



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN TOPOGRAFÍA,**  
**GEODESIA Y CARTOGRAFÍA**

**Máster en Ingeniería Geodésica y Cartografía**

**Trabajo Fin de Master**

**Modelización de las fallas activas para la  
estimación de la Peligrosidad Sísmica.  
Aplicación Metodológica en Haití**

Madrid, Julio de 2015

*Alumno: Alejandro Parra González*

*Tutora:  
Belén Benito Oterino*

*Cotutora:  
Yolanda Torres Fernández*

*Agradecimientos*

*....a TODOS en Dios, que nos conforta y fortalece....*

## INDICE

RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCION .....	3
1.1 Antecedentes .....	3
1.2 Motivación .....	4
1.3 Objetivos .....	4
2. MARCO SISMOTECTONICO .....	6
2.1 Placa Caribe .....	6
2.1.1 Cinemática de la región.....	7
2.1.2 Fallas .....	8
2.1.3 Geología .....	10
3. PELIGROSIDAD SISMICA .....	12
3.1 Definición de la peligrosidad sísmica .....	12
3.2 Método probabilista de cálculo de la peligrosidad sísmica.....	12
3.3 Fases de cálculo .....	13
3.3.1 Definición de las fuentes sísmicas .....	14
3.3.2 Modelos de recurrencia.....	16
3.3.3 Ecuaciones de predicción del movimiento fuerte - GMPE's .....	24
3.3.4 Configuración del árbol lógico y resolución de la integral de peligrosidad.....	24
4. CÁLCULO PSHA.....	28
4.1 Catálogo sísmico .....	28
4.1.1 Fuentes de información .....	28
4.1.2 Homogeneización.....	29
4.1.3 Depuración del catálogo.....	31
4.1.4 Análisis de completitud.....	31
4.2 Fuentes sísmicas.....	35
4.2.1 Zonificación profunda o subducción.....	35
4.2.2 Zona cortical o superficial.....	36
4.2.3 Fallas como elementos independientes .....	37
4.3 Cálculo de parámetros sísmicos .....	39
4.3.1 Método zonificado .....	39
4.3.2 Método híbrido.....	41
4.4 Selección de modelos de atenuación.....	47
4.5 Árbol lógico .....	48
4.6 Especificaciones de cálculo.....	49

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD .....	50
5.1 Mapas de peligrosidad obtenidos .....	50
5.1.1 Método zonificado .....	50
5.1.2 Método híbrido.....	62
5.2 Resultados puntuales en Puerto Príncipe .....	74
5.2.1 Curvas de peligrosidad sísmica .....	74
5.2.2 Espectros de peligrosidad uniforme .....	75
5.3 Interpretación de resultados y análisis de sensibilidad.....	76
5.3.1 Método zonificado .....	76
5.3.2 Método híbrido.....	77
5.3.3 Comparativa de resultados .....	79
6. CONCLUSIONES .....	87
7. PLANIFICACION TEMPORAL Y ECONÓMICA.....	90
7.1 Planificación temporal .....	90
7.2 Valoración económica del estudio .....	90
7.2.1 Gastos directos .....	91
7.2.2 Costes indirectos .....	92
8. REFERENCIAS.....	94
9. ANEXOS .....	97
9.1 Mapas peligrosidad método zonificado .....	97
9.2 Mapas peligrosidad método híbrido.....	104
9.3 Diferencias de aceleración. Método híbrido – Método zonificado .....	104



## **RESUMEN**

El desarrollo del presente Trabajo Fin de Master tiene como objetivo la modelación de las fallas activas para la estimación de la peligrosidad sísmica en Haití. Se ha empleado el método probabilista zonificado, tanto el clásico como el híbrido, que considera la incorporación de fallas activas como unidades independientes en el cálculo de la peligrosidad sísmica. En este caso, la tasa de momento sísmico es repartida entre las fallas y la zona de una misma región sismogénica. Las fallas incluidas en este estudio son la Falla Septentrional, la Falla de Matheux y la Falla de Enriquillo. Se han comparado los resultados de peligrosidad obtenidos por ambos métodos para determinar la importancia de la consideración de las fallas dentro del cálculo.

En primera instancia, ha sido necesaria la actualización del catálogo sísmico, su homogenización, análisis de la completitud y depuración, para obtener un catálogo listo para proceder a la estimación de la peligrosidad. Con la zonificación sismogénica definida en estudios anteriores y el catálogo sísmico actualizado, se han obtenido las relaciones de recurrencia de Gutenberg-Richter de sismicidad, en cada zona superficial y profunda. Los modelos de atenuación seleccionados han sido los que se utilizaron en Benito et al., 2011, ya que la tectónica del área de estudio es muy similar a la de la región Centroamericana. Su aplicación ha sido mediante la formulación de un árbol lógico considerando pesos de acuerdo a la relevancia de cada combinación de modelos.

Se presentan como resultados los mapas de peligrosidad sísmica para los períodos de retorno de 475, 975 y 2475 años, y las aceleraciones espectrales (SA) en los períodos estructurales: 0.1 – 0.2 – 0.5 – 1.0 y 2.0 segundos, así como la diferencia de aceleraciones entre los mapas obtenidos por el método clásico y el método híbrido. Los mapas dan cuenta de la importancia de la inclusión de las fallas como elementos independientes en el cálculo de la peligrosidad. La morfología de los mapas zonificados presenta valores más altos en la zona donde se traslapan la zona superficial y profunda.

En los resultados se puede determinar que los valores mínimos en el método zonificado son mayores a los del método híbrido, especialmente en las zonas donde no hay fallas. Los valores altos corresponden a los obtenidos en las zonas de fallas por el método híbrido entendiendo que el aporte de las fallas en este método es muy importante con valores altos. El valor máximo de PGA obtenido es de 963gal cercano a Falla Septentrional, hacia la Falla Matheux se obtiene valores de 460 gal, y en la línea de Falla Enriquillo el valor de PGA alcanza los 760gal en el segmento oriental y 730gal en el segmento occidental. Este valor contrasta con el obtenido en el método zonificado donde en esta zona el valor de PGA obtenido fue de 240gal. Se comparan estos valores con los obtenidos por Frankel et al., (2011) con los que tienen mucha similitud en valores y morfología, contrastando con los presentados por Benito et al., (2012) y la Norma Sísmica de República Dominicana.



## **ABSTRACT**

The development of this Master's Thesis is aimed at modeling active for estimating seismic hazard in Haití failures. It has been used zoned probabilistic method, both classical and hybrid, considering the incorporation of active faults as independent units in the calculation of seismic hazard. In this case, the rate of seismic moment is divided between the failures and the area seismogenetic same region. Failures included in this study are the Septentrional, Matheux and Enriquillo fault. We compared the results obtained by both methods to determine the importance of considering the faults in the calculation.

In the first instance, updating the seismic catalog, homogenization, completeness analysis and purification was necessary to obtain a catalog ready to proceed to the estimation of the hazard. With the seismogenic zoning defined in previous studies and the updated seismic catalog, they are obtained relations Gutenberg-Richter recurrence of seismicity, superficial and deep in each area. Selected attenuation models were those used in (Benito et al., 2011), as the tectonic area of study is very similar to that of Central America. Its implementation has been through the development of a logical in which each branch is multiplied by an index based on the relevance of each combination of models.

Results are presented as seismic hazard maps for return periods of 475, 975 and 2475 years, and spectral acceleration (SA) in structural periods: 0.1 - 0.2 - 0.5 - 1.0 and 2.0 seconds, and the difference accelerations between maps obtained by the classical method and the hybrid method. Maps realize the importance of including faults as separate items in the calculation of the hazard. The morphology of the zoned maps presented higher values in the area where the superficial and deep zone overlap.

In the results it can determine that the minimum values in the zoned approach they outweigh the hybrid method, especially in areas where there are no faults. Higher values correspond to those obtained in fault zones by the hybrid method understanding that the contribution of the faults in this method is very important with high values. The maximum value of PGA obtained is close to Septentrional in 963gal, near to 460 gal in Matheux, and the Enriquillo fault line value reaches 760gal PGA in the Eastern segment and Western 730gal in the segment. This compares with that obtained in the zoned approach in this area where the value of PGA obtained was 240gal. These values are compared with those obtained by Frankel et al., (2011) with those have much similarity in values and morphology, in contrast to those presented by Benito et al., (2012) and the Standard Seismic Dominican Republic.

# CAPITULO I

## INTRODUCCIÓN

## 1. INTRODUCCION

### 1.1 Antecedentes

En el año 2010 la República de Haití fue sacudida por un fuerte sismo, de magnitud momento Mw 7.0 y profundidad 13km. El epicentro fue localizado cerca de la capital Puerto Príncipe. Los efectos fueron devastadores: cerca de 300000 viviendas fueron dañadas severamente o colapsadas, el número de víctimas mortales sobrepasó la cifra de 316000 y más de 1,3 millones quedaron sin hogar (Cavallo et al., 2010). En la actualidad el país está en reconstrucción y el número de desplazados en campamentos disminuye lentamente.

La comunidad internacional, tras este episodio, vió necesaria la conformación de grupos de cooperación entre entidades especialistas en diversas áreas. La Universidad Politécnica de Madrid (UPM) inició una línea de cooperación con Haití en el año 2010 por intermediación del Grupo de Investigación de Ingeniería Sísmica (GIIS). El grupo GIIS aporta conocimientos e información a las autoridades competentes, para que puedan adoptarse medidas preventivas orientadas a la mitigación del elevado riesgo sísmico existente.

El personal investigador, multidisciplinario, ha conseguido alcanzar objetivos importantes que sirven de base para elaborar planes de emergencia ante riesgos naturales de carácter sísmico. Los logros alcanzados incluyen mapas de amenaza sísmica en Haití, así como una evaluación del efecto local en Puerto Príncipe, estudios de vulnerabilidad sísmica, estimación del riesgo sísmico y establecimiento de medidas de mitigación del riesgo y diseño sismorresistente. (Benito et al., 2012). Estos resultados han sido obtenidos en el desarrollo de los proyectos Sismo – Haití I, II y III.

Por otra parte la comunidad científica ha colaborado con estudios de peligrosidad en la zona de la Isla la Española, estudios como el realizado por Frankel et al., (2011) han contribuido a la discusión de metodologías de estimación de la peligrosidad. Así también República Dominicana ha desarrollado una Normativa sismorresistente (2011-R-001,2011) que está en fase de implementación. Estos dos estudios contienen información relevante que puede ser útil para comparar los resultados que se obtengan.

El equipo de investigación GIIS ha estudiado la adaptación de una metodología híbrida que permite combinar fallas activas y zonas sismogénicas, para el cálculo de la peligrosidad sísmica en la zona sur de España, donde el conocimiento de la tectónica activa de la zona permite modelizar algunas fallas significativas (fallas lentas) de esta región. Como aplicación metodológica, en este proyecto, se efectuará una prueba en Haití donde las condiciones geológicas son bien diferentes. Se cuenta con información de los parámetros de las principales fallas de la región, la falla Septentrional, al norte, y

la falla de Enriquillo, al sur, para su modelización e inclusión en el cálculo de la amenaza sísmica de Haití.

## **1.2 Motivación**

El proyecto se enmarca dentro de un proceso colaborativo, en el que los resultados que se obtengan contribuirán a la toma de decisiones tanto en el campo de la investigación como en la aplicación práctica a la hora de definir la normativa sísmica de Haití. En el primero, al analizar la incorporación de las fallas como unidades independientes en el cálculo de la peligrosidad. Esto permitirá una mejor estimación de la influencia de las fallas en los resultados. Además, teniendo la región de la Isla La Española características tectónicas diferentes a la zona de prueba de la metodología (sur de España), se podrán plantear futuros estudios sobre el ajuste de parámetros de cálculo y estimación de la peligrosidad.

Por otra parte, en cuanto a la generación de normativas en Haití, los mapas de peligrosidad que se obtengan permitirán a la comunidad contar con nuevas alternativas u opciones ante la toma de decisiones y formulación de la normativa sísmica Haitiana, con la finalidad de que la reconstrucción del país tras el terremoto ocurrido en el año 2010 se realice de forma segura. Así se puede reducir la vulnerabilidad de estructuras ante terremotos, contribuyendo de esta manera a disminuir el riesgo sísmico, con la intención de que sismos futuros no den lugar a catástrofes como sucedida hace 5 años.

Realizar este trabajo fin de master bajo la tutela de un grupo de investigación consolidado y experto en la materia, multidisciplinario y con aportación a nivel mundial resulta muy interesante por las futuras líneas de investigación que se puedan plantear en países donde el fenómeno sísmico sea importante, como es el caso de Ecuador. La labor investigadora del grupo ha dado como fruto informes técnicos, tesis doctorales, trabajos fin de master y trabajos fin de grado, todos ellos con amplios resultados que han sido plasmados en artículos y revistas de interés científico internacional.

## **1.3 Objetivos**

El objetivo principal de este estudio es obtener mapas de peligrosidad sísmica de Haití mediante la aplicación de un método híbrido que considera zonas y fallas activas como fuentes sísmicas independientes.

Para alcanzar el objetivo principal se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Actualización del catálogo sísmico de la Isla La Española. El catálogo ha de ser homogeneizado a una escala de magnitud determinada, corregido por falta de completitud y depurado de réplicas y premonitores.



- Caracterizar las fuentes sísmicas y definir sus modelos de recurrencia.
- Estimar la peligrosidad sísmica con el método clásico zonificado y con el método híbrido (zonas + fallas), y comparar los resultados obtenidos con ambos.
- Efectuar un análisis de sensibilidad sobre el impacto de incluir fallas como unidades independientes en la peligrosidad.

Este trabajo fin de master se estructura de la siguiente manera:

En el Capítulo II se aborda el Marco Sismotectónico de Haití. En el Capítulo III se describe el cálculo de la peligrosidad sísmica, donde se exponen todos los conceptos que intervienen.

En el Capítulo IV se expone todo lo relacionado con la aplicación práctica en Haití, esencialmente la preparación de los inputs de cálculo y las especificaciones del mismo; el capítulo V presenta los resultados obtenidos y el análisis de sensibilidad realizado; las Conclusiones y Valoración económica se indican en los Capítulos VI y VII respectivamente. Finalmente se presentan las referencias bibliográficas y los Anexos.

## CAPITULO II

# MARCO SISMOTECTÓNICO

## 2. MARCO SISMOTECTONICO

Las estructuras tectónicas donde se producen los terremotos son llamadas fuentes sismogénicas. La definición de estas fuentes requiere de conocimientos de geología regional, local, sismicidad y tectónica dada su importancia en la evaluación de la peligrosidad sísmica (Reiter, 1990).

De acuerdo a Reiter (190) la definición de fuentes sismogénicas implica identificar fallas individuales o grupos de fallas (familias) o provincias tectónicas (áreas) de rasgos estructurales, geofísicos y sísmicos homogéneos. Para identificar una falla y poder considerarla una fuente sismogénica, es necesario que se pueda probar una actividad tectónica cuaternaria o reciente. Una manera de relacionarla con la sismicidad es mediante la coincidencia de epicentros con la traza de la falla.

### 2.1 Placa Caribe

La Isla La Española se encuentra en el borde norte de la Placa Caribe, entre las longitudes 60°- 90° W y latitudes 10° - 20° N. Su área es de 4.000.000Km<sup>2</sup> aproximadamente, teniendo como límites Centroamérica y las Antillas, en la dirección oeste-este; y Cuba y Sudamérica, en la dirección norte-sur. Esta placa interacciona con la placa de Norteamérica hacia el norte y noreste, la Placa Sudamericana hacia el sur y sureste, hacia el oeste con la Placa de Cocos, y en el sur con la placa de Nazca, como se indica en la Figura 2-1 de acuerdo a la propuesta presentada por Mann et al (2002). Estas dos placas colisionan a una velocidad de 2 cm/año (Calais, 2007), y estos movimientos se ven acompañados por deformaciones de la corteza terrestre que son manifestados en forma de sismos. La orientación relativa del movimiento es de N85°E. Esta región está dentro de una transición de un régimen de subducción en el este a un predominante límite de desgarre (strike-slip) al oeste.

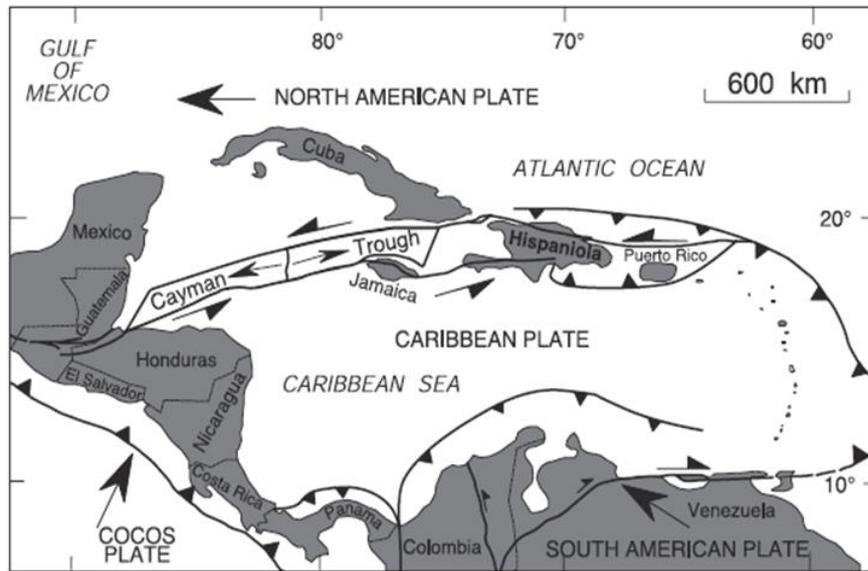


Fig. 2-1 Configuración tectónica de la Placa Caribe.

Fuente: Mann et al, 1999.

Estos límites han sido definidos por la concentración de sismos en su periferia. En efecto los estudios sismológicos en la zona del Caribe muestran que los registros con magnitud  $> 4.5$  suceden con más frecuencia en contextos tectónicos de subducción, como las Antillas menores y Centroamérica. La profundidad que alcanzan en esta zona ronda los 250km. En los límites transcurrentes, sin embargo los registros con magnitud mayor a 4.5 son menos frecuente (Mann et al, 1999).

### 2.1.1 Cinemática de la región

Mediante el sistema de monitoreo GPS se ha obtenido mucha información sobre la cinemática actual y neotectónica de la zona (Jansma et al., 2000; Calais et al., 2002; Mann et al., 2002), que ha sido estudiada desde el año 1986 hasta el 2007 (Mann et al., 2002; Manaker et al., en prensa). La red de monitoreo ha sido mejorada y ampliada para tener una buena cobertura (Figura 2-2).

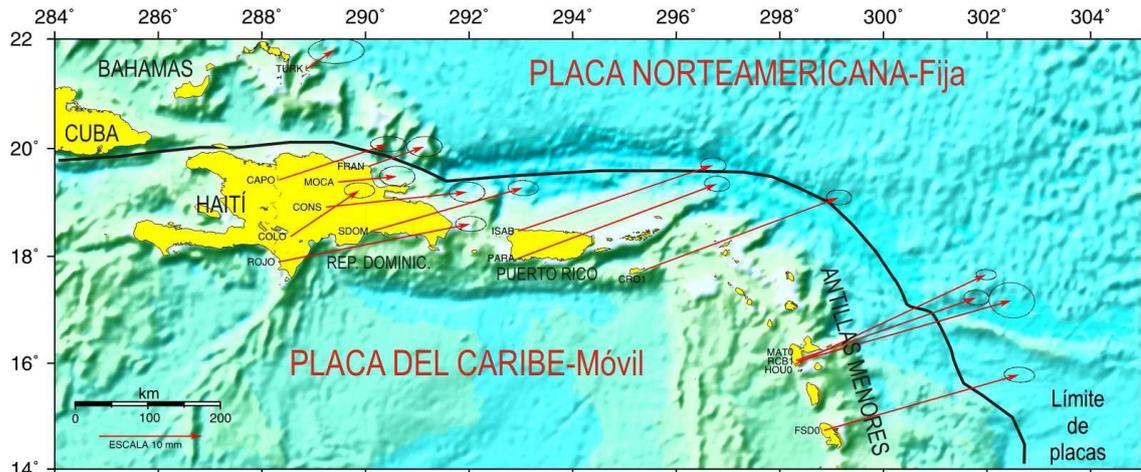


Fig. 2-2: Mapa de tasa de movimiento relativo y azimuth derivado de GPS (modificado de DeMets et al. (2000) y Mann et al. (2002)).

Fuente: Granja, 2009

Si se considera fija la placa Norteamericana, el interior rígido de la placa Caribe se mueve en dirección  $70^\circ$ , moviendo consigo a la Isla de Puerto Rico, Sant Croix, las Antillas menores y la zona que queda al sur de la zona de falla de Enriquillo. Según estos datos la falla de Enriquillo podría constituir un límite de placas principal (Calais et al., 2002). La Isla La Española soporta un retraso en su desplazamiento hacia el este con respecto a la placa del Caribe, posiblemente debido a la colisión de los Bancos de las Bahamas con el NE de la Isla. Con respecto a la placa Norteamericana, la isla se mueve con velocidades y sentidos variables que dependen del punto de medida, entre  $4 - 17\text{mm/año}$  en sentidos desde  $80^\circ$  hasta  $0^\circ$ . Este movimiento indica que se trata de una microplaca con la deformación distribuida, en la cual se produce una disminución en la magnitud del desplazamiento de norte a sur y una desviación en sentido anti horario (Jansma et al., 2006)

### 2.1.2 Fallas

Los estudios geológicos permiten identificar las características del terreno, la formación a la que pertenecen, su período de formación y las fallas que existen. En Haití se han localizado dos zonas sismogénicas principales repartidas entre dos sistemas de empuje en alta mar. La primera, localizada en la zona de la costa norte, es un sistema de fallas con dirección este-oeste prolongándose hacia el valle de Cibao en República Dominicana. Se denomina sistema del Norte o Septentrional, y se indica con la nomenclatura 2 (A-B) en la Figura 2-3.

Un segundo sistema de fallas se ubica en el sur. Es la falla de Enriquillo, que atraviesa Puerto Príncipe desde la Isla Tiburón al oeste, hasta el valle de Enriquillo, al este en República Dominicana. En la Figura 2-3 se indica esta falla que rompe en segmentos a lo largo de su extensión, denominados: Miragoane (3A), Goabe (3B), Dufort (3C),

Nomance (3D), Dumay (3E), Les Cayeux (3F-3G). Un sistema menor de fallas se ubica en el centro de la isla, denominadas Matheux, 4A y 4B en Figura 2-3.

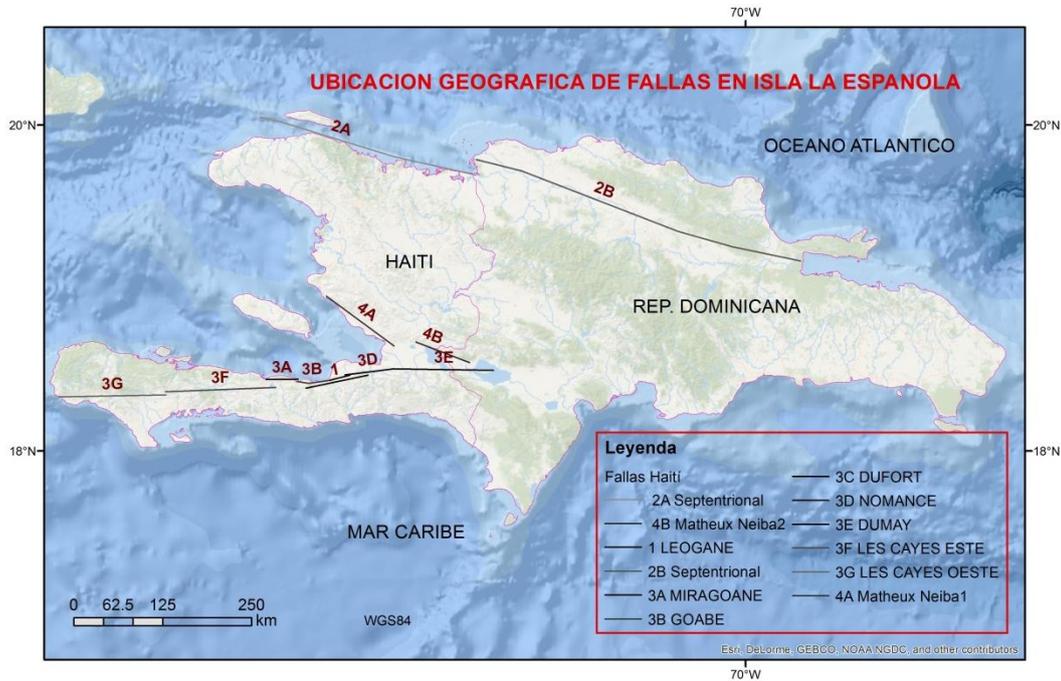


Fig. 2-3 Sistemas de fallas en La Española.  
Elaboración: Autor

En el cálculo de la peligrosidad se incluirán estas familias de fallas, que son descritas a continuación:

### Falla Septentrional

Esta falla está formada por diferentes tramos activos e inactivos con movimientos transcurrentes izquierdos. Los ramales inactivos comprenden dos fallas conocidas como Villa Vázquez y Monte Cristi. Los ramales activos definidos, pueden identificarse como una estructura continua que se origina desde la Baja Samaná, en el área oriental del Valle del Cibao, hasta los alrededores de la Ciudad de Guayabin en el Valle del Cibao Occidental.

Estudios de paleosismicidad en la zona sísmica Septentrional indican una tasa de deslizamiento del Holoceno de 6 -12 mm/año, mostrando que el terremoto de ruptura superficial más reciente en este sistema ocurrió en un periodo de tiempo de 800 años antes de nuestra era (Prentice, 2010).

### Falla Matheux

Se trata de una falla inversa. La actividad sísmica de esta falla es poco conocida, ya que las mediciones GPS realizadas no establecen un movimiento significativo. La

morfología en el sector occidental apunta a que esta falla tiene actividad, asignándole una velocidad de 1mm/año, teniendo en cuenta la incertidumbre de los resultados por GPS. En el estudio realizado por Mora et al., (2010) muestra como resultado que la energía elástica acumulada es 7mm/año, siendo impreciso ya que la falla Matheux está bajo el mar y las medidas GPS se realizan en la superficie.

