteres, y cuando es necesario hacer una operación en entero o flotante se comprueba antes que la variable original no esté vacía, para luego leer en ella su valor entero o flotante. Los programas confeccionados se presentan en la tabla 1.

Tabla1. Programas para la conversión de formato

programa	catálogo inicial
cen2cat	Catálogo “centennnial”
cuba2cat	Catálogo cubano 1502-1995 completo, en formato ASCII secuencial
ehdf2cat	Catálogos del USGS (EHDF y PDE)
gem2cat	Catálogo ISC-GEM
hdf2cat	Catálogos convencionales del ISS-ISC
isc2cat	Selección en-línea de catálogos del ISC con la opción de “csv formateado”
Iss2cat, issVi2cat	Otras 2 versiones del catálogo del ISS en formato ASCII
j9603_2cat	Catálogo de Cuba 1996-2003/05 completo, en formato ASCII secuencial
noaa2cat	Catálogo EQH-PDE (antiguo formato NOAA)
pa2cat	Catálogo de Pacheco y Sykes en formato ASCII secuencial
pr2cat	Catálogo de la Red Sismológica de Puerto Rico en formato ASCII

sei2cat	Catálogos en formato SEISAN
cat2sei	Conversión de formato CAT a SEISAN

En estos programas se usa subrutina tomada del Numerical Recipes in FORTRAN 77, “julday”, que es la que calcula el día juliano. La misma es privativa y se obtuvo en el ICTP, pues acompaña al libro del propio nombre (Press et al., 1992) que se encontraba en la biblioteca de ese centro. En caso de publicación usando estos programas hay que señalar algún tipo de filiación de los autores al ICTP.

Se confeccionó otro programa de conversión de formato para las selecciones en línea de datos de mecanismo focal. Este programa, denominado “leemecaisc”, convierte el fichero de tipo “csv formateado” en uno en formato ASCII simple.

c) Operaciones con catálogos en formato “cat”

Para poder preparar un catálogo único a partir de diversas fuentes (en formato ASCII) es necesario disponer de herramientas que permitan seleccionar datos de un catálogo, unir catálogos, fijar parámetros en ellos, controlar valores, etc. Para ello fueron confeccionados los programas presentados en la tabla 2.

Tabla 2. Programa para la manipulación de los catálogos

<i>programa</i>	<i>descripción</i>
buscaMesDia0.f	Verifica si en un catálogo existen valores de mes y día = 0 y graba en un fichero esos casos para ser corregidos a mano si se desea.
relCatMF_TM.f	Fija clave en un catálogo en formato “cat” indicadora de que existen datos de mecanismo focal en un fichero de mecanismos y coloca el indicador ISC adecuado para su enlace.
unecat.f	Une dos catálogos en formato “cat” ajustando el indicador de número de orden.
intercat.f	Intercala dos catálogos en formato cat usando como indicador la fecha juliana.
indicecat.f	Pone el número de orden en los registros de un catálogo.
julian_orden.f	Pone el número de orden y calcula la fecha juliana en los registros de un catálogo.
partecat.f	Realiza la selección en un catálogo en formato “cat” por región geográfica y por intervalos de tiempo, profundidad y magnitud. Puede usar desde uno hasta los 4 criterios de selección simultáneamente.
componecat.f	Combina dos catálogos de forma interactiva. Los terremotos de ambos catálogos que caen dentro de un espacio umbral tiempo-distancia los procesa de forma interactiva para “componer” los resultados en un registro único por terremoto.
eliminadupli.f	Para un catálogo en formato cat (puede haber sido obtenido mediante intercalación de diversos catálogos) realiza un análisis para buscar registros repetidos de un mismo terremoto. Se consideran “repetidos” los terremotos con una diferencia de tiempo dada. Cuando encuentra un

cheqisc1.f	evento con dos registros da la opción de conservar uno de ellos o ambos, A partir de 2 selecciones del ISC “catálogo revisado” y “catálogo completo”, modifica este último señalando cuando una determinación está “revisada” o no. Esto lo hace poniendo en la variable “scat(5:6)” (ver anexo 1) el valor “re” cuando el epicentro ha sido revisado.
correct#cat	Programas para ajustar formato y contenido de los campos de caracteres en el formato “cat” . Se usan para homogeneizar los datos de la fuente de las magnitudes, que cada uno de los catálogos base utilizados la presenta de forma diferente.
MWcata	Realiza un análisis de catálogo en formato cat, convierte las magnitudes a MW usando relaciones globales o locales y da como resultado dos ficheros, uno en formato “csv” para ser usado como hoja de cálculo de una “suite ofimática” y otro en formato “seisan” (“.sei”) para ser usado con un SIG.
prepMconv	A partir de un catálogo en formato “cat” obtiene otro donde en las magnitudes se presentan los valores promedio de diferentes tipos. Se usa en conjunción con cat2db para poner el resultado en una base de datos y realizar entonces análisis de relaciones entre diferentes tipos de magnitud.

El procesamiento de los catálogos en bases de datos

El tratamiento de los catálogos mediante bases de datos permite usar la gran funcionalidad de realización de consultas que tiene incluido el sistema gestor de base de datos (SGBD) que se utilice. Por su amplia distribución y su uso creciente se seleccionó el “postgresql”, de código abierto y multiplataforma. Se instalaron el SGBD propiamente dicho y el cliente pgAdmin, una interfase gráfica de usuario que permite visualizar cómodamente las tablas y realizar operaciones dentro del SGBD. Se creó una base de datos general, que llamaremos “cata”, en la cual se han ido creando diversas tablas. Hay dos tipos de tablas básicas: “cat” para los catálogos de terremotos que en ASCII siguen el formato del propio nombre, y “mec” para los catálogos de mecanismos focales que en ASCII siguen el formato del ISC modificado (mec). Los atributos de estas tablas se definen de acuerdo al tipo de variable que corresponde a cada uno de los campos que están descritos en los anexos 1 y 2. Por la gran cantidad de atributos que tienen ambos tipos de tabla, se prepararon dos guiones (scripts) para crearlas cada vez que se desee con un solo comando (creacat y creamec, ver anexo3). En ambas se crea una clave primaria apuntando al número de orden del terremoto en el catálogo, lo que permite su actualización directa con el postgresql. En las tablas de mecanismos se crea un clave foránea apuntando al identificador ISC del terremoto que se incluye en las tablas tipo “cat”. En este caso es imprescindible que la tabla tipo “cat” contenga todos los identificadores ISC que están presentes en la tabla de tipo “mec”. Para poblar esas tablas se leen ficheros en formato “csv” aunque pueden ser editadas a mano. Los nombres indican “desde2hacia”. En la tabla 3 se indican los programas confeccionados para transformación ASCII ↔ Base de datos. La comunicación entre ellos se hace mediante ficheros “csv”.

Tabla 3. Programas confeccionados para las transformaciones ASCII ↔ Base de datos.

programa	función
----------	---------

cat2db	Convierte catálogo en formato “cat” a “csv” separado por “;” con ausencia de información como “NULL”
meca2db	Convierte catalogo de mecanismos en formato “meca” a “csv” separado por “;” con ausencia de información como “NULL”. Añade 1 campo al formato “mec”, indicador de solución múltiple de mecanismo focal y otro que corresponde a un número de orden simple, necesarios para facilitar la actualización y el manejo de la base de datos.
db2cat	Convierte desde desde copia de base de datos en formato “csv” separado por “;” con ausencia de información como “#” a catálogo en formato “cat”.
db2meca	Convierte desde copia de base de datos en formato “csv” separado por “;” con ausencia de información como “#”. a catálogo de mecanismos en formato “meca”

De tal forma se pueden actualizar los catálogos tanto en formato ASCII como dentro de la base de datos, siempre y cuando se tenga el cuidado de pasar inmediatamente el resultado final obtenido en uno al otro soporte.

La preparación de un catálogo con fines de PS

Para realizar estimados de PS es necesario tener un catálogo donde a cada terremoto le corresponda una sola magnitud, ya que para los procesos de eliminación de réplicas y preparación de gráficos magnitud-frecuencia es complicado trabajar con magnitudes diferentes. No obstante, convertir las magnitudes a una sola escala es un proceso complejo. En primer lugar, la selección de la escala de referencia está determinada por las relaciones de atenuación de aceleración, intensidad, ordenadas del espectro de respuesta, etc., que se decida utilizar. En nuestro caso se decidió utilizar las relaciones de recomendadas por el proyecto GEM (Dpouglas et al., 2010), expresadas en términos de la magnitud M_w , por lo que fue necesario obtener un conjunto de expresiones de conversión de las magnitudes presentes en el catálogo a la seleccionada. (ver más adelante).

El formato elegido para el catálogo resultante con fines de PS es el SEISAN, ya existe un gran número de aplicaciones útiles en el trabajo sismológico que leen ese formato. Por tanto se confeccionó un último programa “cat2sei” que convierte el catálogo final en formato “cat” en uno en formato “SEISAN” que cumple las condiciones de una sola magnitud.

Resultados

a) Criterios para la confección de un catálogo unificado

Para confeccionar un catálogo unificado debe tenerse en cuenta la calidad de las determinaciones de cada una de las fuentes existentes por terremoto, porque entre ellas se debe seleccionar la que se considere de mayor calidad. Para estimar esa “calidad” en primer lugar se usan los indicadores de la misma que indican los autores, pero es necesario establecer a priori un orden de selección entre fuentes en dependencia del conocimiento que se tenga del método de cálculo utilizado. En primer lugar deben estar siempre las relocalizaciones realizadas por diferentes métodos, y en segundo lugar las localizaciones efectuadas usando un gran número de estaciones. Esto es válido tanto para terremotos determinados por redes locales como por redes globales. En el caso de los terremotos mas fuertes predominarán los resultados de las redes globales, aunque pueden ser mejores los estimados de profundidad de las locales. El orden de prioridad en las fuentes globales establecido se muestra en la tabla 1. Los criterios en que nos basamos para esta selección están en las publicaciones citadas para cada caso. Nótese que esto es para las coordenadas fundamentalmente. Para las magnitudes se trata de considerarlas todas, y el orden de prioridad sólo se considera a la hora de preparar la versión del

catálogo con fines de PS.

Tabla 1. Orden de prioridad de los datos hipocentrales de las fuentes globales

<i>Orden</i>	<i>Catálogos y boletines</i>
1	catálogo Centennial
2	catálogo ISC-GEM
3	catálogo EHB del ICTP 1960-2008
4	catálogo revisado del ISC hasta 2012
5	catálogo EHDF del GS 1990-2011
6	catálogo no revisado del ISC hasta 2012
7	catálogo EQH-PDE 1638-1995
8	catálogos compilados por la NOAA
9	boletines mensuales PDE del GS
10	otros catálogos globales

Para el caso de las fuentes locales tenemos diferentes tipos de datos, para los cuales se estableció el orden de prioridad indicado en la tabla 2:

Tabla 2. Orden de prioridad para los datos de las fuentes locales. “#” indica el orden.

<i>#</i>	<i>Tipo de dato</i>	<i>Comentarios</i>
1	determinados con gran número de estaciones	en la región de estudio sólo la Red Sismológica de Puerto Rico es capaz de tales determinaciones, de una elevada precisión
2	determinados por 4 o más estaciones	con aplicación de algoritmos estándar que permiten la estimación de errores, presentes en los catálogos de Cuba y Jamaica
3	determinados por 2 o 3 estaciones	casos en que no se pueden aplicar algoritmos que calculen el error de la localización, sino que se basan en construcciones geométricas; su precisión es mayor que en el caso anterior, pero no satisfactoria
4	determinados por estaciones aisladas	un gran problema del catálogo cubano, donde la mayoría de los eventos están estimados por una sola estación, sujetos a una gran incertidumbre, fundamentalmente de tipo “azimutal”
5	macrosísmicos-históricos	sujetos a una gran incertidumbre, que disminuye en la medida que exista una buena documentación del terremoto

A la hora de componer los parámetros correspondientes a un terremoto particular, los 4 primeros órdenes de prioridad de las redes globales están sobre todos los locales, le sigue el 1 de los locales, y después del 5 al 8 de los globales con posible ajustes de la profundidad por el 2 de los locales. El 9 y el 10 de los regionales deben compararse con el 2 de los locales, y valorar en función del error reportado

en ellos. Finalmente siguen del 3 al 5 de los locales.

b) Relocalización de epicentros

Se realizó una búsqueda en las bases de datos del ISC de aquellos eventos de la región de estudio que tuviesen datos de llegadas de diferentes fases a las estaciones sismológicas a partir de 1998. Se seleccionaron un total de 263 terremotos hasta diciembre de 2012. Se convirtieron los formatos a SEISAN y se le añadieron los datos de tiempo de llegada de las diferentes fases a las estaciones cubanas. Los eventos fueron relocalizados entonces usando el SEISAN con dos modelos de corteza diferente, uno local y otro regional. En el caso de los terremotos locales es significativo el hecho de que muchos terremotos que anteriormente habían sido localizados en tierra, tienen ahora el epicentro en el mar. Para los más alejados a las estaciones cubanas las nuevas coordenadas en algunos caso difieren grandemente de las iniciales.

c) Preparación del catálogo

Lo primero que se hizo fue convertir todos los catálogos disponibles al formato “cat” seleccionado usando los programas de la tabla 1. Usando algunos de los programas de la tabla 2 fueron sistematizados los datos iniciales para la composición de un catálogo único.

Se preparó un catálogo inicial partiendo del catálogo de Alvarez et al. (1999) en su versión original, el que se completó con los datos de la red cubana (SSSN, 1996-2012) y del catálogo de Julio García 1998-2003 (García, inédito).

Utilizando el programa “componecat”, de forma interactiva fueron incorporados los datos de los diferentes catálogos a ese catálogo básico. La idea era no tener registros duplicados. Sin embargo a veces el procesamiento semiautomático en la unión de catálogos no detectaba esos casos por lo que se hizo una revisión con vistas a eliminar eventos duplicados usando el programa “eliminadupli”. Igualmente se convirtió a una base de dato “postgresql” par realizar trabajos de homogeneización de la información sobre fuentes de datos, magnitudes, etc. Al final se obtuvo un catálogo con 60874 terremotos (Fig.1). Es probable que aún queden eventos duplicados en ese catálogo, pero no deben ser muchos. En el futuro de afinarse la revisión para limpiarlo lo más posible.

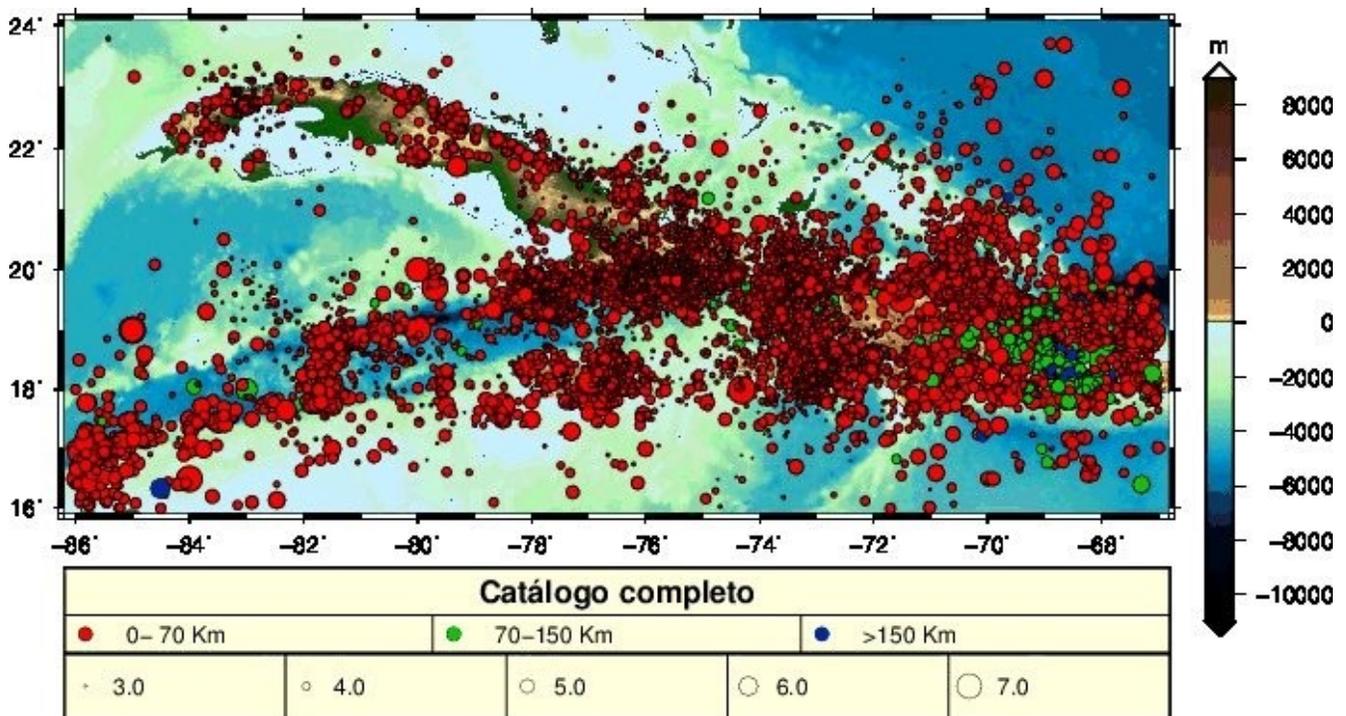


Fig. 1. Mapa de epicentros para el catálogo completo considerando $M \geq 2.75$. El criterio para asignar la magnitud fue tomar el valor de M_W y cuando ésta no existiese tomar el valor máximo de las otras presentes

Preparación de un catálogo con fines de peligrosidad sísmica

El problema de las magnitudes

a) Análisis de las relaciones entre magnitudes de diferentes tipos

Un catálogo con fines de peligrosidad sísmica debe tener sus magnitudes expresadas en una escala única, la cual debe ser la misma que se emplee en las fórmulas de atenuación del movimiento del terreno a utilizar. En la práctica las magnitudes de los terremotos se determinan en función del equipamiento que los registran, y son de varios tipos, por lo que para cumplir el objetivo anterior se debe estudiar la relación entre ellas.

Las relaciones entre magnitudes se dividen en 2 grupos, el de las magnitudes determinadas rutinariamente por las redes globales (m_b y M_S) y el de las determinadas por las redes locales (M_L , M_D , etc.). En este trabajo se hizo una selección de 5551 terremotos desde 1973 hasta 2012 registrados por el International Seismological Centre (ISC), el National Earthquake Information Centre (NEIC), presentes en el catálogo CMT de Harvard y registrados por el servicio sismológico cubano, con los cuales se estudiaron algunas relaciones de correlación entre magnitudes.

De las magnitudes globales se obtuvo una correlación entre la magnitud M_S del ISC y la M_W usando una muestra de 76 eventos:

$$M_W = 0.67M_S + 2.09 \quad (1)$$

la cual es muy cercana a la obtenida por Scordilis (2006) usando una muestra global bastante amplia.

Se obtuvo una relación entre las magnitudes m_b del ISC y el NEIC usando una muestra de 501 terremotos en un rango de magnitud e/ 3 y 6:

$$m_{b\text{ISC}} = 0.995 m_{b\text{PDE}} - 0.113 \quad (2)$$

la cual es muy cercana a la obtenida por Scordilis (2006) usando igualmente una extensa muestra global.

Como se ve, las magnitudes de las redes globales en este catálogo manifiestan un comportamiento cercano a la media global, a pesar de ser obtenidas con muestras relativamente pequeñas. Es por ello que se tomó la decisión de usar en el proceso de conversión a M_W las fórmulas de Scordilis (2006):

$$\begin{aligned} M_W &= 0.67(\pm 0.005)M_S + 2.07(\pm 0.03), & 3.0 \leq M_S \leq 6.1 \\ M_W &= 0.99(\pm 0.02)M_S + 0.08(\pm 0.13), & 6.2 \leq M_S \leq 8.2 \\ M_W &= 0.85(\pm 0.04)m_b + 1.03(\pm 0.23), & 3.5 \leq m_b \leq 6.2, \end{aligned} \quad (4)$$

También se analizó la relación entre las magnitudes M_S y m_b usando una muestra de 380 eventos en el rango de 3 a 6:

$$M_S = 1.345m_b - 2.010 \quad (5)$$

la cual es muy cercana a la obtenida para esta región por García et al. (2003).

Cuando se pasa a las magnitudes locales es más complicado el problema, pues no hay suficientes datos para hacer correlaciones entre magnitudes locales y M_W , por lo que es necesario buscarlas entre locales y M_S o m_b , lo que obliga a hacer una conversión en 2 pasos, la cual es menos confiable que una directa.

Con una muestra de 544 eventos se estudió la correlación entre m_b del PDE y M_{CODA} de la red sísmológica cubana para un rango de magnitudes entre 2.5 y 5 para el período 1999-2012:

$$m_b = 0.554M_{\text{CODA}} + 2.112 \quad (6)$$

el coeficiente de correlación es de 0.75 lo que muestra la existencia de una amplia dispersión.

Por otra parte, usando una muestra de 790 eventos en el período 1973-2012 se estudió la correlación entre las magnitudes m_b del PDE y M_L de la red sísmológica cubana

$$m_b = 0.426M_L + 2.457 \quad (7)$$

el coeficiente de correlación es también de 0.75 lo que muestra la existencia de una amplia dispersión, más explícita que en el caso anterior cuando se analiza gráficamente.

En el caso de la red sísmológica de Puerto Rico se repite el patrón. Usando una muestra de 209 eventos se analizó la correlación entre la magnitud media (ver más adelante) m_b y la M_D :

$$m_b = 0.976M_D + 0.792 \quad (8)$$

con un coeficiente de correlación de 0.69, lo que hace inutilizable la correlación.

Esta situación de la gran dispersión de las magnitudes locales **las hace inutilizables para la preparación de los gráficos magnitud-frecuencia y los eventos correspondientes sólo pueden ser empleados en análisis espaciales de la sismicidad.**

Una situación diferente ocurre con la parte del catálogo cubano donde se utilizaban los equipos soviéticos y la magnitud se estimaba a partir de la clase energética K. Correlaciones aceptables entre M_S y K_R o K_D fueron obtenidas por Alvarez et al. (2000)

$$M_{KR} \equiv M_S(K_R) = 0.48 K_R - 1.5 \quad (9)$$

$$M_{KD} = 3.2 \log(D) - 4.5 \quad (10)$$

Las mismas han sido utilizadas por García et al. (2003) y en todos los trabajos de peligrosidad sísmica realizados hasta el momento.

Mención aparte merecen las magnitudes estimadas por datos macrosísmicos. En este catálogo, todas las que están presentes han sido determinadas en el CENAIIS usando un procedimiento propio, que emplea la fórmula de Fedotov y Shumilina (1971) para Kamchatka y un modelo de isosistas elípticas (Alvarez y Chuy, 1985) mediante un procedimiento de prueba y error. Los valores de M_I obtenidos por dicho procedimiento siempre se han considerado equivalentes a M_S

y hasta ahora no hay ningún argumento fuerte para cambiar esta consideración. Ahora bien, en este trabajo se deben convertir a M_w y existe una dificultad. Las magnitudes M_l determinadas abarcan un rango muy amplio, incluyendo valores entre 2 y 3. Si bien es cierto que existen determinaciones de M_s en ese rango, las mismas a escala global son muy escasas y no fueron usadas por Scordilis(2006) para obtener su correlación que es válida sólo hasta $M_s=3$ correspondiente a $M_w=4.08$. Si se extrapola la fórmula de Scordilis hacia los valores mas bajos tendríamos que una magnitud de $M_s=2$ correspondería a una M_w de 3.41, algo que parece demasiado alto. Por eso se decidió convertir esos valores de M_l sumándole el valor constante 1.08, lo que sería equivalente a considerar una recta de pendiente 1 desplazada en el valor de la diferencia (M_w-M_s) que se obtiene para el límite de existencia de la fórmula de Scordilis

$$\begin{aligned} M_w &= M_s(M_s) \text{ Scordilis(2006),} & MI &\geq 3 \\ M_w &= M_s + 1.08, & MI &< 3 \end{aligned} \quad (11)$$

b) Modificación del catálogo a uno con magnitudes convertidas

Una vez decidido utilizar como base del catálogo la magnitud M_w , y las fórmulas de conversión a ésta, se procesa el catálogo promediando para cada evento las magnitudes de cada tipo y convirtiéndolas a M_w . Para ello se usan los programas de la tabla 4.

Tabla 4. Programas para el procesamiento de las magnitudes de los catálogos

MWcata	Realiza un análisis de catálogo en formato cat, convierte las magnitudes a M_w usando relaciones globales o locales y da como resultado dos ficheros, uno en formato “csv” para ser usado como hoja de cálculo de una “suite ofimática” y otro en formato “seisan” (“.sei”) para ser usado con un SIG.
prepMconv	A partir de un catálogo en formato “cat” obtiene otro donde en las magnitudes se presentan los valores promedio de diferentes tipos. Se usa en conjunción con cat2db para poner el resultado en una base de datos y realizar entonces análisis de relaciones entre diferentes tipos de magnitud.

El resultado de este trabajo está formado por 2 catálogos en formato SEISAN. El primero de ellos contiene todos los eventos, donde la magnitud la M_w (determinada o convertida) se encuentra en la 3ra posición y en las otras 2 posiciones cualquier otra magnitud que no pudo ser transformada a M_w , fundamentalmente las M_D y M_L determinadas en los últimos años por las redes sismológicas de Puerto Rico y Cuba. Este catálogo se utiliza para estudios generales de sismicidad (mapas de epicentros, perfiles, etc). El segundo de los catálogos contiene solo los eventos a los que se le determinó M_w (15845 eventos) y es el que se utiliza para eliminar premonitores y réplicas.

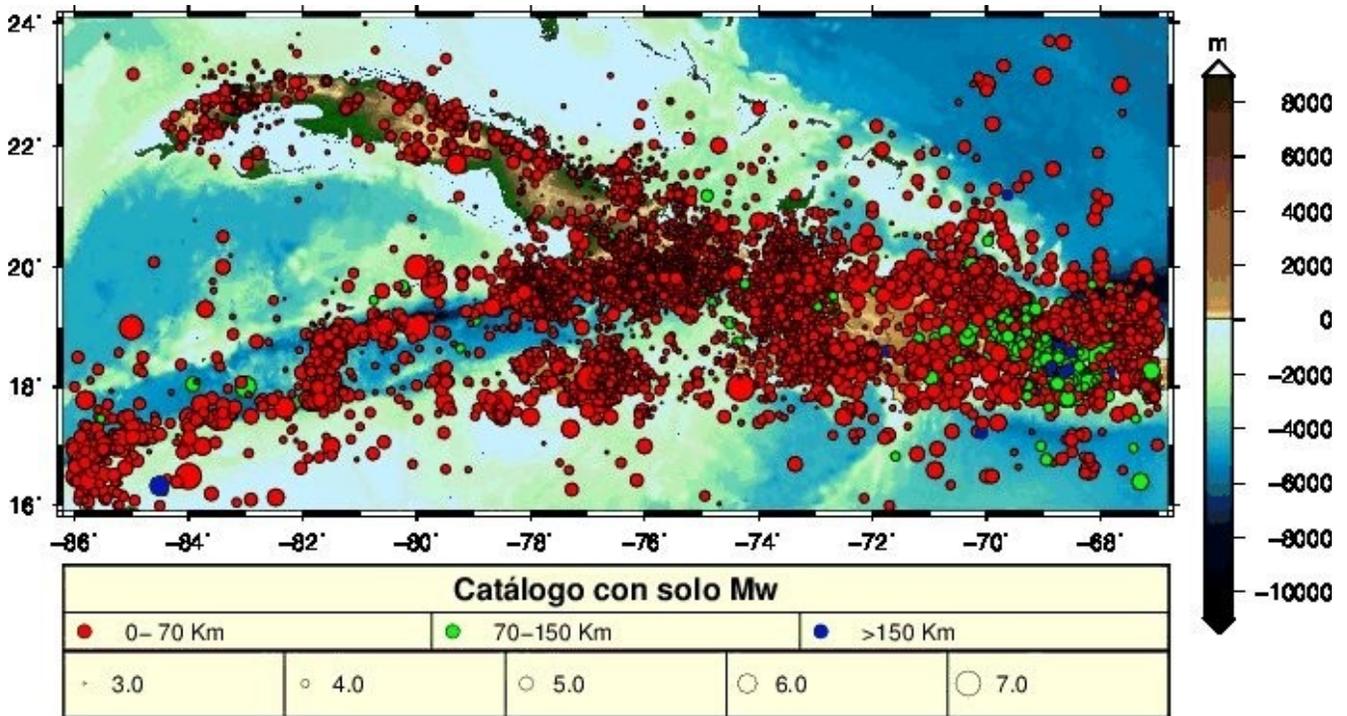


Fig.2. Mapa de epicentros para el catálogo formado por los terremotos que posean un valor de M_w (determinado o convertido), considerando $M \geq 2.75$.

Eliminación de premonitores y réplicas

Para la eliminación de premonitores y réplicas se hizo la prueba con dos programas diferentes: el “cluster” incluido en el SEISAN (Ottmøller et al. 2011) y con el “cluster2000x” (Reasenber, 1999).

a) Con el programa “cluster” del SEISAN

El programa “cluster” del SEISAN requiere un catálogo en forma “no compacta”, por lo que el catálogo original tiene que ser procesado con el SEISAN, primero con el “makerea” y el “split” para crear la base, y luego con el “collect” para formar el catálogo “no compacto” con que trabaja el “cluster”. Este programa, identifica los premonitores y las réplicas mediante el método de ventanas espacio-temporales dependientes de M , usando el fichero de datos “\$SEISAN_TOP/DAT/cluster.def”.

(11)

En este fichero están las ventanas de Gardner y Knoppof (1974). Probando con el catálogo se reafirmó un resultado anterior (Rodríguez y Alvarez,1996, García et al., 2003) de que los criterios de eliminación de ese algoritmo eran muy fuertes, por lo que se construyó un nuevo fichero de parámetros “cluster.def” con las ventanas propuestas por Rodríguez et al. (1996) con el que se hizo la selección. Finalmente el catálogo quedó en 12771 eventos.

b) Con el programa “cluster2000x”

El programa “cluster2000x” usa una ventana espacial circular de radio “a” (en km), que solo depende de la magnitud del terremoto principal y del stress drop

$$\{ \log a = 0.4 * M - (\log(\text{dsigma}))/3 - 1.45 \} \quad (12)$$

El termino $\{ \log(\text{dsigma})/3 - 1.45 \}$ es igual 0.011 para $\text{dsigma}=30$ bars. Ese valor esta prefijado en el programa. Igualmente usa una ventana temporal de duración t (en dias)

$$\{ t = 10 / [-\text{alog}10(1-P)] * 10^{**}[2/3 * (dM-1)] \} \quad (13)$$

donde $dM = M_{\text{max}} - M_{\text{min}}$ (M_{max} es la del terremoto principal, M_{min} depende de las observaciones), P es la probabilidad de que en un término de hasta 10 días ocurra una réplica, la cual se fija en el programa en 0.01. La descripción del método se encuentra en (Reasenberg, 1985). Se hizo una modificación del programa para que los eventos principales no los escribiese después del catalogo de eventos independientes, sino en un fichero aparte (cluster.eqv). También se añadió el uso de catálogos en formato SEISAN, y solo para ese formato se hace una llamada al programa "unesei" para que intercale el “cluster.eqv” dentro de “cluster.dec” creando un nuevo fichero "cluster.fin". Con este proceso el catálogo resultante quedó en 14045 eventos. Se debe señalar que al usar este programa se pierde parte de la información del catálogo (segundos, cualquier magnitud adicional a la que se prefiere y todas las variables de caracteres que aparecen en cada registro).

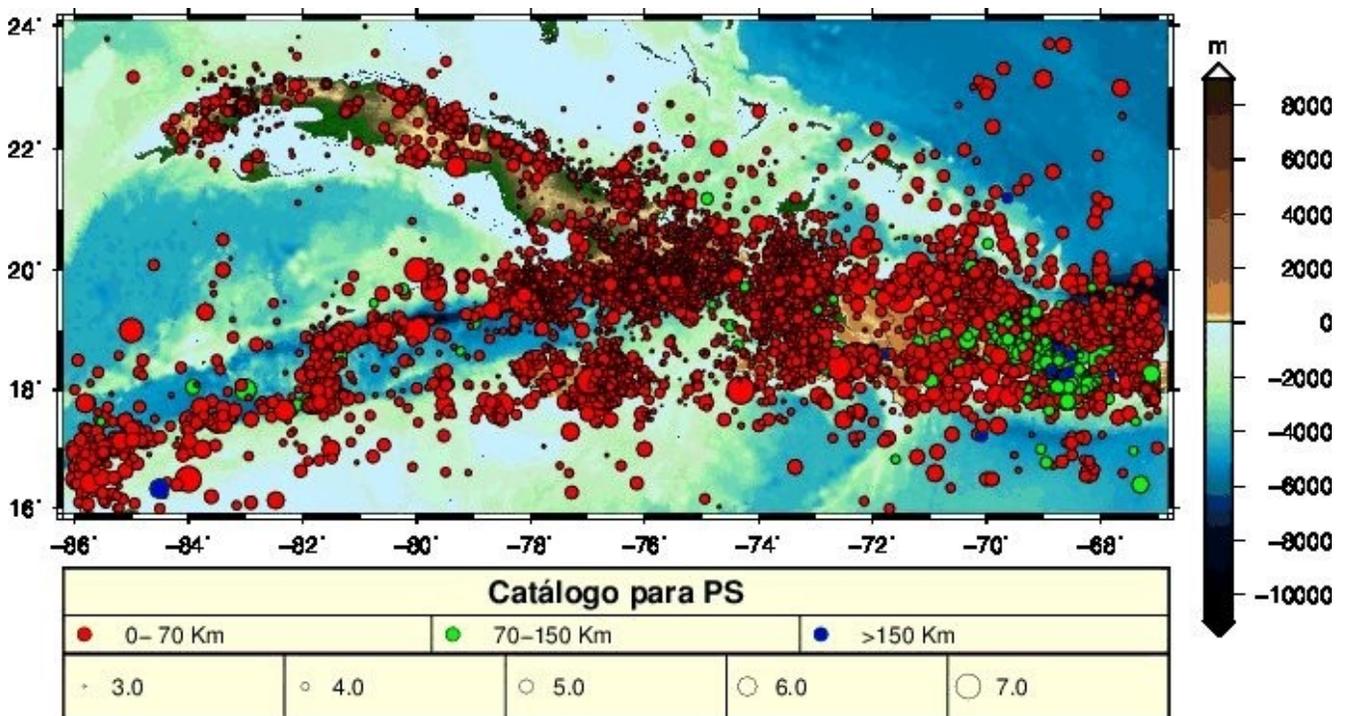


Fig. 3. Mapa de epicentros para el catálogo preparado para peligrosidad sísmica, considerando $M \geq 2.75$.

c) Catálogo para uso en las estimaciones de PS

Analizando los resultados de ambos programas se decidió usar el catálogo limpiado por el SEISAN con las ventanas M-T de Rodríguez y Alvarez (1996). Las características de este catálogo son:

- no contiene premonitores ni réplicas
- solo contiene magnitudes MW (determinadas o convertidas)

- contiene 12771 eventos

Conclusiones

- Se confeccionó un catálogo básico de terremotos de Cuba y regiones aledañas (1502-2012), donde cada evento se representa por una línea de 325 caracteres que contiene la información más confiable sobre tiempo de origen y coordenadas, hasta 12 magnitudes diferentes, información sobre precisión y otros datos. Este catálogo cuenta con 60874 terremotos.
- Se preparó una versión de ese catálogo en formato SEISAN que contiene en la 3ra posición de las magnitudes a la M_w (determinada o convertida) y en las otras dos las magnitudes que no pudieron ser transformadas a M_w . La cantidad de eventos a los que se le pudo estimar una M_w fue de 15845.
- Ese último catálogo (con M_w) fue sometido a un proceso de eliminación de premonitores y réplicas obteniéndose un catálogo final con 12771 eventos;

Bibliografía

- ALVAREZ, L.; T. CHUY (1985): Isoleismal model for Greater Antilles. Proceedings of the 3rd. International Symposium on the Analysis of Seismicity and on Seismic Risk, Liblice Castle, Czechoslovakia, June 17-22, pp. 134-141.
- ALVAREZ, L. CHUY, T., GARCIA, J., MORENO, B., ALVAREZ, H., BLANCO, M., EXPOSITO, O., GONZALEZ, O., FERNANDEZ, A.I. (1999), An earthquake catalogue of Cuba and neighboring areas, ICTP Internal Report IC/IR/99/1, Miramare, Trieste, 60 pp.
- ALVAREZ, L., MIJÁILOVA, R. S., VOROBIOVA, E. O., CHUY, T. J., ZHAKIRDZHÁNOVA, G. N., PÉREZ, E. R., RODIÓNOVA, L. M., ALVAREZ, H., MIRZOEV, K. M. (2000): Terremotos de Cuba y áreas aledañas. En: Sismicidad de Cuba y estructura de la corteza en el Caribe. La Habana, Editorial Academia. ISBN 959-02-0242-X, pp. 7-35.
- BONDÁR, I.; STORCHAK, D. (2011): Improved location procedures at the International Seismological Centre, *Geophys. J. Int.*, vol. 186, pp. 1220-1244.
- DIEZ, E., “Cuban National Seismo-telemetric network”, Abdus Salam Internacional Centre for Theoretical Physics (ICTP), Preprint 1999038, 1999
- DIEZ, E, CUTIÉ, M., MONTENEGRO, M., PALAU, R., POVEDA, V., YINXING, Z., YANG, C., FENGXIA, W. (2014): Modernización de la Red Sísmica Cubana. Instalación, Calibración y puesta a punto. Revista de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, Vol. 29, N° 2, pp. 69-78.
- ENGDAHL, E.R.; van der HILST, R.; BULAND, R. (1998). Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination, *Bull. Seism. Soc. Am.* vol, 88, pp. 722-743.
- DOUGLAS, J.; FACCIOLI, E.; COTTON, F.; CAUZZI, C. (2010): Selection of ground-motion prediction equations for GEM1. GEM Technical Report 2010-E1, GEM Foundation, Pavia, Italy, 77 pp.
- DZIEWONSKI, A.M., CHOU, T.A.; WOODHOUSE, J.H. (1981): Determination of earthquake source parameters from waveform data studies of global and regional seismicity, *JGR*, vol. 86, pp. 2825-2852
- ENGDAHL, E.R.; VILLASEÑOR, A. (2002): Global Seismicity: 1900-1999, in W.H.K. Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, and C. Kisslinger (editors), *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, Part A, Chapter 41, pp. 665-690, Academic Press, 2002.

- FEDOTOV, S.A.; SHUMILINA S.L. (1971): Peligrosidad sísmica de Kamchatka (en ruso). *Izv. Akad.Nauk S.S.S.R., Fizika. Zemli*, 9, pp. 3–15
- GARCÍA, J. (inédito): Catálogo de terremotos de Cuba 1998-2003 usando los registros de la red china.
- GARCÍA, J.A; SLEJKO, D.; ALVAREZ, L.; PERUZZA, L.; REBEZ, A. (2003): Seismic hazard maps for Cuba and surrounding areas, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93, No. 6, pp. 2563-2590.
- GARDNER, J.K.; KNOPOFF, L. (1974): Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian?, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol 64, pp. 1363-1367.
- NOAA (1996): Global Seismicity Catalog CD-ROM, 2150 B.C. to 1995. The Seismicity Catalog CD-ROM Collection, 1996. <<http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/fliers/se-0208.shtml>>
- OTTEMÖLLER, L.; VOSS, P.; HAVSKOV, J. (2011): SEISAN earthquake analysis software for Windows, Solaris, Linux and MacOSX. <https://www.uib.no/rg/geodyn/artikler/2010/02/software>
- PACHECO, J.F.; SYKES, L.R., 1992, Seismic moment catalog of large shallow earthquakes, 1900 to 1989, *Bull.Seism. Soc. Am.*, 82, 1306-1349.
- PRESS, W.H.; TEUKOLSKY, S.A.; VETTERLING, W.T.; FLANNERY, B.P. (1992): *Numerical Recipes in FORTRAN 77. The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press 1992, 1002 pp.
- REASENBERG, P. (1985): Secon-order moment of Centarl California seismicity, 1969-1982. *J. Geophys. Res.*, vol. 90, pp. 5479-5495.
- REASENBERG, P. (2000): CLUSTER2000. <http://earthquake.usgs.gov/research/software/>
- RODRÍGUEZ, M.; ALVAREZ, L. (1996): Estimaciones Probabilísticas de la Peligrosidad Sísmica en Cuba. CENAI-S-MAPFRE, 1996, 94 pp.
- SCORDILIS, E.M. (2006): Empirical global relations converting MS and mb to moment magnitude. *J. Seismology*, 10, pp. 225–236
- SSSN (1996-2012): Sistema del Servicio Sismológico Nacional. Base de datos de terremotos.
- STORCHAK, D.A.; DI GIACOMO, D.; BONDÁR, I.; HARRIS, J.; ENGDAHL, E.R.; LEE, W.H.K.; VILLASEÑOR, A.; BORMANN, P.; FERRARI, G. (2012): Final Scientific Report: ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900-2009), 99 pp.

Anexo 1

Formato "cat" seleccionado para el trabajo en ficheros secuenciales

Parte del formato del catálogo "centenial" de Engdhal originalmente denominado "CAT FILE FORMAT", modificado para incluir información adicional y cumplir requerimientos de este trabajo.

Definiciones de variables

Se considera una sola variable de caracteres x, con longitud 325. Para evitar problemas de errores de lectura escritura todas las variables sean reales, enteras o de caracteres se llevarán a caracteres.

scat – fuente del catálogo → (a6) → x(1:6)

por ejemplo EHB = EHB hipocentro y tiempo de origen por EHB

asol – apertura del azimuth de las estaciones teleseismicas ($\Delta > 28^\circ$) → (a1) → x(7:7)

para el período 1900-1963:

bl=desconocido

A = $< 180^\circ$

B = $< 210^\circ$ y $> 180^\circ$

= $< 240^\circ$ y $> 210^\circ$

D = $< 270^\circ$ y $> 240^\circ$

F = $> 270^\circ$

para el período 1964-1999

bl = $< 180^\circ$

Z = $\geq 180^\circ$

tsol – tipo de solución → (a5) → x(8:12)

primera información en los 3 primeros caracteres

HEQ= tiempo de origen e hipocentro fijado

DEQ= profundidad libre

BEQ= profundidad fijada a la del USGS BB (ajusted topo/bati)

CEQ= profundidad fijada a la del cluster de Engdahl (profundidad de evento multiple)

FEQ= profundidad fijada por Engdahl basada en información independiente

LEQ= profundidad fijada por depth el programa

XEQ= solución pobre

P-F= profundidad fijada (SEISAN)

P-S= valor de partida de la profundidad (SEISAN)

P##= Cantidad de fases usadas en la determinación de profundidad (EHDR)

(muestra 99 si ≥ 99)

otra información (en los otros 2 caracteres)

M = disponible mecanismo focal

X = cluster (evento múltiple) disponible localización conocida hasta x km

T = existe determinación de tensor de momento (EHDR)

F = solución de plano de falla disponible

?= Calidad de la solución (EHDF)/evento de intercambio internacional (NOAA,EHDR)

?=X IDE(evento para intercambio de datos)

antes de PDE 1/04;

?= (' A', ' B', ' C', ' D', ' H', ' N') calidad del evento

comenzando con with PDE 1/04

IS= presente en el catálogo de mecanismos focales del ISC (se usa en combinación con el código ISC que se pone en los últimos 9 caracteres de la variable "cid2" (ver al final)

Estos son añadidos para aprovechar información en catálogos HDF, no se modifica el formato, se cambian algunas letras "X por Q", "M por T", "M por D", para evitar confusión con las ya definidas para otros catálogos en los casos 'X ' → 'Q ', 'Xx' → 'Qx', 'Mx' → 'Tx', 'M(d,n,r,f,h,x)' → 'T(d,n,r,f,h,x)'

x= localización del terremoto conocida hasta x km (si x es un número)

c= solo disponibles datos de evento regional

Q = explosión/colapso de cavidad

Qx= localización de la explosión conocida hasta x km (si x es un número)

Tx= localización conocida hasta x km (si x es un número)

Dd= profundidad revisada y aceptada

Dn= profundidad no revisada pero aceptada provisionalmente basado en ≥ 5 fases profundas y/o estacion(es) a distancia(s) menores que la profundidad focal

Dr= profundidad bajo revisión

Df= profundidad fijada al estimado de profundidad regional

Dh= profundidad fijada a la profundidad del CMT de Harvard

Dx= profundidad revisada pero no aceptada

d= profundidad revisada y aceptada

n= profundidad no revisada pero aceptada provisionalmente basado en ≥ 5 fases profundas y/o estacion(es) a distancia(s) menores que la profundidad focal

r= profundidad bajo revisión

f= profundidad fijada al estimado de profundidad regional

x= profundidad revisada pero no aceptada

espacio en blanco → x(12)

ciyr - año → (i4) → x(14:17)

cmon - mes → (i3) → x(16:20)

ciday - día → (i3) → x(21:23)

espacio en blanco → x(24:24)

cihr - hora de origen → (i3) → x(25:27)

cminu - ídem minuto → (i3) → x(28:30)

csec - ídem segundo → (6.1) → x(31:36)

epq - autoridad/indicador de calidad (&, *, % ó ?) (EHDF) (a1) → x(37:37)

nótese que para el PDE esto será siempre calidad horizontal o del epicentro

espacio en blanco → x(38:38)

cglat - latitud → (f8.3) → x(39:46)

cglon - longitud → (f8.3) → x(47:54)

cdep - profundidad focal → (f6.1) → x(55:60)

cnreg - número de región de Flynn-Engdahl → (i4) → x(61:64)

cntel - número de observaciones telesísmicas ($\Delta > 28^\circ$) o número de llegadas de P o PKP (EHDF) usadas en la solución → (i4) → x(65:68)