### Falla Enriquillo

Es un tipo de falla transcurrente. Comparte con la falla Septentrional Oriente aproximadamente la mitad del movimiento relativo entre la placa de América del Norte y las placas tectónicas del Caribe. Esta falla se mueve alrededor de  $20.6 \pm 1.66$  mm/año. Tras el terremoto sucedido en 2010 varios equipos de investigadores acudieron a la zona para analizar el contexto geológico del terremoto. La información recopilada y analizada no mostró indicios de ruptura en la superficie de la Falla Enriquillo (Prentice et al., 2010). La distribución espacial del desplazamiento GPS cosísmico mostraba una combinación de planos de ruptura con movimiento horizontal y de norte a sur y contracción izquierda – lateral (Paultre, 2013). El comportamiento no respondía a los parámetros determinados en la falla de Enriquillo, lo que implicaba una falla desconocida, denominada desde entonces Leogane (Calais et al., 2010).

En esta falla Enriquillo, no se han realizado estudios paleosísmicos pero de acuerdo a los registros de grandes terremotos (Mw 7.5) del año 1751 (21/Nov) y 1770 (3/Jun) que causaron graves daños en Puerto Príncipe, se deduce que ocurrieron en este sistema (Prentice, 2010). Otros eventos ocurridos en noviembre de 1751 y Junio de 1770 en la zona de la falla de Enriquillo han causado severos daños, así como un gran terremoto ocurrido en abril de 1860 hacia el oeste de la isla.

### **2.1.3 Geología**

La geología de la zona es el resultado del proceso de convergencia oblicua entre las placas Norteamericana y Caribe (Pérez-Estaún et al., 2007), constituida por varios dominios geo-estructurales separados por fallas de desgarre que están en íntima relación con los sistemas montañosos de la isla. Estos dominios los constituyen rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias del periodo Jurásico – Cretácico formadas en contexto intra – oceánico y de arco isla.

De acuerdo a lo expuesto por Pérez – Estaún (2007) estas rocas se sitúan bajo rocas principalmente sedimentarias del periodo de colisión (transpresivo). La zona que ocupa Republica Dominicana contiene rocas de arco – isla, del antearco y del transarco, junto con rocas metamórficas de alta presión y otras unidades de colisión. Los complejos de alta presión con ecoglititas, esquistos azules y mezclas ofiolíticas, que afloran en la parte septentrional de la isla forman parte de la cuña de colisión extrusiva formada entre las placas Norteamericana y del Caribe.

Los estudios han determinado que la Isla la Española presenta un registro geológico completo desde la el periodo del Jurásico superior hasta el presente. En la Figura 2-4 se presenta el mapa geológico de la isla.

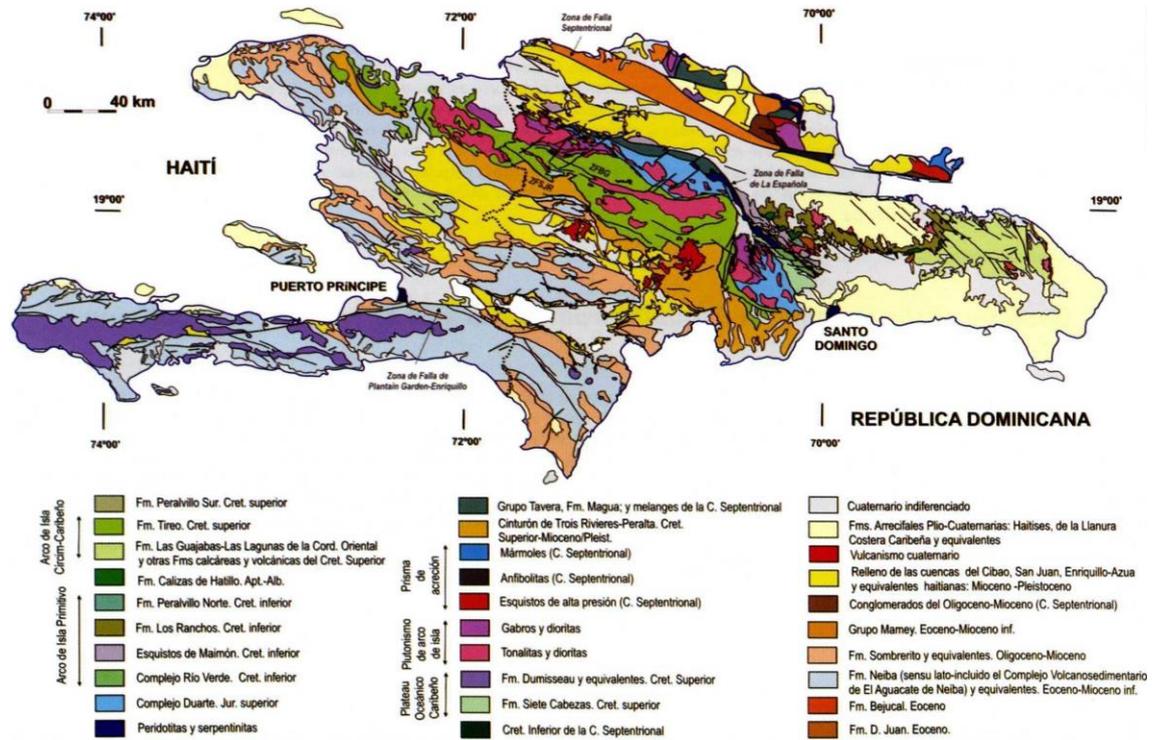


Fig. 2-4 Mapa geológico de la Isla La Española.

Fuente: Pérez – Estaún et al (2007) y modificado de Lewis y Draper (1990).

## CAPITULO III

# PELIGROSIDAD SÍSMICA

### 3. PELIGROSIDAD SISMICA

#### 3.1 Definición de la peligrosidad sísmica

La definición actualmente aceptada fue designada por la Oficina Coordinadora de las Naciones Unidas para el Socorro en Casos de Desastre (Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator – UNDRO) en el año 1980. La que define a la **peligrosidad sísmica  $H$**  (Hazard) como la probabilidad de que un cierto nivel de movimiento sea excedido durante un determinado período de tiempo en un emplazamiento específico, como consecuencia de la ocurrencia de terremotos en la zona de influencia alrededor del emplazamiento. Se representa por medio de una función de probabilidad del parámetro indicativo de la intensidad del movimiento  $x$ , en un emplazamiento  $s$ , (Benito y Jiménez, 1999). Esta función de probabilidad se expresa en la Ecuación 1:

$$H = P [x(s) \geq x_0; t] \quad \text{Ecuación 1}$$

donde  $P$  representa la probabilidad de superación de un valor umbral  $x_0$  del parámetro elegido durante un tiempo  $t$ .

El desplazamiento, la velocidad o la aceleración son considerados generalmente como parámetros del movimiento, sea por medio de sus valores máximos denominados PGD, PGC o PGA (Peak Grond Displacement, Peak Ground Velocity o Peak Ground Aceleration) o sea por medio de alguna ordenada espectral,  $SD(T)$ ,  $SV(T)$ ,  $SA(T)$ .

En los estudios de peligrosidad se han empleado habitualmente modelos de fuente sísmica basados en zonas sismogénicas tipo área cuyo potencial sísmico se considera uniforme, asumiendo que la sismicidad sigue un modelo *poissoniano* que considera una independencia temporal y espacial entre sismos de una misma fuente. Este método se denomina método zonificado y será el utilizado en este estudio como modelo de comparación con respecto del método híbrido, que considera, además de zonas sismogénicas, fallas activas como fuentes independientes.

#### 3.2 Método probabilista de cálculo de la peligrosidad sísmica

Para estimar la peligrosidad sísmica se utilizan los métodos determinista o probabilista. El primero tiene por objetivo obtener la acción sísmica en el emplazamiento sin proporcionar información sobre su periodo de retorno o probabilidad de excedencia del movimiento. Además en este método no se consideran incertidumbres en el análisis, estimando generalmente el peor escenario posible, por lo que los resultados obtenidos son muy conservadores.

Por su parte el método probabilista tiene como objetivo estimar las acciones sísmicas en un emplazamiento concreto a causa de terremotos futuros, para un período de retorno determinado (Cornell, 1968).

En las últimas décadas se ha impuesto un método probabilista que cuantifica además las incertidumbres inherentes a diferentes modelizaciones de la sismicidad, zonificación, ecuaciones de predicción del movimiento fuerte, etc. mediante la composición de un árbol lógico que considere diferentes opciones de cálculo. Es el método conocido como PSHA (Probabilistic seismic hazard assessment). Este es el método en el que se centra este estudio.

Las ventajas de utilizar este método, frente a un determinista, son:

- El nivel de peligrosidad que se obtiene es consistente para todos los sitios de cálculo.
- Se considera la tasa de actividad de los eventos sísmicos.
- Integra estimaciones de incertidumbre y diferentes modelos alternativos.

En cuanto a desventajas, en este método los resultados son más difíciles de interpretar y verificar, requiere elegir explícitamente un nivel de probabilidad y se pierde el concepto de terremoto de diseño.

Los modelos de sismicidad probabilista se pueden dividir en zonificados y no zonificados, dependiendo de si se descompone el área que potencialmente constituye un peligro sísmico en zonas sismogénicas sin geometría definida (sin zonificar); o bien definida, que se representan en zonas con sismicidad uniforme o fallas.

### 3.3 Fases de cálculo

El análisis PSHA es un estudio de peligrosidad dirigido a establecer criterios de diseño sismorresistente. Por una parte, facilita las aceleraciones esperadas asociadas a su probabilidad de excedencia o período de retorno, dadas por medio de una curva de peligrosidad. Por otra, se pueden obtener todas las probabilidades anuales de excedencia para las aceleraciones observadas en la curva de peligrosidad.

Las fases propuestas en un estudio de peligrosidad sísmica, (Benito, 2009) se pueden resumir:

- Determinación de los parámetros y opciones de entrada para el cálculo de la amenaza sísmica, incluyendo:
  - o Definición de fuentes sísmicas, diferenciando entre fallas y áreas de sismicidad homogénea (método zonificado) o zonas de sismicidad distribuida (método no zonificado).
  - o Definición de los modelos de sismicidad (distribución de magnitud o de intensidad) y de recurrencia temporal de terremotos.
  - o Asignación de los modelos de movimiento fuerte del suelo asociados a cada falla y a cada zona sismogénica.

- Establecer el árbol lógico con todas las opciones y parámetros de entrada sujetos a variabilidad.
- Asignación de un conjunto de pesos o probabilidades a las diferentes ramas del árbol lógico, siguiendo el juicio de expertos en la materia.
- Cálculo de la amenaza para todos los conjuntos de opciones de entrada representados en el árbol lógico, mediante la resolución de la integral de la amenaza.
- Presentación de resultados en mapas de peligrosidad.

En la Figura 3-1 se presenta en un esquema las fases del cálculo de la peligrosidad.

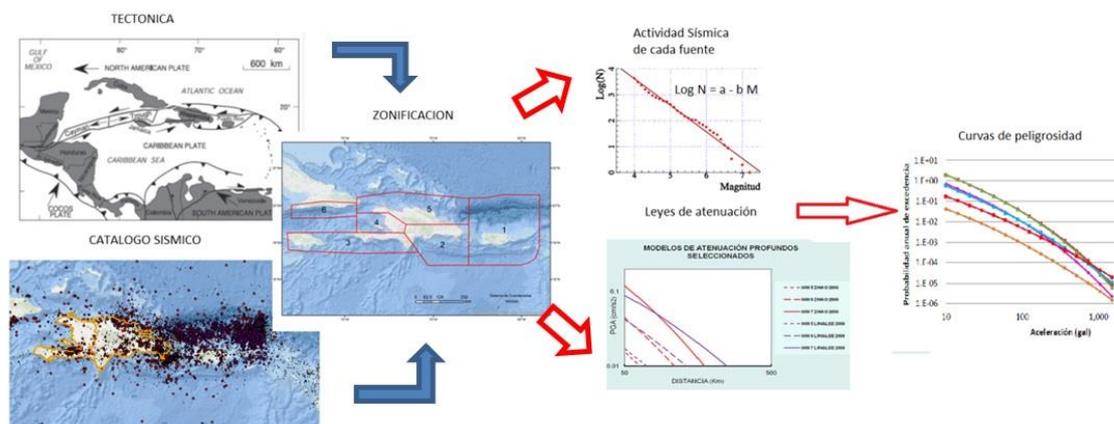


Fig. 3-1 Esquema de fases de cálculo de la peligrosidad

### 3.3.1 Definición de las fuentes sísmicas

La definición de fuentes depende del método a seguir, tal como se indica a continuación.

#### *Método no zonificado*

En este método se considera que la sismicidad no está circunscrita en ninguna zona en concreto, usándose por lo general en zonas de baja sismicidad. Entre estos modelos se puede resaltar aquellos en los que la distribución de epicentros responde a una geometría fractal, representada por medio del método de kernel de suavizado, que incluye una ley de potencias decreciente con la distancia al epicentro (Woo, 1996).

#### *Método zonificado*

Habitualmente se adoptan este tipo de modelos, que consideran que la sismicidad del área en cuestión puede distribuirse en distintas zonas sismogénicas. Se supone que éstas responden a un mismo patrón de sismicidad que las caracteriza y distingue. Este

modelo fue desarrollado por Cornell en 1968. Las zonas pueden clasificarse en zonas sismogénicas o zonas tipo fallas.

- *Zonas tipo área:* Este tipo de modelización divide a la región que potencialmente puede afectar a la zona de influencia en polígonos que delimitan áreas, a cada uno de estos polígonos o área se les considera como una fuente sismogénica independiente con una sismicidad uniforme y un potencial sísmico homogéneo. Esto se traduce en que a todos los puntos interiores de una misma fuente se les asocia: un mismo modelo de recurrencia, tasa de ocurrencia de sismos y una proporción de sismos constante en toda el área o zona sismogénica (Rivas, 2014).

La delimitación de las zonas se basa en criterios geológicos y sísmicos. La información sísmica se extrae del catálogo sísmico. Los datos geológicos se refieren a la distribución geográfica de los factores que determinan las características tectónicas de la zona examinada, como son: la distribución geográfica de las fallas, la distribución de unidades tectónicas, o características litológicas y reológicas de los materiales que componen cada unidad tectónica.

- *Zonas tipo fallas:* Las zonas sismogénicas pueden ser además fallas tectónicas descritas como entidades físicas reconocibles. Incluirlas en el estudio de amenaza supone conocer la geometría de la misma y su capacidad de generar terremotos, expresándose a través de intervalos de recurrencia o de la tasa de deslizamiento. La adopción de zonas sismogénicas con sismicidad difusa, no obliga disponer de un conocimiento tan exhaustivo de la fuente sismogénica.

El conocimiento que se ha desarrollado sobre las fuentes reales de los sismos, ha permitido el cambio en el planteamiento de la definición de fuente sísmica en los estudios de peligrosidad. La consideración de las fallas como fuentes sísmicas independientes incide en dos aspectos importantes:

- Cambio de la geometría de la fuente sísmica: las fallas se consideran como áreas que definen el plano de falla (modelización más completa) o como líneas que definen la traza de la falla proyectada en la superficie.
- Cambio de la fuente de información para caracterizar el potencial sísmico: en las zonas sismogénicas la caracterización del potencial sísmico se efectúa a través de la tasa de ocurrencia de terremotos  $\dot{N}(m)$ ; y la proporción de estos en función de su tamaño  $\beta$ ; parámetros que son estimados a partir del catálogo sísmico mediante modelos de recurrencia. Para las fallas, los parámetros  $\dot{N}(m)$  y  $\beta$  se derivan de las características físicas de la falla

(geométricas y cinemáticas), como la tasa de deslizamiento y el área del plano de falla.

Considerando la falla como fuente sísmica potencialmente activa e independiente, se modeliza el plano de falla en el que se asume que se produce la ruptura. La falla queda definida por los parámetros geométricos que se indican en la Figura 3-2.

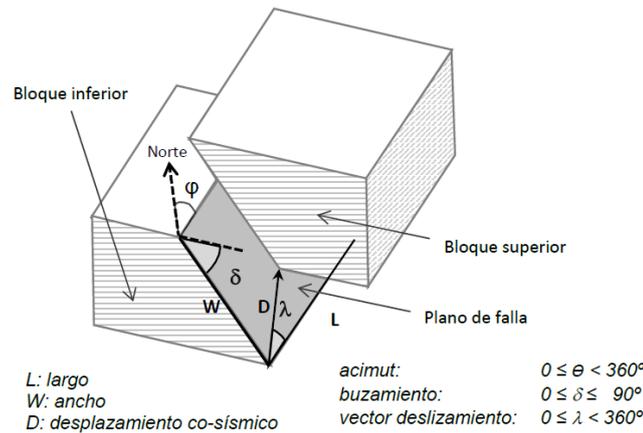


Fig. 3-2: Geometría y parámetros de la falla  
Fuente: Rivas, 2014

### 3.3.2 Modelos de recurrencia

#### Modelos de recurrencia en método zonificado

El modelo de recurrencia utilizado en la caracterización de las zonas sismogénicas corresponde a una ley de Gutenberg-Richter calculada a partir de los registros del catálogo sísmico. La ley relaciona la magnitud con el número de terremotos mediante la función logarítmica frecuencia-magnitud (Stein and Wysession, 2003) indicada en la Ecuación 2a:

$$\log N = a - bM \quad \text{Ecuación 2a}$$

donde  $M$  es la magnitud;  $N$  es el número de sismos con magnitud mayor que  $M$  ocurridos en un tiempo dado o tasa acumulada de sismos ( $\dot{N}$ );  $a$  y  $b$  son constantes. Esta fórmula puede expresarse también en términos de logaritmo neperiano, como se indica en la Ecuación 2b.

$$\ln N(M) = \alpha - \beta \cdot M \quad \text{Ecuación 2b}$$

dónde  $N(M) = \exp(\alpha - \beta \cdot M)$ , siendo  $\beta = b \cdot \ln 10$  y  $\alpha = a \cdot \ln 10$

Esta ley supone que la sismicidad se ajusta a una ley de recurrencia de tipo exponencial entre dos valores extremos de magnitud ( $M_{\min}$  -  $M_{\max}$ ), se podría considerar que el modelo de distribución es un modelo de Poisson que implica una independencia temporal y espacial entre terremotos de una misma fuente. Esta ecuación relaciona el tamaño de los sismos albergados en la zona con su frecuencia.

Es muy importante recalcar que la hipótesis básica para definir la peligrosidad sísmica de una zona se fundamenta en el análisis de la sismicidad pasada en el área de influencia y su extrapolación al futuro, el catálogo debe suponerse completo para un periodo extenso para poder establecer los modelos matemáticos que representen el potencial sísmico en el tiempo.

#### *Modelos de recurrencia método zonas tipo falla*

El modelo híbrido considera en el cálculo de la peligrosidad a las zonas sismogénicas y las fallas como unidades independientes. Para ello es necesario disponer de toda la información de fallas activas existentes. En caso de no contar con toda esta información, se modelan las zonas para cubrir el potencial sísmico de aquellas fallas que no pueden ser caracterizadas de forma independiente.

El problema que se presenta es la duplicación del potencial sísmico final resultante, debiendo combinarse de manera adecuada las zonas y las fallas superpuestas geográficamente y tener presente que el potencial sísmico de la zona no debe incluir el potencial sísmico de las fallas modeladas independientemente. En aquellas fallas lentas donde se producen sismos con periodos de recurrencia muy largos se torna virtualmente imposible separar la sismicidad asociada a la falla de la asociada a las zonas adyacentes, con el fin de establecer modelos de recurrencia diferenciados. Existen dos propuestas, para tratar estos casos, presentadas por Frankel et al., (1996) y por Bungum (2007).

En el primer caso, Frankel et al., (1996) presenta los resultados de un estudio de peligrosidad sísmica en el oeste de EEUU, donde se incorporan fallas con dos modelos de recurrencia diferentes: terremoto característico (TC) y Gutenberg-Richter (GR). Para el caso de fallas conocidas proponen el uso de TC, y en aquellas menos estudiadas se utilizan dos modelos de recurrencia (TC y GR) dando igual peso a los dos. Los autores proponen separar la distribución del potencial sísmico de las zonas y fallas por medio de una magnitud de corte que establece el límite entre el tamaño máximo de los terremotos que se pueden producir en la zona y el tamaño mínimo de terremotos que se puedan producir en las fallas. En la Figura 3-3 se indica el esquema de la distribución de tasas acumuladas en zonas y fallas.

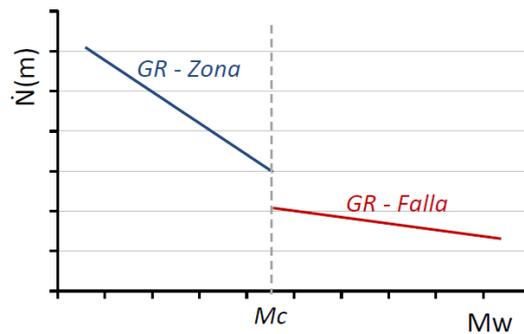


Fig. 3-3 Representación de la distribución de tasas acumuladas en zonas y fallas G-R.

Por su parte Bungum (2007) parte de la relación fundamental entre la deformación que se produce en la corteza y las tasas de la actividad sísmica. Analiza las deformaciones de la corteza (momento-slip) y la actividad sísmica asociada a ella (momento-rate). La propuesta de Bungum estima la actividad de las fallas de manera directa mediante el control de la sismicidad asociada a alguna de ellas durante algún tiempo, siendo esta actividad extrapolada al futuro por modelos estadísticos de ocurrencia de eventos. Pero cuando se trata de zonas de baja actividad sísmica, donde no hay datos suficientes, la información referente a la actividad de la falla por medio del catálogo no se obtiene fácilmente, se puede estimar de la siguiente manera:

- Al conocer la tasa de deslizamiento de la falla, se puede deducir una actividad sísmica asociada a ella por medio de relaciones de equivalencia entre la tasa de momento sísmico que se está acumulando en la falla y el momento sísmico que se libera en los sismos (*moment slip*).
- Desconociendo la tasa de deslizamiento de la falla, la actividad sísmica asociada a ella se puede evaluar asignando a la falla una proporción de la actividad sísmica de la zona donde se encuentra ésta. Identificar la magnitud máxima resulta muy importante debido a que justamente la mayor parte de la energía liberada que se asocia a una región es dada por los sismos grandes (*moment rate*).

En la Figura 3-4 se indica el esquema presentado por Bungum (2007)

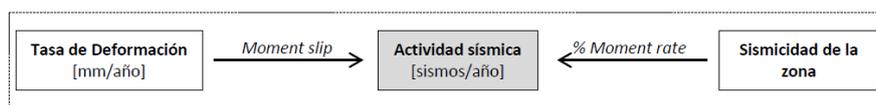


Fig. 3-4 Esquema de procedimiento *moment slip* y *moment rate* de Bungum (2007)  
Fuente: Rivas, 2014

En resumen, para afrontar el problema de la distribución de la sismicidad entre zonas y fallas (método híbrido) la metodología que propone Frankel et al., (1996) se basa en la

distribución del potencial sísmico por medio de una magnitud de corte ( $M_c$ ) y Bungum (2007) propone el reparto del momento sísmico directamente entre fallas y zonas.

Una de las propuestas para obtener los parámetros del modelo de recurrencia a partir de los parámetros físicos de la falla es el del modelo de terremoto característico (TC) (Wesnousky et al., 1983). Este modelo supone que en la falla solo se producen rupturas completas de todo el plano de falla o segmento, rompiéndose la falla en sismos de la misma magnitud denominándose a esta magnitud máxima (Magnitud característica  $M_{TC}$ ). Este es un modelo simple que iguala el momento sísmico acumulado en la falla ( $M_{o\text{acumulado}}$ ) durante un tiempo de recurrencia del medio  $T$  al momento sísmico liberado en el máximo terremoto de la falla ( $M_{o\text{liberado}}$ ). La magnitud máxima que se esperaría en la fuente se puede calcular por medio del área del plano de falla usando las relaciones empíricas propuestas por Wells y Coopersmith (1994), Stirling et al., (2002, 2008).

A su vez la relación entre el Momento sísmico  $M_o(m)$  que se liberaría en un posible sismo máximo y la magnitud máxima de dicho terremoto ( $M_{TC}$ ) se puede expresar mediante la propuesta de Hanks y Kanamori (1979), indicada en la Ecuación 5:

$$M_w = \frac{2}{3} \log(M_o) - 10.7 \quad \text{Ecuación 5}$$

La tasa de momento sísmico  $\dot{M}_o$  que se acumula en la falla (momento rate) está relacionada con la tasa de deslizamiento anual de la falla  $\dot{u}$  (*slip rate*) según Brune (1968), suponiendo de manera conservadora que en todo el plano de falla se acumula energía uniformemente, expresada en la Ecuación 6:

$$\dot{M}_o = \mu \times \dot{u} \times A \quad \text{Ecuación 6}$$

en la que  $\mu$  es el módulo de rigidez o de cizalla,  $A$  el área del plano de falla.

Las relaciones entre la tasa de momento sísmico y los modelos de recurrencia están basadas en la propuesta publicada por Anderson (1979), mediante la Ecuación 7:

$$\dot{M}_o = \int_{M_{min}}^{M_{max}} \dot{n}(m) \cdot M_o(m) dm \quad \text{Ecuación 7}$$

donde  $\dot{M}_o$  es la tasa de momento sísmico,  $\dot{n}(m)$  es la tasa simple de sismos de magnitud  $m$  y  $M_o(m)$  el momento sísmico que se libera en un terremoto de magnitud  $m$ . con esta expresión se puede deducir la tasa de actividad sísmica de la falla, truncada a una magnitud máxima y mínima, con la tasa de momento sísmico de la falla.

Partiendo de la Ecuación 7 se obtiene la tasa simple,  $\dot{n}(m)$ , del modelo de Gutenberg Richter, Ecuación 8:

$$\dot{n}(m) = \dot{N}min \cdot \beta \cdot \left[ \frac{e^{-\beta(m)}}{(e^{-\beta(Mmin)} - e^{-\beta(Mmax)})} \right] \quad \text{Ecuación 8}$$

El momento sísmico liberado en cada sismo, según la expresión de Hanks y Kanamori (1979), (Ecuación 3) puede expresarse como se indica en la Ecuación 9:

$$Mo(m) = e^{\bar{c} + \bar{d}m} \quad \text{Ecuación 9}$$

donde  $\bar{c} = 16.1 \ln(10)$  y  $\bar{d} = 1.5 \ln(10)$ .