Primer bloque de magnitudes (1-8). Cada bloque esta compuesto por:

cxmag - magnitud → (f4.1)

espacio en blanco

msc - escala de magnitud- (a2)

espacio en blanco

mdo - fuente de la magnitud- (a5)

La correspondencia con la ubicación en la variable x es:

No	tipo	cxmag(i)	bl	msc(i)	bl	mdo(i)
1	mb	x(69:72)	x(73:73)	x(74:75)	x(76:76)	x(77:81)
2	Ms	x(82:85)	x(86:86)	x(87:88)	x(89:89)	x(90:94)
3	Mw	x(95:98)	x(99:99)	x(100:101)	x(102:102)	x(103:107)
4	MD , Mt o reserva	x(108:111)	x(112:112)	x(113:114)	x(115:115)	x(116:120)
5	ML o KR	x(121:124)	x(125:125)	x(126:127)	x(128:128)	x(129:133)
6	M (~ MS) o reserva	x(134:137)	x(138:138)	x(139:140)	x(141:141)	x(142:146)
7	RG, LG, ME, MG o reserva	x(147:150)	x(151:151)	x(152:153)	x(154:154)	x(155:159)
8	MC o reserva	x(160:163)	x(164:164)	x(165:166)	x(167:167)	x(168:172)

En el caso de EHDR, mdo(1) está formado por ## - número de amplitudes usadas (i2) – se muestra 99 si ≥ 99 - y mdo(2) está formado por 'componente (Z o H)', ## - número de amplitudes usadas (i2) – se muestra 99 si ≥ 99)

Segundo bloque de magnitudes, en este caso la variación está dada por el formato, ya que permite dos cifras decimales

cxmag1 - magnitud → (f5.2)

espacio en blanco

msc - escala de magnitud- (a2)

espacio en blanco

mdo - fuente de la magnitud - (a5)

La correspondencia con la ubicación en la variable x es:

No.	tipo	cxmag1(i)	bl	msc(i)	bl	mdo(i)
9	Gutenberg-Richter o reserva	x(173:177)	x(178:178)	x(179:180)	x(181:181)	x(182:186)
10	MI	x(187:191)	x(192:192)	x(193:194)	x(195:195)	x(196:200)
11	MKr o MKd	x(201:205)	x(206:206)	x(207:208)	x(209:209)	x(210:214)
12	MwPS	x(215:219)	x(220:220)	x(221:222)	x(223:223)	x(224:228)

Esta última la usaremos para magnitudes finales Mw, reales o convertidas, con fines de PS

Hasta aquí llega la semejanza con el formato “centennial” con ligeras modificaciones. Todo lo que sigue son añadidos para cumplir con los objetivos del presente trabajo

espacio en blanco → x(229:229)=' '

I) opciones para datos macrosísmicos

a) indicar si el epicentro y el t0 fueron determinados por datos macrosísmicos

amac - (a3) → x(230:232)

MAC = tiempo de origen e hipocentro determinados por datos macrosísmicos

MSC = tiempo de origen instrumental pero hipocentro macrosísmico

b) existencia datos de macrosísmicos

smac – arreglo de dos variables de un carácter cada una (2a1) → x(233:233), x(234:234)

smac(1) - mapa = disponible mapa de isosistas (si hay mapa se pone: C - Cuba, (P = PDE o Monthly Listing o U = U.S. Earthquakes) (EHDR) → x(233:233)

smac(2) - efectos = C, D, F or H - casualties, damage, felt o heard (muertos, daños, sentido u

oído) → x(234:234)

cint - (f4.1) → I_{max} = valor de intensidad máxima → x(235:238)

permite intensidades intermedias (ej. 4.5) y también ≥X (ej. 10.0)

c) escala de intensidades - (a3) → x(239:241)

espacio en blanco → x(242:242)

II) opciones de error

crmst - (f6.2) error medio cuadrático en tiempo de origen → x(243:248)

crmsp - (f6.2) error medio cuadrático en profundidad → x(249:254)

crmsn - (f6.2) error medio cuadrático en epicentro (N-S) → x(255:260)

crmse - (f6.2) error medio cuadrático en epicentro (E-W) → x(261:264)

crmsd - (f6.2) error medio cuadrático en epicentro (total) → x(267:272)

espacio en blanco → x(273:273)

III) opciones de indicadores

ciorden - (i8) número de orden del terremoto en este catálogo → x(274:281)

cid1 (a16) - indicador del evento → x(282:297)

compuesto por cid1(1:1)=bl, cid1(2:8)=dia juliano, cid1(9:9)='.',

cid1(10:16)=tiempoEnFraccionDeDia*10000000 - la cadena se completa con ceros desde el punto hasta la primera cifra significativa → esto permite tratar como un solo número (de precisión doble) la fecha-hora y considerar diferencias de hasta la centésima de segundo entre registros

cid2 (a16) - identificador del evento → x(298:313)

Los primeros 7 caracteres en este momento no se usan. En los últimos 9 caracteres se coloca el identificador de terremoto del ISC

IV) Otra información otra(a12) → x(314:325)

Es para incluir los indicadores que vienen en otros catálogos, pero que no aparecen en el centennial. Se dan en una sola variable, y se asignan sus valores de acuerdo a la posición

a) primer grupo, correspondiente a la posición 45-50 en NOAA - Associated Phenomena → x(314:319)

1 (45) código de diastrofismo → x(314:314)

F = fallamiento superficial

U = elevación/subsidencia.

D = flamiento y elevación/subsidencia.

2 (46) código de tsunami → x(315:315)

T = generado un tsunami

Q = posible tsunami.

3 (47) código de seiche → x(316:316)

S = seiche.

Q = posible seiche.

4 (48) código de vulcanismo → x(317:317)

V = terremoto asociado con vulcanismo

Q = probable terremoto volcánico

5 (49) código de fenómenos no tectónicos → x(318:318)

R = explosión minera.

C = Coal bump o explosión minera en una mina de carbón.

M = fuente meteorítica.

E = explosión -- accidental, controlada o sospechada.

P = probable explosión

I = colapso.

- L = luces u otros efectos visuales observados
- 6 (50) código de ondas generadas → x(319:319)
- T = onda T.
- A = onda acústica
- G = onda gravitacional
- B = A y G juntas.
- M = efectos múltiples (EHDF)
- b) segundo grupo, columnas 60 y 69 del formato NOAA: x(320:321)
- 7 (60) eventos inusuales → x(320:320)
- L = liquefacción.
- G = geysers/fumarolas.
- S = deslizamientos, avalancha.
- B = flujos de arena.
- C = fractura del terreno no asociado con fallamiento
- V = fenómenos visuales o luces
- O = fenómenos olfatorios
- M = mas de uno de los anteriores.
- 8 (68) indicador de control de la profundidad → x(321:321)
- A = asignada.
- D = profundidad restringida basada en 2 o mas reportes de ondas pP's.
- G = profundidad restringida por geofísica
- N = profundidad de 33 km (Normal) cuando los datos no son sensibles a la profundidad para focos someros
- S = control de la profundidad con ayuda de la fase S.
- * = solución de profundidad libre menos “bien-ligada”; 90% confianza si descansa dentro de 8.5 y 16 km (usada desde enero de 1985).
- ? = solución de profundidad libre pobremente ligada (usada desde enero de 1985).
- c) último grupo, indicadores de otros catálogos
- 9 (SEISAN, tipo1, 11) F - tiempo de origen fijado → x(322:322)
- 10 (SEISAN, tipo1, 21) cualquier letra, modelo utilizado → x(323:323)
- 11 (SEISAN, tipo1, 22) L - local, R - regional, etc., → x(324:324)
- 12 (EHDF) fenómeno de diastrofismo → x(325:325)
- (U = elevación, S = subsidencia, F = fallamiento, 3 = U & S, 4 = U & F, 5 = S & F, 6 = todos)

Aquí no estan incluidos 12 campos del formato HDF que no caben en la definición que hemos escogido. El mas importante que se omite es una segunda definición de la profundidad, pues el formato hdf da una profundidad y luego repite otra que denomina profundidad ISC. Se escogió la segunda pensando que es la de las relocalizaciones EHB, pero debe ser verificado.

Hay otros 10 campos que corresponden a diferentes determinaciones de calidad; algunos de ellos también están en el formato SEISAN (lineas E) y tampoco se consideraron. El otro campo es una clasificacion de agencia para los datos, de un solo carácter, pero no hay información que se pueda utilizar para ver como adaptarla, y además en todos los catálogos que se han revisado no aparece.

Anexo 2

Formato “mec” seleccionado para el trabajo en ficheros secuenciales

Sea "y" la variable que contiene la línea de catálogo

a) datos epicentrales

idisc --- es el identificador del terremoto en el catálogo del ISC → (i9) → y(1:9)

2 espacios en blanco → y(10:11)

scat - es la fuente de los datos hipocentrales → (a6) → y(12:17)

5 espacios en blanco → y(18:22)

→ Fecha y hora

ciyr - es el año → (i4) → y(23:26)

mes → (i3) → y(27:29)

día → (i3) → y(30:32)

un espacios en blanco → y(33:33)

hora → (i3) → y(34:36)

minuto → (i3) → y(37:39)

segundo → (f6.2) → y(40:45)

→ Coordenadas

latitud → (f9.3) → y(46:54)

longitud → (f11.3) → y(55:65)

profundidad → (f8.1) → y(66:73)

dos espacios en blanco → y(74:75)

fijo – es una indicación del tipo de hipocentro que parece corresponder al parámetro tsol(1:3) del formato “cat” → (a4) → y(76:79)

b) tensor de momento

6 espacios en blanco; se desconoce si son una extensión del parámetro “fijo”, pues en la selección hecha para la región de estudio aparecen siempre vacíos
→ y(80:85)

autor - es la fuente de los datos de mecanismo focal → (a4) → y(86:89)

7 espacios en blanco; pudiera ser que los primeros sean alguna reserva para nombres largos de autor, no presentes en la selección realizada
→ y(90:96)

→ valor de M0 en notación científica

aex - es el exponente → (i2) → y(97:98)

am0 – es el factor (f8.3) → y(99:106)

amw - valor de la magnitud de momento (f5.1) → y(107:111)

→ valores de las componentes del tensor

2 espacios en blanco → y(112:113)

aex1 → exponente de los valores en notación científica (equivalente al de M0) → (i2) → y(114:115)

m1 – componente MRR → (f8.3) → y(116:123)

m2 – componente MTT → (f8.3) → y(124:131)

m3 – componente MPP → (f8.3) → y(132:139)

m4 – componente MRT → (f8.3) → y(140:147)

m5 – componente MTP → (f8.3) → y(148:155)

m6 – componente MPR → (f8.3) → y(156:163)

c) planos nodales en notación de Aki (valores en grados)

s1 – plano 1, azimut → (f8.2) → y(164:171)

d1 – plano 1, buzamiento (dip) → (f7.2) → y(172:178)

r1 – plano 1, deslizamiento (rake) → (f9.2) → y(179:187)

s2 – plano 2, azimut → (f8.2) → y(188:195)

d2 – plano 2, buzamiento (dip) → (f7.2) → y(196:202)

r2 – plano 2, deslizamiento (rake) → (f9.2) → y(203:211)

d) ejes principales (T, P, N)

dos espacios en blanco → y(212:213)

aex2 - de nuevo el exponente del M0, que en este caso parece ser el exponente

de las amplitudes de los vectores correspondientes a los ejes → (i2) → y(214:215)

t1- eje T, amplitud → (f8.3) → y(216:223)

t2- eje T, buzamiento (plunge) → (f7.2) → y(224:230)

t3- eje T, azimut → (f8.2) → y(231:238)

un espacio en blanco → y(239:239)

p1- eje P, amplitud → (f8.3) → y(240:247)

p2- eje P, buzamiento (plunge) → (f7.2) → y(248:254)

p3- eje P, azimut → (f8.2) → y(255:262)

un espacio en blanco → y(263:263)

a1- eje N, amplitud → (f7.3) → y(264:270)

a2- eje N, buzamiento (plunge) → (f7.2) → y(271:277)

a3- eje N, azimut → (f8.2) → y(278:285)

e) fecha juliana

un espacio en blanco → y(286:286)

cid1 - fecha juliana → (f16.7) → y(287:302)

Anexo 3

Guiones (scripts) preparados para crear tablas de tipo “cat” y “mec” en postgresql

a) Guión “creacat” para catálogos de terremotos.

El símbolo “#” en la primera y última instrucciones se debe modificar cada vez que se cree una nueva tabla.

```
CREATE TABLE cat#  
(  
scat character varying(6),  
asol character(1),  
tsol character(5),  
ciyr integer,  
cmon integer,  
ciday integer,  
cihr integer,  
cminu integer,  
csec real,  
epq character,  
cglat real,  
cglon real,  
cdep real,  
cnreg integer,  
cntel integer,  
cxmag1 real,  
msc1 character(2),  
mdo1 character(5),  
cxmag2 real,  
msc2 character(2),  
mdo2 character(5),  
cxmag3 real,  
msc3 character(2),  
mdo3 character(5),  
cxmag4 real,  
msc4 character(2),  
mdo4 character(5),  
cxmag5 real,  
msc5 character(2),  
mdo5 character(5),  
cxmag6 real,  
msc6 character(2),  
mdo6 character(5),  
cxmag7 real,  
msc7 character(2),
```

```

mdo7 character(5),
cxmag8 real,
msc8 character(2),
mdo8 character(5),
cxmag11 real,
msc9 character(2),
mdo9 character(5),
cxmag12 real,
msc10 character(2),
mdo10 character(5),
cxmag13 real,
msc11 character(2),
mdo11 character(5),
cxmag14 real,
msc12 character(2),
mdo12 character(5),
amac character(3),
smac1 character(1),
smac2 character(1),
cint real,
escala character(3),
crmst real,
crmsp real,
crmsn real,
crmse real,
crmsd real,
ciorden integer,
cid1 double precision,
cid2 bigint,
otra character(12),
CONSTRAINT cat#_pk PRIMARY KEY (ciorden)
);

```

b) **Guión “creamec” para catálogos de mecanismos focales.**

El símbolo “#” en la primera y última instrucciones se debe modificar cada vez que se cree una nueva tabla.

```

CREATE TABLE mec#
(
idisc integer,
ncon integer,
norden integer,
scat character varying(6),
ciyr integer,
mes integer,
dia integer,
hora integer,

```

```
minuto integer,  
segundo real,  
latitud real,  
longitud real,  
profundidad real,  
fijo character varying(4),  
autor character varying(4),  
eaex integer,  
am0 real,  
amw real,  
eaex1 integer,  
m1 real,  
m2 real,  
m3 real,  
m4 real,  
m5 real,  
m6 real,  
s1 real,  
d1 real,  
r1 real,  
s2 real,  
d2 real,  
r2 real,  
eaex2 integer,  
t1 real,  
t2 real,  
t3 real,  
p1 real,  
p2 real,  
p3 real,  
a1 real,  
a2 real,  
a3 real,  
cid1 double precision,  
CONSTRAINT mec#_pk PRIMARY KEY (norden)  
);
```

Proyecto “Peligrosidad y riesgo sísmicos en Cuba y las regiones circundantes”

Tarea 2: Peligrosidad sísmica, principios y herramientas

Informe de resultado

Programas para el procesamiento de los resultados de árbol lógico obtenidos con el programa CRISIS

Leonardo Avarez

Indice

Introducción.....	1
Programas de procesamiento masivo de resultados de UHS.....	3
preparación general.....	3
programa selectSites.....	3
programa creaInput.....	4
program selectGRAall.....	4
program intCrisisBD.....	4
programa mapUHS.....	5
script postmapa5.pl.....	6
programa de interpolación interUHS.....	6
Resumen del Procedimiento.....	7
Aplicación web para obtener mapas y gráficos de UHS.....	7
Consideraciones generales.....	7
Programas que se usan.....	8
El procesamiento en el sistema cliente-servidor.....	9
Conclusiones.....	10
Bibliografía.....	10
Anexo 1. Algoritmo para el cálculo de los percentiles.....	11

Introducción

Como CRISIS'2014 no tiene incluido el procesamiento estadístico de los resultados de árbol lógico de decisión resultaba necesario realizar este procesamiento estadístico fuera de CRISIS. El problema de la estadística varía en CRISIS'2015, donde se usa una estadística muestral para el caso de árboles lógicos, donde se calculan 8 percentiles, pero no el de 0.84, que es el equivalente a media+SDe en estadística normal. Por otra parte, incluso en la última versión de CRISIS'2015 solo se preparan mapas para el caso de “media” o “mediana” (no está claro cual de las dos es la que usa), por lo que la opción de

considerar el error epistémico queda fuera de las opciones del programa y es necesario procesar los ficheros básicos de resultados para confeccionarlos.

La primera aproximación fue realizar el procesamiento punto a punto, dando como entrada las coordenadas del punto. Se probó con un versión de programas confeccionados por Conrad Lindholm (*extract_from_GRA.f*, *extract_from_GRA.script* e *interpolate_gra.f*). El resultado de estos programas era un fichero de nombre "dalle", cuyo formato, con ligeras modificaciones se adoptó para todo el trabajo posterior. En el proceso de prueba de esos programas se encontraron algunos errores, los que condujeron a su reescritura en forma de otros dos, que realizan la misma operación: ***selectGRA.f*** e ***intCrisis.f***. El resultado incluía ahora no solo el fichero "dalle" sino también el UHS con la dispersión epistémica y su representación gráfica, realizada en línea con el gnuplot. Para preparar el UHS para un período de retorno dado se usa una interpolación lineal simple entre 2 puntos. No se realiza extrapolación, por lo que los "niveles de intensidad" deben cubrir todo el rango posible de valores. Para el cálculo de la dispersión estándar se sigue la formulación dada por Mario Ordaz en el artículo distribuido con CRISIS 2007 sobre los arboles lógicos, pero modificada para el caso $\text{Var}(\text{rama})=0$, ya que en CRISIS2014 no se calcula ese valor. La siguiente etapa fue pasar del cálculo puntual individual al cálculo para todos los puntos donde se calculó la PS. La concepción de esta nueva variante es la preparación de una base de datos de todos los resultados del UHS con una estadística lo mas completa posible. Para ello se preparó una nueva versión de estos dos programas: ***selectGRAall.f*** e ***intCrisisBD.f***, a la que se unen otros 2 para preparación de datos (*selectSites* y *crealInput*) y otro para la preparación de mapas (*mapUHS*). Además, se logró deducir el algoritmo usado por Ordaz para el cálculo de los percentiles en CRISIS2015 y se programó para poder calcular el percentil 0.84 (ver anexo1).

La idea de estos programas es preparar una base de datos con varias tablas. Una con los valores de frecuencia de ocurrencia para cada punto en todas las ramas, y otras con los valores del UHS para cada punto en todas las ramas para diversos períodos de retorno con su procesamiento estadístico. De esta forma, con herramientas de BD se podría acceder a cualquier información y preparar gráficos, tablas y mapas en poco tiempo. La realización de esto se sale de los objetivos del presente proyecto. Lo que se hizo fue preparar una aplicación web, que dado un período de retorno y un tipo de estadística (normal o muestral) calcula gráficos puntuales de UHS o mapas de PS para cada una de las ordenadas del UHS usadas en los cálculos con CRISIS'2014.

Por otra parte, para lograr operatividad y permitir el procesamiento de los resultados del proyecto (Alvarez et al., 2015). se imponía la presentación de estos en una forma accesible para cualquier persona, incluso para los no vinculados al mismo. La forma mas simple es usar un sistema cliente-servidor, donde las bases de datos básicas estén accesibles siempre y puedan ser consultadas por cualquiera haciendo peticiones simples.

Programas de procesamiento de puntos individuales

programa selectGRA

Selecciona para un punto específico los valores de PS calculados por el CRISIS (caso: frecuencia de ocurrencia) y los coloca en forma de tabla:

nivelDeIntensidad \ frecuenciaDeOcurrencia(rama) para todas las ramas

El fichero de salida se denomina "intCrisis.inp". La entrada es por *selectGRA.inp* (parámetros), ya que el programa crea el fichero *selectGRA.dat* (las ramas), para lo cual los ficheros de resultados del CRISIS deben estar en el directorio de trabajo

programa intCrisis

El programa CRISIS lo que hace es calcular para cada uno de los puntos seleccionados un “valor” que se asocia a un nivel del espectro de aceleración. Ese “valor” puede ser: frecuencia de ocurrencia, probabilidad de no excedencia o probabilidad de excedencia. Sin embargo, lo habitual en PS es fijar un período de retorno y determinar a que valor del espectro de aceleración corresponde. El programa CRISIS calcula estos valores en caso el de la media de las ramas para 5 valores del período de retorno que deben seleccionarse al preparar cada corrida. Si después se desea otro debe correrse de nuevo el programa. Este programa lo que hace es interpolar espectros UHS a partir de soluciones de árbol lógico para cualquier período de retorno usando interpolación lineal simple en escala bi-log. La entrada correspondiente a una rama es

- x – frecuencia de ocurrencia ($1/T_{ret}$)
- y – valor de intensidad de la la componente del UHS

Se admiten valores de 'X' en términos de probabilidad de no excedencia o excedencia, lo que se selecciona interactivamente. Se solicita de forma interactiva el valor del período de retorno. Procesa la información de cada rama y calcula el promedio y dispersión de las frecuencias por rama, la cuales son procesadas igualmente. Para el caso de valores fuera de rango se procede como:

- si el valor de “intensidad” es mayor que el máximo considerado en los cálculos, se fija en escala logarítmica como $\lg(\text{MaxIntensity})+0.1$, lo que conduce a un gráfico incorrecto, pero que sigue la misma tendencia y es fácilmente identificable. En ese caso la solución correcta consiste en extender en rango de búsqueda y correr nuevamente CRISIS

Resultados:

- valores interpolados de intensidad: intCrisis.res
- tabla compacta of UHS: intCrisis.uhs
- gráfico de aceleración espectral vs. T_{UHS} : intCrisis.ps
- fichero de comandos “gnuplot” para hacer el gráfico: intCrisis.gnu
- fichero con estadística de las frecuencias por nivel de “intensidad”
- fichero con cálculos intermedios: "intCrisis.pri"

Programas de procesamiento masivo de resultados de UHS

preparación general

Este bloque de programas presupone que se haya hecho una corrida completa de árbol lógico. Por tanto se selecciona un directorio de trabajo y se sitúan en él todos los datos necesarios para realizar el proceso:

ficheros “.gra” de cada una de las ramas

ficheros “.LTC” y “.LTC.dat” del árbol lógico

El fichero “.LTC” contiene los pesos que se le dan a cada una de las ramas del árbol lógico., por lo que se usan dos variantes, una con pesos iguales por ramas y otra con pesos diferentes seleccionados por un análisis de la confiabilidad de las ramas (Alvarez et al., 2015).

programa selectSites

Lee cualquier fichero ".gra" creado por CRISIS2014 y extrae la información sobre los

puntos donde se calculó la PS

Uso: "selectSites any_file.gra"

Resultados: "puntos.dat" y "puntosSinDatos.dat"

El fichero "puntos.dat" contiene las coordenadas (long.lat) de los puntos usados en CRISIS para el calculo de la PS. Si se desea calcular solo algunos puntos, edite este fichero o créelo a mano. Por otra parte el fichero "puntosSinDatos.dat" tiene los otros puntos en los que no se calculó la PS y que cubren toda la región de estudio. Estos puntos, en los ficheros ".gra", aparecen con todos los valores en "0".

programa crealInput

Este programa lee los ficheros ".LTC" y ".LTC.dat" de la corrida de árbol lógico con CRISIS:

- selectGRA.inp - contiene los parámetros que van a controlar el proceso de calculo posterior
- selectGRA.dat – contiene la lista de ficheros ".gra" a procesar

use: "crealInput file_.LTC file_.LTC.dat"

En el caso de ramas con igual peso no es importante el orden en que aparezcan los ficheros ".gra" en el "selectGRA.dat", pero en el caso de ramas con peso diferente si. El fichero selectGRA.inp tiene que tener la posición de los valores de los pesos en correspondencia con la posición de los ficheros ".gra" correspondientes. Se recomienda tener sumo cuidado si se van a editar a mano esos ficheros.

program selectGRAall

Este programa es una modificación del selectGRA, para procesar un número indeterminado de puntos (si npun>9999 modificar el 104 format). Tiene como salida un fichero "intCrisisAll.inp" que difiere del "intCrisis.inp" en que se ponen los bloques de datos por punto, uno a continuación del otro, y se añade una línea de comentario al inicio de cada bloque: "New site: 1"

Entrada:

puntos.dat - creado por el programa "selectSites"

selectGRA.inp - de los parámetros del árbol lógico

selectGRAall.dat - con los nombres de los ficheros.gra que se van a utilizar

Salida:

intCrisisAll.inp – entrada para "intCrisisBD"

selectGRAall.pri – reportes parciales de ejecución

program intCrisisBD

Es el programa básico del paquete. Este programa lo que hace es leer los resultados básicos de CRISIS ya resumidos por "selectGRAall" e interpolar para el período de retorno que se desee, con un tratamiento estadístico amplio. La interpolación se hace de igual forma que en "intCrisis".