Si se reemplaza en la Ecuación 7 las Ecuaciones 8 y 9 se obtiene la siguiente Ecuación 10:

$$\dot{M}o = \int_{Mmin}^{Mmax} \dot{N}min \cdot \beta \cdot \left[ \frac{e^{-\beta(m)}}{(e^{-\beta(Mmin)} - e^{-\beta(Mmax)})} \right] \cdot e^{\bar{c} + \bar{d}m} dm \quad \text{Ecuación 10}$$

Resolviendo la integral, es posible obtener la tasa de sismos de magnitud mayor o igual a una mínima establecida  $\dot{N}min$  (Ecuación 11), en función de la tasa de momento sísmico de la falla y la proporción de sismos  $\beta$  considerada.

$$\dot{N}min = \frac{\dot{M}o \cdot (\bar{d} - \beta) \cdot (e^{-\beta(Mmin)} - e^{-\beta(Mmax)})}{\beta [e^{-\beta(Mmax)} \cdot Mo(Mmax) - e^{-\beta(Mmin)} \cdot Mo(Mmin)]} \quad \text{Ecuación 11}$$

donde  $\dot{M}o$  es la tasa del momento sísmico de la falla,  $Mo(Mmax)$  y  $Mo(Mmin)$  es el momento sísmico que se liberaría en los sismos de magnitud máxima y mínima respectivamente (Rivas, 2014).

### Estimación de la peligrosidad con el método híbrido

De acuerdo a lo anotado en el apartado anterior el problema que se aborda en el estudio de peligrosidad es la manera de establecer la división del potencial sísmico entre las fallas y zonas, especialmente en aquellas zonas donde la acumulación de esfuerzos es lenta. Para ello se sigue la propuesta presentada por Bungum (2007) para el reparto de la tasa de momento sísmico, en la que se iguala el momento sísmico anual liberado en la región con el momento sísmico anual acumulado en la misma. Es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones sobre el modelo, que de alguna manera minimizan los problemas citados hasta ahora.

- Región: se denominará región a la suma de zona y fallas, donde el potencial sísmico de zonas sumado al potencial sísmico de las fallas será equivalente al potencial sísmico de la región.
- La zona y región comparte la delimitación geométrica, pero por lo expuesto anteriormente se consideran distintas ya que la región contiene a la zona en potencial sísmico.

De acuerdo con Rivas (2014) para el reparto de las tasas de momento sísmico es necesario incorporar las siguientes condiciones:

- La tasa sísmica anual observada en cada región se mantendrá constante, independientemente de las fuentes sísmicas consideradas.
- Para repartir el potencial sísmico se utilizará el periodo en el que el catálogo sísmico puede considerarse completo para cada rango de magnitud.
- En el caso de la falla, el potencial sísmico que se sustrae del potencial sísmico regional para obtener el de la zona, no será de toda la falla sino de aquel registrado en el periodo completo del catálogo.

En referencia el catálogo debe anotarse que se identificará, mediante análisis de completitud, a partir de qué año es posible suponer que la totalidad de los sismos ocurridos de una determinada magnitud han sido registrados y agregados al catálogo. A este año se le llamará el año de referencia [AR(m)], y es dependiente de la magnitud. Basándose en el AR(m) se establecerá el período de completitud, considerado como el período de tiempo que transcurre desde AR(m) hasta el año del último de registro del catálogo sísmico.

Se denominará Magnitud de Máxima Completitud (MMC) de cada región a la magnitud máxima del catálogo cuyo periodo de completitud (PC) esté incluido en el periodo de observación del catálogo. De manera análoga se denominará Magnitud mínima de completitud (Mmin) aquella por debajo de la cual no se contemplará el potencial sísmico de la fuente. En el registro se le identifica por la magnitud mínima del catálogo o la mínima considerada para el análisis de la peligrosidad.

#### Tasa de momento sísmico de la región

La tasa anual de sismos  $\dot{n}(m)$  registrados de una magnitud dada es equivalente al número de sismos,  $n(m)$ , registrados de esa magnitud durante su periodo de completitud dividida entre el número de años comprendido en PC(m), expresado en la Ecuación 12.

$$\dot{n}(m) = \frac{n(m)}{PC(m)} \quad \text{Ecuación 12}$$

Si al Momento sísmico  $M_o(m)$  liberado en cada terremoto de magnitud  $m$  se multiplica por la tasa de sismos de esa magnitud se obtiene la tasa de momento sísmico liberada en la región para esa magnitud, indicada en la Ecuación 13.

$$\dot{M}(m) = \dot{n}(m) \cdot M_o(m) \quad \text{Ecuación 13}$$

La tasa de momento sísmico total liberado en la región en el intervalo de magnitud  $M_{min}$  y  $MMC$  resulta de la sumatoria de todas las tasas de momento sísmico en ese intervalo, según se indica en la Ecuación 14.

$$\dot{M}_{o\ region} = \sum_{M_{min}}^{MMC} M_o(m) = \sum_{M_{min}}^{MMC} \dot{n}(m) \cdot M_o(m) \quad \text{Ecuación 14}$$

### Tasa de momento sísmico de la falla

Esta tasa se obtendrá asociando el intervalo de magnitudes registradas de forma completa ( $M_{min}$ ,  $MMC$ ), suponiendo que la forma de liberar energía de las fallas es por medio de sismos de distinta magnitud, para lo cual se usaran modelos de recurrencia del tipo GR. La tasa determinada en la Ecuación 6 representa la acumulación de momento sísmico anual en la falla que se libera por sismos desde magnitud próxima a 0 hasta la máxima de la falla.

El objetivo es identificar qué porcentaje de tasa de momento sísmico de la falla (Figura 3-5) se libera en el intervalo de magnitudes registradas de forma completa en el catálogo ( $M_{min}$ ,  $MMC$ ), pudiendo así definir qué porcentaje de tasa de momento sísmico de la región puede ser asociado a la falla dentro de ese intervalo.

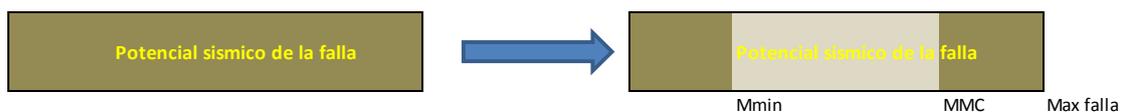


Fig. 3-5 Representación del porcentaje de tasa de momento sísmico de la falla en el intervalo  $M_{min} - MMC$

Siendo necesario asociar a la falla un modelo de recurrencia utilizando la tasa de momento sísmico acumulado de la falla y asignando un valor  $\beta$  inicial, la selección de este modelo condicionara el reparto de tasa de momento sísmico resultante.

La tasa de momento sísmico total de la falla será igual a la suma de la tasa de momento sísmico liberada en los distintos intervalos de magnitud que se puedan considerar en la misma, expresada en la Ecuación 15.

$$\dot{M}_{o\ falla} = \dot{M}_o|_0^{M_{min}} + \dot{M}_o|_{M_{min}}^{MMC} + \dot{M}_o|_{MMC}^{M_{max\ falla}} \quad \text{Ecuación 15}$$

donde  $\dot{M}_o|_{Mmin}^{MMC}$  representa la tasa de momento liberada por la falla en el intervalo indicado en la Figura N3-5, y es la que se quiere conocer aplicando la metodología híbrida.

### Reparto del potencial sísmico entre las fuentes

El reparto del potencial sísmico se realiza dentro del intervalo de magnitudes registradas de forma completa en el catálogo ( $M_{min}$ ,  $MMC$ ). Es importante recordar que la tasa de momento sísmico liberada por los sismos que suceden en una región es igual a la suma de la tasa de momento liberada por los sismos que se producen en todas las fallas de esa región más la tasa de momento liberada por los terremotos que suceden en la zona y que no pueden ser asignados a ninguna falla, esto se expresa en la Ecuación 16.

$$\dot{M}_{o_{region}}|_{Mmin}^{MMC} = \Sigma \dot{M}_{o_{falla}}|_{Mmin}^{MMC} + \dot{M}_{o_{zona}}|_{Mmin}^{MMC} \quad \text{Ecuación 16}$$

Con la misma premisa, la tasa acumulada de terremotos que se produce en una región es igual a la suma de tasas acumuladas de terremotos que se producen en todas las fallas de esa región más la tasa acumulada de terremotos que ocurren en la zona sin relacionarlas con falla alguna, se expresa en la Ecuación 17.

$$\dot{N}_{min_{region}}|_{Mmin}^{MMC} = \dot{N}_{min_{zona}}|_{Mmin}^{MMC} + \Sigma \dot{N}_{min_{falla}}|_{Mmin}^{MMC} \quad \text{Ecuación 17}$$

En esta ecuación los términos correspondientes a tasas de momento sísmico de la falla y región son conocidos, éstos dependen del modelo de recurrencia asociado a la falla y del valor inicial  $\beta$  considerado, quedando la tasa de momento sísmico de la zona equivalente a la diferencia entre la región y la falla. De este enunciado se desprende que la tasa de momento sísmico de la zona depende de la tasa de momento sísmico regional y de las fallas contenidas en la región.

En vista que la tasa de momento sísmico de la falla depende de su  $\beta$  definida por su modelo de recurrencia, la tasa de momento sísmico de la zona también dependerá de la  $\beta$  de la falla, expresando la Ecuación 17 bajo esta consideración se obtiene la Ecuación 18.

$$\dot{N}_{min_{region}}|_{Mmin}^{MMC} = f(\dot{M}_{o_{falla}}(\beta_{falla}), \beta_{zona})|_{Mmin}^{MMC} + \Sigma g(\dot{M}_{o_{falla}}(\beta_{falla}), \beta_{falla})|_{Mmin}^{MMC} \quad \text{Ecuación 18}$$

La resolución de esta relación consiste en fijar una  $\beta$  (falla o zona) y determinar la otra por ajuste hasta que cumpla el equilibrio. En este modelo híbrido se ha fijado un valor de  $\beta$  para todas las fallas de una misma región simplificando los cálculos.

La asignación de los valores de  $b$  o  $\beta$ , en los modelos de recurrencia, que corresponden a las pendientes de los modelos indican la proporción entre sismos pequeños y grandes. La metodología que se propone establece la relación entre las  $\beta$  de la zona y las fallas, lo que permite fijar una de ellas y calcular la otra en dependencia de la fijada. El valor de  $\beta$  asociado a las fallas y a la zona determina el equilibrio del modelo debido a que la tasa de momento sísmico de las fallas asociada al rango de observación completo varía con el valor de la  $\beta$  del modelo de recurrencia de la falla. Rivas (2014 ) recomienda fijar la  $\beta$  asociada a la zona, que puede ser estimada en función de la sismicidad de la zona considerada, y poder calcular el respectivo de la falla para conseguir la igualdad de la Ecuación 18.

### 3.3.3 Ecuaciones de predicción del movimiento fuerte - GMPE's

Estos modelos relacionan el movimiento del terreno en la zonificación definida (aceleración o velocidad) con el parámetro que establece el tamaño del sismo en la fuente (intensidad macrosísmica o magnitud), la distancia fuente – emplazamiento ( $r$ ) y una medida de la dispersión de los datos al modelo. Lo indicado se expresa la Ecuación 19, ecuación de predicción del movimiento fuerte:

$$\ln(y) = \psi(r, m, \dots) + \varepsilon\sigma_{\ln y} \quad \text{Ecuación 19}$$

donde  $\ln(y)$  representa el logaritmo neperiano del parámetro del movimiento en el emplazamiento. La variable  $y$  suele darse en términos de aceleraciones o velocidades pico (PGA o PGV), ó de aceleración/velocidad espectral (SA, SV).

Por otra parte,  $\psi(m, r, \dots)$  es una función de la magnitud y de la distancia, aunque otros términos pueden ser incluidos en la ecuación como la profundidad a la que se ha producido el sismo, el tipo de mecanismo de la falla, el factor del suelo, tipo de distancias sea ruptura, epicentral, hipocentral, etc. El término  $\varepsilon\sigma_{\ln y}$  es denominado término de error del movimiento del modelo y tiene gran importancia en los estudios de amenaza.

### 3.3.4 Configuración del árbol lógico y resolución de la integral de peligrosidad

En los métodos se desconocen a profundidad los procesos físicos involucrados en las diferentes fases de cálculo de la peligrosidad, introduciendo incertidumbre en los resultados. Estas incertidumbres están presentes en la definición de las zonas sismogénicas, ajuste de la sismicidad a relaciones de recurrencia, selección de las leyes de atenuación, consideración del efecto de las condiciones locales del emplazamiento, etc. Por ello se han desarrollado técnicas de reconocimiento, cuantificación y en la medida de lo posible reducción de éstas incertidumbres, que han sido clasificadas en aleatorias y epistémicas y se definen como:

- Incertidumbre aleatoria: asociada a errores en la estimación de parámetros de un determinado modelo. Pueden reducirse aumentando la cantidad y calidad de los datos existentes para estimar con mayor precisión dichos parámetros.
- Incertidumbre epistémica: inherente a los modelos asumidos de sismicidad, zonificación, predicción del movimiento, etc., que podrían ser estimados solo si se conociera los modelos reales.

Una de las formas de cuantificación de incertidumbre es la metodología del árbol lógico (Cramer, 2001; Wahlstrom y Gruntal, 2000) empleado en los estudios de peligrosidad PSHA.

El método del árbol lógico, llamado también árbol de decisión, fue desarrollado en 1986 por Coopersmith y Young, EPRI y *National Research Council* (1988), cuyo método ordena la serie de estimaciones a realizar en el análisis de la probabilidad y dirige la incertidumbre de cada estimación de manera secuencial hasta conseguir la incertidumbre de los resultados finales. Es una herramienta que proporciona una estimación cuantitativa de la incertidumbre epistémica del estudio de peligrosidad. Siendo una herramienta tiene la finalidad de formular diversas opciones que pueden ser incluidas en el análisis de peligrosidad y establecer cuales podrían ocurrir con más probabilidad que otras, tanto en la metodología zonificada como en la metodología híbrida.

El árbol lógico está estructurado por nodos y ramas. Los nodos representan los elementos del análisis cuya incertidumbre se requiere cuantificar (como zonificación sísmica o modelo de atenuación), mientras que las ramas indican las diferentes opciones consideradas para cada nodo. La relación entre nodos y ramas es recíproca, es decir todos los nodos conectan al menos en una rama y todas las ramas terminan en un nodo, excepto la del extremo final. A cada rama se asigna un peso o probabilidad de ocurrencia del suceso condicionada a esa variable; de esta manera a una zonificación elegida se le asignará un peso que representará la probabilidad de esa elección, es decir la probabilidad de que esa rama represente el valor correcto. La suma de todos los pesos asignados a cada nodo debe ser siempre la unidad por asunción de que los valores que toma la variable definida en cada nodo son mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos. En la siguiente Figura 3-6 se indica el esquema del árbol lógico utilizado en cálculos de peligrosidad

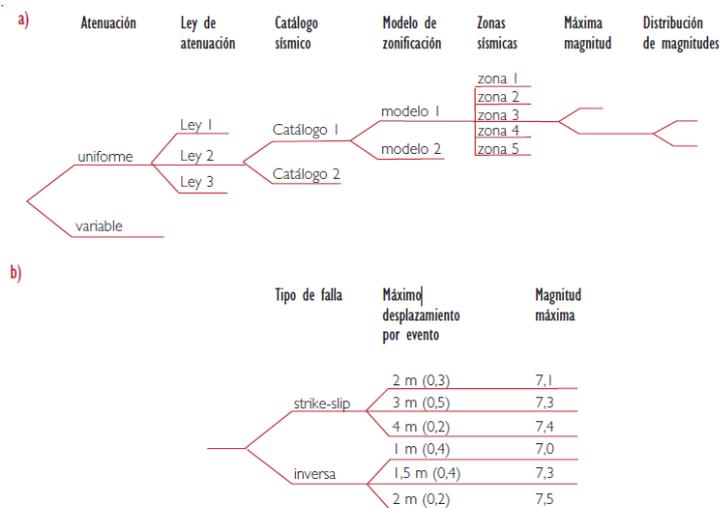


Fig. 3-6 Esquema general de árbol lógico. a) Estructura de árbol lógico para el cálculo de la amenaza sísmica, b) Ejemplo de una parte del árbol lógico correspondiente a la estimación de la magnitud máxima.

Fuente: Benito, B. 2009

El árbol lógico ordena la serie de estimaciones a realizar en el análisis de peligrosidad, y dirige la incertidumbre de cada estimación de manera secuencial hasta obtener la incertidumbre de los resultados finales (Benito y Jiménez, 1999); de esta manera el resultado final de la peligrosidad se presenta asociado a una medida de incertidumbre.

En la estructuración del árbol, la asignación de los pesos no es tarea de un solo analista, éstos son establecidos mediante juicio de expertos en la materia, ya que la ponderación escogida influye en los resultados de la peligrosidad.

### Resolución de la integral de la peligrosidad

Definidos los modelos de atenuación se calcula la triple integral de la peligrosidad sísmica mediante la relación planteada por Cornell (1968) y Esteva (1967,1968).

En la Ecuación 20 se indica la forma funcional de la integral de la amenaza debida a un conjunto de N fuentes sísmicas:

$$\lambda(y > Y) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(y > Y) = \sum_{i=1}^N v_i \iiint P_i[y > Y | m, r, \varepsilon] f_{M_i}(m) f_{R_i}(r) f_{\varepsilon_i}(\varepsilon) dm dr d\varepsilon \quad \text{Ecuación 20}$$

donde  $f_{M_i}(m) f_{R_i}(r) f_{\varepsilon_i}(\varepsilon)$  son las funciones de densidad de probabilidad de magnitud, distancia y epsilon respectivamente.

Los límites de la triple integral son las magnitudes y distancias mínimas y máximas de la fuente al emplazamiento, y los valores en los que se trunca la relación de predicción del movimiento; de no tener truncamiento, la integral correspondiente a  $\varepsilon$  se evalúa en el rango  $-\infty$  y  $+\infty$ .



La tasa anual de excedencia del nivel del movimiento  $Y$  es representada por  $\lambda(y > Y)$ , debida a la ocurrencia de terremotos en las  $N$  fuentes, que resulta de la suma de las tasas anuales de excedencia  $\lambda_i(y > Y)$  por la actividad de cada una de las fuentes (las que representan una tasa anual de ocurrencia de terremotos  $v_i$ ). La probabilidad de excedencia de un valor  $Y$  del parámetro de movimiento condicionada a las variables  $m, r, \varepsilon$  está dada por el término  $P_i[y > Y|m, r, \varepsilon]$ .

## CAPITULO IV

# APLICACIÓN PRÁCTICA EN HAITÍ

## 4. CÁLCULO PSHA

Para el cálculo de la peligrosidad sísmica en Haití, realizada con el método probabilista zonificado e híbrido según la metodología definida en el Capítulo anterior, se ha desarrollado una fase inicial de preparación de las entradas de cálculo, que consta de las siguientes acciones:

- Elaboración del catálogo sísmico homogenizado a magnitud momento ( $M_w$ ), completo y depurado.
- Definición de un modelo de zonas sismogénicas (zonas y fallas) para la región.
- Selección de las leyes de atenuación o modelos de movimiento fuerte a emplear en el análisis.

El movimiento objeto se calcula en términos de aceleración pico del suelo (PGA) y aceleraciones espectrales (SA) para los períodos estructurales: 0.1, 0.2, 0.5, 1 y 2 segundos que representan el movimiento esperado para tres períodos de retorno: 475, 975 y 2475 años.

### 4.1 Catálogo sísmico

Dado que existe un catálogo elaborado por el grupo de investigación GIIS, que contiene eventos registrados desde el año 1551 hasta el año 2011, se complementará la información con registros desde este último año hasta el año 2014.

#### 4.1.1 Fuentes de información

El historial de sismicidad en la Isla no ha sido registrado completamente con los datos técnicos necesarios para establecer un catálogo histórico, sin embargo se tienen antecedentes de actividad sísmica donde indican eventos en los años 1751, 1770 (De Saint-Méderic M. 1797).

El catálogo para este estudio ha sido elaborado recopilando datos de las siguientes agencias cuya información está disponible en la red, que por orden de fiabilidad se indican a continuación:

1. RSPR: Red sísmica de Puerto Rico. Puerto Rico
2. USGS: United States Geological Survey. USA
3. ISC/ISS: International seismological centre. United Kindom
4. GCMT: Global center moment tensor
5. CSEM: Centre sismologique Euro-Mediterraneen. Francia
6. EIDC: Experimental (GSETT3) international data center. Center for monitoring research. USA
7. SZGRF: seismologisches zentralobservatorium Grafenburg. Alemania

8. MOS: Geophysical institute – Russian academy of science, Obninsk. Rusia

El área de influencia que se definió se extiende desde 10° a 25°N en latitud y -60° a -80°W en longitud. Esta extensión abarca toda la Isla La Española, y parte de las placas Norteamérica y Caribe. Se tomaron en cuenta registros con magnitud mayor a 3.0.

En la Tabla 1 se indican el resultado de los registros encontrados, durante el periodo 2011 a 2014:

Tabla 1. Registros recopilados distintas fuentes

Fuente	Número de registros	M max	M min	Escala
RSPR	3337	6.4	3.0	Md
USGS	3549	6.4	3.0	Md,Mb
ISC-ISS	2886	5.9	3.0	Mb, Md
GCMT	33	6.3	4.8	Mw
CSEM	192	6.4	4	Md,Mb,Mw
IRIS	503	6.0	4.0	Md,Mb,Ms,Ml,Mw
Total	10500			

La precisión en la determinación de los eventos puede ser variable debido a la diversidad de agencias, ya que cada una de ellas posee su propio sistema de registro y escala de magnitud.

#### 4.1.2 Homogeneización

La homogeneización consiste en obtener un catálogo con una escala de magnitud única, en nuestro caso magnitud momento ( $M_w$ ), dada la variedad de escalas en las distintas agencias. Un catálogo sísmico es homogéneo en tamaño de sismos cuando el parámetro que lo define es el mismo para todos los eventos.

Del total de eventos fueron transformados a magnitud  $M_w$ : 883 registros con  $M_b$ , 9495 registros con  $M_D$ , 98 registros con  $M_L$  y 24 registros con  $M_s$  utilizando las relaciones propuestas por Bozzoni et al., (2011), como se indica en la Tabla 2.

Tabla 2. Relaciones de magnitudes empíricas entre Magnitud momento ( $M_w$ ) y magnitudes de ondas de superficie ( $M_s$ ), ondas de cuerpo ( $m_b$ ), duración ( $M_D$ ), local ( $M_L$ ) y Momento sísmico ( $M_0$ ).

Relación	Referencia
$M_w = 0.6789 M_s + 2.2192$ ( $R^2=0.8215$ )	Bozzoni
$M_w = 1.1302 m_b - 0.3383$ ( $R^2=0.7967$ )	Bozzoni
$M_w = M_L$	Tanner and Shepherd, 1997
$\log M_0 = 1.51 M_D + 16.26$	Pasyanos et al, 1996, Kanamori 1977



La distribución espacial de los sismos sigue la alineación tectónica de la Placa Caribe. Existe una concentración de eventos muy importantes cercana a las fallas Septentrional y Enriquillo que pueden influir en el cálculo de parámetros sísmicos.

#### 4.1.3 Depuración del catálogo

Una vez homogenizado el catálogo y determinada la magnitud de corte, se procede a determinar las series sísmicas principales con sus respectivas réplicas y premonitores, con la finalidad de verificar la hipótesis de que el ajuste de la actividad sísmica de cada zona sismogénica se rige por un modelo de *Poisson*. Esto significa que se considera constante la probabilidad de ocurrencia de un terremoto en el tiempo en cualquier punto de la zona. Las réplicas y premonitores deben ser eliminadas para obtener registros independientes de otros.

El proceso de depuración consiste en determinar mediante ventanas espaciales y temporales aquellos eventos que pueden depender de otros. En la ventana espacial se analiza a qué distancia se considera que se producen réplicas y premonitores, más allá de ese radio se consideran eventos principales, aunque se produzcan en un tiempo muy próximo. La ventana temporal analiza el mayor intervalo de días, en el cual se han producido eventos (replicas o premonitores) a partir del principal y se determina cuantos días transcurren con ocurrencia de premonitores. Los parámetros que determinan las ventanas descritas se basan en el estudio realizado por Gardner y Knopoff (1974) que se ha generalizado para la zona del Caribe.

El grupo de investigación GIIS ha desarrollado una aplicación para determinar los eventos que se consideran réplicas o premonitores. Los parámetros de ingreso corresponden a los indicados en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de ingreso para determinar replicas y premonitores

ID	Año	mes	Día	longitud	latitud	Mw	Precisión
1	1551	5	2	19.85	-75.95	6.7	0

La etiqueta de precisión no se escribe en el archivo *x.txt* que se elabora.

Los resultados del proceso indican que el 48% de los eventos registrados corresponden a eventos principales y el 52% representan replicas o premonitores. De los eventos principales 1946 eventos corresponden a magnitudes mayor igual a Mw 4.0

#### 4.1.4 Análisis de completitud

El análisis de la completitud de un catálogo tiene el objetivo estimar el año a partir del cual el registro de sismos de una magnitud concreta está completo, ya que es evidente que en éste no están registrados todos los terremotos que se han producido en una región a lo largo de la historia dado que hay menos registros a medida que retrocedemos

en el tiempo. Para considerar un catálogo completo en un determinado rango de magnitudes éste debe contener todos los sismos en ese rango que presumiblemente han ocurrido en el área de influencia.

El parámetro que se considera en el cálculo de la peligrosidad es la frecuencia anual de ocurrencia de terremotos acumulada, esta es asumida constante en el tiempo y uniforme en cada zona sismogénica. Para obtener este parámetro es necesario corregir la falta de completitud del catálogo sísmico. Se nota que en los primeros años del catálogo hay más sismos grandes que pequeños debido a que son los que más se sentían, se identificaban y documentaban.

Para realizar este proceso se han definido intervalos de magnitudes con incrementos de 0.5 grados, desde Mw 4.0 hasta Mw 8.30 que es el valor máximo registrado en el catálogo. El inicio del periodo de completitud se identifica por una inflexión en la gráfica de la frecuencia de ocurrencia vs el año de ocurrencia. El catálogo sísmico se divide en dos secciones de acuerdo a la profundidad registrada y a la zonificación sísmica que se indicó en el capítulo anterior. La primera corresponde a la zona superficial, que incluye eventos localizados entre una profundidad entre 0 y 49.9Km. La segunda corresponde a la zona profunda, con eventos cuya profundidad es mayor a o igual a 50km (zona de subducción).

Se grafica la frecuencia acumulada normalizada contra el periodo de tiempo del catálogo y se determina visualmente el punto de inflexión donde la secuencia de eventos se asemeja a una recta, es decir, presenta una pendiente constante. En la Figura 4-2 se muestra la configuración del archivo de trabajo y el gráfico resultante para la completitud del rango 5.0 – 5.5 Mw en la zona profunda. El año de completitud identificado en este caso es 1970.

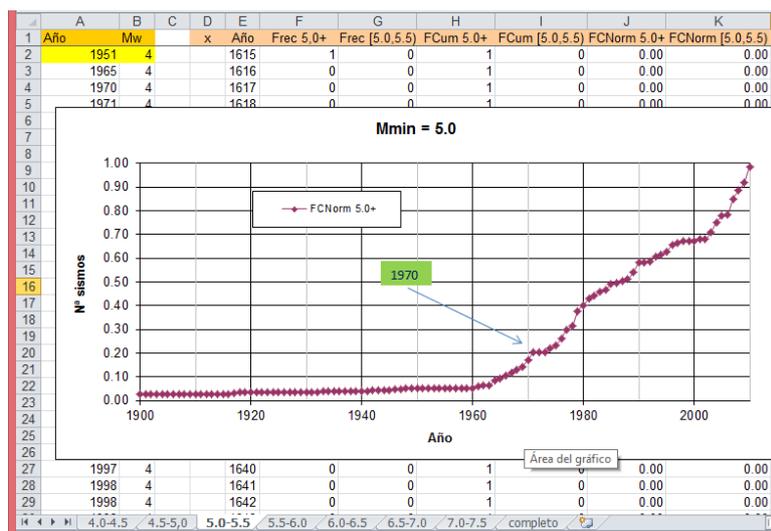
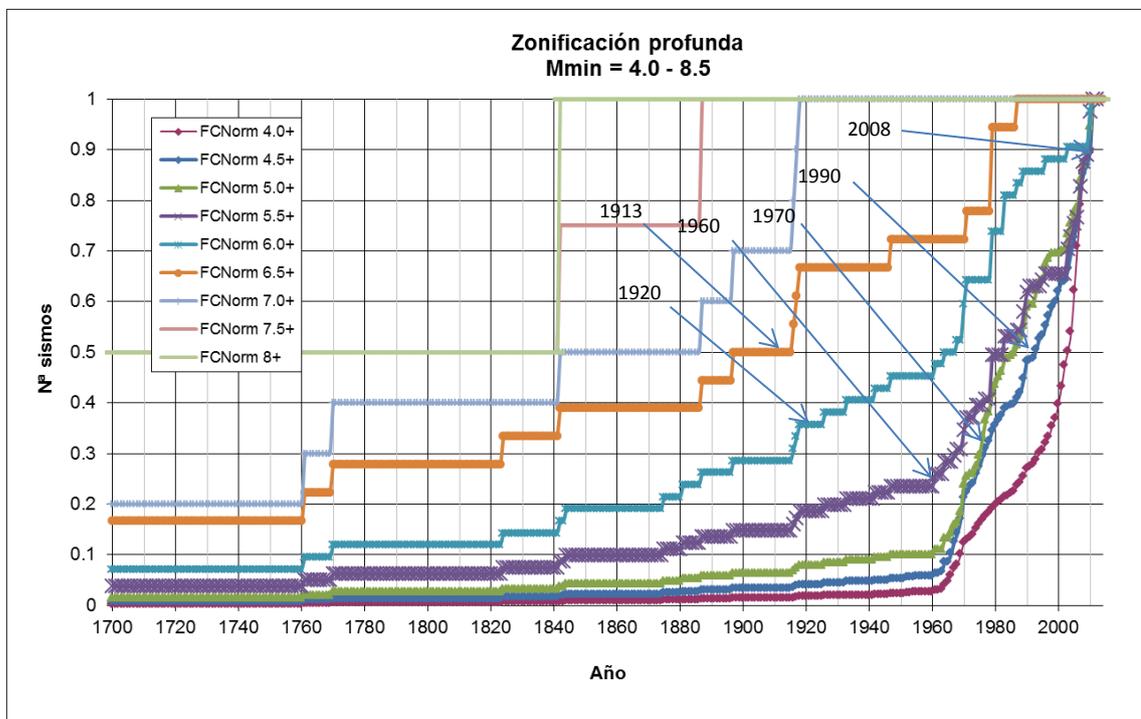
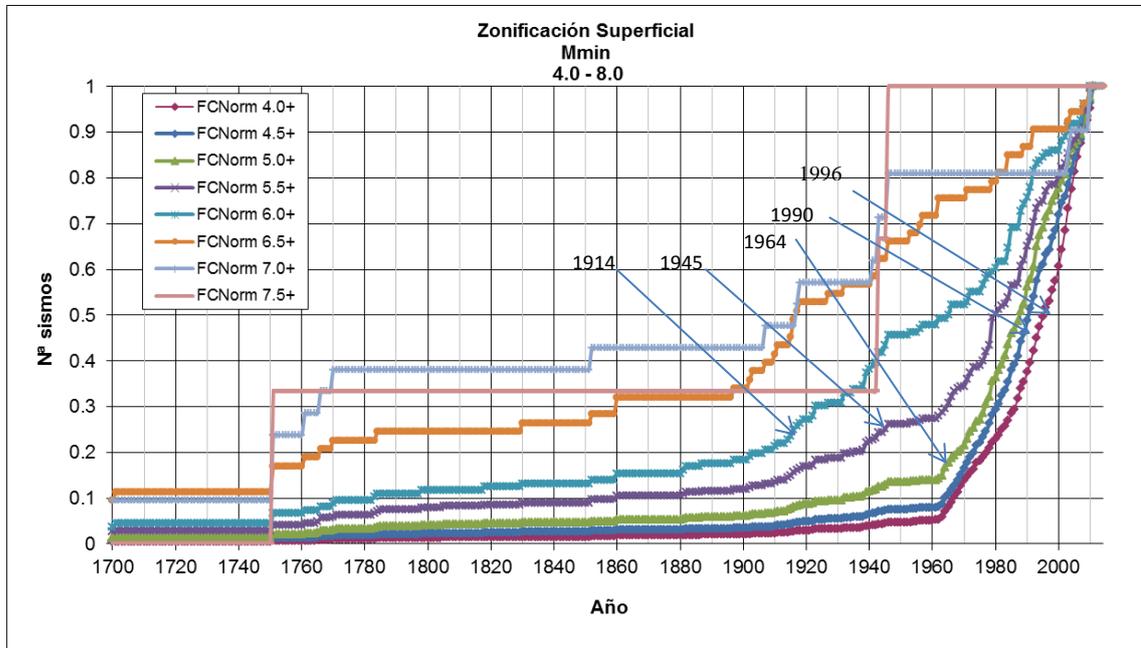


Fig. 4-2 Configuración plantilla Excel para completitud rango 5.0 – 5.5

En la Figura 4-3 y Figura 4-4 se muestra el resultado para todos los rangos de magnitud, diferenciando la zonificación sísmica superficial y profunda. De estas gráficas se han extraído los años de referencia para cada rango de magnitud.

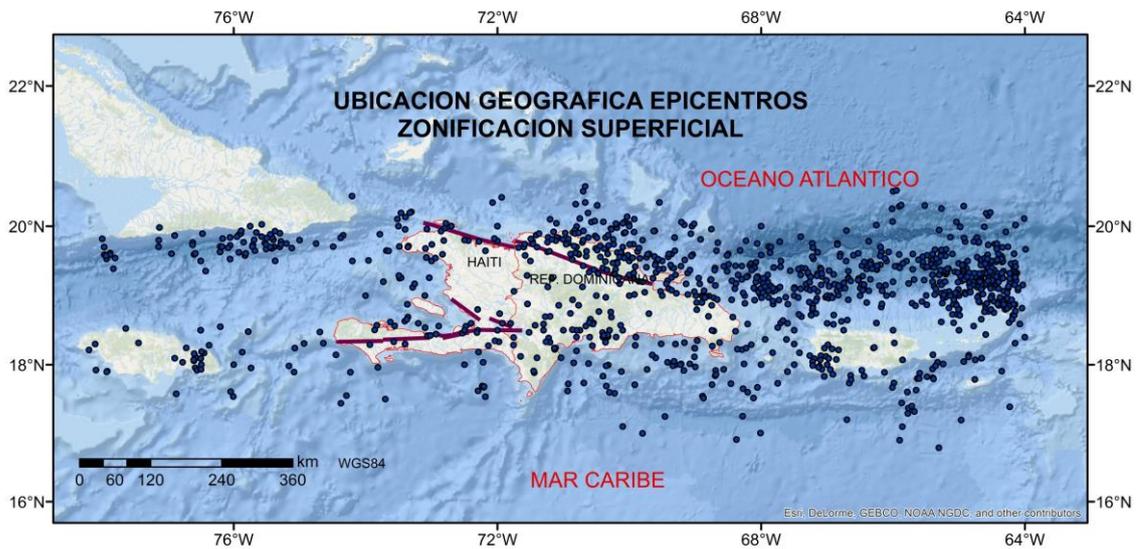


Una vez procesados todos los eventos en los rangos de magnitud indicados los años de referencia resultantes se indican en la Tabla 4.

*Tabla 4. Años de referencia por rango de magnitud y zonificación sísmica*

Magnitud (Mw)	Zonificación	
	Superficial < 50Km	Profunda ≥ 50Km
4.0 – 4.4	1996	2008
4.5 – 4.9	1990	1990
5.0 – 5.4	1964	1970
5.5 – 5.9	1945	1690
6.0 – 6.4	1914	1920
6.5 – 6.9	1680	1913
7.0 – 7.4	1551	1680
7.5 – 8.0	1551	1615
8.0 – 8.5	1551	1615

Realizados los procesos descritos se obtiene el catálogo final que será utilizado en el cálculo de parámetros sísmicos y peligrosidad. La Figura 4-5 muestra el mapa de epicentros con los eventos registrados en la zonificación superficial o cortical.



*Fig. 4-5 Ubicación geográfica epicentros en Zonificación Superficial o Cortical*

La siguiente Figura 4-6 muestra la ubicación de los eventos de la zona Profunda o Subducción.

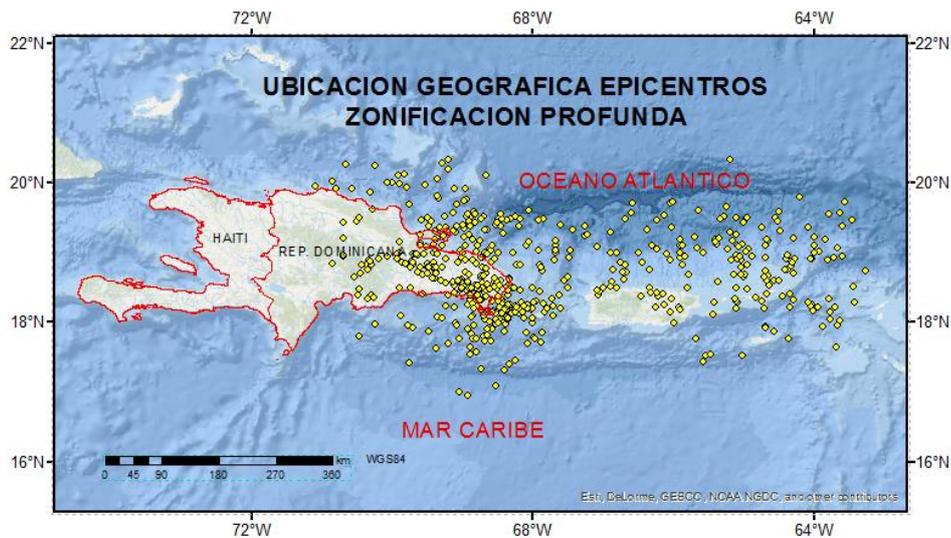


Fig. 4-6 Ubicación geográfica epicentros Zona Profunda o Subducción

El catálogo final cuenta con 1772 registros principales de magnitud  $M_w \geq 4.0$  de los cuales 586 eventos pertenecen a la zonificación profunda y 1186 a la zonificación superficial. Con este catálogo se procede a determinar los parámetros sísmicos de la ley de recurrencia de Gutenberg – Richter que modelan el comportamiento de la sismicidad en cada zona.

## 4.2 Fuentes sísmicas

La zonificación propuesta para la región de Haití consta de 10 zonas identificadas, atendiendo a las principales unidades sismogénicas y tectónicas descritas anteriormente. La zonificación se subdivide, a su vez, atendiendo al régimen tectónico y profundidad de las fuentes en a una zonificación cortical o superficial y a una zonificación profunda o de subducción (García y Suarez, 1999). Se describen a continuación las zonas incluidas en cada uno de estos regímenes.

### 4.2.1 Zonificación profunda o subducción

Para definir la zonificación profunda ( $h \geq 50\text{km}$ ) se ha considerado la geometría de la zona de subducción a partir de datos geofísicos, y la naturaleza de la sismicidad considerando su distribución y los mecanismos focales. Engloba el territorio de Haití, República Dominicana y Puerto Rico, y comprende a su vez cuatro zonas:

- Zona 1: zona de sismicidad profunda derivada del bloqueo de la subducción por la plataforma de las Bahamas.
- Zona 3: son zonas de ocurrencia de sismicidad profunda asociada a las zonas de subducción de la Fosa de los Muertos y Puerto Rico.

- Zona 2 y 4: zona de sismicidad profunda derivada de la indentación de la Dorsal de la Beata y de la Fosa de los Muertos.

En la Figura 4-7 (a) se muestra la geometría en planta de las zonas de subducción identificadas.

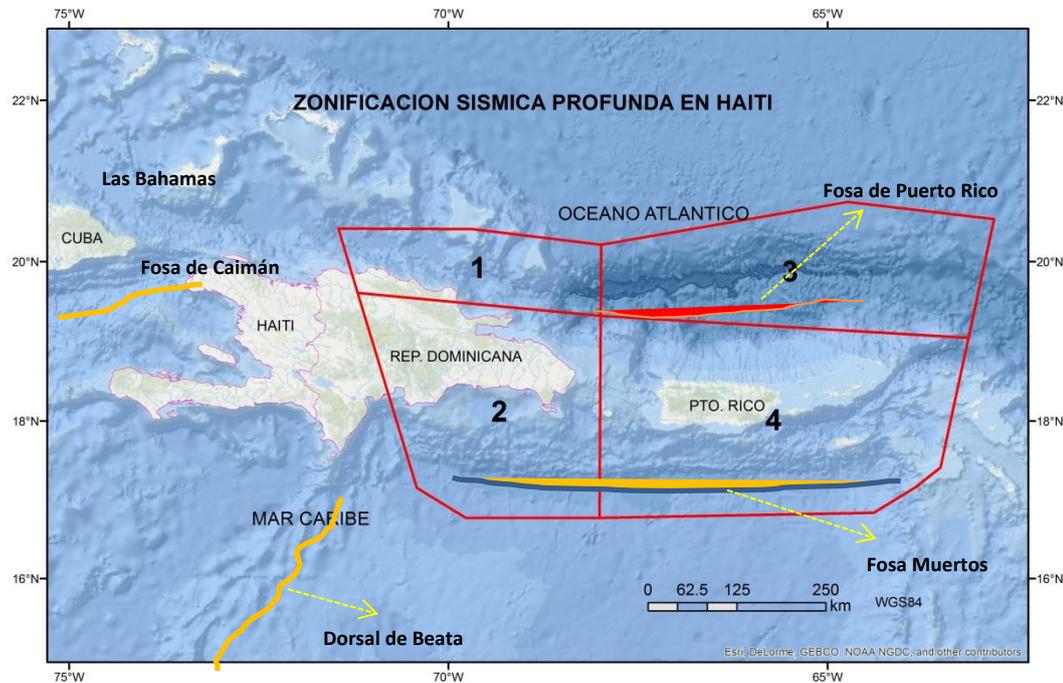


Fig. 4-7(a) Zonificación sísmica profunda en Haití.  
Fuente: García y Suarez (1999)

#### 4.2.2 Zona cortical o superficial

Estas zonas han sido definidas basadas en los siguientes criterios (García-Mayordomo J. y A. Suarez, 1999):

- Modelo de deformación tectónica,
- Geología superficial,
- Homogeneidad en las familias de fallas cuaternarias, en cuanto a orientación, cinemática y tamaño, y
- Distribución y características de la sismicidad.

En la Figura 4-7 (b) se muestra la zonificación cortical o superficial propuesta.

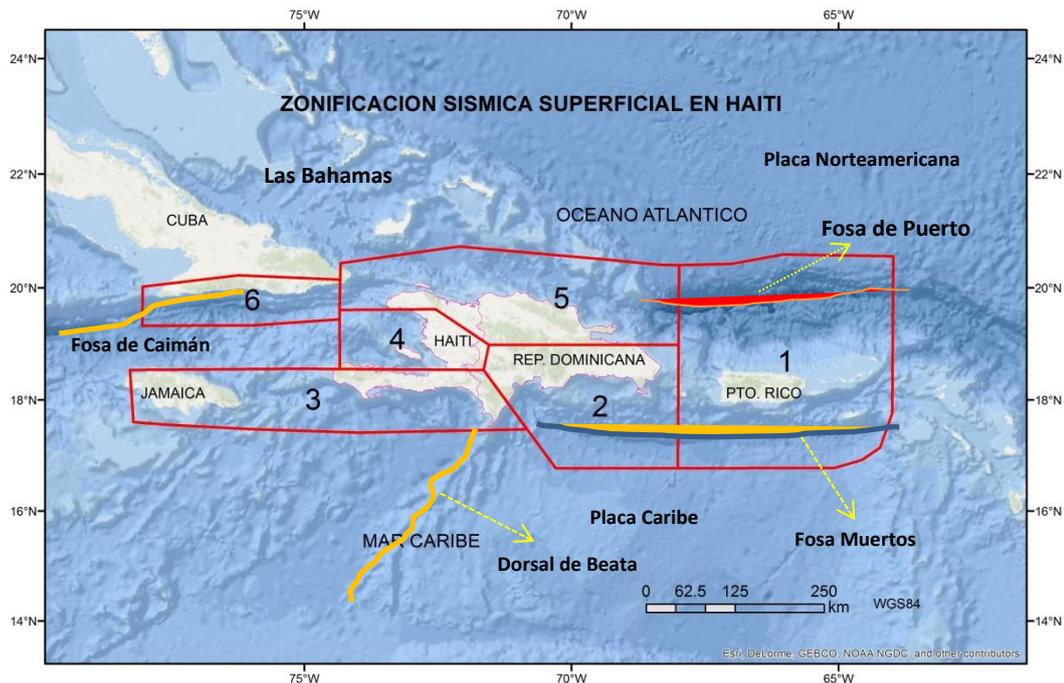


Fig. 4-7(b) Zonificación sísmica superficial en Haití.  
Fuente: García y Suarez (1999)

Definida para una profundidad menor a 50km, esta zonificación abarca los territorios de Haití, República Dominicana, Puerto Rico, Jamaica y Cuba. La descripción de cada zona se indica a continuación:

- Zona 1: sistema de fallas que componen el contacto por desgarre entre la Placa Norteamericana y la Placa del Caribe.
- Zona 2: zona de ocurrencia de sismicidad superficial derivada de la indentación de la Dorsal de la Beata y de la Fosa de los Muertos.
- Zona 3: zona de la Falla de Enriquillo-Plantain Garden.
- Zona 4: zona de la falla Matheux Neiba.
- Zona 5: zona de la falla Septentrional.
- Zona 6: zona de ocurrencia de sismicidad superficial placa Cayman.

#### 4.2.3 Fallas como elementos independientes

Las fallas existentes en la zona ya han sido descritas anteriormente y ubicadas geográficamente. Las fuentes sísmicas tipo falla se modelizan con el plano de falla simplificado como una superficie rectangular. Se usan como datos las coordenadas de los puntos extremos, la profundidad y el buzamiento.

En la Tabla 5 se indican las coordenadas de las fallas, su profundidad y longitud consideradas para el cálculo:

Tabla 5: Coordenadas de las fallas identificadas en Haití.

Zona 4	Falla Matheux					
	Segmento Matheux A			Segmento Matheux B		
	Longitud	Latitud	Profundidad	Longitud	Latitud	Profundidad
	-72.7002	18.9517	0	-72.1228	18.6706	0
	-72.6216	19.0537	20	-72.0754	18.7887	20
	-72.1858	18.7489	20	-71.7311	18.6627	20
	-72.2645	18.6471	0	-71.7787	18.5448	0
Zona 5	Falla Septentrional					
	Segmento Septentrional A			Segmento Septentrional B		
	Longitud	Latitud	Profundidad	Longitud	Latitud	Profundidad
	-73.1251	20.0475	0	-69.6465	19.168	0
	-73.1251	20.0475	15	-69.6465	19.168	15
	-71.7375	19.6915	15	-71.7359	19.7896	15
	-71.7375	19.6951	0	-71.7359	19.7896	0
Zona 3	Falla Enriquillo					
	Segmento Oeste			Segmento Este		
	Longitud	Latitud	Profundidad	Longitud	Latitud	Profundidad
	-74.4436	18.3316	0	-73.088	18.4404	0
	-74.4435	18.3315	15	-73.088	18.4404	15
	-73.1263	18.382	15	-71.6236	18.4962	15
	-73.1263	18.382	0	-71.6236	18.4962	0

El segmento oeste de la falla de Enriquillo corresponde a los segmentos de Les Cayeux (este y oeste) y el segmento este corresponden a los segmentos de: Miraoane, Goabe – Dufort, Dumay, y Nomance. Las características de cada una de estas familias o fuentes, resultados de medidas GPS, se indican a continuación en la Tabla 6:

Tabla 6: Parámetros geométricos y cinemáticos de las Fallas activas en Haití

Fuente: Benito et al., 2010

Código	Segmento	Falla	Long. (Km)	Prof. (Km)	Sliprate (mm/año)
Zona 3					
3A_En	Miraoane	Enriquillo	22	15	7
3B_En	Goabe	Enriquillo	20	15	7
3C_En	Dufort	Enriquillo	15	15	7
3D_En	Nomance	Enriquillo	33	15	7
3E_En	Dumay	Enriquillo	68	15	7
3F_En	Les Cayeux Este	Les Cayeux	75	15	7
3G_En	Les Cayeux Oeste	Les Cayeux	73	15	7
Zona 4					
4A_Mat	Matheux Neiba 1	Matheux Neiba	57	24	1
4B_Mat	Matheux Neiba 2	Matheux Neiba	40	24	1
Zona 5					
2A_Sept	Septentrional	Zona de Haití	150	15	12
2B_Sept	Septentrional	Zona de Rep. Dominicana	230	15	12

La tasa de momento sísmico que se acumula en la falla será calculada por la relación empírica de Brune (1968) en función del área del plano de falla y la tasa de deslizamiento.

### 4.3 Cálculo de parámetros sísmicos

#### 4.3.1 Método zonificado

Los parámetros de sismicidad se calcularon para cada zona sismogénica definida, realizando ajustes de la sismicidad a la expresión de Gutenberg – Richter (Ecuación 1) para establecer la ley de recurrencia en cada zona.

Los parámetros a y b de cada zona se calcularon mediante análisis de regresión en base al catálogo obtenido, con ajuste de máxima verosimilitud. En la Figura 4-8 se muestra un ejemplo de los parámetros obtenidos (a, b).

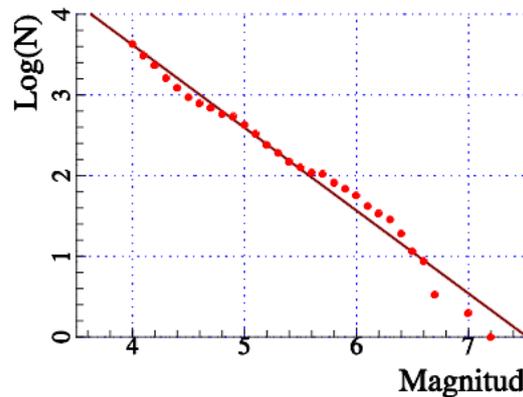


Fig. 4-8 Representación gráfica modelo recurrencia Gutenberg – Richter. Ejemplo del ajuste de la sismicidad de una cierta zona.

La magnitud mínima ( $M_{min}$ ) considerada para el ajuste se ha fijado en  $M_w$  4.0. Para tener en cuenta la incertidumbre de la magnitud máxima ( $M_{max}$ ) de cada zona, se ha considerado una distribución Gaussiana definida por los parámetros:

- $M_1$ : magnitud máxima observada en la zona, que corresponde al umbral inferior de la distribución de  $M_{max}$ .
- $M_2$ : magnitud máxima de corte con la tectónica de la zona, que corresponde al umbral superior de la distribución de  $M_{max}$ .
- $E(m)$ : magnitud máxima esperada, que corresponde a la  $M_{max}$  que se considera más probable.
- $\sigma$ : desviación estándar de la distribución de  $M_{max}$ .

En la Tabla 7 y Tabla 8 se indican los valores de los parámetros obtenidos para caracterizar las recurrencia de las fuentes profundas y superficiales. Éstos parámetros son:

- Profundidad: (Prof) profundidad de los eventos de cada fuente sísmica.
- $E(m)$ : valor probable de la máxima magnitud esperada en la fuente.
- $M_1$ : magnitud máxima observada en la fuente.
- $M_2$ : magnitud máxima que establece la geología de la fuente.
- $a$ : ordenada en el origen de la relación Gutenberg – Richter.
- $b$ : índice de sismicidad, representa la pendiente de la relación Gutenberg – Richter.
- $N(M_{min})$ : indica el número anual de temblores de magnitud mínima  $M_w$  4.0, también conocido como tasa.