Entrada: "intCrisisAll.inp" creado por "selectGRAall"

Salida:

- Fichero con impresiones intermedias para control: "intCrisis.pri"
- Fichero con la estadística para cada punto (media, media+SDe, media-SDe, otros 2 tipos de media y percentiles diferentes): "intCrisis.prom"

- Fichero con una selección de estadística para cada punto (media, media+SDe, mediana y percentil 0.84) para ser usada como entrada del programa “mapUHS “: “mapa.xyz”
- Un fichero comprimido para cada punto (“.zip”) conteniendo los gráficos de UHS:
 - ➔ Table compacta of UHS para plotear: “intCrisis.uhs”
 - ➔ Gráfico ac vs. T_{UHS} : “intCrisis.ps”
 - ➔ Fichero de comandos para plotear con el gnuplot: “intCrisis.gnu”
 - ➔ Fichero con estadística de los valores de entrada por nivel de intensidad: “intCrisis.estad”
- Listado de ficheros obtenidos para todos los puntos: intCrisis.res

En la Fig. 1 se presenta un ejemplo de los gráficos puntuales que contiene los valores para cada rama y los de la estadística normal.

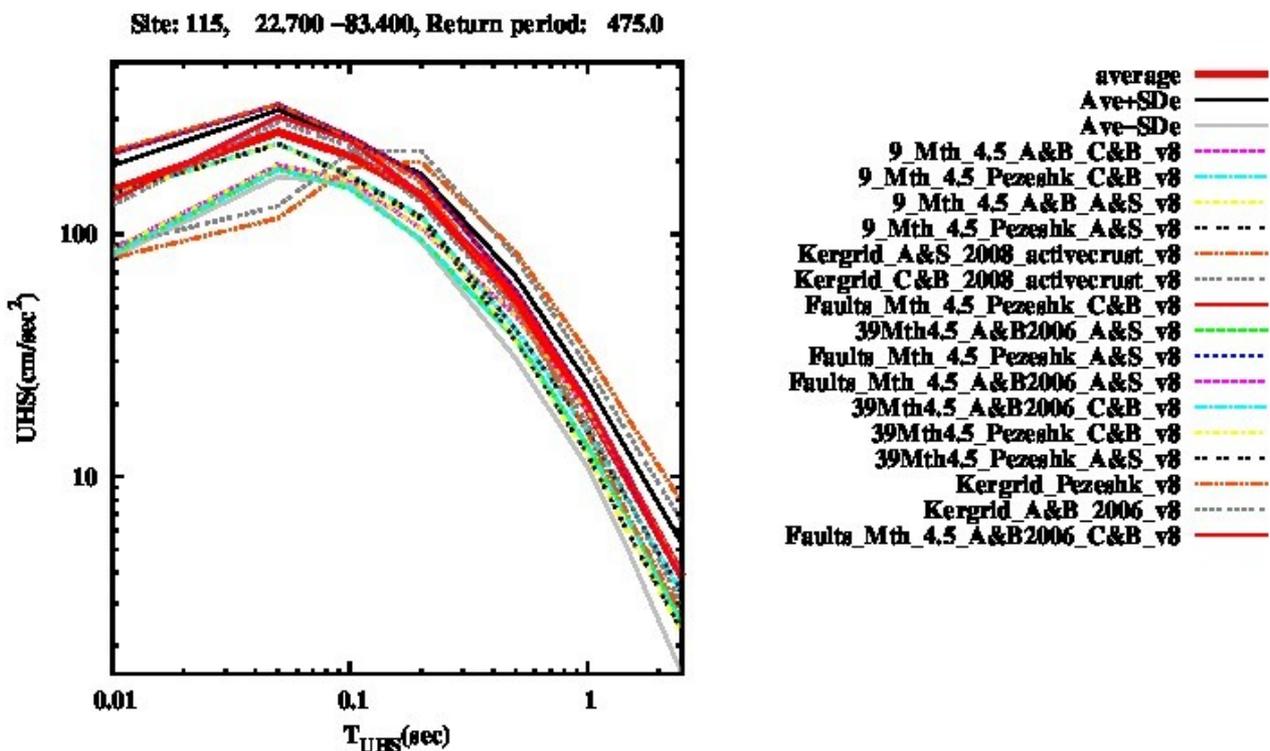


Fig. 1. Ejemplo de gráfico de UHS para uno de los nodos en que se calculó la PS.

programa mapUHS

Este programa lo que hace es leer el fichero “mapa.xyz” creado por “intCrisisBD” y preparar un conjunto de ficheros de parámetros y un script¹ para confeccionar mapas de UHS usando el script “postmapa5.pl”. De forma interactiva consulta sobre el tipo de estadística a utilizar (normal – media y media+SDe, y muestral – mediana y percentil 0.84).

Salida:

- conjunto de ficheros “codigo.postmapa5.par” que cubren todos los períodos UHS para los dos casos de mapa a preparar con la estadística seleccionada.
- conjunto de ficheros “codigo.xyz” que contienen los datos para plotear un mapa específico, en el formato “xyz” del GMT

¹ La traducción del término en inglés “script” corresponde a “guion”, pero en la práctica se usa normalmente el término inglés

- job – es un script que llama al “postmapa5.pl” para preparar cada uno de los mapas. Uso “sh job”

El código se forma uniendo Tret???, Tuhs???, clave de “estadística”, clave “Nomar” como indicación de no uso de batimetría, y es de muy fácil identificación (los ficheros de datos “xyz” no incluyen la porción de código de no uso de batimetría)

script postmapa5.pl

Este es un fichero de procesamiento por lotes que llama a distintos programas del GMT para ir construyendo los elementos que lleva un mapa específico.

Entrada:

- ficheros comunes: paletas de colores topogra2.cpt, red2yellow.cpt y caribe.grd
- ficheros “codigo.xyz” y “codigo.posmapa5.par” para cada uno de los mapas

Salida:

- ficheros “codigo.ps” y “codigo.eps” para cada una de las variantes de “codigo”

En la Fig. 2 se presenta un ejemplo de mapa con batimetría incluida.

Ground motion values for sa (cm.sec⁻²), Tret 475 years, Tuhs 0.5 sec – Type: ave

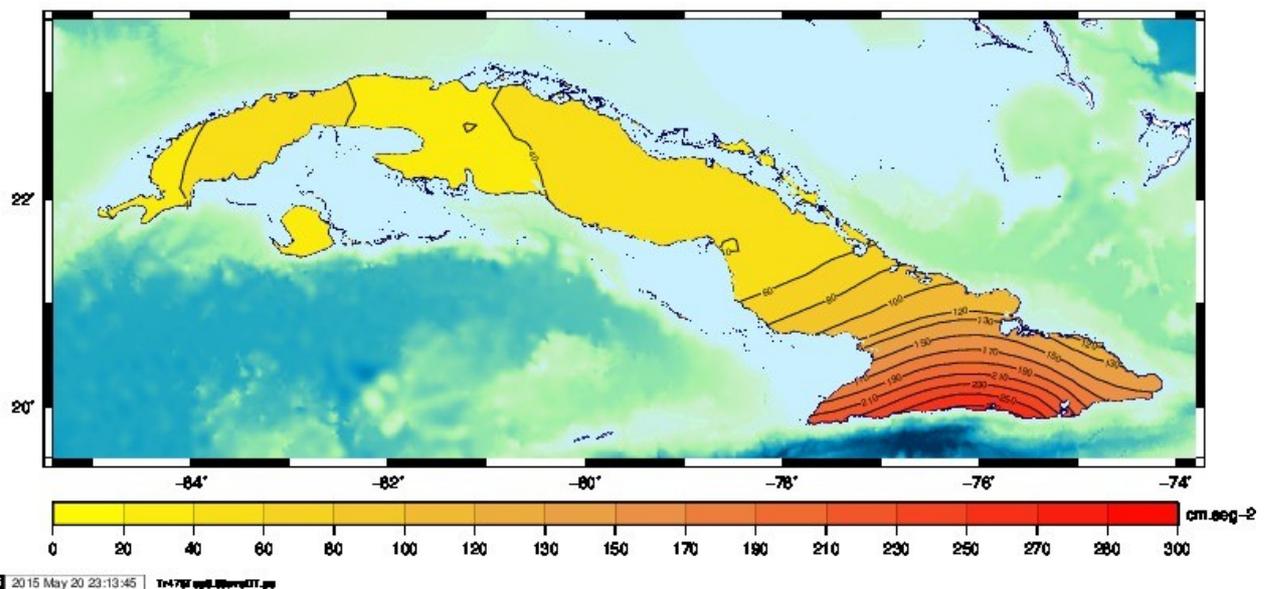


Fig.2. Ejemplo de mapa de aceleración espectral que incluye la batimetría.

programa de interpolación interUHS

Hay veces en que se desea obtener el espectro de UHS para un punto que no coincide con los nodos del cálculo de PS con el CRISIS. Para ello es necesario interpolar entre puntos cercanos. El proceso es buscar los puntos, en la base de datos, que se encuentran a una distancia de hasta 23 Km del punto investigado e interpolar los valores en este punto por el método de inverso de distancia. Solo calcula para el caso de estadística normal (media y media+SDe). Este programa requiere que se pongan en un directorio de nombre "dat" todos los ficheros ".zip" creados por el programa "intCrisisBD" y el fichero "intCrisisAll.res" con una descripción de esos ficheros ".zip".

Entrada: “interUHS longitud latitud nombre_del_lugar”

Salida:

interUHS.res – resumen de la ejecución con valores de puntos cercanos e interpolado

para el punto deseado

job – script para la confección del gráfico

interUHS.gnu – fichero de comandos para la confección del gráfico

nombre_del_lugar.dat4PS – datos para el gráfico

nombre_del_lugar.ps – gráfico

lista – listado de puntos cercanos usados en la interpolación

zipfiles – directorio creado para operaciones auxiliares

En la Fig. 3 se muestra un ejemplo de UHS para un punto cualquiera obtenido por interpolación de puntos cercanos.

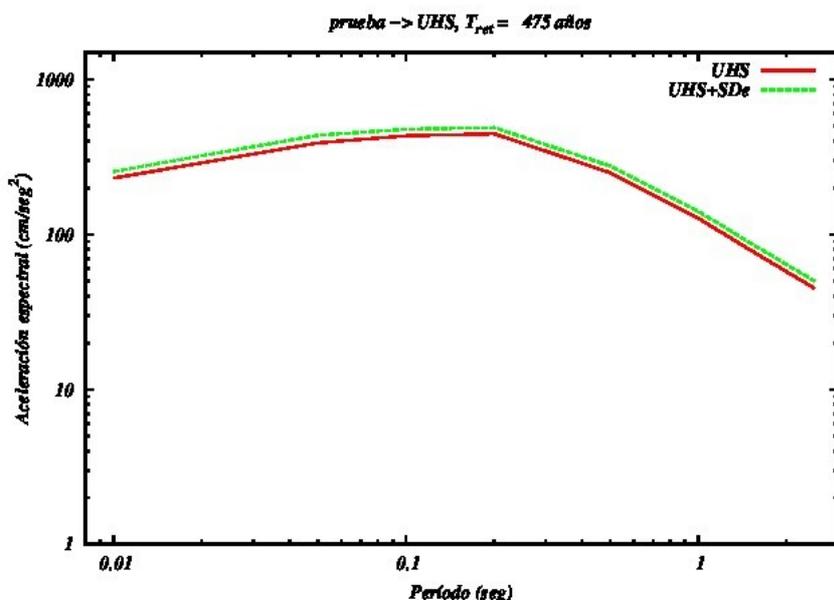


Fig. 3. Gráfico de UHS para un punto cualquiera. Se representan la media (UHS) y la media + dispersión epistémica (UHS+SDe).

Resumen del Procedimiento

- situar todos los ficheros “.gra” en un directorio vacío”
- preparar el fichero “selectGRA.inp”
- usar el programa “selectSites” para crear el fichero “puntos.dat”
- usar el programa “selectGRAall” para crear la entrada para el proceso de interpolación “intCrisis.inp”
- usar el programa “intCrisisBD” para obtener los gráficos por punto y los datos para preparar los mapas
- usar “mapUHS”, seguido de “sh job” para obtener los mapas asociados al período de retorno seleccionado
- usar “interUHS” si se desea obtener gráficos de UHS para puntos particulares

Aplicación web para obtener mapas y gráficos de UHS

Consideraciones generales

La concepción general de una aplicación web es que desde una máquina cualquiera se pueda acceder a un servidor web donde se encuentren los datos necesarios y los programas que permitan realizar una consulta. En nuestro caso se decidió preparar una

aplicación que permitiese preparar mapas de valores de aceleración espectral para todos los períodos del UHS calculados con cualquier período de retorno y gráficos de UHS para cualquier punto incluido dentro de la región estudiada, igualmente para cualquier período de retorno. La misma se incorpora al sistema de aplicaciones web confeccionado en este proyecto (Alvarez, 2014, 2015).

La aplicación es en HTML4.0 y hace llamada a diferentes programas en Fortran, al gnuplot y a guiones en perl que preparan los mapas usando el GMT. A nivel de “cliente” lo que se ve es una “planilla” como la representada en la Fig. 4. Una vez llenada ésta se presiona el botón “Enviar consulta” y se espera a que aparezca en pantalla el resultado de la consulta. Este resultado (texto, gráficos, mapas) es seguido de una sección que permite descargar estos resultados donde desee el “cliente”. La aplicación tiene depositados en un directorio los ficheros “.gra” de resultados del CRISIS para cada una de las ramas, así como otros de resultados del procesamiento discutido en el epígrafe anterior y un mapa de la batimetría a superponer en formato “grd” del SURFER.

Datos generales

Tipo de estimado: mapa estimado puntual

Período de retorno (años):

Tipo de estadística:

- ajuste a distribución normal (media y media+dispersión epistémica)
- simple (mediana y percentil 0.84)

Caso de mapa

Uso de batimetría: no si

El proceso de confeccion de mapas con el GMT es lento, sobre todo si se usa batimetría. Esta aplicación construye 16 mapas (2 para cada uno de los 8 períodos del espectro considerados) por lo que demora algunos minutos la obtención de los resultados

Caso de estimado puntual

Nombre del lugar:

Longitud:

Latitud:

Fig. 4. Parte del portal de la aplicación que contiene la “planilla” (<form>). Se seleccionan las opciones: mapa o estimado puntual, se da el período de retorno y se selecciona el tipo de estadística a usar. Luego, según sea el caso se introducen los parámetros adicionales. Se ha cambiado un poco el orden que aparecen los diferentes parámetros en la página web para facilitar la discusión.

Programas que se usan

Se usa una modificación de los que se describieron en el epígrafe anterior. Estos son: **intCrisisBDweb** por intCrisisBD, **interUHSweb1** e **interUHSweb2** por interUHS, **mapUHSweb** por mapUHS, **selectGRAallweb** por selectGRAall y **postmapa5web.pl** por postmapa5.pl

Los cambios en los programas responden a dos criterios:

- disminuir el tiempo de ejecución obviando la creación de ficheros auxiliares y de control
- cumplir con los requerimientos del servidor web respecto a la ubicación de resultados parciales o finales

Solo en el caso de interUHS fue necesario hacer cambios significativos, los otros resultaron muy parecidos a los originales. De forma general se sustituyeron entradas interactivas por entrada en línea de comandos como es habitual en los programas para servidor web. Todos los datos necesarios se transmiten a través de la planilla de la aplicación web.

intCrisisBDweb – en este caso se eliminaron la preparación de los ficheros individuales por punto y la escritura de ficheros auxiliares; solo se crean los ficheros con la estadística por punto del UHS.

interUHSweb1 e **interUHSweb2** – la división del original “interUHS” fue obligada por detalles técnicos propios de la ejecución en servidor web.

mapUHSweb, **selectGRAallweb** y **postmapa5web.pl** – las modificaciones estuvieron orientadas fundamentalmente a la disminución de impresiones auxiliares o su eliminación después de ser utilizadas.

Es posible usar diferentes variantes de peso de las ramas si se le dan al programa “selectGRAallweb” los datos de los pesos que se deseen (fichero “selectGRA.inp”). Se incluyen en el directorio de datos los casos “selectGRA.inp.igual” y “selectGRA.inp.difer” correspondientes a los casos señalados al inicio, y se da la opción de crear uno de forma interactiva variando los pesos a voluntad: “selectGRA.inp.sumin”. A la hora de ejecución del programa se selecciona la variante que se desee (Fig. 5).

Asignación de pesos. iguales por rama combinación de pesos recomendada a seleccionar por el usuario (en este caso debe llenar la tabla que sigue)

Asignación interactiva de pesos:

Se usa el convenio de CRISIS'20014: Este peso no puede ser fraccionario, pues el CRISIS no lo admite. La mejor forma de determinar esos pesos es crear una escala de importancia en números enteros. Puede ser 1-2, entre 1 y 10, entre 1 y 100, etc. No importa la cantidad de ramas que contenga el fichero. El programa normaliza estos pesos para que al final la suma de las probabilidades asociadas sea 1.

Número de ramas:

- 1) 9_Mth_4.5_A&B_C&B
- 2) 9_Mth_4.5_Pezeshk_C&B
- 3) 9_Mth_4.5_A&B_A&S
- 4) 9_Mth_4.5_Pezeshk_A&S
- 5) Kergrid_A&S_2008_activecrust
- 6) Kergrid_C&B_2008_activecrust
- 7) Faults_Mth_4.5_Pezeshk_C&B
- 8) 39Mth4.5_A&B2006_A&S
- 9) Faults_Mth_4.5_Pezeshk_A&S
- 10) Faults_Mth_4.5_A&B2006_A&S
- 11) 39Mth4.5_A&B2006_C&B
- 12) 39Mth4.5_Pezeshk_C&B
- 13) 39Mth4.5_Pezeshk_A&S
- 14) Kergrid_Pezeshk
- 15) Kergrid_A&B_2006
- 16) Faults_Mth_4.5_A&B2006_C&B

Fig. 5. Opción de utilizar el tipo de peso por rama que se desee. La “combinación recomendada” es la de pesos diferentes que se usó en en proyecto (Alvarez et al., 2015). La posibilidad de seleccionar los pesos y crear nuevas combinaciones permite investigar el comportamiento del fenómeno que se está estudiando.

Para el tratamiento de los pesos variables se confeccionaron 2 programas:

imprselect: lee los pesos del fichero “selectGRA.inp.difer” en el caso de que se use “combinación recomendada” y los imprime en la página de resultados.

creaselect: lee los pesos que se introducen en la planilla por el método usado en CRISIS'2014, los convierte al formato en que son procesados por “intCrisisBDweb” y los que escribe en el fichero “selectGRA.inp.sumin”

El procesamiento en el sistema cliente-servidor

La entrada de datos es a través de una planilla “html” en lado del cliente (PSUHS.html).

En ella aparecen todos los campos necesarios a completar y se dan algunas indicaciones generales. El procesamiento se realiza en el servidor web mediante un programa en CGI denominado "PSUHS.cgi". Dicho programa recibe todos los datos de la planilla y va haciendo llamadas a los distintos programas o scripts que deben ejecutarse de acuerdo a la solicitud realizada. Los resultados los presenta en una página web, donde se da información general sobre los datos y la ejecución, se muestran tablas, gráficos y mapas según el caso, y al final se sitúan enlaces para poder descargar dichos resultados. Los mismos se descargan fácilmente desde el cliente.