Tabla 7. Parámetros sísmicos para la zonificación profunda

Zona	Prof. (Km)	Mag.max.			Parámetros sísmicos	
		E(M)	M1	M2	N(M min)	b
1	50 – 245	6.3	6.0	6.5	2.865	1.340
2	50 – 245	8.6	8.3	8.8	10.966	1.040
3	50 – 224	5.5	5.2	5.7	1.893	1.521
4	50 - 224	7.5	7.3	7.8	5.994	1.135

Tabla 8. Parámetros sísmicos para la zonificación superficial

Zona	Prof (Km)	Mag. max.			Parámetros sísmicos	
		E(M)	M1	M2	N(M min)	b
1	10	7.8	7.5	8.0	15.577	0.971
2	10	8.0	7.7	8.2	3.289	0.843
3	10	7.8	7.5	8.0	2.136	0.795
4	10	6.7	6.4	6.9	0.768	0.645
5	10	7.5	7.3	7.8	7.901	0.870
6	10	7.3	7.1	7.6	2.179	0.744

#### 4.3.2 Método híbrido

Siguiendo la propuesta de este método indicada en el capítulo anterior se ha desarrollado una hoja de cálculo Excel para obtener los parámetros sísmicos y realizar el reparto del momento sísmico y tasa de fallas y zonas. Los parámetros de entrada son los indicados en la Tabla 1, junto con el catálogo sísmico distribuido en las zonas superficiales, que es donde se localizan geográficamente las fallas. Las zonas correspondientes donde hay fallas se indicaron en la Figura 2-2.

#### *Magnitud máxima de fallas*

La magnitud máxima asociada a las fallas se calcula mediante las relaciones empíricas de Wells&Coopersmith (1994), Stirling et al., (2002, 2008) indicadas en las Ecuaciones 19, 20 y 21 respectivamente, que se indican en la siguiente Tabla 9:

Tabla 9. Ecuaciones para cálculo de magnitud máxima

Autor	Ecuación	
Wells & Coppersmith (1994)	Nº 19	$M_w = 5.16 + 1.12 \log L$
Stirling et al. (2002)	Nº 20	$M_w = 5.88 + 0.8 \times \log L$
Stirling et al. (2008)	Nº 21	$M_w = 4.18 + 2/3 \log W + 4/3 \log L$

Con estas relaciones se obtienen los siguientes Mmax para cada falla, incluidos en la Tabla 10:

Tabla 10. Valores de magnitud máxima (Mw) calculada para cada segmento de falla

Segmento fallas	Ecuación 17	Ecuación 18	Ecuación 19	Promedio
Matheux Neiba 1	7.1	6.8	7.4	7.1
Matheux Neiba 2	7.0	6.7	7.2	7.0
Enriquillo este	7.6	7.0	7.9	7.5
Enriquillo oeste	7.6	7.0	7.9	7.5
Septentrional A	7.6	7.0	7.9	7.5
Septentrional B	7.8	7.1	8.1	7.7

### Tasa de momento sísmico y tasa de sismicidad

Como se indicó anteriormente es necesario determinar la tasa de momento sísmico registrada en la región para poder repartirla entre las fuentes contenidas en ella. Para esto se considera solo el rango de magnitudes del catálogo que puede haber sido observado de forma completa. En la Figura 4-9 se indica las regiones 3, 4 y 5 que contiene las fallas.

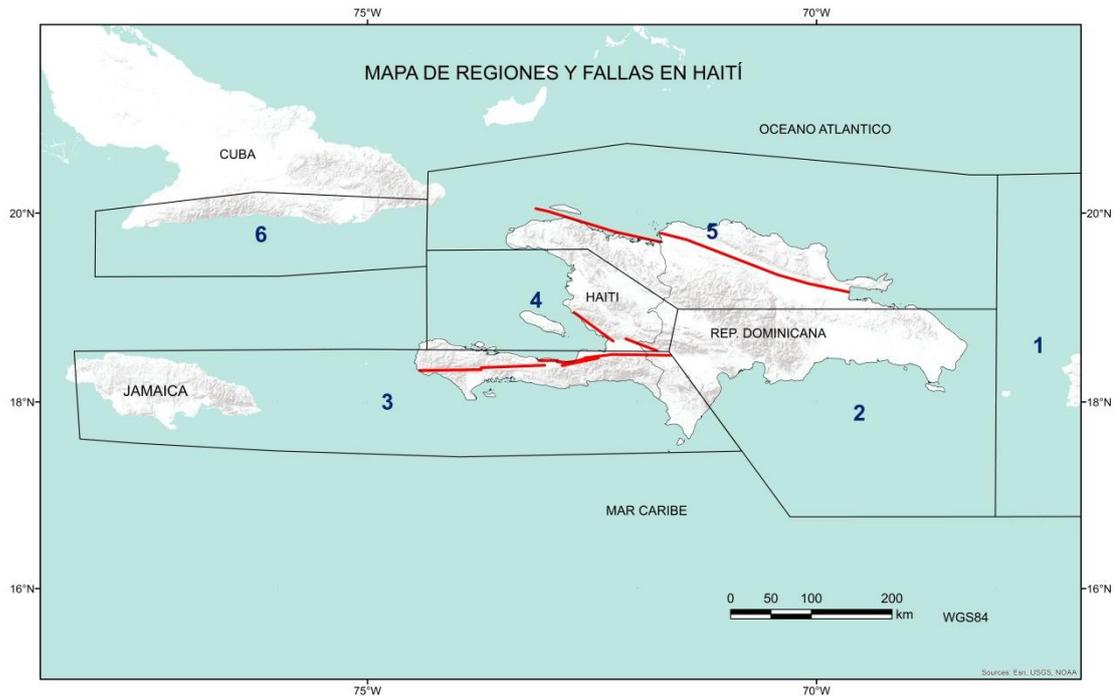


Fig. 4-9 Representación de las regiones 3, 4 y 5 que contiene las fallas Enriquillo, Matheux y Septentrional respectivamente.

El rango de magnitudes en el que se realiza el reparto de potencial sísmico está contenido entre una magnitud mínima (Mmin) de 4.0 y la magnitud máxima (Mmax) de completitud (MMC). Posteriormente se calcula la tasa de sismos en cada región, y los resultados se indican en la Tabla 11.

Tabla 11. Tasas de sismicidad y momento sísmico observadas en cada región

Región	Mmin	Mmax	MMC	Mmin - Mmax		Mmin - MMC		% Mo registrada en periodos completos
				N(4.0)	Mo (nm/año)	N(4.0)	Mo (nm/año)	
3	4.0	7.5	7.5	0.9423	4.07E+23	0.9423	4.07E+23	100
4	4.0	6.4	6.4	0.7964	2.11E+24	0.7964	2.11E+24	100
5	4.0	7.3	7.3	0.7879	2.58E+24	0.7879	2.58E+24	100

Se puede entender que el porcentaje de tasa de momento sísmico en el intervalo de completitud Mmin – MMC equivale al 100% respecto del total de la región.

#### Estimación del parámetro beta de las zonas

El parámetro  $\beta$  de la zona se puede obtener asignando el mismo valor que el  $\beta$  ajustado en la región por medio de la tasa de momento sísmico y de la sismicidad, usando la Ecuación 11 indicada en el Capítulo III, que representa un ajuste del modelo de recurrencia GR- modificado. Los resultados se indican en la Tabla 12.

Tabla 12. Valores de  $\beta$  para cada zona

Zona	Mmcz	$\beta$ región = $\beta$ zona	b
Zona 4	6.4	1.543	0.670
Zona 3	5.5	1.650	0.717
Zona 5	7.3	2.093	0.909

donde:

- Mmcz: magnitud de máxima completitud de la zona.
- Se mide en  $\text{dyn} \times \text{cm/año}$  ó  $\text{N} \times \text{m/año}$ .
- $\beta$ : parámetro relacionado con el valor b de la forma  $\beta = b \times \ln(10)$ .

#### Reparto del potencial sísmico regional entre fallas y zonas

##### Tasa de momento sísmico de las fallas registradas en la región

El potencial sísmico de la falla que se sustrae para obtener el de la zona corresponde al que se obtiene en el intervalo de magnitudes registradas de forma completa en el catálogo (Mmin, MMC), siendo el primer paso identificar qué parte del potencial

sísmico de la falla será utilizado para el reparto de la tasas de momento sísmico. El rango análisis se indica en la siguiente Figura 4-10, que corresponde a lo descrito en la Ecuación 15.

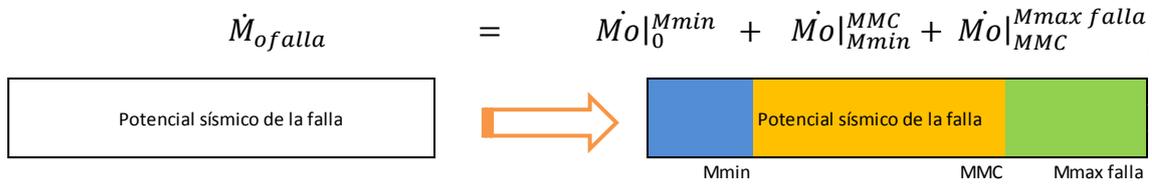


Fig. 4-10 Reparto de la tasa de momento sísmico de la falla

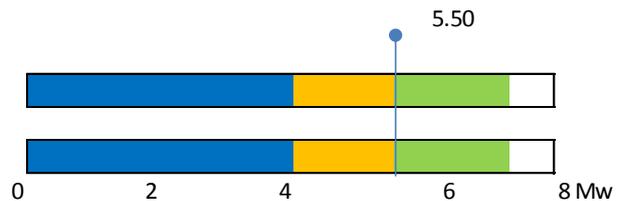
Los colores indicados en la Figura 4-10 corresponden a los rangos de magnitud en cada falla y zona. Así el color azul corresponde al rango desde la magnitud inferior a 4.0, el naranja representa el rango de magnitud del período de observación completo de la región (Mmin - MMC); y en verde la magnitud no observada de forma completa en la región (Mmaxfalla – MMC). Los segmentos de fallas utilizados en el cálculo se resumen a continuación, indicando para cada caso los diferentes rangos de magnitud que se han identificado en cada una.

### Región 3

En esta región se localiza la falla de Enriquillo que está formada por siete segmentos, que como se anotó anteriormente, han sido agrupados en dos segmentos este y oeste. El valor de magnitud ha sido definido en la Tabla 10 en Mw 7.5. Los valores de magnitudes definidas para esta zona se indican en la Tabla 13.

Tabla 13. Segmentos de fallas en la Región 3

	Mw max	Mmobs
Enriquillo Este	7.5	5.5
Enriquillo Oeste	7.5	5.5

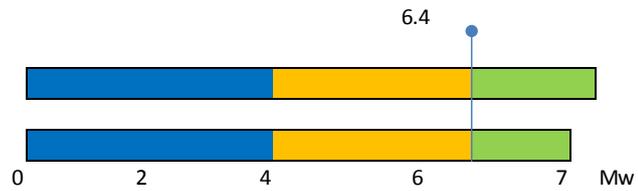


### Región 4

Esta falla está compuesta por dos segmentos de Matheux Neiba. El valor de magnitud máxima ha sido calculado en 7.1 para el segmento Matheux Neiba A y en 7.0 para el Matheux Neiba B. Los valores se indican en la Tabla 14.

Tabla 14. Segmentos de fallas en la Región 4

	Mw max	Mmobs
Mathuex Neiba A	7.1	6.4
Mathuex Neiba B	7	6.4

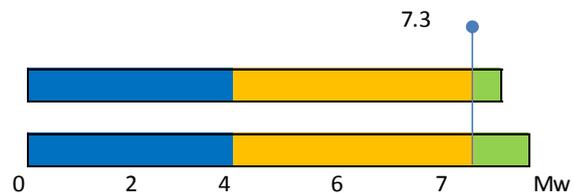


### Región 5

Corresponde al sistema de fallas Septentrional A y B, donde se ha obtenido una magnitud máxima de 7.5 y 7.7 respectivamente. La magnitud observada es de 7.30 para ambos segmentos. En la Tabla 15 se indican los valores obtenidos.

Tabla 15. Segmentos de fallas en la Región 5

	Mw max	Mmobs
Septentrional A	7.5	7.3
Septentrional B	7.7	7.3



### Modelo de recurrencia y valor de beta de la falla

Se asigna a las fallas un modelo de recurrencia GR modificado, con la consideración de que todas las fallas contenidas en una misma región tendrán igual valor de  $\beta$ . Mediante la Ecuación 18 se calcula el valor de  $\beta$  de la falla, donde este parámetro es la única incógnita. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Valor de  $\beta$  de las fallas

Zona	$\beta$ Fallas
Zona 3	1.659
Zona 4	1.555
Zona 5	2.077

### Reparto del potencial sísmico

Identificados los rangos de magnitud para los que se han calculado los valores de la tasa y momento sísmico, éstos son repartidos en la región entre fallas y zonas, lo que correspondería a la franja de color naranja. En la Tabla 17 se muestra los valores obtenidos para las zonas y fallas.

Tabla 17. Reparto del potencial sísmico en las fallas y zonas en cada región

Región	Fuente	Nmin (Mmin-MMC)	Mo (Mmin-MMC)	% aporte falla a la región
3	Enriquillo este	0.8084	1.419E+23	33%
	Enriquillo oeste	0.7962	1.398E+23	32%
	Total fallas	1.6047	2.817E+23	65%
	Zona 3	0.8626	1.516E+23	35%
	Total región	2.4673	4.333E+23	
4	Matheux Neiba A	0.1152	1.165E+23	12%
	Matheux Neiba B	0.1078	1.089E+23	11%
	Total fallas	0.2230	2.254E+23	23%
	Zona 4	0.7360	7.450E+23	77%
	Total región	0.9590	9.704E+23	
5	Septentrional oeste	3.9447	6.745E+24	42%
	Septentrional este	4.7033	8.043E+24	50%
	Total fallas	8.6480	1.479E+25	92%
	Zona 5	0.7096	1.214E+24	8%
	Total región	9.3576	1.600E+25	

En la Tabla 17 se puede observar que en la región 3 y 5 el aporte de las fallas a la región es superior al de la zona (65% y 92% respectivamente), lo que supone que la mayoría del potencial sísmico de la región ha sido modelizado por medio de fallas independientes. Este resultado es debido posiblemente a la influencia del valor de tasa de deslizamiento (slip rate) con valores altos para las fallas incluidas en esas regiones, mientras que en la región 4 el valor del aporte del potencial sísmico asociado a las fallas es inferior al asociado a la zona.

Para aquellas regiones en las que no se cuenta con fallas, el cálculo de los parámetros se realiza utilizando el modelo de recurrencia G-R, donde el valor obtenido de la tasa sísmica es repartida entre toda la zona. En la Tabla 8 se obtuvieron estos valores correspondiendo a las zonas 1, 2 y 6 superficiales.

#### 4.4 Selección de modelos de atenuación

De acuerdo a la bibliografía consultada, hasta la fecha no se han desarrollado ecuaciones espectrales de atenuación del movimiento fuerte para Haití. Por esta razón en este estudio se utilizan las ecuaciones de atenuación elegidas para el cálculo de la peligrosidad sísmica de América Central (Benito et al., 2012), dado que ambas regiones tienen contextos tectónicos afines, al pertenecer ambas a la Placa Caribe. La selección tiene correspondencia con la zonificación propuesta anteriormente, es decir modelos para la zonificación superficial y modelos para la zonificación profunda. En la Tabla 18 se indican los modelos seleccionados.

Tabla 18. Modelos predicción movimiento fuerte del suelo adoptados para Haití

Modelo	Tipo fuente	Parámetros	Origen de datos	Tipo mag	Rango M	Tipo de R	Rango R (km)
Kanno et al (2006)	Intraplaca, cortical	M, R, tipo suelo	América central	Mw	4.0 – 9.0	Rrup	0 – 200
Zhao et al (2006)	Intraplaca, cortical	M, R, H, tipo fuente, mecanismo, tipo suelo	Japón	Mw	5.0 – 8.2	Rrup	10 – 300
Lin and Lee (2008)	Interplaca, intraplaca	M, R, H, tipo terremoto, tipo suelo	Taiwan	Mw	5.3 – 8.1	D hip	15 – 630
Boore and Atkinson (2008)	Cortical	M, R, tipo de suelo, mecanismo	Mundial	Mw	5.0 – 8.0	Rjb	< 200

M: magnitud, R: distancia en km, H: profundidad

En la Figura 4-11 se representan los modelos de atenuación para la zonificación superficial; y en la Figura 4-12 se representa los modelos para la zonificación profunda.

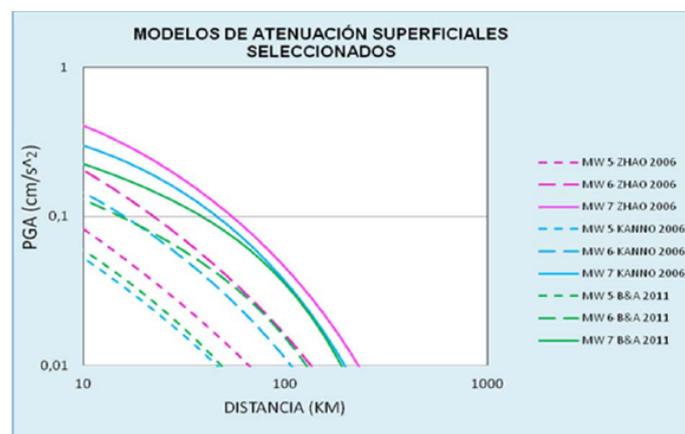


Fig. 4-11 Modelos de atenuación para fuentes sísmicas corticales

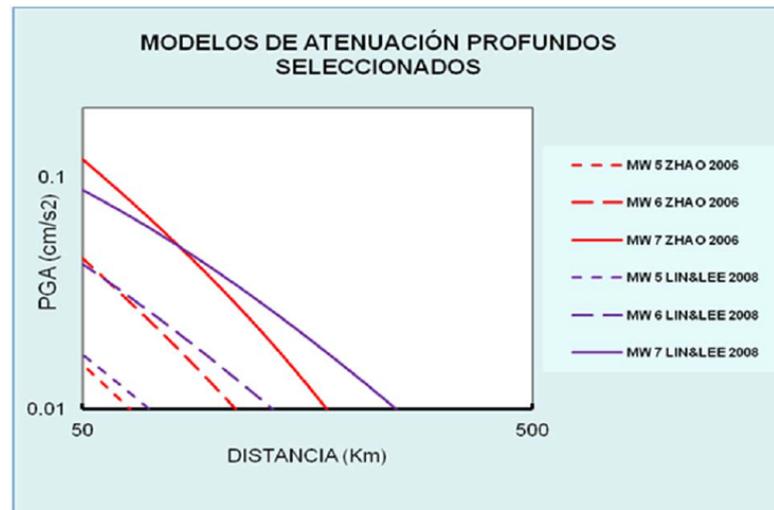


Fig. 4-12 Modelos de atenuación para fuentes sísmicas de subducción

#### 4.5 Árbol lógico

En este estudio se ha formulado un árbol lógico, con un único nodo, para tener en cuenta la incertidumbre epistémica inherente a los modelos de atenuación. En este nodo se contemplan diferentes opciones, cada una de ellas combinando un modelo de zonas corticales con otro para zonas de subducción. Los modelos que se combinan son los previamente seleccionados, incluidos en la Tabla 8. Resultan así 6 combinaciones, que se estructuran en otras tantas ramas, como se indica a continuación.

- Rama 1
  - Zonas corticales con modelo de atenuación Kanno et al., 2006
  - Zonas de subducción intraplaca con modelo de atenuación de Zhao et al., 2006
- Rama 2
  - Zonas corticales con modelo de atenuación Kanno et al., 2006
  - Zonas de subducción interplaca con modelo de atenuación de Lin and Lee 2008.
- Rama 3
  - Zonas corticales con modelo de atenuación de Zhao et al., 2006
  - Zonas de subducción intraplaca con modelo de atenuación de Zhao et al., 2006.
- Rama 4
  - Zonas corticales con modelo de atenuación de Zhao et al., 2006.
  - Zonas de subducción interplaca con atenuación de Lin and Lee 2008.
- Rama 5
  - Zonas corticales con modelo de atenuación de Boore and Atkinson 2008.
  - Zonas de subducción intraplaca con atenuación de Zhao et al., 2006.

- Rama 6
  - Zonas corticales con modelo de atenuación de Boore and Atkinson 2008.
  - Zonas de subducción interplaca con atenuación de Lin and Lee 2008.

Este método permite cuantificar la correspondiente incertidumbre epistémica por medio de la asignación de pesos a las ramas estructuradas. En la Tabla 19 se indican los pesos asignados a cada rama, de acuerdo a juicio de expertos.

Tabla 19. Pesos asignados al modelo de árbol lógico

Rama	Peso
1	0.15
2	0.15
3	0.15
4	0.15
5	0.20
6	0.20
Total	1.00

El peso asignado se da en función de la fiabilidad de los modelos, dando un mayor peso a las ramas 5 y 6, por ser el modelo de Boore y Atkinson de la Nueva Generación de modelos de atenuación.

#### 4.6 Especificaciones de cálculo

Los cálculos de peligrosidad se han realizado según la estructura del árbol lógico presentado anteriormente, en términos de PGA y SA(T) para T= 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 y 2.0 segundos, en puntos de una malla cubriendo el área de estudio con puntos equiespaciados 0.1 grados de longitud y latitud, formando una matriz de cálculo de 75 columnas por 30 filas. El área de cálculo se ha definido con un origen en -75° longitud y 17.3° en latitud. El programa de cálculo utilizado ha sido CRISISI 2014. Los resultados obtenidos se presentan en el siguiente capítulo.

## CAPITULO V

# RESULTADOS Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Como resultados finales del estudio realizado, se han obtenido mapas de peligrosidad sísmica cubriendo todo el territorio de La Española, para 5 parámetros de movimiento y tres períodos de retorno. Además en Puerto Príncipe se han obtenido resultados puntuales, representando las curvas de peligrosidad completas y los espectros de peligrosidad uniforme UHS para los tres períodos de retorno considerados.

### 5.1 Mapas de peligrosidad obtenidos

Los mapas que se presentan contienen la totalidad de la Isla La Española en vista de la influencia de las fallas en toda la región y no solamente en Haití. Así los resultados podrán compararse con los anteriores realizados en toda la isla.

#### 5.1.1 Método zonificado

Se presentan los mapas de peligrosidad obtenidos, en primer lugar, mediante el método clásico zonificado. Los resultados que se muestran son:

- Mapas en términos de PGA, para los períodos de retorno (PR) de 475, 975 y 2475 años. Figuras 5-1, 5-2 y 5-3 respectivamente.
- Mapas en términos de SA(T) para  $T = 0.2, 0.5, 1$  y 2 segundos para PR de 475 años. Figuras 5-4, 5-5, 5-6, 5-7 respectivamente.
- Mapas en términos de SA(T) para  $T = 0.2$  y 1 segundos para PR de 975 años. Figuras 5-8 y 5-9.
- Mapas de PR de 2475 años en términos de SA(T) para  $T = 0.2$ , y 1 segundos. Figuras 5-10 y 5-11.

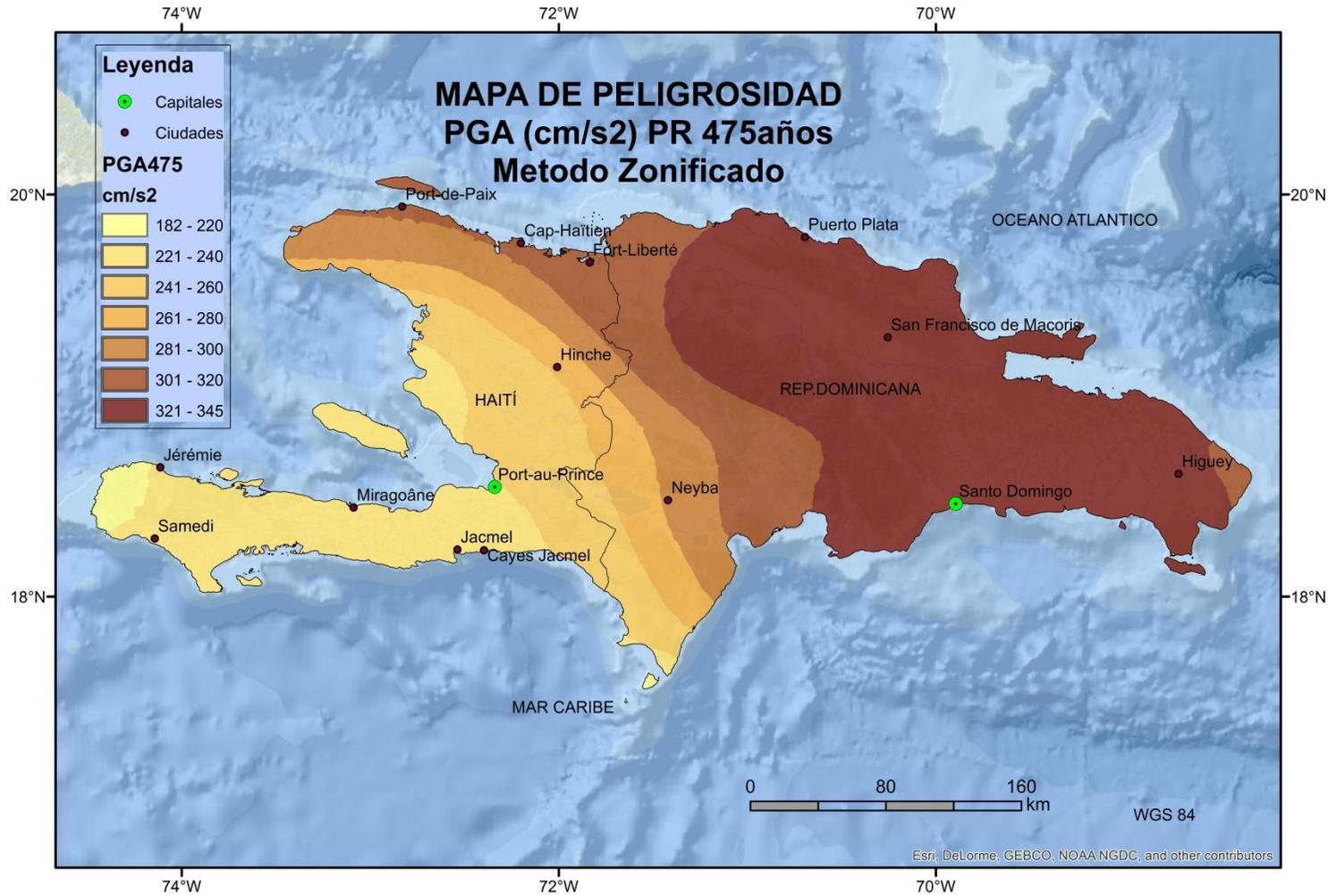


Fig. 5-1. Mapa de Peligrosidad sísmica en términos de PGA, PR 475 años.