Conclusiones

- 1) Se confeccionó un conjunto de programas que permiten realizar un procesamiento estadístico completo de los resultados de una corrida de árbol lógico del programa CRISIS (Ordaz et al., 2014, 2015), tanto en línea de comandos como a través de un servidor web.
- 2) Las tablas de resultados incluyen estimaciones de media, media+dispersión estándar y 10 percentiles. Los mapas se preparan para (media, media+dispersión estándar, mediana y percentil 0.84). Si se desea el mapa de otra de las variantes de estimación estadística, deben ser modificados algunos de los programas.
- 3) Se pueden usar diferentes combinaciones de pesos de las ramas (iguales, combinación recomendada por los autores (Alvarez et al., (2015), cualquier combinación preparada de forma interactiva)

Bibliografía

- ALVAREZ, L. (2014): [Sistema de análisis de la sismicidad sobre servidor Web](http://iga.cu/publicaciones/revista). Ciencias de la Tierra y el Espacio (<http://iga.cu/publicaciones/revista>), vol.15, pp. 184-198.
- ALVAREZ, L. (2015): Proyecto "Peligrosidad y riesgo sísmicos en Cuba y las regiones circundantes". Tarea 2: Peligrosidad sísmica, principios y herramientas. Informe de resultado: "Sistema de aplicaciones web para sismólogos", 23 pp.
- ALVAREZ, L.; VILLALÓN, M., LINDHOLM, C (2015): Seismic Hazard for Cuba . Report. CENAI and NORSAR . 73 pp.
- ORDAZ, M.;MARTINELLI, F.; AGUILAR, A.; ARBOLEDA, J.;MELETTI, C.; D'AMICO, C. (2014): CRISIS 2014 Ver 1.2, Program for computing seismic hazard, <http://www.iingwn.unam.mx>
- ORDAZ, M.;MARTINELLI, F.; AGUILAR, A.; ARBOLEDA, J.;MELETTI, C.; D'AMICO, C. (2015): CRISIS 2015 Ver 2.1, Program for computing seismic hazard, <http://www.iingwn.unam.mx>

Anexo 1. Algoritmo para el cálculo de los percentiles

Lo primero que se hace es ordenar la muestra, por lo que se tiene un conjunto de valores de PS ordenados de menor a mayor: $\{PS_1 \leq PS_2 \leq \dots \leq PS_N\}$. Cada una de esas ramas tiene un peso dado en el problema:

$$\text{peso}_i = \text{peso}(\text{ramaPS}_i)$$

Se calcula entonces la probabilidad asociada a cada uno de los puntos de la muestra:

$$\begin{aligned} \text{prob}_1 &= \text{peso}_1 & i=1 \\ \text{prob}_i &= \text{prob}_{i-1} + \text{peso}_i & i=2, N \end{aligned}$$

Sean v_{per_j} , $j=1, m$ los valores de los percentiles buscados y PS_{per_j} los valores de PS correspondientes a esos percentiles. El cálculo se hace como:

$$\begin{aligned} PS_{per_j} &= PS_i & \text{si } v_{per_j} = \text{prob}_i \text{ (orden } 1e-10) \\ PS_{per_j} &= v_{per_j} * PS_i / \text{prob}_i & \text{si } v_{per_j} < \text{prob}_i \\ PS_{per_j} &= PS_i + (v_{per_j} - \text{prob}_i) * (PS_{i+1} - PS_i) / (\text{prob}_{i+1} - \text{prob}_i) & \text{si } v_{per_j} > \text{prob}_i \text{ y } v_{per_j} < \text{prob}_{i+1} \end{aligned}$$

Este método se tomó parcialmente de Wikipedia (el caso de muestras no pesadas). No se encontró algo aceptable para “muestras pesadas”. Entonces se modificó el método de muestras no pesadas para incluirle los pesos. El algoritmo resultante fue chequeado comparando con lo que aparece en las salidas “pct” de las corridas de árbol en CRISIS'2015. Las diferencias son muy pequeñas, y pueden achacarse a problemas de precisión y de complejidad de los algoritmos de interpolación usados en cada caso.

Proyecto “Peligrosidad y riesgo sísmicos en Cuba y las regiones circundantes”

Tarea 2: Peligrosidad sísmica, principios y herramientas

Informe de resultado

Sistema de aplicaciones web para sismólogos Leonardo Alvarez

Presentación

Este trabajo es el colofón a una actividad comenzada hace varios años de preparación de diversas aplicaciones sobre web para realizar cálculos sencillos de uso diario en sismología, como es la confección de mapas de epicentros, así como para facilitar la introducción de los resultados obtenidos en el trabajo anterior de estimación de la peligrosidad sísmica (PS) realizado por el CENAIIS (Alvarez et al.; 2005). En el presente proyecto se decidió transformar aquellas aplicaciones simples en un sistema más complejo, que incluyese una mayor cantidad de variantes de procesamiento de datos sismológicos y de consulta de bases de datos de PS.

Como toda aplicación web tiene como objetivo ser consultada por cualquier usuario, durante el desarrollo del trabajo se instalaron en el servidor web del Departamento de Sismología de La Habana todas las aplicaciones, según se iban desarrollando, y se estuvo intercambiando con los usuarios para evaluar la calidad de las mismas, así como para recibir sugerencias para posibles modificaciones. Se hizo una presentación de los resultados preliminares en el congreso Informática'2013, en la sesión que tuvo lugar en Santiago de Cuba. Ese trabajo fue publicado posteriormente en la revista Ciencias de La Tierra y el Espacio (Alvarez, 2014)

A partir de ese momento se trabajó en la solución de los problemas y limitaciones que presentaba el sistema para convertirlo en uno más robusto. Atención especial requirió la preparación de una aplicación que permitiese manipular los resultados obtenidos en la Tarea 2 del presente proyecto.

Este sistema se ha utilizado en un curso de peligrosidad sísmica impartido por el autor en Nicaragua en 2013. Sin embargo, aunque la instalación en el servidor web del CENAIIS se ha realizado en 2 ocasiones, por diferentes causas, ajenas al autor, no ha estado disponible para los investigadores del centro. Con la presentación de este resultado se espera acabar de resolver los problemas para que la aplicación esté completamente accesible para los trabajadores del CENAIIS.

El sistema que se presenta no es cerrado. Tiene 14 aplicaciones funcionando y pueden añadirse otras; de igual forma pueden ser mejoradas algunas aplicaciones y añadidas otras funcionalidades de carácter general.

Resumen

Se presenta un sistema de análisis de la sismicidad que funciona sobre un servidor web, compuesto de páginas web que pasan datos iniciales a aplicaciones “cgi” las cuales hacen uso de otras aplicaciones en “perl”, programas en FORTRAN, y programas de confección mapas y gráficos. Funciona sobre un servidor web en Linux. Todo está realizado sobre plataforma de código abierto (Open Source). Los mapas se confeccionan con el GMT, incluido total o parcialmente en las distribuciones de Linux más comunes (aunque es preferible su instalación a partir de las fuentes). Los mapas usan datos de topografía-batimetría que también son libres. Los gráficos se construyen usando el “gnuplot” y los programas en FORTRAN son compilados con el compilador “gfortran”, que está presentes en todas las distribuciones de Linux. Se pueden obtener los siguientes resultados: (a) mapas de epicentros, de liberación de energía, de mecanismos focales, de actividad sísmica y de densidad de epicentros; (b) gráficos espacio-temporales, de terremotos en profundidad y de liberación de energía; (c) Consultas a bases de datos de peligrosidad sísmica de Cuba; (d) Cálculo de pérdidas en caso de terremoto; (e) Análisis de procesos terremoto principal-réplicas; (f) Representación 3D de terremotos en base de datos SEISAN; (g) Calculo de escenario de terremoto. Usa catálogos de terremotos y mecanismos focales, datos de topografía y otros. Los resultados son textos e imágenes en formato PS, EPS y GIF. El servidor web puede ser montado sobre un servidor web ya existente en red o sobre computadoras de mesa y portátiles con SO Linux.

Abstract

A system for the analysis of seismicity is presented. It works in a Linux web server and it is composed from web pages that pass the initial data to CGI scripts that make use of perl scripts, FORTRAN programs and specialized programs for maps and graphics preparation. All the system is “open source”. The maps are prepared with GMT, that is totally or partially included in the more popular Linux distribution (although it is preferred its installation from sources). In maps' preparation there are used topographic-bathymetric data, also free. The graphics are constructed with “gnuplot” and the FORTRAN programs are compiled with “gfortran” compiler, that is present in all Linux distributions. The following results can be obtained: (a) maps of epicentres, of energy release, of focal mechanisms, of seismic activity and epicentres' density; (b) graphics space-temporal, of epicentres in depth and of energy release; (c) Requests to databases of seismic hazard of Cuba; (d) Loss calculations in case of earthquake; (e) Analysis of main shock-aftershocks process; (f) 3D representation of earthquakes in a SEISAN database; (g) Calculation of earthquake scenario. It makes use of topography data and others. The results are text files and images in formats PS, EPS and GIF. The web server can be installed in an already existing general web server or in PC or laptops running Linux SO.

Palabras claves: sismicidad, mapas, aplicación web

Introducción

Siempre que se hace un análisis de la sismicidad de una región es necesario preparar cierta cantidad de materiales, como son los mapas de epicentros, de ubicación y tipo de mecanismos focales y de otras representaciones de la ocurrencia de terremotos. Es igualmente importante la preparación de perfiles, gráficos espacio-temporales y de liberación de energía, etc. Estos materiales simples constituyen la base de partida para estudios más detallados. Para obtener este tipo de material es necesario procesar la información básica con diferentes programas de cómputo o sistemas. No siempre esa información está disponible y es necesario hacer búsquedas de la misma. Esto resulta engorroso y normalmente lleva mucho tiempo. El reto de los sismólogos es disminuir al mínimo ese tiempo para poder dar una respuesta rápida ante solicitudes que puedan hacer los organismos interesados. Por otra parte, los resultados de estudios de PS por lo general se reducen a un grupo de mapas y gráficos y algunas bases de datos de difícil manipulación. Sin embargo estas bases de datos permiten obtener resultados cualitativamente diferentes si son procesadas adecuadamente. El objetivo de este trabajo fue el preparar herramientas y recopilar datos primarios fundamentales, que ubicados en un servidor web, permitieran obtener los mapas o gráficos necesarios de forma rápida. Eso garantiza una respuesta inmediata con una buena calidad y la posibilidad de evitar el engorroso trabajo de recopilar datos y procesarlos con programas que no siempre están disponibles.

Materiales y métodos

La solución del problema planteado se enfoca a través de un sistema cliente-servidor. El servidor tiene algunos requerimientos: sistema operativo Linux (fácilmente adaptable a otros sistemas de base UNIX), servidor apache2 con perl y cgi, herramientas de código abierto (gfortran, gnuplot, GMT, utilitarios para manejo de ficheros en postscript) y todos los datos a emplear. El cliente no tiene requerimientos especiales: cualquier sistema operativo, cualquier navegador.

Materiales incluidos en el sistema:

Los materiales básicos sobre la sismicidad son los catálogos de terremotos y de mecanismos focales (ver anexo 1) y resultados de estudios de peligrosidad sísmica. Los catálogos son de dos tipos: compilaciones mundiales y catálogos locales. Toda esa información se reduce a ficheros secuenciales con formatos específicos que pueden ser procesados con programas escritos en FORTRAN. Dichos materiales se deben actualizar periódicamente para garantizar un correcto análisis de la sismicidad. Los estudios de PS son específicos, y en esta aplicación se manejan dos diferentes: Alvarez et al. (2005) y Alvarez et al. (inédito). Los datos auxiliares son fundamentalmente de tipo topográfico-batimétrico-geofísico que permiten confeccionar mapas de calidad. El sistema usa unos datos básicos de este tipo que se obtienen libremente en Internet y pueden ser utilizados directamente o con un procesamiento mínimo. Existen otros elementos auxiliares que a veces ayudan en la interpretación, como son: límites de placas, volcanes, puntos calientes y ubicación de ciudades, que se obtienen también de Internet y con un procesamiento simple se preparan para ser incluidos en la confección

de mapas. Por otra parte pueden ser incluidos contornos preparados por el usuario o de otros estudios como vía de comparación.

Materiales propios del usuario:

El sistema permite que el usuario importe materiales propios para el cálculo (catálogos, mapas base a usar en lugar de topografía-batimetría y contornos auxiliares). Estos se depositan en un directorio particular del sistema y pueden ser seleccionados por cualquier usuario a partir de ese momento. Los catálogos de terremotos deben estar en formato SEISAN. Los mapas de base que usa el GMT deben estar en formato “grd”, propio del sistema, que es binario y no puede ser importado a través de una “planilla” en html. Es por ello que se importan los datos de mapas geofísicos en formato xyz, y el sistema los convierta “grd” en el momento de ser importados. Si los datos geofísicos están ya en formato “grd” del GMT, tiene que solicitarse al administrador del sistema que los coloque en el lugar correspondiente. Los contornos auxiliares se usan en el sistema en el formato “xy” del GMT, y pueden ser importados directamente en ese formato o en el “bln” del SURFER, en cuyo caso el sistema lo convierte a “xy”.

Métodos de procesamiento:

a) Preparación previa de los datos que se van a poner para su uso en el sistema. Lo primero es la reducción de los datos a formatos estándar. Se realiza con programas en FORTRAN y guiones (“scripts”) en “awk”. Para cada catálogo o base de datos se realiza un procesamiento particular. Los catálogos de terremotos se preparan en formato SEISAN, mientras que para los de mecanismos focales se usan los formatos internacionales “ndk”, “SOPAR”, “ISC” y uno diseñado especialmente para los catálogos locales. Los datos topógrafo-batimétricos (Becker et al, 2008) usan el formato “grd” del GMT y los otros auxiliares se convierten a formatos “xy” y “xyz” del GMT.

b) Selección de datos de los catálogos y bases de datos y procesamiento específico sismológico. Se realiza con programas en FORTRAN (básicamente en FORTRAN 77 con algunos elementos de FORTRAN 90) preparados especialmente para el sistema en su mayoría. Se usan algunos programas del paquete SEISAN así como un applet en Java.

c) Preparación de gráficos y mapas. Para ello se usa software libre. En primer lugar el GMT (Wessel y Smith, 1990). Este es un sistema formado por decenas de programas que van trazando los elementos de un mapa o gráfico desde el inicio hasta su conclusión. Debido a la complejidad del procesamiento, para realizar cada tipo de mapa o gráfico se prepara un guión en “perl” que controla los diferentes pasos del proceso. En segundo lugar el “gnuplot” (Williams y Kelley, 2010). Este programa confecciona gráficos de calidad con una serie de comandos específicos que se leen de un fichero de control de ejecución del programa. Igualmente se usan algunos guiones en “bash” para realizar tareas múltiples. Tanto los ficheros de datos, los de control y los guiones en “bash”, son creados durante la ejecución de los programas en FORTRAN.

d) Conversión de formatos de gráficos. Las salidas de ambos constructores de gráficos en formato “postscript” (PS), un formato vectorial de alta calidad. Se usan utilitarios de Unix para transformarlos a otros formatos – EPS (vectorial) y GIF (raster). El formato EPS es el básico de los gráficos ya que es el de mas calidad y puede ser convertido a cualquier otro formato. El formato GIF se usa solamente para preparar las imágenes que se muestran en las páginas web de resultados.

e) Gestión de los programas a utilizar. Se realiza por conjunto de programas en “CGI”, “perl” y “bash” que gestionan la adquisición de datos de la interfase web inicial (portal de la aplicación), la ejecución de los programas, la representación en la interfase web (portal) de los resultados, la descarga de los mismos y el mantenimiento del servidor web.

f) Interfase de usuario. Cada aplicación tiene un portal en formato HTML4.0 donde se sitúan los datos para la petición. La misma se realiza en un formulario (<form>) que envía estos datos al programa en CGI (o perl) que controla el proceso. Ese portal está en un directorio que contiene además un subdirectorio “dat” con los datos a usar, y uno “web” donde se ubicarán los resultados. El directorio “dat” requiere permiso de lectura, mientras que el “web” requiere permiso de escritura.

¿Como funciona el sistema?

En primer lugar se necesita un servidor web sobre Linux (no se ha probado sobre otros sistemas UNIX, aunque debe ser semejante). Los programas básicos a instalar, son lógicamente el “apache2”, el “perl”, el “Image-magic”, el “GMT”, el “gnuplot” y el “gfortran”. Todos ellos vienen en las distribuciones estándar de Linux. Son necesarios igualmente algunos utilitarios para procesar ficheros PS, como “ghostcript”, “ghostview”, “ps2eps”, etc., que normalmente se instalan al configurar una instalación de Linux o pueden ser requeridos como dependencias al instalar los básicos. Para evitar problemas se recomienda instalar el GMT de las fuentes originales sobre el directorio “/usr” GMT(2012).

Una vez instalados estos programas se buscan en el directorio “/etc” los ficheros de configuración del apache2. Se localiza la ubicación del directorio “cgi-bin” donde se pondrán todos los programas ejecutables (perl, cgi y FORTRAN) y el “www” donde se colocan los portales de acceso al servidor. Si se desea pueden ser cambiadas esas ubicaciones, pero no se recomienda hacerlo si no se domina bien el funcionamiento del apache. El directorio “cgi-bin” debe tener permiso de escritura, pues en el se escribirán todos los ficheros temporales que crea el GMT. Con este proceso se configura completamente el servidor web. El paso siguiente es crear en este los directorios donde se ubican los datos, los portales de cada aplicación y los directorios de trabajo, donde se colocarán también los resultados finales. Los portales de aplicación son en HTML simple con formularios (Vega, 2003).

La incorporación al sistema de opciones de importación de ficheros complica el proceso de configuración del servidor web (Gundavaram, 1996). Es necesario instalar el módulo, escrito en “perl 5”, CGI-Lite y preparar guiones específicos en perl para realizar el trabajo usando dicho módulo. El misma se descarga en formato fuente de Internet (Gundavaram, 1997) y debe ser compilado e instalado por el administrador del servidor. Permite la transferencia de ficheros en formato ascii desde el cliente hasta el servidor.

Por el lado del cliente se accede al servidor web y en el se busca la aplicación deseada. Cada aplicación tiene un formulario a llenar con datos que constituyen la “petición”. La misma se envía al servidor web como solicitud de ejecución de un guión CGI. Una vez realizada la petición, se borran los ficheros existentes en el directorio “web” de la misma (resultados de una petición anterior), se escriben en el mismo los resultados de la petición actual y cambia el portal de inicio a uno de resultados. El proceso de obtención de resultados pasa por un guión en CGI que es el que controla el proceso. Lo primero que se hace es llamar a un programa en FORTRAN que realiza los cálculos y prepara

los datos de entrada para el GMT y el gnuplot. A continuación se ejecutan los guiones en “perl” para construir mapas con el GMT y se llama al gnuplot para construir gráficos. Los mapas y gráficos se convierten a formato GIF y se muestran en la página de resultados. Se analizan los mismos y se tienen dos variantes de acción:

- repetir la petición cambiando algunos parámetros
- descargar los resultados de la misma

¿Como se manipulan los accesos múltiples a una misma aplicación?

El sistema identifica la dirección IP del cliente y crea, en el directorio de resultados de cada aplicación, un subdirectorio cuyo nombres es el IP. Si existía uno antes con dicho nombre lo borra y comienza la escritura nuevamente. De tal forma no se mezclan las aplicaciones de los diferentes usuarios. La única excepción a esto es en la representación 3D de la sismicidad, que usa un applet de Java (Lomax, 2006) que lee los ficheros de parámetros de un directorio fijo, por lo que los resultados intermedios son copiados también en ese lugar. En la Fig. 1 se muestra el esquema de procesamiento.

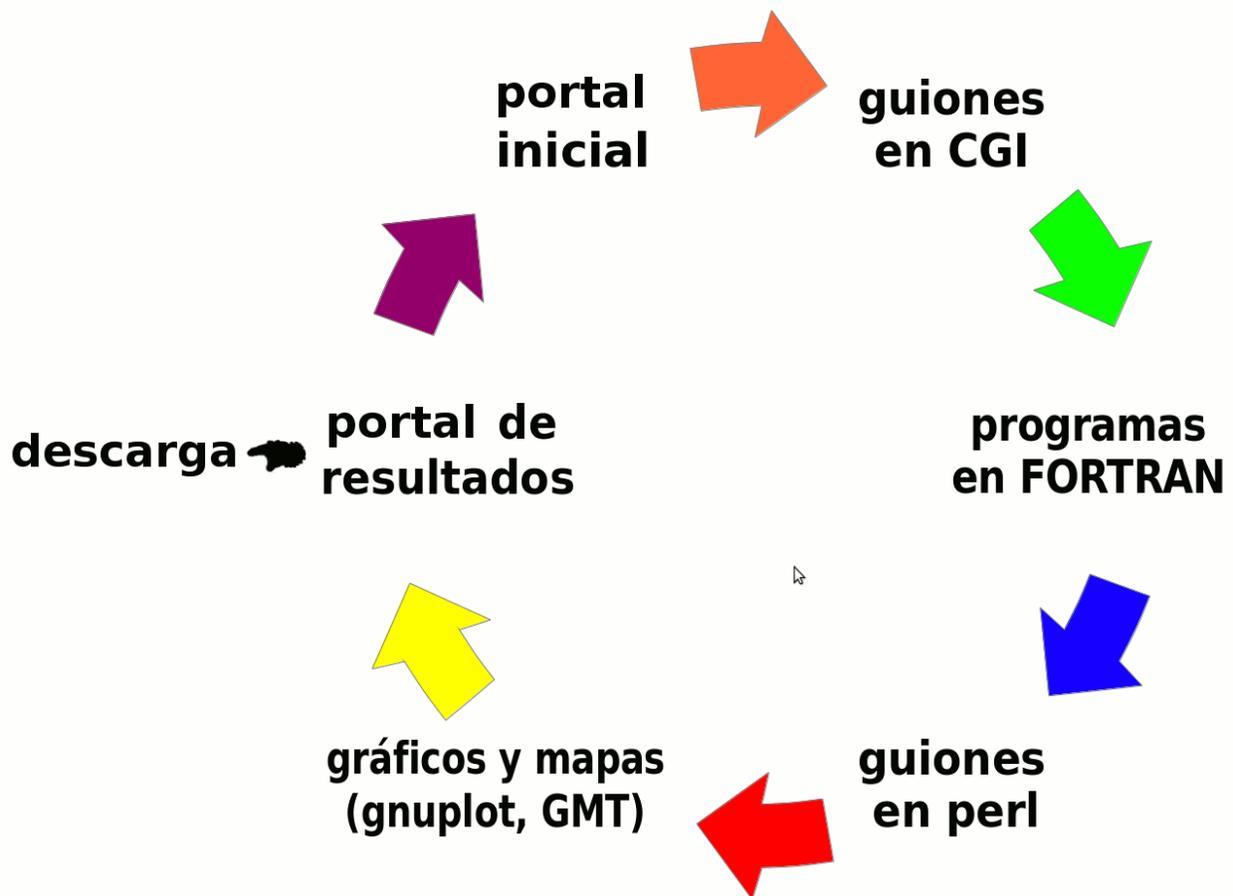


Fig. 1. Esquema de trabajo de la realización de una consulta en el sistema. Una vez llenada la planilla comienza un proceso que culmina representando el portal de resultados. Se pueden descargar esos resultados y se puede volver al portal de inicio y repetir el proceso con otros parámetros.