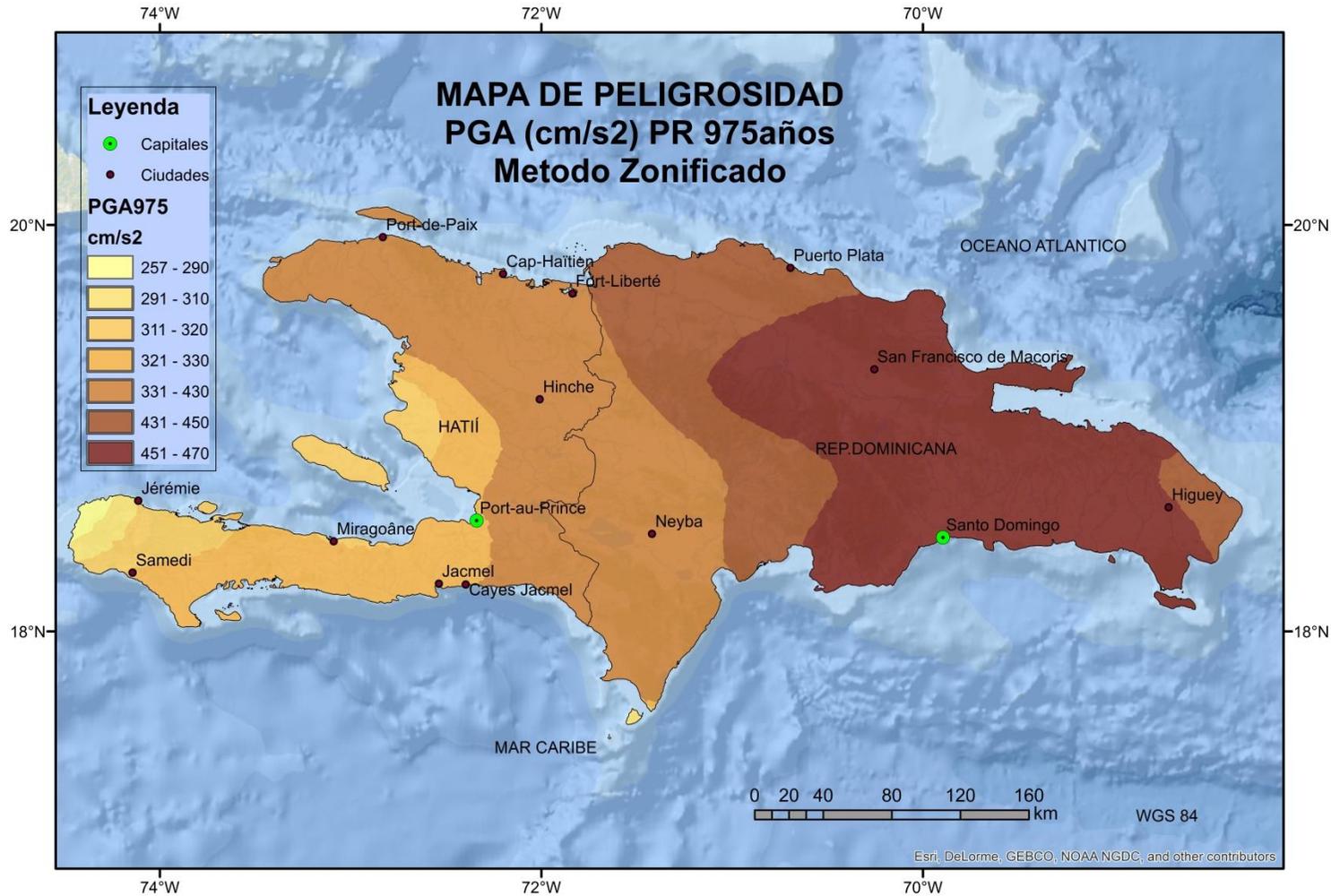


Fig. 5-2. Mapa de Peligrosidad sísmica en términos de PGA, PR 975 años.

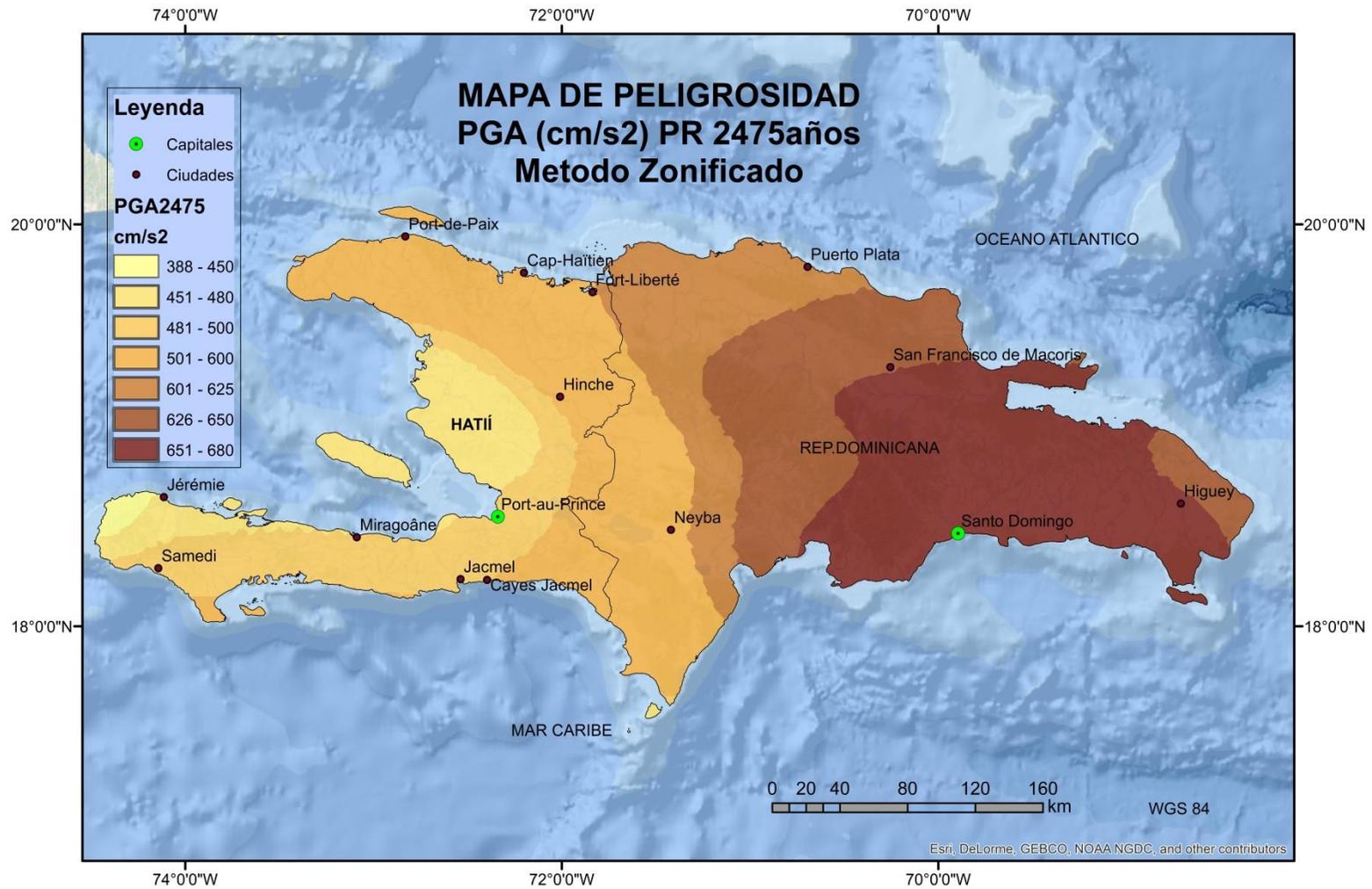


Fig. 5-3. Mapa de Peligrosidad sísmica en términos de PGA, PR 2475 años.

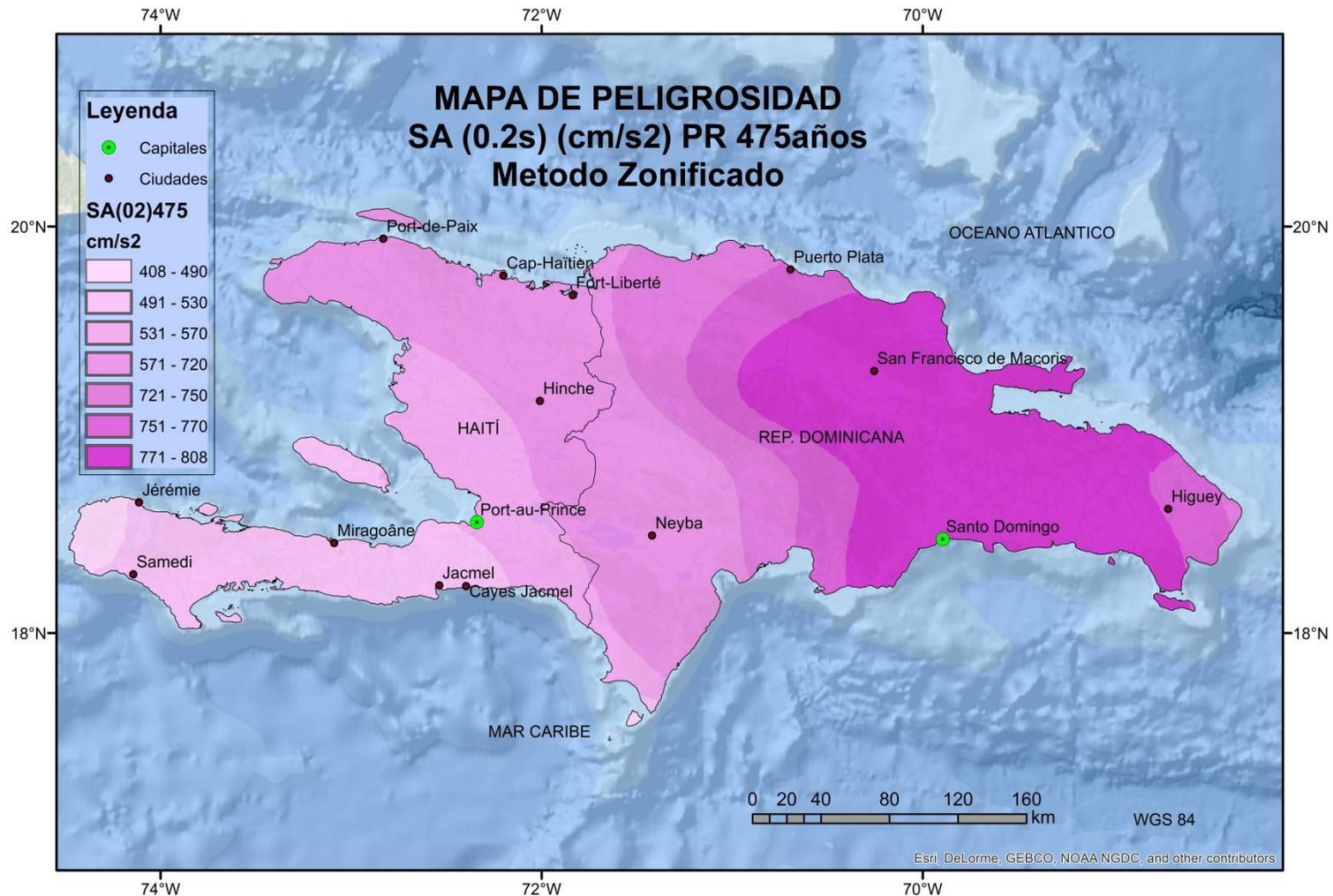


Fig. 5-4. Mapa de Peligrosidad sísmica en términos de SA(0.2s), PR 475 años.



Fig.5-5. Mapa de Peligrosidad sísmica en términos de SA(0.5s), PR 475años.



Fig.5-6. Mapa de Peligrosidad sísmica en términos de SA(1.0s), PR 475 años.



Fig.5-7. Mapa de Peligrosidad sísmica en términos de SA(2.0s), PR 475años

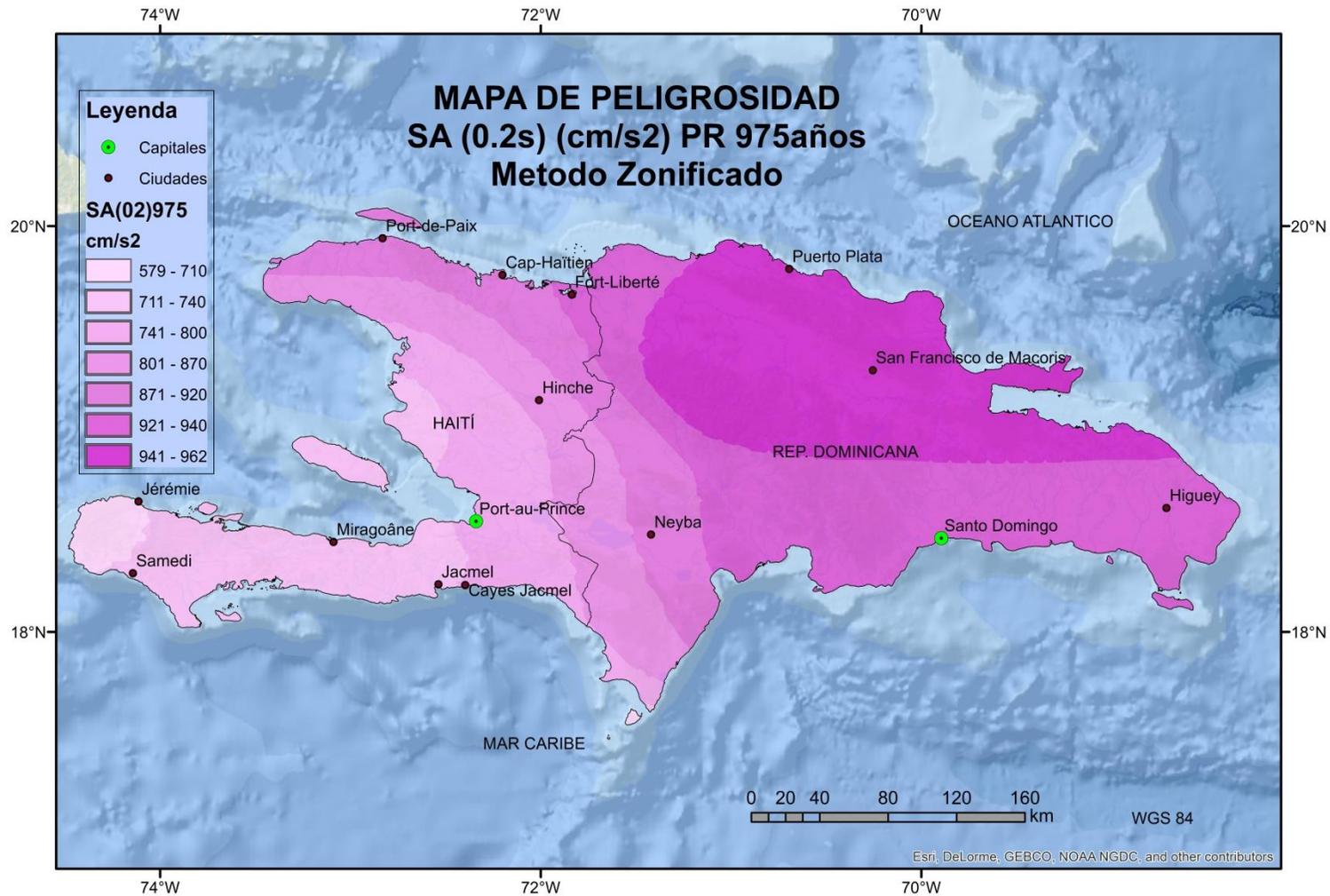


Fig. 5-8. Mapa de Peligrosidad sísmica en términos de SA(0.2s), PR 975años



Fig. 5-9. Mapa de Peligrosidad sísmica en términos de SA(1.0s), PR 975años

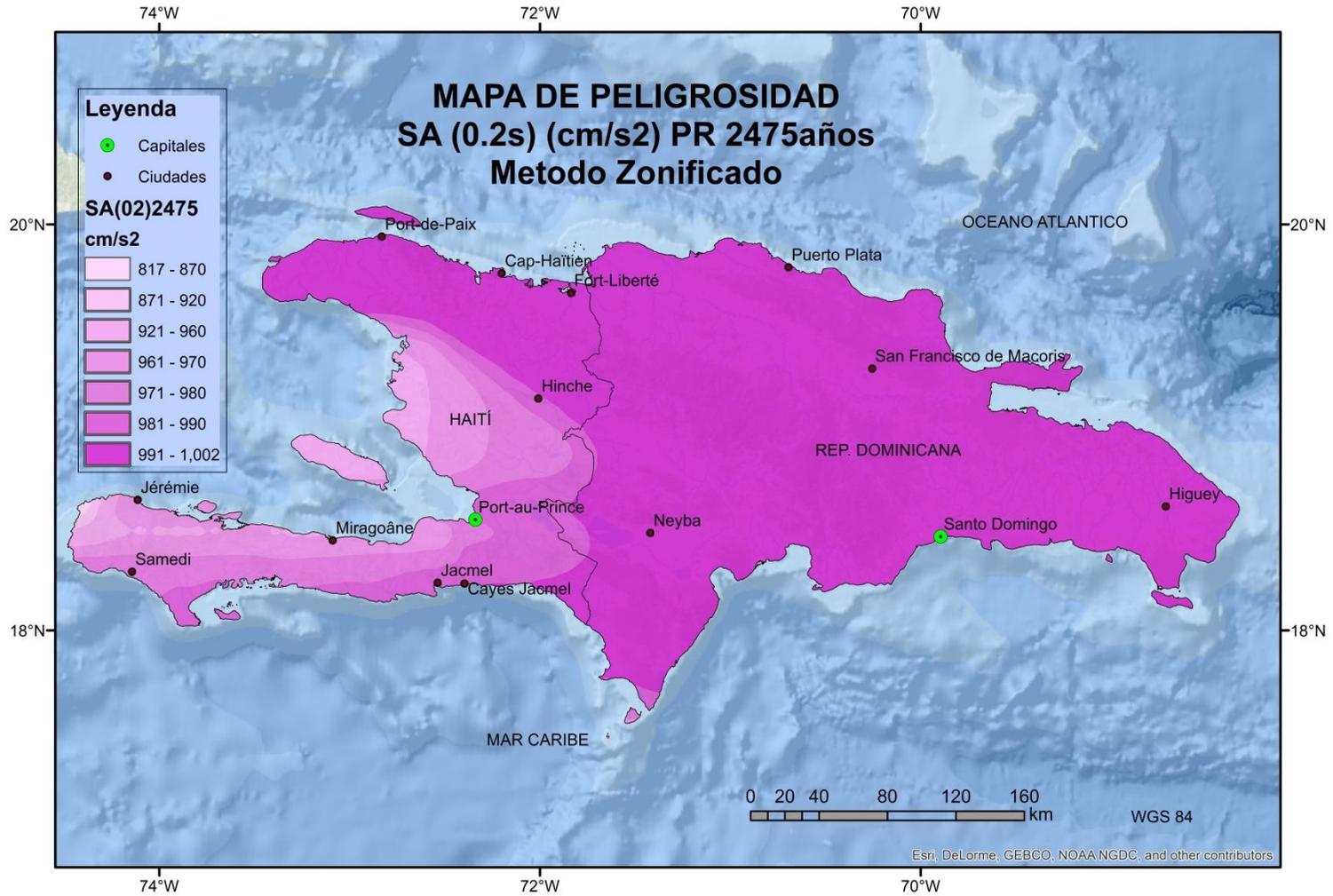


Fig.5-10 Mapa de Peligrosidad sísmica en términos de SA(0.2s). PR 2475 años



Fig.5-11 Mapa de Peligrosidad sísmica en términos de SA(1.0s). PR 2475 años

### 5.1.2 Método híbrido

Con el método híbrido se han obtenido, al igual que con el zonificado, mapas de peligrosidad de PR de 475, 975 y 2475 para PGA y SA (0.1, 0.2, 0.5, 1 y 2). Los resultados que se muestran son:

- Mapas en términos de PGA, para los períodos de retorno (PR) de 475, 975 y 2475 años. Figuras 5-12, 5-13 y 5-14 respectivamente.
- Mapas en términos de SA(T) para T = 0.2, 0.5, 1 y 2 segundos para PR de 475 años. Figuras 5-15, 5-16, 5-17, 5-18 respectivamente.
- Mapas en términos de SA(T) para T = 0.2 y 1 segundos para PR de 975 años. Figuras 5-19 y 5-20.
- Mapas de PR de 2475 años en términos de SA(T) para T = 0.2, y 1 segundos. Figuras 5-21 y 5-22.

En los mapas se han incluido las fallas para observar la actividad de éstas en la zona de influencia, y poder realizar una comprobación visual respecto del modelo zonificado.