Resultados

En los guiones (“scripts” en inglés) en “perl” y “cgi” se hace referencia a la ubicación de los directorios de trabajo de cada aplicación, del directorio “cgi-bin” y del directorio de instalación del GMT propios del servidor web que se está utilizando. Para facilitar su modificación al ser instalado en otro servidor web se confeccionó un programa sencillo que lee las nuevas ubicaciones y transforma los ficheros .cgi y .pl correspondientemente. Por comodidad se decidió ubicar los directorios de cada aplicación bajo un mismo directorio (así es mucho más fácil la actualización de los ficheros .cgi y .pl). Por ejemplo, un directorio “sismo” que contiene los subdirectorios CMT, denepi, epimap, libera, perfilT y perfilh, mientras que cada uno de éstos contiene sus directorios “dat” y “web” (datos y trabajo respectivamente), así como el portal desde donde se hacen las peticiones (ver Fig. 1).

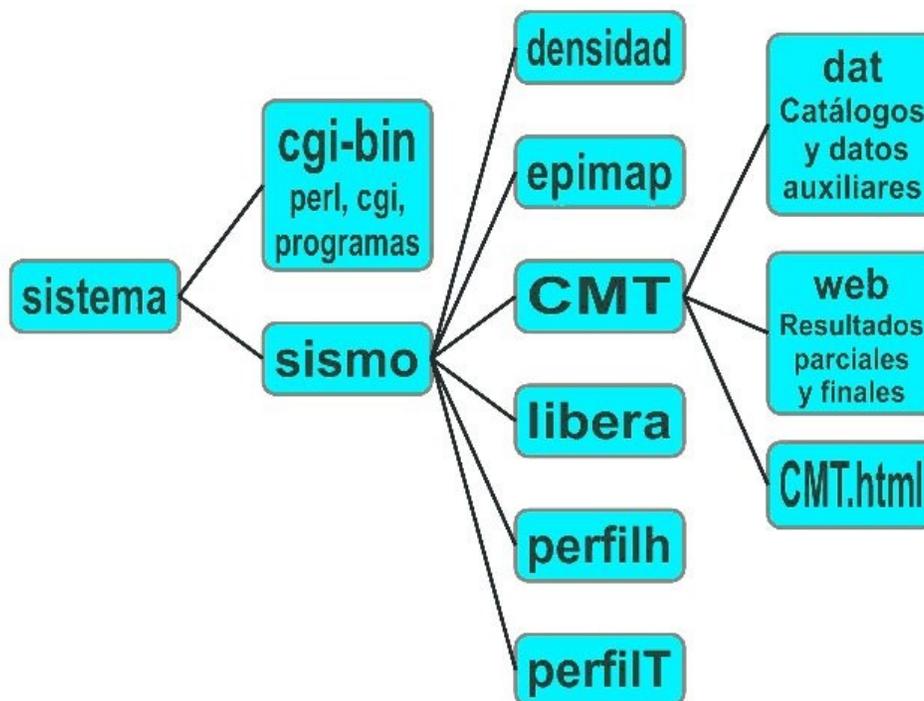


Fig. 2. Esquema de la estructura del sistema. En primer lugar está el directorio cgi-bin del servidor web donde se ubican los ficheros “.pl”, “.cgi”, “.sh” y los programas que realizan los cálculos de nuestro sistema, y en segundo lugar el directorio “www” del servidor web donde se ubican las aplicaciones de nuestro sistema (reunidas en un directorio de nombre convencional “sismo”). Dentro de ese directorio están los subdirectorios correspondientes a cada una de las aplicaciones (convencionalmente representamos solo 6) y otros donde se ubican datos. Dentro de los subdirectorios de cada aplicación hay dos subdirectorios básicos, “dat” con los datos y “web” para los resultados, así como el fichero “.html” del portal de la aplicación.

Las aplicaciones desarrolladas en el momento de confección del informe son las siguientes

- densidad – Mapas de densidad de epicentros
- epimap - Mapas de epicentros (incluye la diferenciación en 3 intervalos de profundidad)
- CMT - Mapas de mecanismos focales y tensores de momento (permite elegir entre planos de falla y tensor de momento)
- libera - Mapas de liberación de energía y deformaciones
- perfilh - Perfiles de terremotos en profundidad (el clásico en 2D y otro en 3D)
- perfilT - Gráficos espacio-temporales
- actsis – Actividad sísmica
- after – Procesos terremoto principal-réplicas.
- seisan3D –Representación 3D de terremotos contenidos en una base de datos SEISAN. Usa programas del SEISAN () y un applet de Java (Lomax, 2006)
- PS - Consulta a base de datos de peligrosidad sísmica en términos de aceleración pico (Alvarez et al., 2005)
- PSUHS - Consulta a base de datos de peligrosidad sísmica en términos de espectro uniforme de peligro (Alvarez et al., 2015)
- perdidas – Cálculo de pérdidas para un terremoto de intensidad dada (Alvarez et. al., 2005).
- escenario – Cálculo del escenario de un terremotos (intensidad y UHS) dadas coordenadas y magnitud usando fórmulas de atenuación válidas para la región (Alvarez et al., 2005)
- BibSeis – Esta es un réplica del portal del ISC para búsqueda en la publicación “Bibliography of Seismology” que usa las bases de datos y un programa de selección incluidos en un CD donde se distribuye información del ISC: <http://www.isc.ac.uk>.

Cada aplicación puede llamar a uno o mas programas y a uno o mas guiones en perl, en dependencia de la complejidad de lo que se solicite. Todos los programas que realizan los cálculos están en lenguaje FORTRAN. No se entra en detalles de los mismos, pues unos realizan solo selecciones en ventanas espacio-temporal-energéticas, otros realizan operaciones habituales en sismología que no requieren explicación y otros responden a metodologías descritas en la bibliografía citada. Sobre los mapas de densidad de epicentros y actividad sísmica puede consultarse (Medvedev, edit., 1968). El resto de los mapas y gráficos que se obtienen en el sistema están descritos en cualquier texto de sismología elemental. Los procesos terremoto principal-réplicas están descritos por Utsu (2002), e incluso se usa parte del software aportado por dicho autor en esa publicación. En cada aplicación, en caso necesario, se incluyen documentos explicativos que se descargan desde el portal de la misma. Los resultados se descargan de la propia web de resultados de cada aplicación, lo que se indica al final de la página. En el anexo 2 se presentan las instrucciones de instalación del paquete.

El sistema como tal ha sido montado en un servidor de Intranet y se ha probado su funcionamiento desde cualquier máquina de la red. También ha sido probado sobre una PC no conectada a red, donde el servidor apache se monta en "localhost". Como no es muy "pesado" se ha montado también sobre una computadora portátil (laptop) donde funciona correctamente. Ha sido utilizado en diversas ocasiones para obtener una respuesta rápida sobre la sismicidad de una región. Actualmente se encuentra montado en la Intranet del Departamento de Sismología de La Habana y en la de la sede del CENAIIS en Santiago de Cuba. Los mapas que se obtienen son de una gran calidad (lo que es una característica del GMT); pueden ser usadas las proyecciones Lambert y Mercator para mapas regionales y para mapas globales se usa la de Ecker. Sobre ellos se puede representar una topografía-batimetría con distintos niveles de definición usando compilaciones globales. Para algunas operaciones en la preparación de mapas en la proyección Lambert se realizan procesos de conversión de coordenadas, en los cuales se emplean los códigos de Williams (1995). Los ficheros básicos resultantes son en formato vectorial (PS), y aunque para su representación en la página web se transforman en formato GIF, son accesibles en tal formato o en formato EPS. A partir de este último formato pueden ser transformadas a cualquier otro (vectorial o raster) usando programas interactivos o en línea de comandos con el "convert" del ImageMagick. En las Fig. 3-12 se muestran algunos de los resultados que se obtienen con las aplicaciones de sismicidad, mientras que en las Fig. 13-16 se muestran algunos de los resultados que se obtienen con las aplicaciones de peligrosidad sísmica.

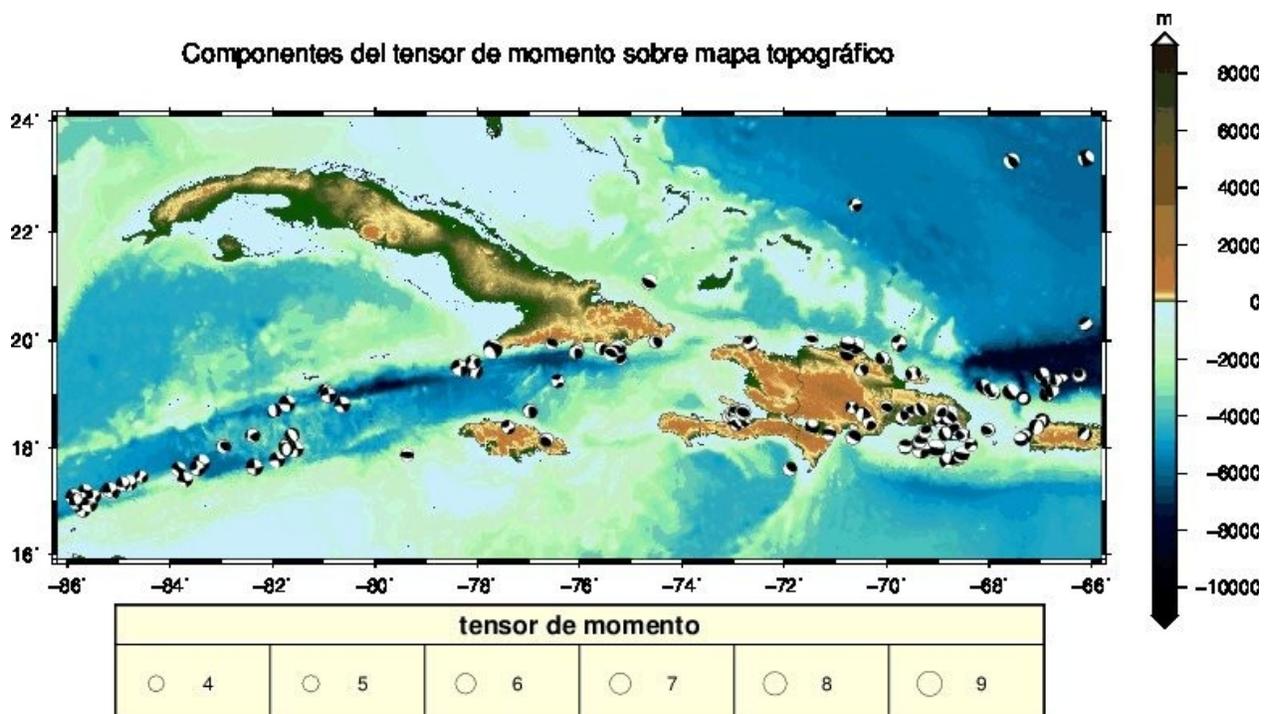


Fig. 3. Representación de los tensores de momento sobre una topografía de alta resolución

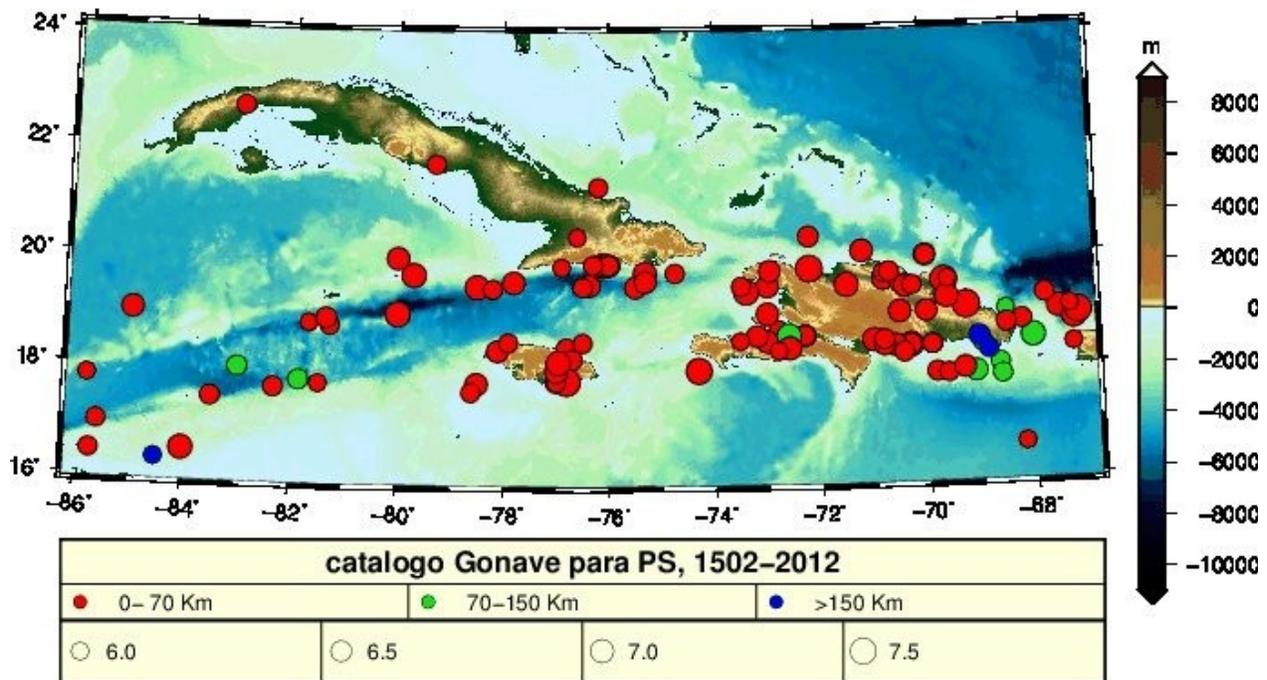


Fig. 4. Mapa de epicentros, topografía de alta resolución, proyección Lambert

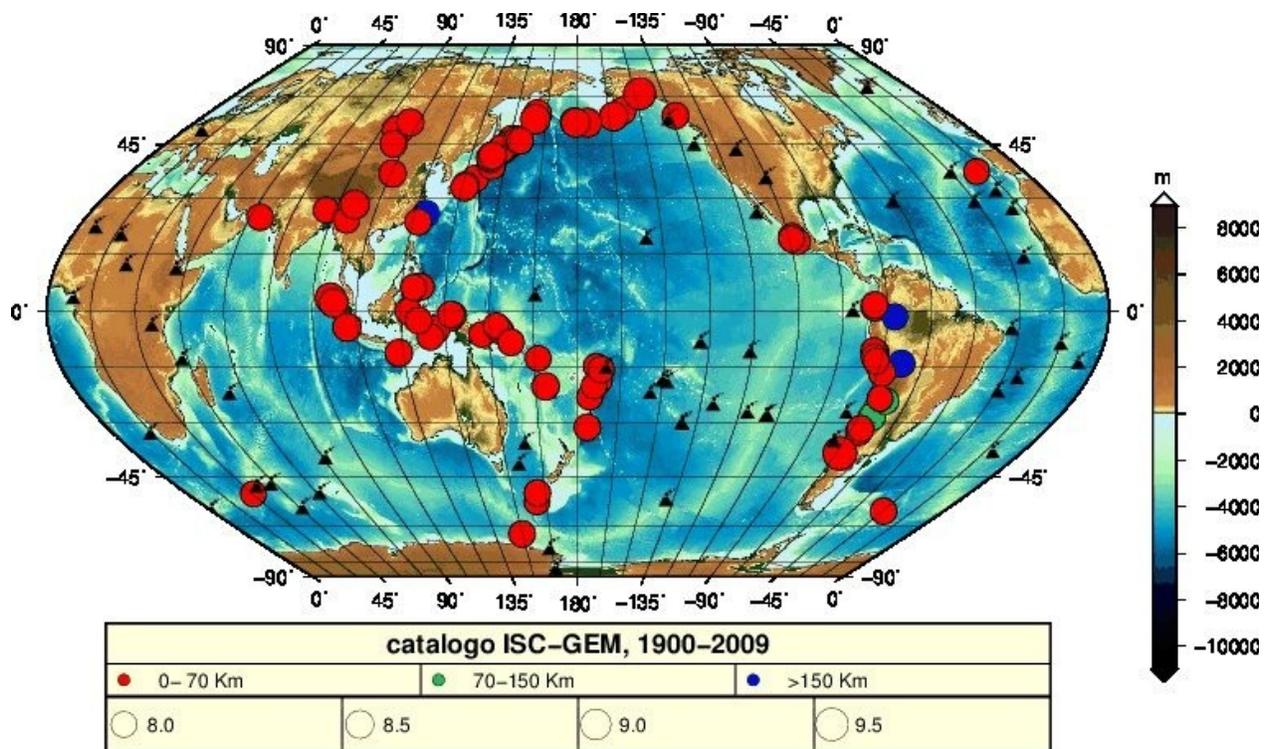


Fig. 5. Mapa de epicentros, proyección de Ecker, topografía de baja definición. Como ejemplo de otras opciones se representan también los puntos calientes (“hot spots”).

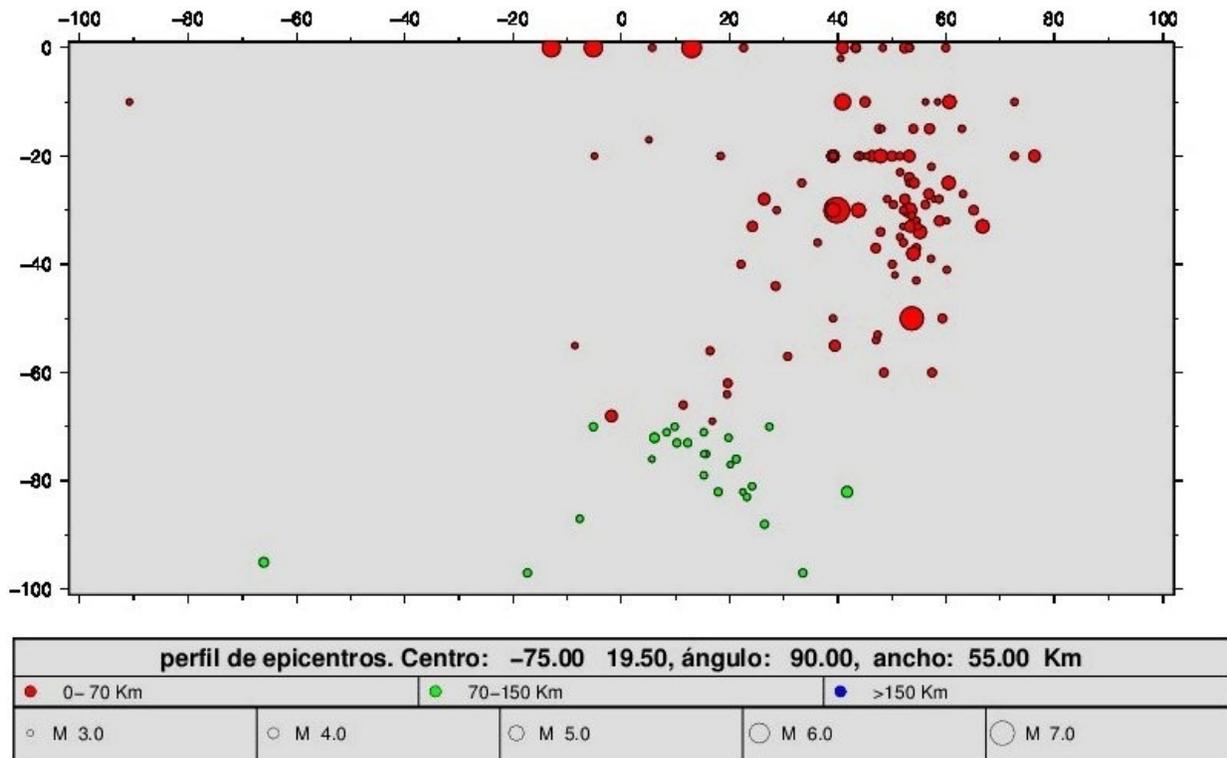


Fig. 6. Perfil de epicentros en profundidad. Representación 2D simple.

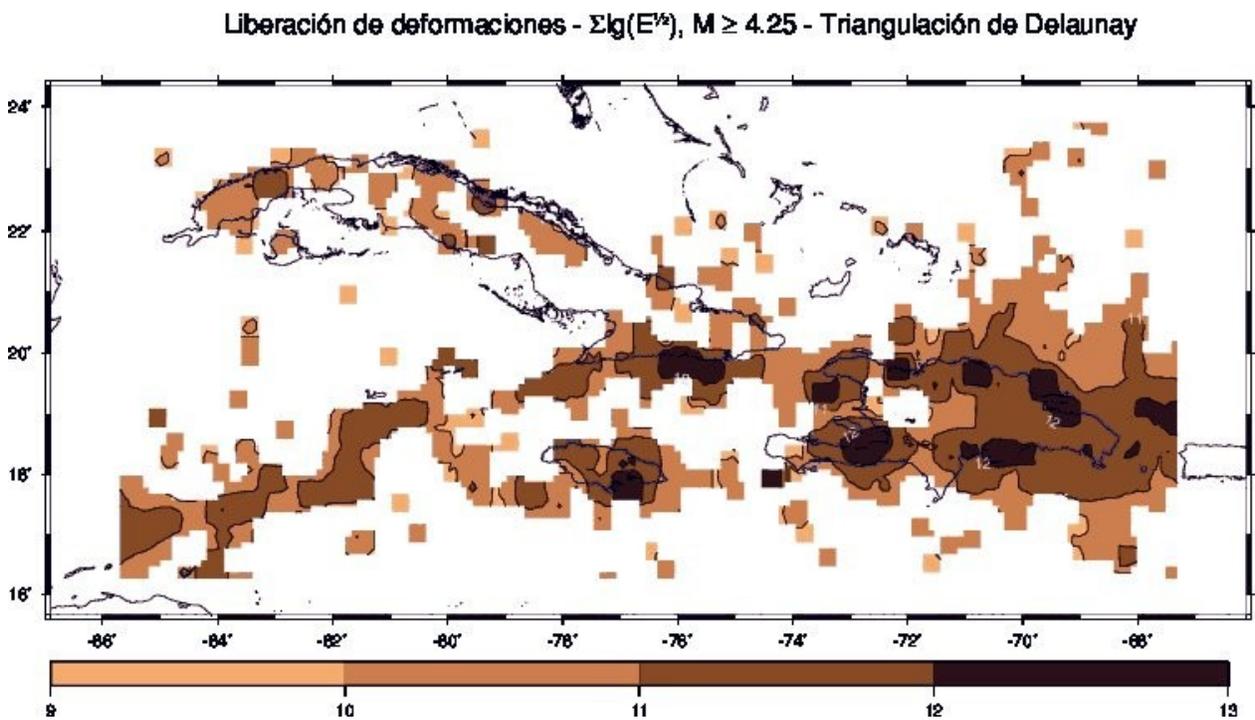


Fig. 7. Liberación de deformaciones.

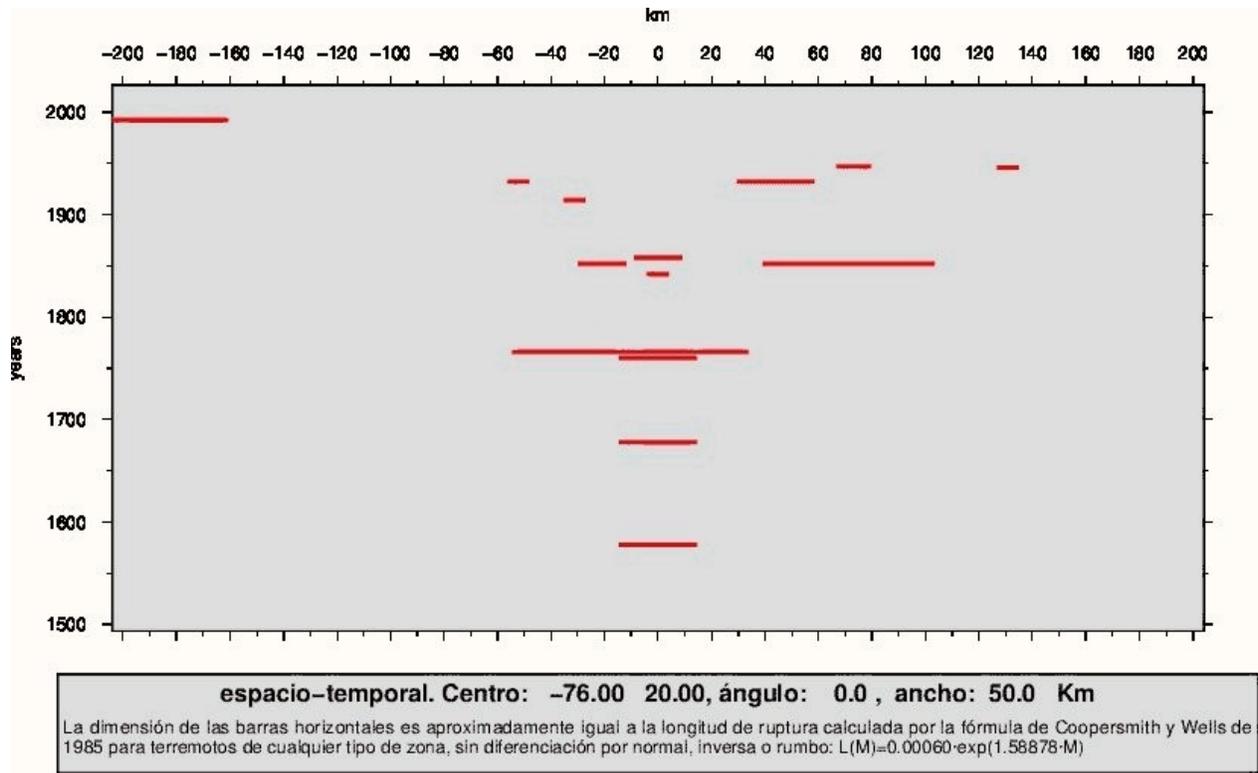


Fig. 8. Gráfico espacio-temporal con representación de los epicentros como barras horizontales del tamaño de la longitud estimada de ruptura.

densidad de epicentros – promediación simple peso central – iteración #03 – triangulación de Delaunay

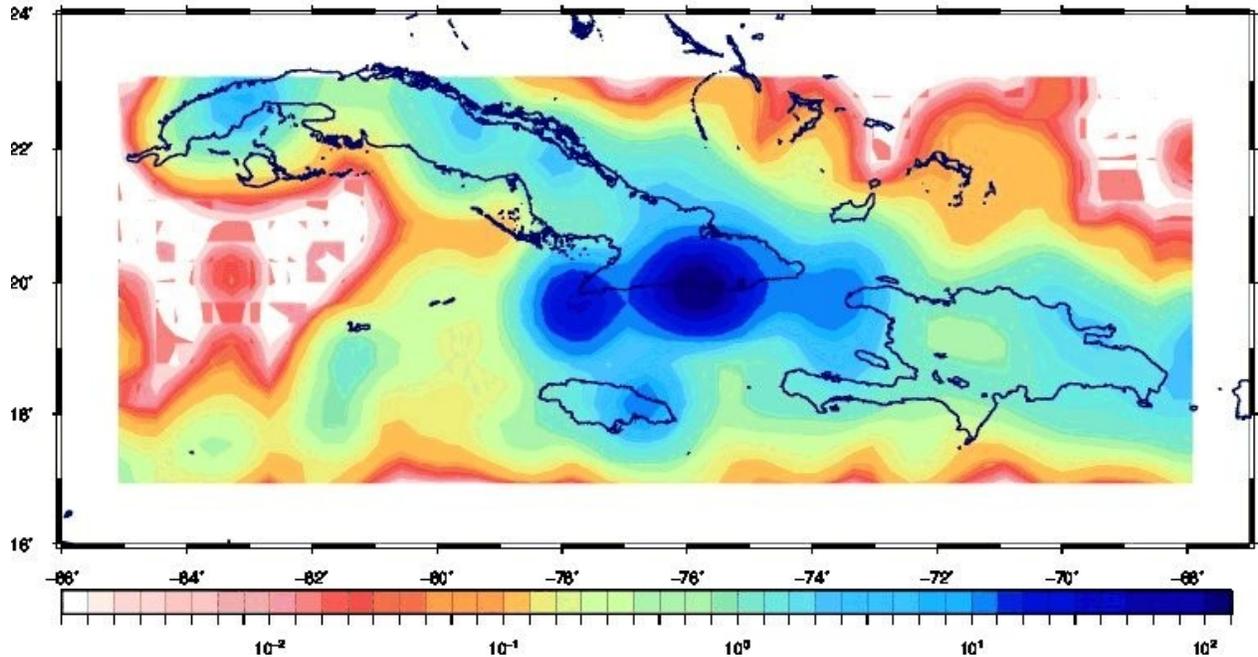


Fig. 9. Mapa de densidad de epicentros.

$A_0(M_0=3.8)$ – conteo simple – suma – representativo – triangulación de Delaunay

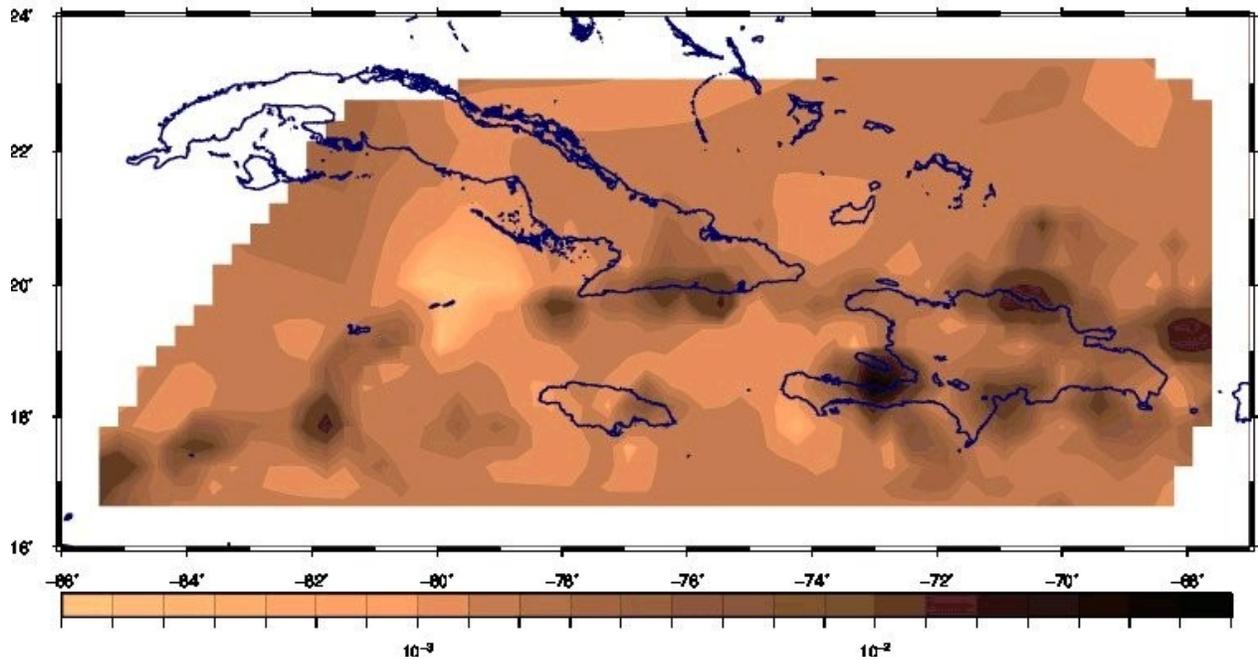


Fig. 10. Actividad sísmica por el método de suma.

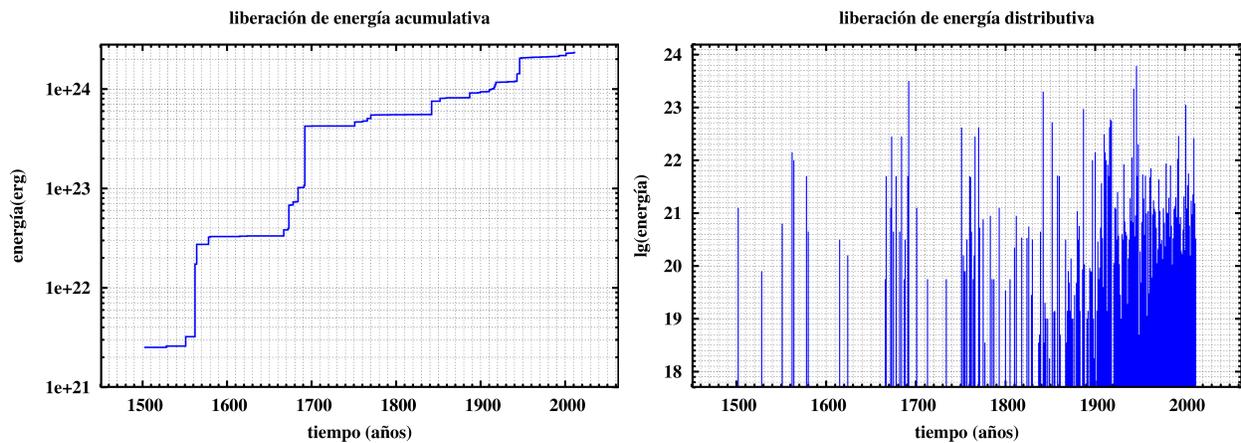
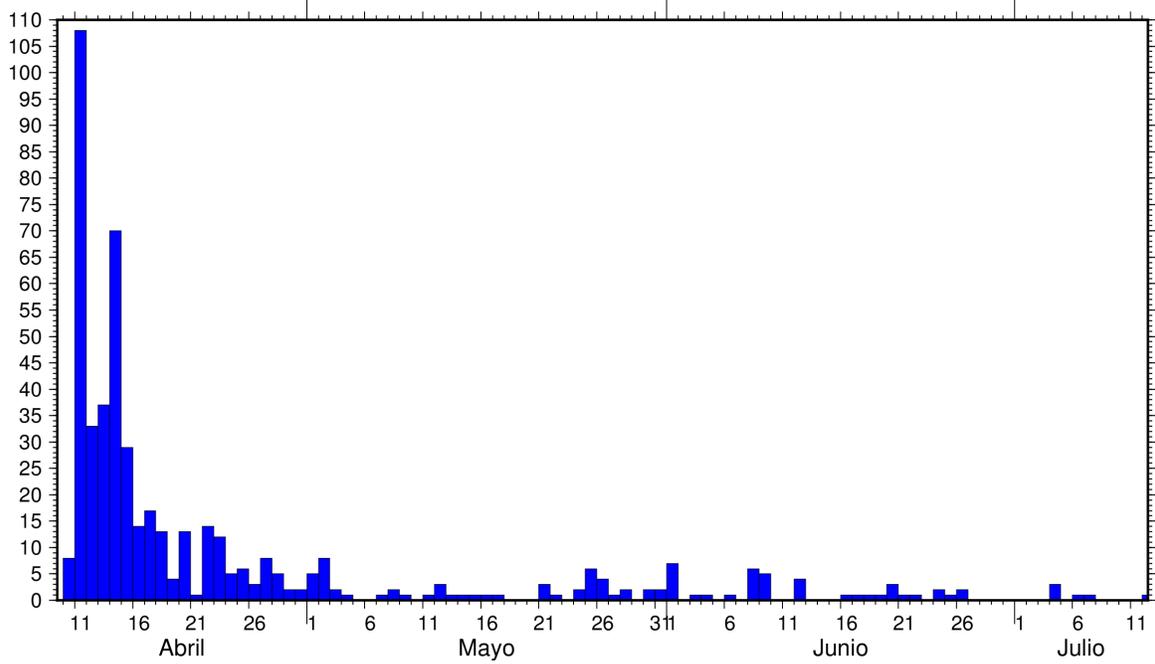


Fig. 11. Gráficos de liberación de energía acumulativa y distributiva (valores anuales). Estos gráficos se preparan en varias de las aplicaciones de sismicidad.

Ocurrencia de terremotos a partir del 10/4/2014



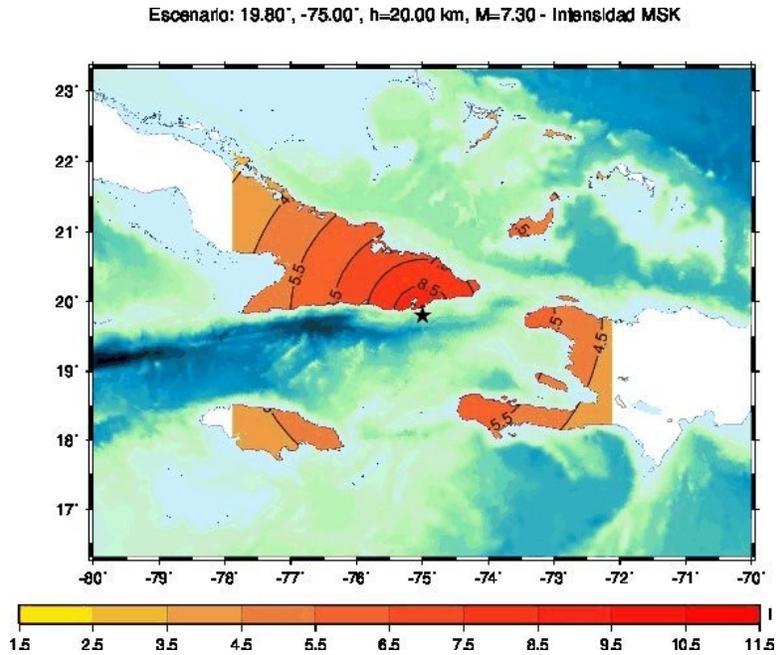


Fig. 13. Cálculo de escenario de un terremoto. Intensidad. Se preparan también para PGA y 5 valores adicionales del espectro UHS. Esta aplicación está pendiente de conclusión en lo que respecta a los modelos de atenuación a utilizar definitivamente.

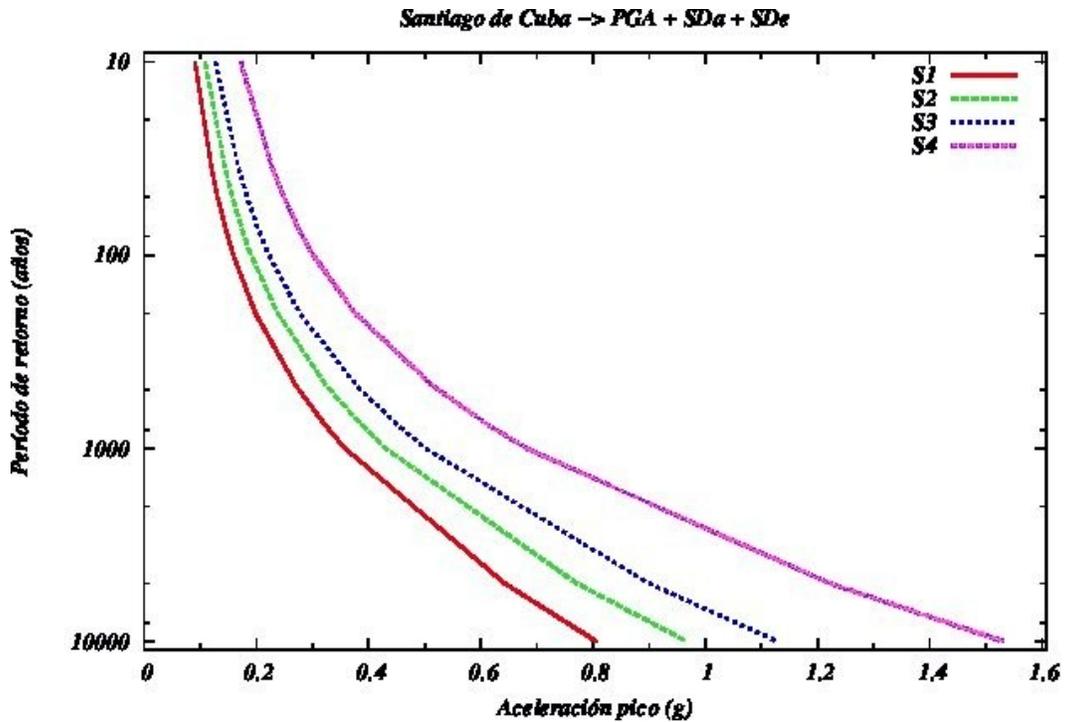


Fig. 14. Estimado puntual de PS según resultados de Alvarez et al. (2015). Los originales son para roca (S1), para los otros suelos (S2-S4) se obtuvieron por conversión usando fórmulas empíricas.

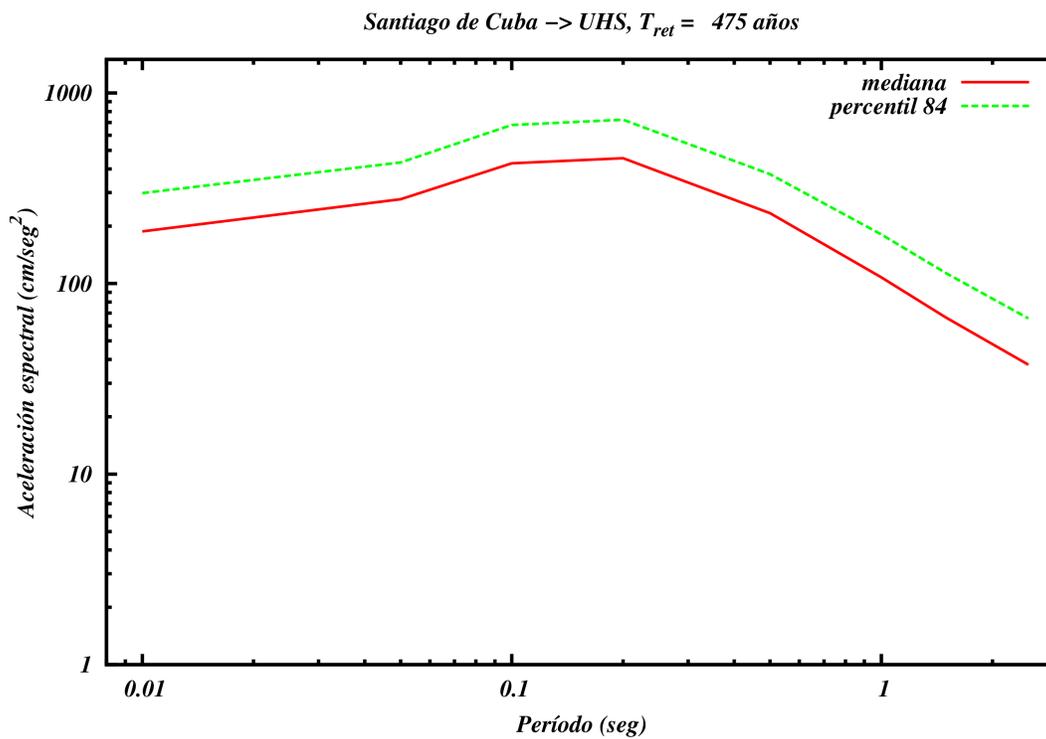
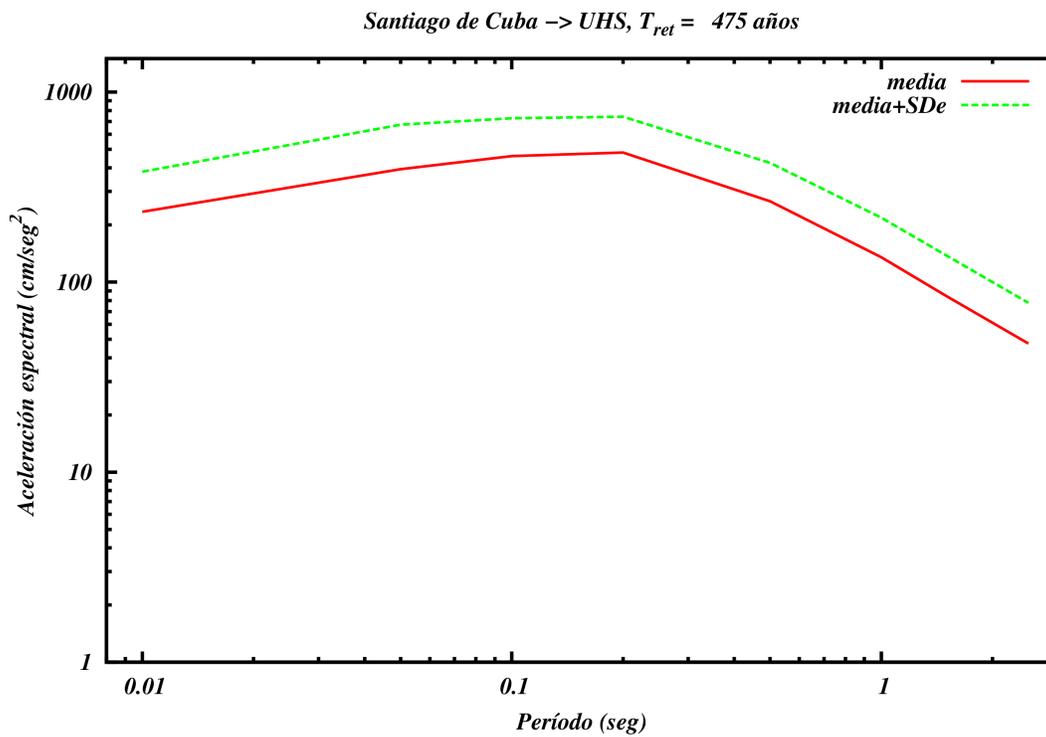
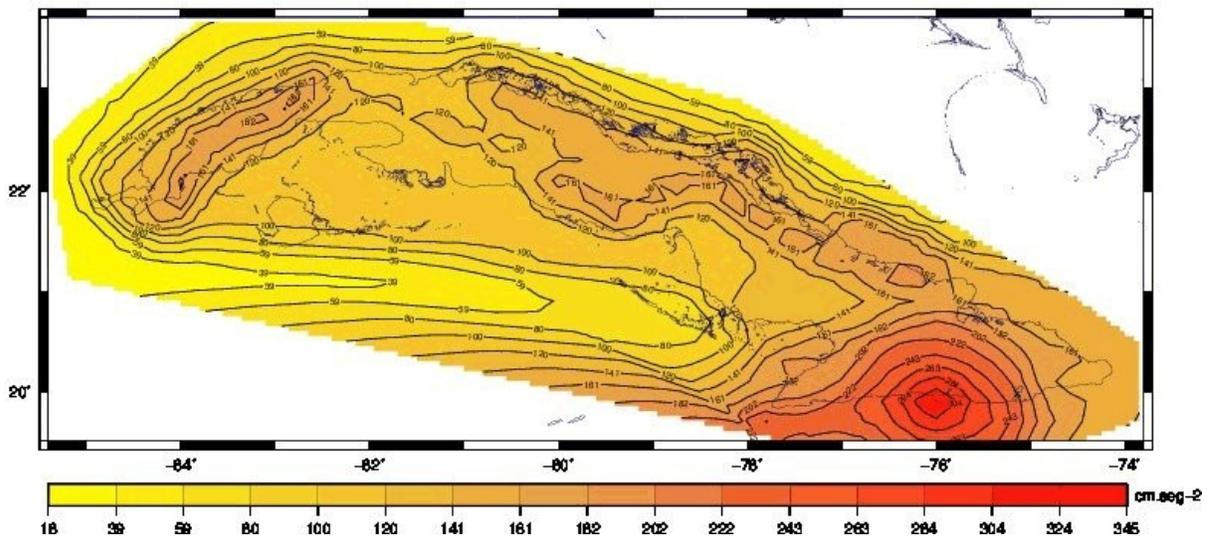


Fig. 15. Valores de aceleración espectral (espectro uniforme de riesgo- UHS), obtenidos en el presente proyecto para un punto. Se presentan dos estimados considerando estadísticas diferentes: (a) normal, (b) muestral.