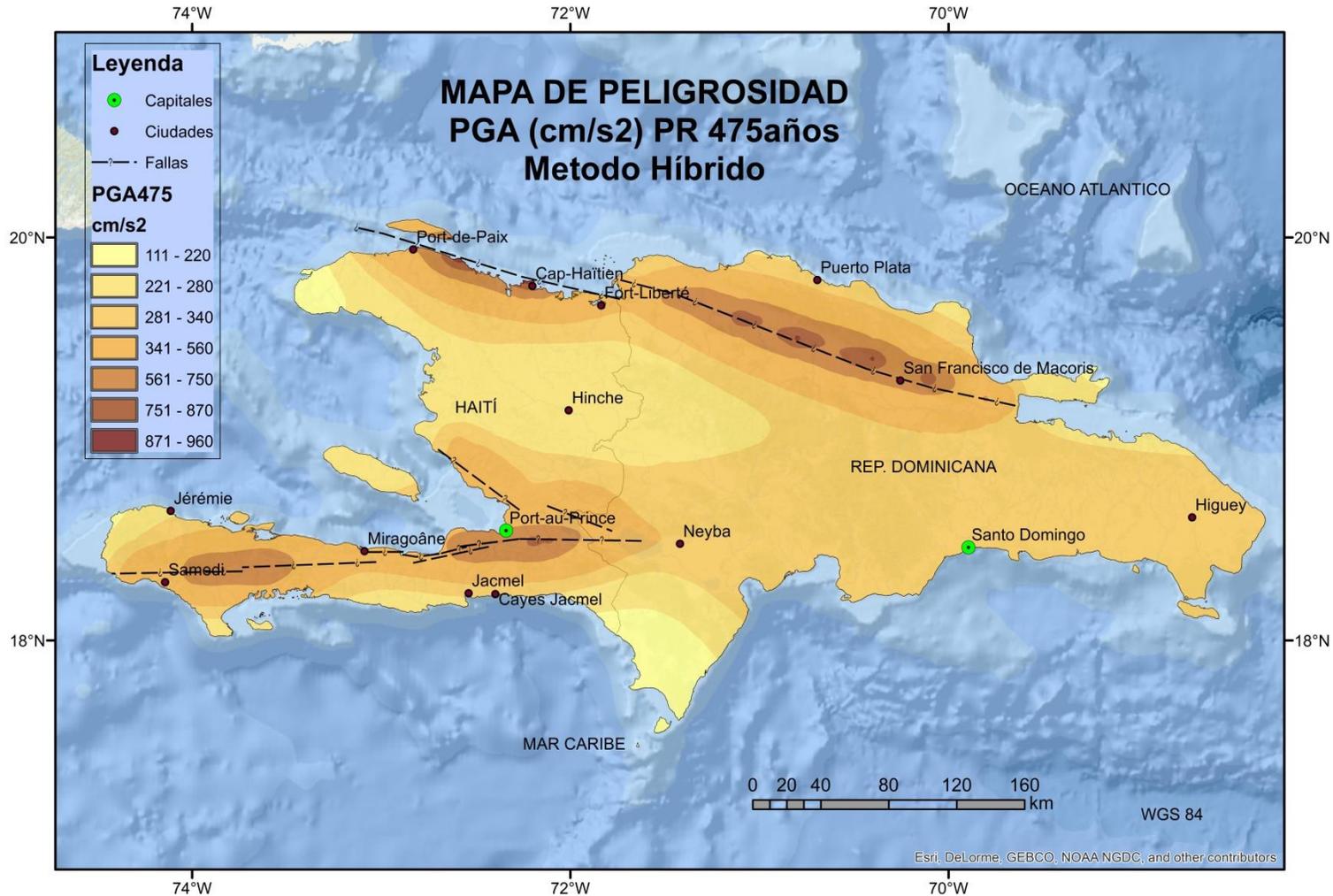


Fig. 5-12 Mapa de Peligrosidad sísmica en términos de PGA. PR475años

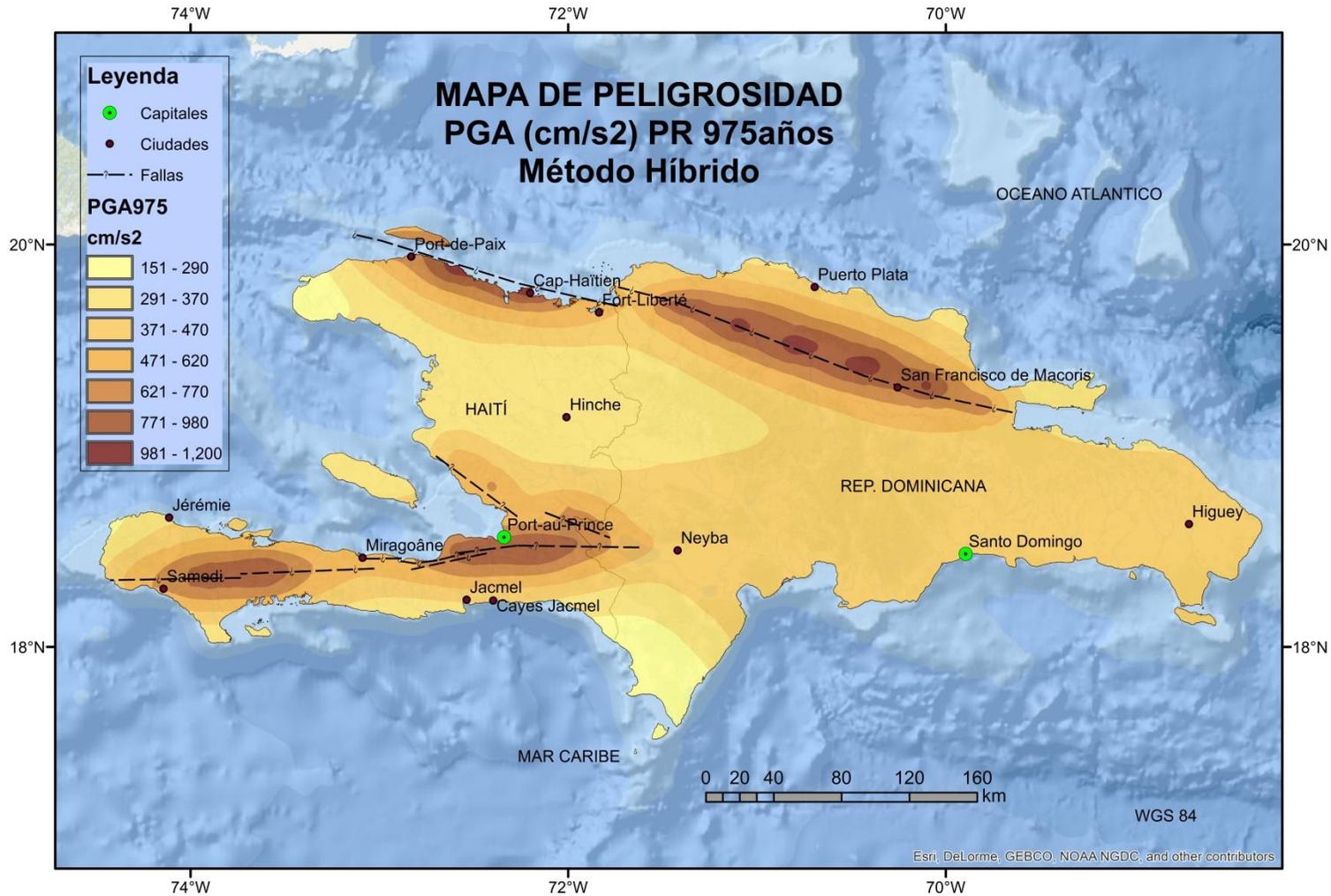


Fig. 5-13 Mapa de Peligrosidad sísmica en términos de PGA. PR975años

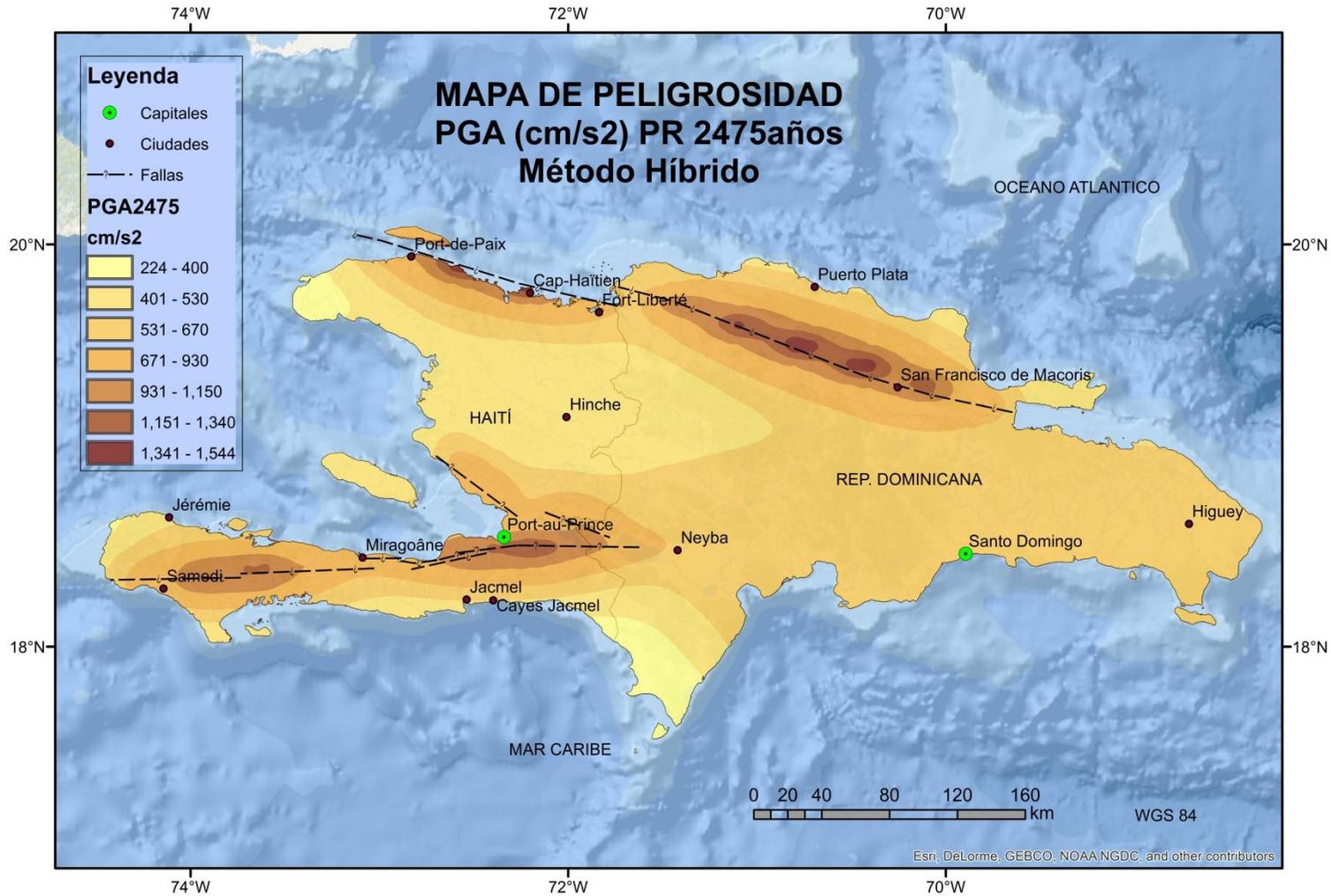


Fig. 5-14 Mapa de Peligrosidad sísmica en términos de PGA. PR2475 años

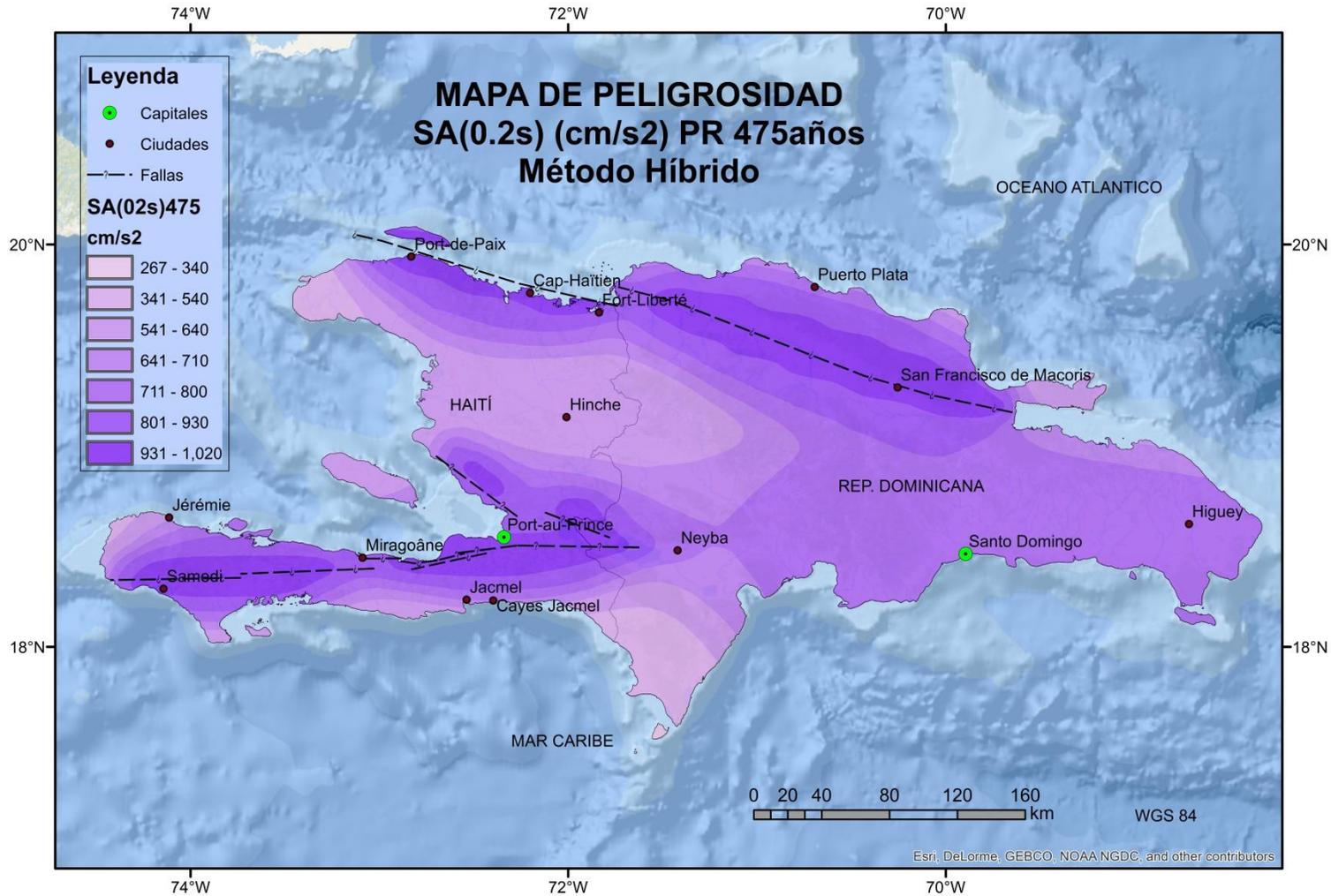


Fig. 5-15 Mapa de Peligrosidad sísmica en términos de SA(0.2s). PR475años

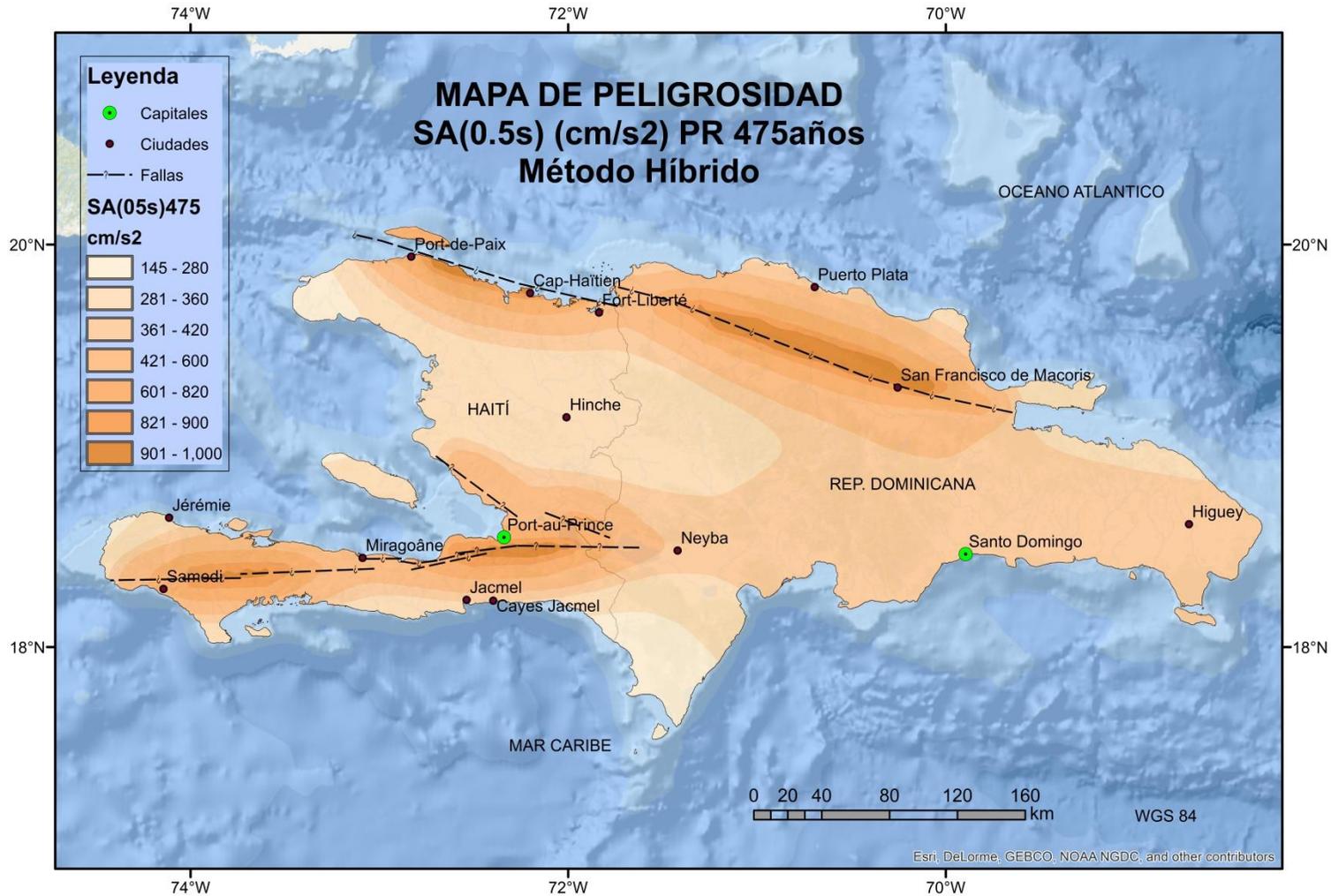


Fig. 5-16 Mapa de Peligrosidad sísmica en términos de SA(0.5s). PR475años

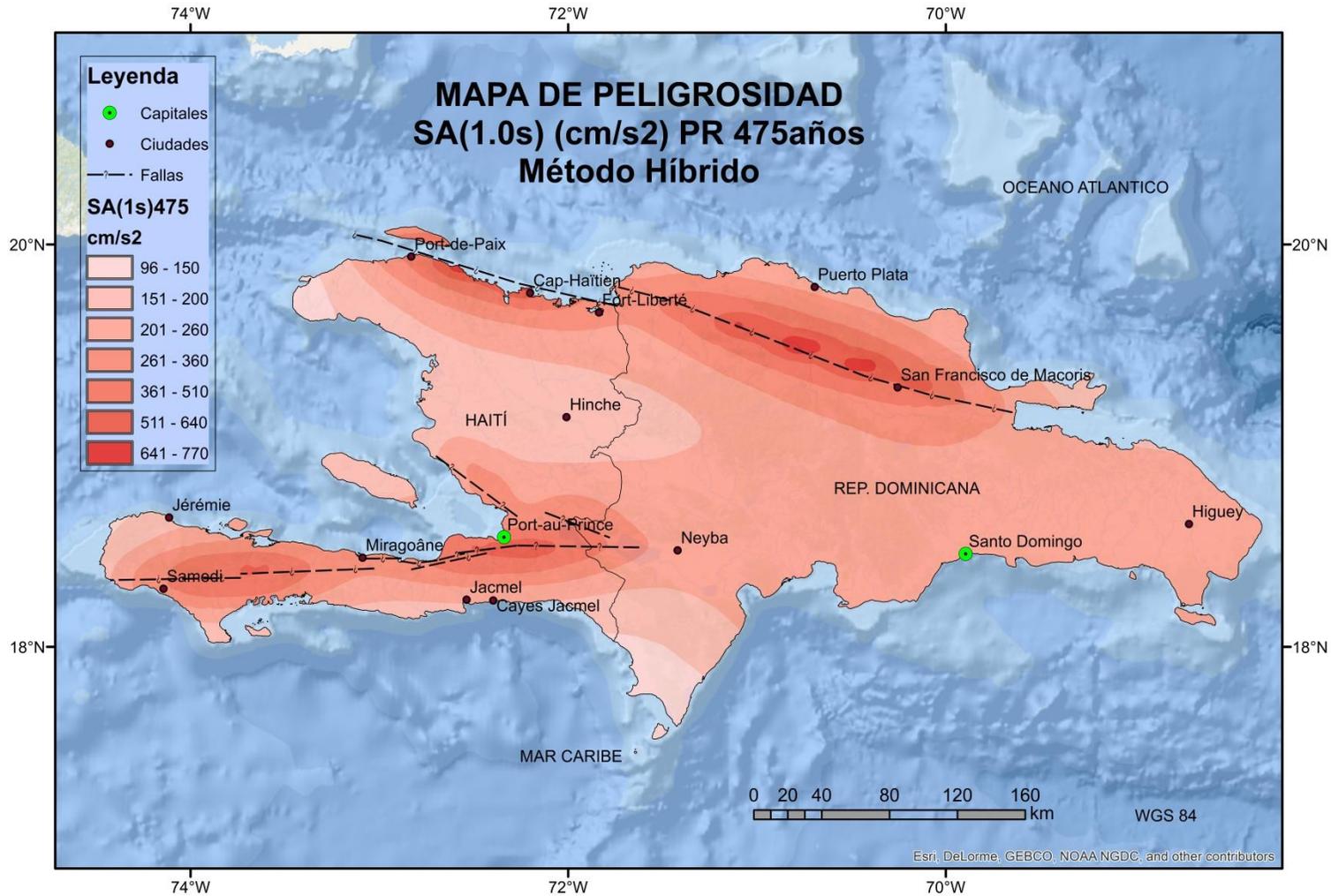


Fig. 5-17 Mapa de Peligrosidad sísmica en términos de SA(1.0s). PR475 años

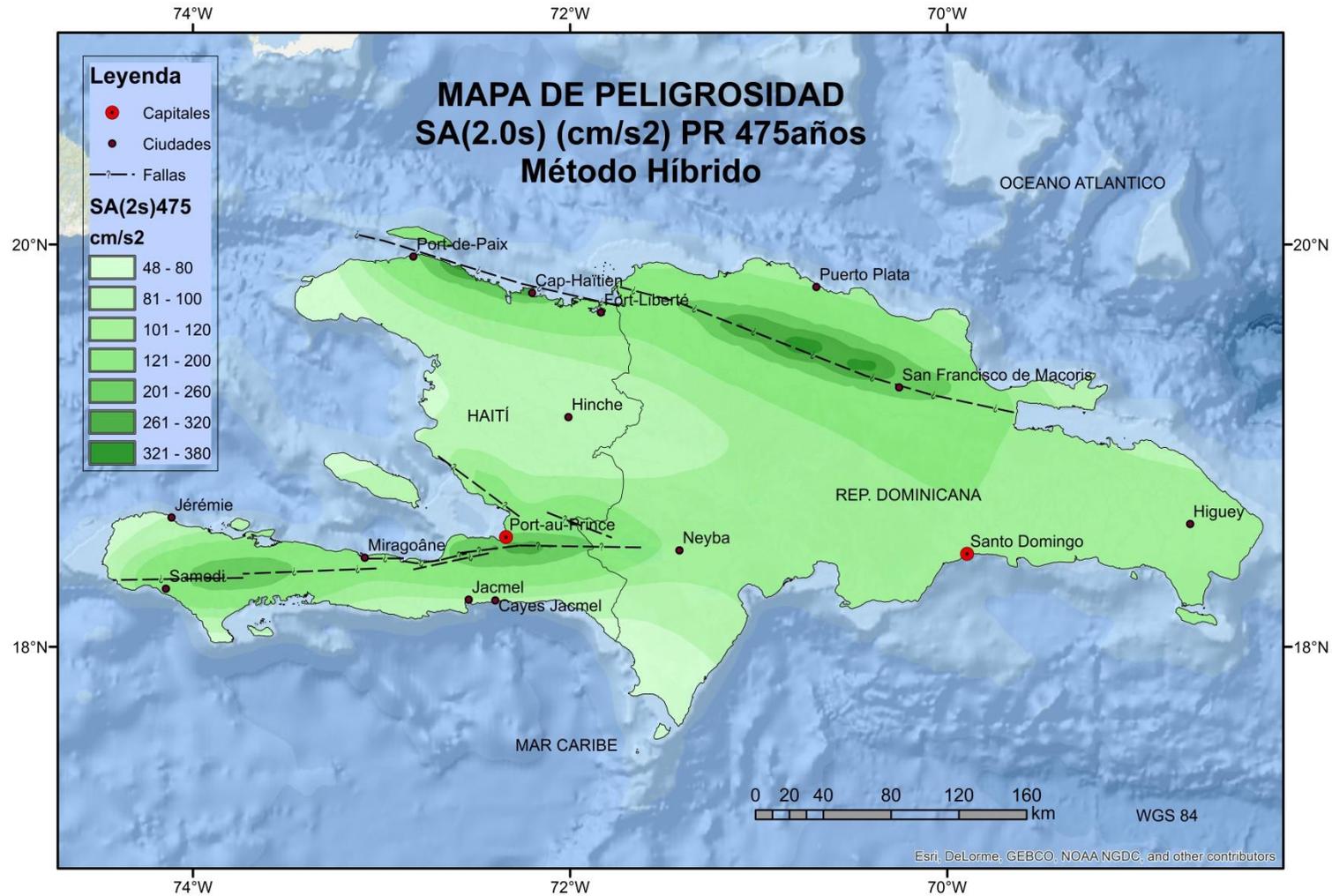


Fig. 5-18 Mapa de Peligrosidad sísmica en términos de SA(2.0s). PR475años

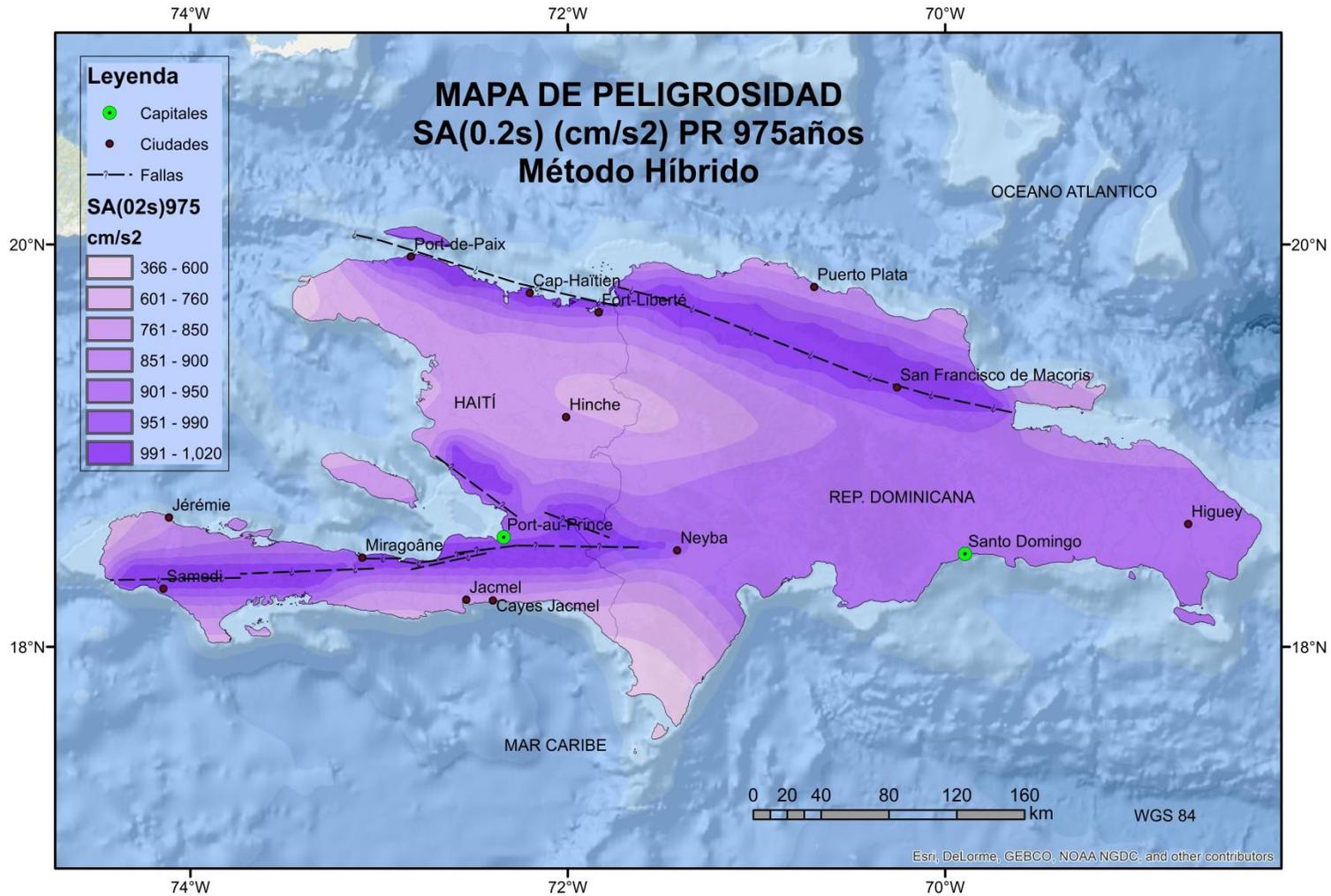


Fig. 5-19 Mapa de Peligrosidad sísmica en términos de SA(0.2s). PR975años

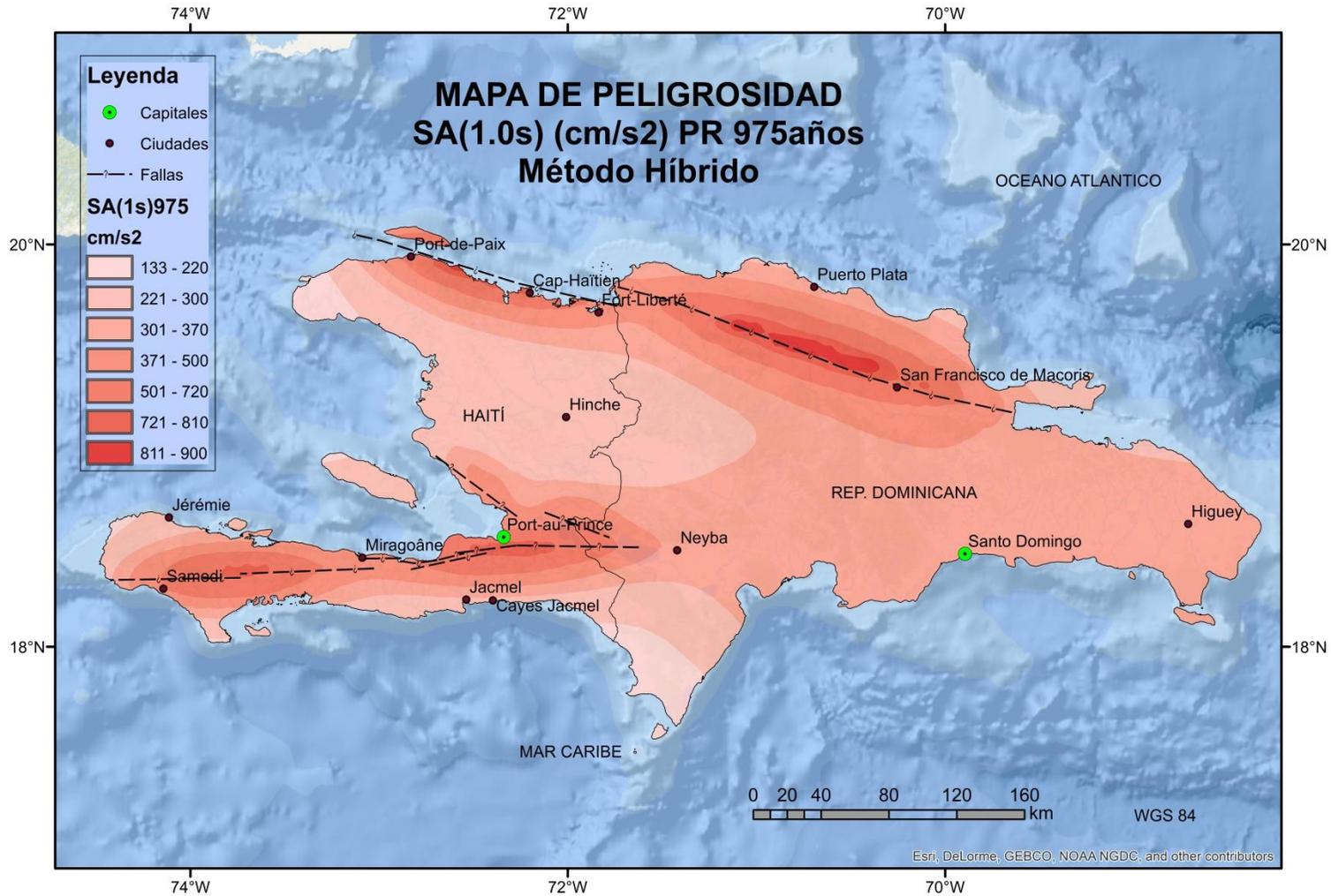


Fig. 5-20 Mapa de Peligrosidad sísmica en términos de SA(1.0s). PR975 años

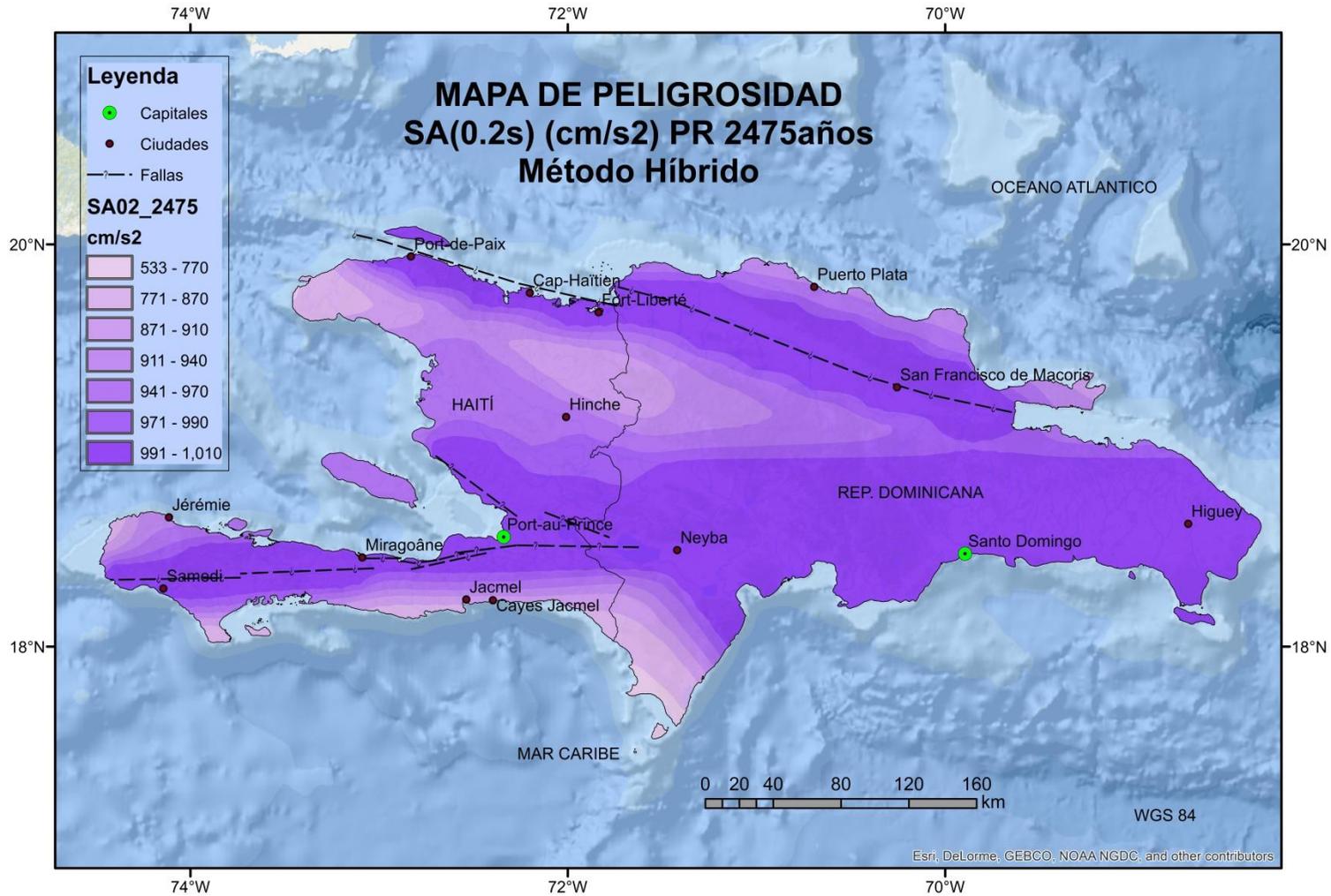


Fig. 5-21 Mapa de Peligrosidad sísmica en términos de SA(0.2). PR2475años

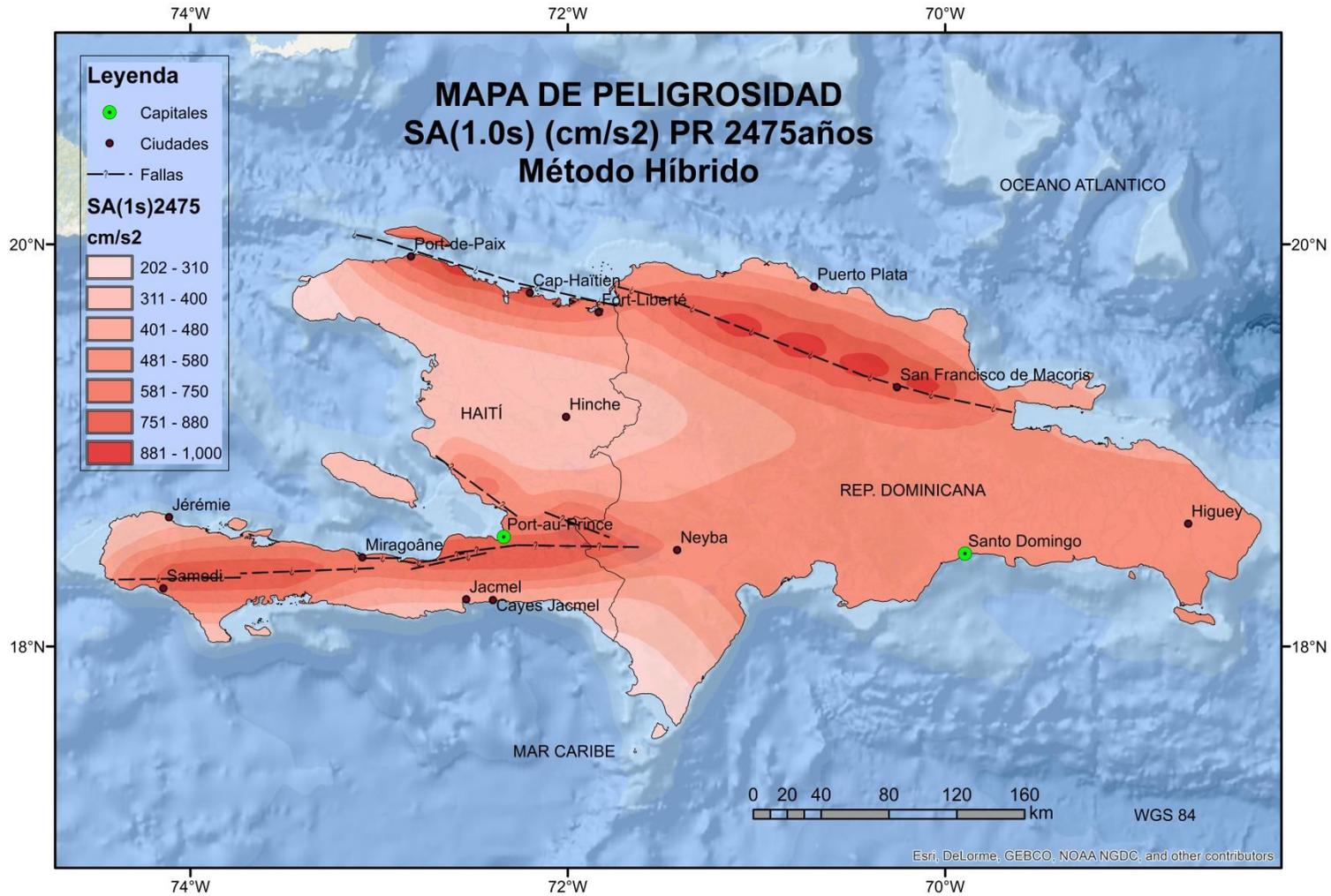


Fig. 5-22 Mapa de Peligrosidad sísmica en términos de SA(1.0s). PR2475años

## 5.2 Resultados puntuales en Puerto Príncipe

Puerto Príncipe es la capital de Haití y una de las principales ciudades de este país. Además está ubicada en la traza de falla de Enriquillo por lo que está afectada de alta peligrosidad sísmica. Por este motivo se han obtenido los resultados puntuales que se presentan en este apartado: curvas de peligrosidad y espectros de peligrosidad uniforme UHS.

### 5.2.1 Curvas de peligrosidad sísmica

Las curvas de peligrosidad para Puerto Príncipe obtenidas por el método híbrido se presentan en la Figura 5-23.

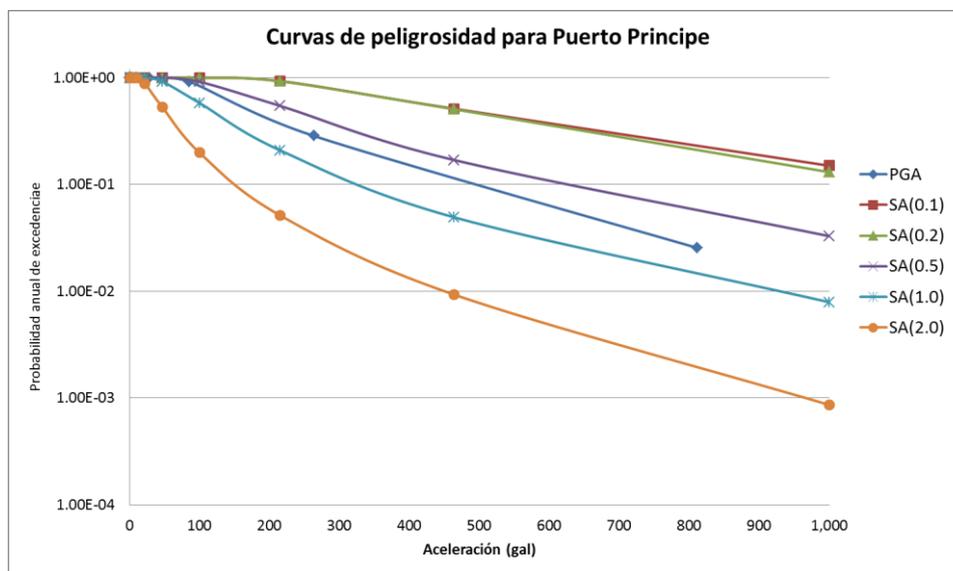


Fig. 5-23 Curvas peligrosidad para Puerto Príncipe. Método híbrido

El resultado obtenido por el método zonificado se presenta en la Figura 5-24.

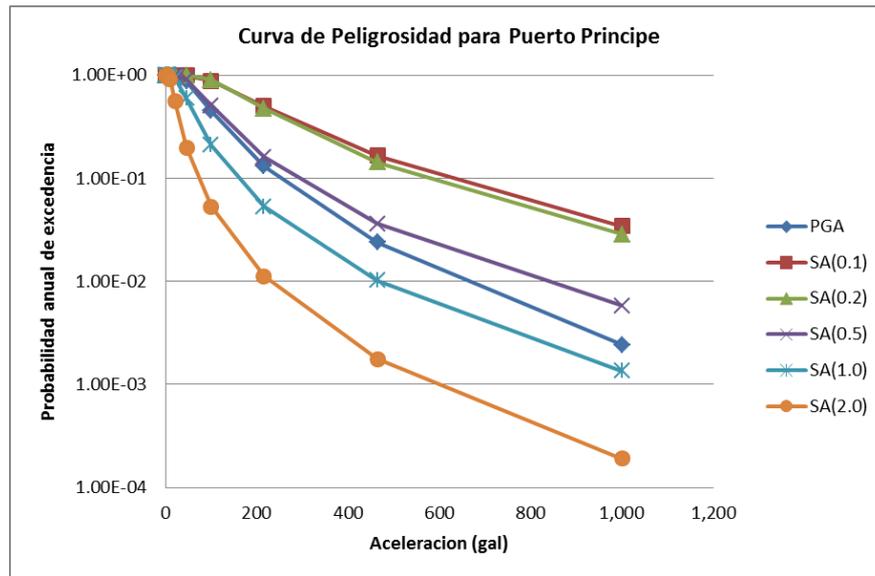


Fig. 5.24 Curvas peligrosidad para Puerto Príncipe. Método zonificado

### 5.2.2 Espectros de peligrosidad uniforme

En la Figura 5-25 se presenta los espectros UHS obtenidos para un período de retorno de 475 años, tanto por el método híbrido como por el zonificado.

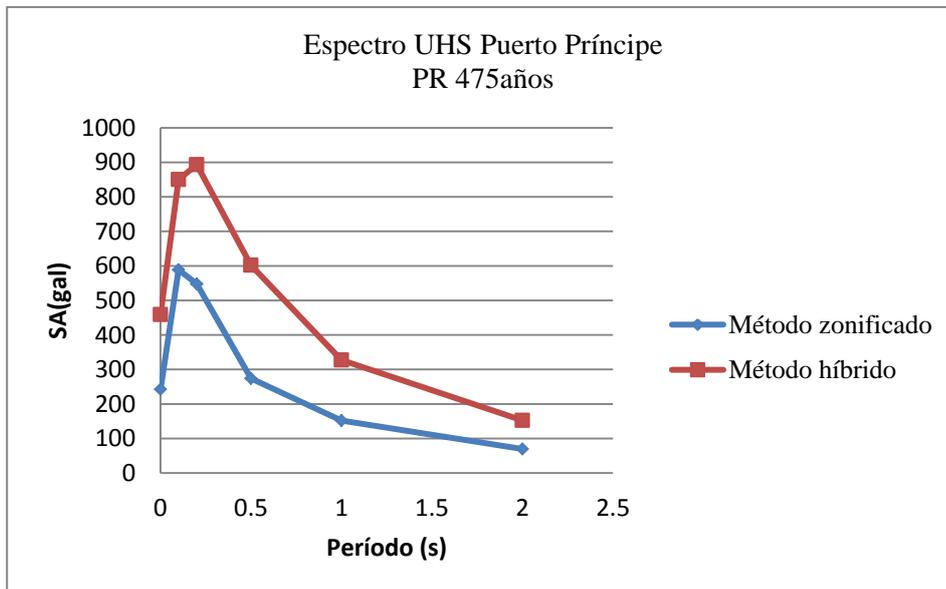


Fig. 5-25 Espectro UHS para Puerto Príncipe, PR 475 años

Como se aprecia en la figura el valor del espectro es mayor en el método híbrido considerando el aporte de las fallas. En la Figura 5-26 se indica el espectro UHS obtenido para Puerto Príncipe en el año 2012 por el grupo GIIS.

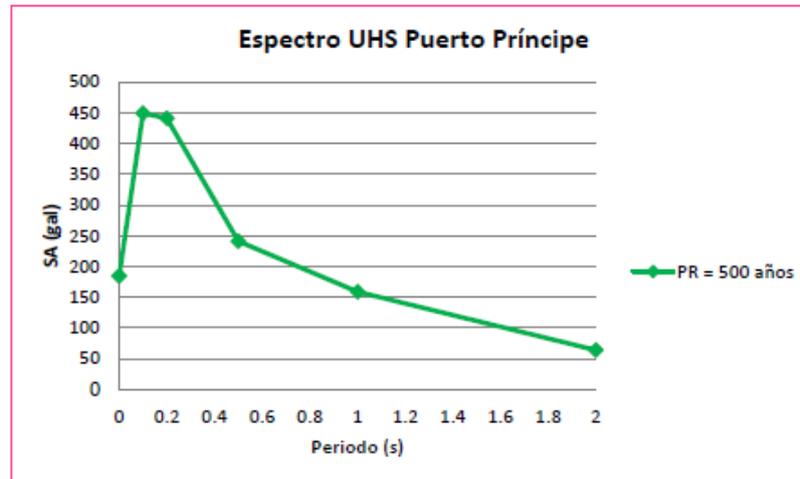


Fig.5-26 Espectro UHS para Puerto Príncipe obtenido en 2012.PR500años