Aceleración espectral del terreno: s_a ($\text{cm}\cdot\text{seg}^{-2}$), Tret: 475 años, Tuhs: 0.01 seg – Tipo: media+SDe



Aceleración espectral del terreno: s_a ($\text{cm}\cdot\text{seg}^{-2}$), Tret: 475 años, Tuhs: 0.05 seg - Tipo: perc.84

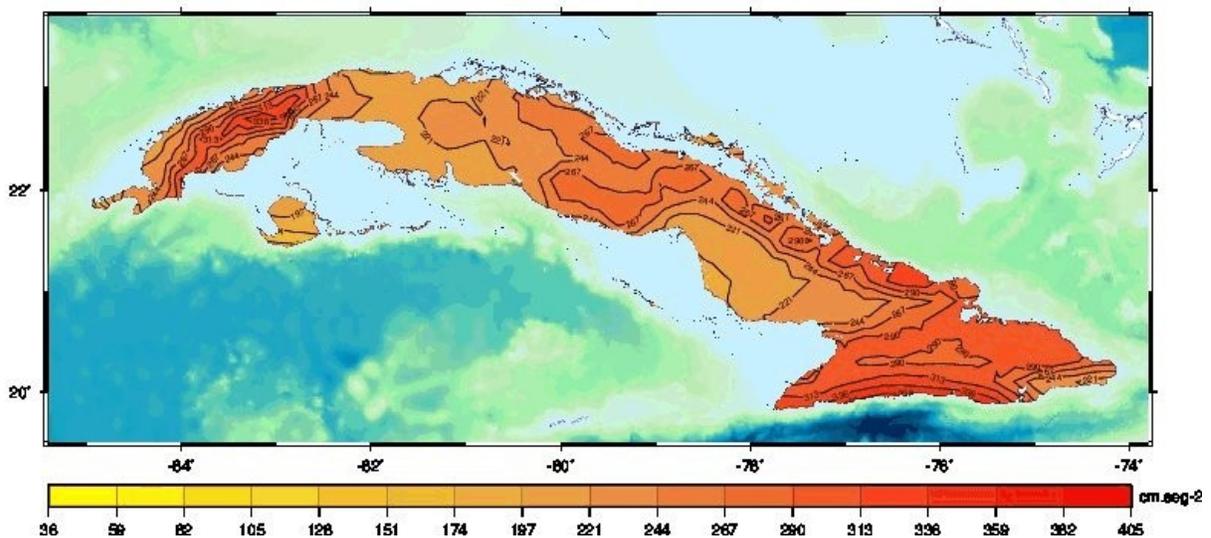


Fig. 16. Mapas de valores de aceleración espectral (espectro uniforme de riesgo- UHS), obtenidos en el presente proyecto. (a) Aceleración pico - caso “valor medio + dispersión epistémica (b) $T_{UHS} = 0.5$ seg superpuesto a mapa batimétrico – caso “percentil 0.84”. En cada corrida se preparan 16 mapas [8 períodos del UHS y según el caso (media, media+SDe) o (mediana, percentil 0.84)]

Discusión

Como se dijo anteriormente, el sistema sólo ha sido probado en sistema Linux, donde se garantiza un 100 % de funcionalidad. Se supone que en otros sistemas UNIX funcione igualmente con facilidad (incluso en MacOS X). Por otra parte, aunque funciona sobre máquinas individuales, está dirigido fundamentalmente a servidores y es muy común que los servidores funcionen con Linux o alguna versión de UNIX. No se garantiza que funcione en Windows, y no está planificado portarlo a ese SO. De todas formas, este es un proyecto de código abierto, y si alguien está interesado en llevarlo a ese sistema operativo, puede hacerlo. Debe señalarse que esto se refiere al servidor; el cliente puede estar en cualquier SO y usar cualquier navegador, aunque se ha ajustado sobre un navegador Firefox. En este sentido debe señalarse que la aplicación "seisan3D", para funcionar correctamente requiere que en el cliente estén instalados los complementos para ejecutar un applet de Java.

Los programas en FORTRAN en algunos casos incluyen módulos formados con subrutinas del diskette acompañante al libro Numerical Recipes en FORTRAN 77 (Press et al. 1992). Estas subrutinas son privativas, pero los módulos fueron preparados por el autor en el ICTP, el cual posee la licencia adecuada para su uso. No obstante, se planifica sustituir en el futuro esas subrutinas.

En el caso de la sismicidad, el conjunto de aplicaciones incluidas permite dar una caracterización adecuada de la misma, pero no se descarta la incorporación futura de otros tipos de análisis. La información de fondo que se presenta es la de topografía-batimetría-geofísica mencionada anteriormente. Se ha recopilado bastante información geofísica global, pero pudieran utilizarse otras compilaciones regionales de datos geofísicos de interés para el trabajo que se quiera realizar, lo que queda a criterio de cada uno de los que acceda al sistema. Igualmente en lo que respecta a los catálogos, se han incluido la mayoría de los que se recopilaron para el presente proyecto, pero en el futuro pueden incorporarse otros. Debe señalarse que una correcta utilización del sistema requiere la actualización periódica de varios de los catálogos de terremotos. En el caso de la peligrosidad sísmica, está incluido el manejo de los resultados de los últimos 2 proyectos que sobre el tema ha realizado el CENAI, mientras que la aplicación de "escenario de terremoto" debe ser mejorada mediante el uso de fórmulas de atenuación más adecuadas a la región de estudio y del modelo de isosistas elípticas que para las Antillas Menores fue desarrollado en los años 80.

En su versión actual se tiene la limitante de no tener instalado un control de usuarios. Por tanto si se desea instalarlo con un uso restringido, debe ponerse un mecanismo de ingreso antes de acceder al portal inicial (usuario y clave con su correspondiente lista de autorización, lo que debe ser manejado por el administrador del servidor).

Conclusiones

Este sistema es aplicable para garantizar un análisis estándar de la sismicidad de cualquier región, tanto usando datos globales como locales y realizar consultas de bases de datos de PS. Es una herramienta de gran utilidad para el servicio sísmológico, pues permite dar una respuesta rápida sin pasar trabajo en la preparación de datos

para programas específicos y en la confección de mapas con sistemas de uso trabajoso, sobre todo en momentos en que se está solicitando información que se debe entregar de forma urgente. Puede ser mejorado en el futuro añadiendo otras aplicaciones o mejorando las prestaciones de las ya existentes .

Referencias

- Alvarez, L. (2014): Sistema de análisis de la sismicidad sobre servidor Web. Ciencias de La Tierra y el Espacio (<http://iga.cu/publicaciones/revista>), vol.15, pp. 184-198.
- Alvarez, L.; Lindholm, C.; Villalón, M.; Sorensen, M.; Moreno, B. (inédito): Proyecto: "Peligrosidad sísmica de Cuba y áreas adyacentes". Tarea 2. Peligrosidad sísmica, principios y herramientas. Resultados preliminares.
- Alvarez, L.; Garcia, J.; Slejko, D.; Rebez, A.; Arango, E.; Pico, R.; Santulin, M.; Márquez, P.I.; Morejón, G.; Vázquez, J.C.; Berenguer, Y. (2005): Nueva generación de estimados de peligrosidad sísmica con el error asociado para Cuba y cálculo de pérdidas para la ciudad de Santiago de Cuba usando técnicas SIG., Informe, fondos del CENAI, 341 pp.
- Becker, T.W., Braun, A. (2004): iGMT: Interactive Mapping of Geoscientific Datasets. User manual for version 1.2, 28 pp.
- Becker, J. J., D. T. Sandwell, W. H. F. Smith, J. Braud, B. Binder, J. Depner, D. Fabre, J. Factor, S. Ingalls, S-H. Kim, R. Ladner, K. Marks, S. Nelson, A. Pharaoh, G. Sharman, R. Trimmer, J. VonRosenburg, G. Wallace, P. Weatherall., Global Bathymetry and Elevation Data at 30 Arc Seconds Resolution: SRTM30_PLUS, submitted to Marine Geodesy, October 8, 2008.
- GMT (2012): The Generic Mapping Tools data processing and display software package. Version 4.5.8. <http://gmt.soest.hawaii.edu>
- Gundavaram, S. (1996): CGI Programming on the World Wide Web , First edition, O'Reilly, 433 pp. (edición web).
- Gundavaram, S. (1997): CGI::Lite - Process and decode WWW forms and cookies. Comprehensive Perl Archive Network (CPAN), <http://CGI Lite - search.cpan.org.htm>
- Lomax, A. (2006): Seismicity Viewer, <http://alomax.free.fr/seismicity>
- Medvedev, S.V. (edit.) (1968): Regionalización sísmica de la URSS (en ruso). Moscú, Nauka, 466 pp.
- Press, W.H.; Teukolsky, A.A.; Vetterling, W.T.; Flannery, Brian, P. (1992): Numerical Recipes in Fortran 77. The Art of Scientific Computing, Volume 1, Cambridge University Press, 1002 pp.
- Utsu, T. (2002): Statistical Features of Seismicity . En: International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. Part A, Chapter 43 (Lee, W.H.K; Kanamori, H.; Jennings, P.C.; Kisslinger, C.: editores), pp. 719-732 + anexos.
- Vega, A. (2003): Aprenda WEB dinámico. La Habana, Editorial Científico-Técnica, 192 pp.
- Wessel, P.; Smith, W.H.F. (1990): New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS Trans. Amer. Geophys. U., vol. 79 (47), pp. 579.
- Williams, R.T. (1995): Lambert and Mercator map projections in geology and

geophysics. Computers & Geosciences, vol. 21, pp. 353-364.
Williams, T.; Kelley, C. (2010): gnuplot 4.4, An Interactive Plotting Program, 222 pp.
<http://sourceforge.net/projects/gnuplot>

Anexo 1

Datos que utiliza el sistema

a) Mecanismos focales

- Catálogo de momentos sísmicos – centroides de la Universidad de Harvard. Usa un formato particular llamado “ndk”. Existen determinaciones definitivas desde 1976 hasta unos 6 meses anteriores a la fecha actual y provisionales hasta unos días antes. Se puede seleccionar uno de ellos o una combinación del primero con un completamiento del segundo. Deben ser actualizados periódicamente desde:

<http://www.globalcmt.org/CMTfiles.html>

- Catálogo de mecanismos focales – tensor de momento – energía de USGS. Conjunto de 3 catálogos que se descargaban con algunas opciones de selección, cada uno con un formato diferente. Comienzan en 1977 y terminan 2010. Es una compilación de varias agencias (fundamentalmente USGS y Harvard). La descarga directa en estos momentos ya no es posible por reorganización en el sitio web del USGS. No se ha encontrado en la web del USGS una continuación del mismo.

- Catálogo de mecanismos focales – tensor de momento – del ISC. Comienzan en 1969 y llegan hasta la fecha, algunos son soluciones de plano de falla, otros tensores de momento y el resto de ambos tipos. Compila todas las fuentes y hay determinaciones múltiples en muchos casos. <http://www.isc.ac.uk>

b) Epicentros de terremotos

l) Catálogos primarios:

- Cuba 1502-1995 (publicación del ICTP). Región: 15-24 N, 67-85 W. Catálogo preparado en el marco de investigaciones para amenaza sísmica.
- ISC (de los ISF) 1904-2003 (magnitudes desde 1964). Este es el catálogo clásico del ISC, tomado de uno de los CD en que se distribuye normalmente.
- terremotos fuertes 1900-2007 (Enghdal). Este es el catálogo denominado “centennial”, publicado por primera vez en el “International Handbook of Earthquake Engineering and Seismology”, y actualizado con posterioridad en el USGS. La última versión se descarga de:
<http://earthquake.usgs.gov/research/data/centennial.php>
- relocalizaciones ISC - EHB 1960-2008 (Enghdal). Estas relocalizaciones se publicaron por primera vez en el “International Handbook of Earthquake Engineering and Seismology”, usando un algoritmo denominado EHB, pero el ISC lo adoptó para sus localizaciones de rutina, por lo que se ha continuado extendiendo con los boletines anuales. Se descargan de: <ftp://www.isc.ac.uk/pub/ehb>
- relocalizaciones ISC-GEM 1900-2009 (Storchak). Esto es un proyecto del GEM, la

aplicación del algoritmo EHB a todo el catálogo del ISC, con ciertos umbrales de magnitud por época. Trae una determinación única de magnitud M_w para cada terremoto. Es accesible por Internet en el portal del ISC.

- NEIC EHDF 1990-último (Monthly Hypocenter). Es un catálogo del USGS con sus determinaciones finales de epicentros.
- NOAA EQH-PDE 1638-1995 (Earthquake History + PDE). Este es otro de los catálogos que se encuentra en la base de datos del USGS
- ISC en línea. Abarca de 1904 hasta la fecha. Se puede descargar en dos variantes: completo y revisado. Este último solo incluye eventos con determinaciones confiables. <http://www.isc.ac.uk>.

II) Combinaciones de catálogos:

- USGS: EQH-PDE 1638-1989 + EHDF 1990-último + PDE (hasta el presente). Esta parece ser la más completa versión que se pueda formar con los datos del USGS. Son determinaciones definitivas hasta unos 2 años antes de la fecha actual, seguido de los PDE hasta el presente, que no son definitivos y no están completos en los últimos 4 meses por lo general. Se debe actualizar periódicamente usando los ficheros mensuales definitivos y los PDE. Los ficheros mensuales se descargan de: <ftp://hazards.cr.usgs.gov/hdf>, y los PDE de <ftp://hazards.cr.usgs.gov/pde>
- ISC: ISF 1904-1959 + EHB 1960-2008. Este sería el catálogo del ISC a que se puede acceder en estos momentos. Incluye la etapa histórica sin magnitudes y la reciente EHB.
- Selección Caribe USGS(1502-1989) + EHDF 1990-último + PDE (hasta el presente), región: 9-26 N, 54.786-88 W. Aquí se usa una selección adicional de terremotos del Caribe más extensa que el EQH-PDE, tomada también de la base de datos del USGS, completada con una selección para la propia región de los boletines mensuales y los PDE.
- CENAI, catálogo Gonave 1502-2012. Es un catálogo preparado en este proyecto componiendo todas las fuentes disponibles
- CENAI, catálogo Gonave 1502-2012 para PS. Es una variante del anterior en que se han eliminado las réplicas y todos aquellos terremotos para los que no fue posible obtener una determinación de M_w , ya fuese directa o por conversión.
- INETER, catálogo 1520-2014. Catálogo de terremotos de Nicaragua.

Cada uno de estos catálogos viene en un formato particular, descrito en la documentación preparada por sus autores. Para ser usados en esta aplicación se convirtieron a formato SEISAN mediante programas simples confeccionados al efecto.

c) Peligrosidad sísmica

- (2005): Usa un fichero básico que resume los resultados de valor de PGA para un conjunto de períodos de retorno en dos variantes PGA+SDa y PGA+SDa+SDe, donde PGA+SDa es el valor medio de las diferentes ramas del árbol lógico utilizado.
- (2015): Usa un conjunto de ficheros de resultados (uno por rama) que contienen el valor de la frecuencia de ocurrencia para diferentes valores de ordenada espectral (20) en 8 períodos del espectro (0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5 y 2.5 segundos)

d) Topografía-batimetría y otra información auxiliar

- srtm30 - Topografía-batimetría con paso de 30 segundos de arco desde los 60° Lat. Norte hasta los 56° Lat. Sur. (Sandwell et al. Universidad de California). Son ficheros muy grandes y sólo se usa una subregión para el Caribe. Los ficheros, así como información adicional para su uso con el GMT se descargan de: ftp://topex.ucsd.edu/pub/srtm30_plus/topo30
- topo1 y topo2 - promedios del srtm30 a 1 y 2 minutos de arco preparados por los mismos autores. Se descargan de: ftp://topex.ucsd.edu/pub/srtm30_plus/topo1_topo2
- volcanes – Tomado del Global Volcanism Program (<http://www.volcano.si.edu>)
- puntos calientes y trazado de frontera de placas – Tomados de la instalación del iGMT (Becker y Braun, 2004): <http://geodynamics.usc.edu/~becker/igmt>
- ciudades – base de datos de coordenadas de ciudades importantes. Se han probado diversas, ahora se está usando una selección de la confeccionada por la organización “GeoNames” (<http://www.geonames.org>).
- Información geofísica recopilada de diferentes fuentes. Una descripción de ese tipo de información, así como indicación de donde se puede obtener aparece en el manual del iGMT (Becker y Braun, 2004)

Anexo 2 Instalación del sistema

a) Los programas base del sistema

- Instalar los programas gnuplot, ImageMagic, psutils, perl, ps2eps y GMT. Los primeros vienen en todos los repositorios de Linux. El último no siempre está completo en los repositorios y al menos el Ubuntu 12.04 instala los programas en forma diferente a la que recomiendan los autores, lo que puede incidir en que no funcione bien en un servidor web (ya en Ubuntu 14.04 no existe ese problema). Para ese caso concreto es preferible instalar la versión de GMT que dan los autores, compilada desde sus fuentes, usando como raíz “/usr” (GMT, 2012).

- Instalar el servidor apache2. Asegurarse que están instalados los paquetes que permiten usar perl y cgi. Debe revisarse la configuración del servidor web, la cual se encuentra en alguno de los ficheros incluidos en el directorio /etc/apache2. Normalmente tanto la ubicación del directorio cgi-bin como el de la raíz del servidor se instalan implícitamente dentro del directorio raíz. Los lugares específicos se dan con las variables de configuración “ScriptAlias” y “DocumentRoot”. Para que trabaje un servidor web todas las aplicaciones deben estar accesibles en las direcciones determinadas por esas variables. Esto se hace de 3 formas diferentes: a) copiándolas en tales directorios, b) haciendo enlaces simbólicos a los mismos, c) cambiando los valores de esas variables en los ficheros de configuración del apache. La última es recomendable sólo para expertos, la segunda es de fácil realización, mientras que la primera no resulta conveniente, pues se pierde en caso de una reinstalación del sistema. Es siempre

preferible que ambos se encuentren fuera del directorio raíz.

b) El paquete

La parte computacional del sistema contiene 3 ficheros: html.zip, scripts.zip y datos.zip. Se debe crear un directorio (dentro del directorio raíz del servidor web), donde se pondrán las aplicaciones. En el mismo se descompacta el fichero html.zip. Debe crear 13 directorios para las aplicaciones, cada uno de los cuales tendrá un directorio “dat” y otro “web” así como la página “.html” de la aplicación. En “datos.zip” están los directorios “topografía” y “datos”. Los ficheros de topografía se ponen en el directorio “topografía”; los catálogos de terremotos se ponen en el directorio “datos/epicentros” y los de mecanismos se ponen en “datos/mecanismos”. En cada directorio de aplicación los subdirectorios “dat” se ponen como enlaces simbólicos a esos directorios. En los casos de “actsis”, “after”, “epimap”, “denepi”, “perfilh”, “perfilT” y “libera” con enlace simbólico a “datos/epicentros”, mientras que en el caso del CMT con enlace simbólico a “datos/mecanismos”. En la página “index.html” del servidor web están los enlaces necesarios para acceder a las páginas web de cada una de las aplicaciones y a las funciones de importar o seleccionar mapas y catálogos.

El fichero scripts.zip debe descompactarse en el directorio cgi-bin; aparecerán los programas en perl, cgi y sh y un subdirectorio “src” con todos los fuentes en Fortran. Dentro del subdirectorio “src” se debe ejecutar “sh compila”. Este realizará la compilación de todos los programas poniendo el resultado en el directorio “cgi-bin”, incluyendo el programa “actualiza”. De esa forma se tendrán los ejecutables en ese directorio y los fuentes en el subdirectorio “src” del mismo por si se desea modificarlos. En el directorio cgi-bin se debe editar el fichero “actualiza.par” con las direcciones reales de los directorios cgi-bin, de ubicación de las aplicaciones y de instalación del GMT y del SEISAN. Al ejecutar “actualiza” este programa cambia los guiones “.cgi” y “.perl” para que corran en el servidor web particular. Después de esto el sistema está listo para trabajar.

c) Algo imprescindible

Tanto el directorio “cgi-bin” como los directorios “web” de cada aplicación deben tener permiso de lectura y escritura para “todos”. Es aconsejable usar los comandos :

“chmod -R 777 cgi-bin” y “chmod -R 777 dir_aplicaciones”.

Ambos deban ser ejecutados como administrador (sudo o su->root). Por supuesto, si no se está en el directorio inmediatamente superior a ellos se debe poner la vía completa. El administrador del servidor puede retirar los permisos de escritura a los programas y guiones para otros usuarios, pero no al directorio cgi-bin, ni a los subdirectorios web de las aplicaciones.

La ejecución de cualquier programa del GMT escribe en el directorio de trabajo los ficheros “.gmtcommands4” y “.gmtdefaults4”. Si durante la instalación se realizan pruebas con los guiones en perl, aparecerán en el directorio cgi-bin estos ficheros, que no podrán ser sobrescritos al ejecutar cualquiera de las aplicaciones. Si tal es el caso, deben borrarse antes de pasar a ejecutar las aplicaciones desde un cliente web.