En comparación con los métodos utilizados en este estudio se denota un aumento en SA, debido al incremento de la sismicidad por la actualización del catálogo y a los modelos de atenuación escogidos. Estos valores son de gran importancia en el diseño de estructuras sismo-resistentes. La finalidad del espectro es proporcionar los valores de aceleraciones espectrales correspondientes al período de retorno determinado con el que se diseñará la estructura de la edificación.

### 5.3 Interpretación de resultados y análisis de sensibilidad

#### 5.3.1 Método zonificado

Al considerar únicamente las zonas en el cálculo de la peligrosidad, sin la influencia de las fallas, los resultados indican que los valores máximos se localizan hacia la zona sur-este de la Isla la Española, posiblemente influenciado por la mayor cantidad de eventos que se registran en esa zona, tanto en las zonas superficiales como en profundas, como se indica en la Figura 5-27. A su vez, en la zona Este de la Isla converge la actividad de los dos regímenes tectónicos: cortical y de subducción, lo que explica la mayor sismicidad y peligrosidad respecto a la zona oeste.

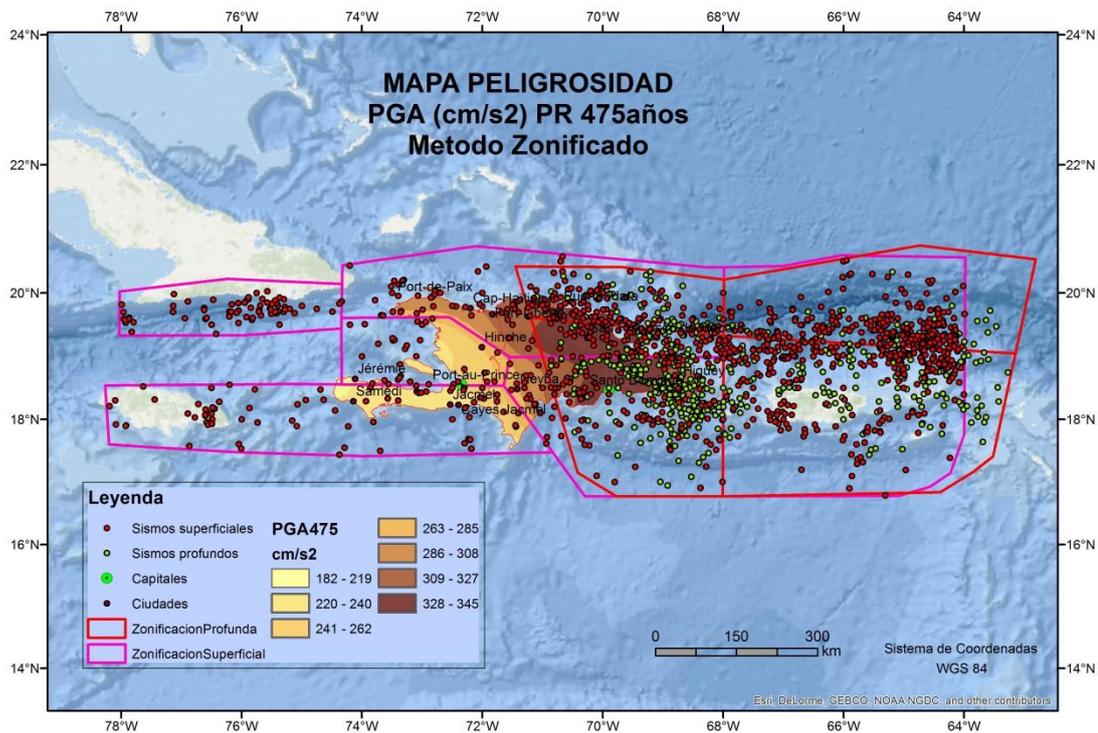


Fig. 5-27 Mapa peligrosidad PGA 475 años y sismicidad registrada período 1551-2014, y la zonificación superficial y profunda.

Los máximos de PGA alcanzan los 345 gal para un período de retorno de 475 años, 470 gal para 975 años y 679 gal para 2475 años de retorno. Los valores más bajos de PGA se localizan hacia la zona oeste de la Falla Enriquillo, segmento Les Cayeux, lo que puede ser contrastado con los resultados del método híbrido.

La morfología de los mapas se centra, al igual que PGA, en la zona donde se traslapan las zonas superficial (2,5) y profunda (1,2) decreciendo hacia la zona de la península (población de Samedi).

Como se puede notar en los mapas, éstos siguen la misma morfología que los anteriores, donde su valor máximo parte de la zona oriental de la Isla hacia la occidental. Los datos tienen mucha proximidad respecto de la media en el caso de SA(0.2s) a diferencia del resultado para 975 años.

### 5.3.2 Método híbrido

Al considerar las fallas como zonas sismogénicas independientes en la peligrosidad, se puede constatar la importancia que tiene su modelación en este tipo de análisis. Los resultados muestran clara influencia en el comportamiento sísmico de la región y por ende en el resultado de la peligrosidad. A continuación se indican los rangos de valores de los mapas presentados en el ítem anterior.

Para el caso de PGA con periodo de retorno de 475 años, se muestra la siguiente Figura 5-28 con la sismicidad que se ha registrado para este estudio. En comparación con el método zonificado, se puede ver la influencia de la sismicidad que se asocia a las fallas ubicadas en la zona superficial 3,4 y 5.

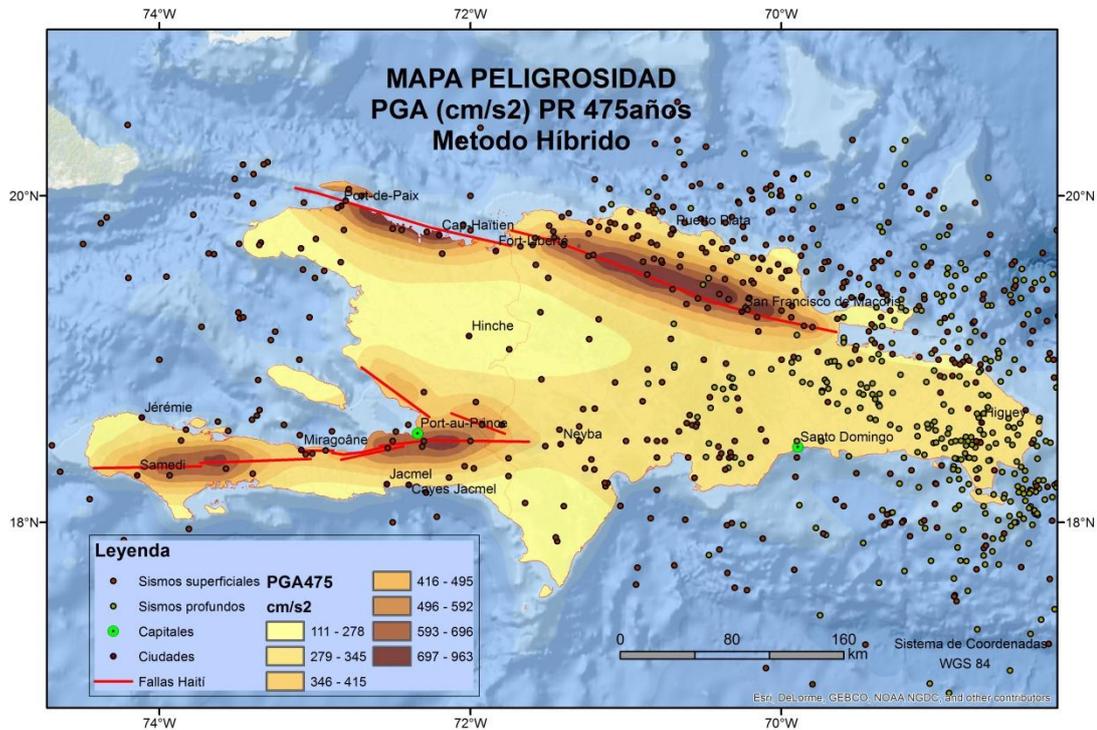


Fig. 5-28 Mapa peligrosidad PGA475 años y sismicidad registrada

Como se puede observar en la anterior Figura, los valores altos de PGA PR 475 años se obtienen justamente sobre las trazas de las fallas; mientras que en la zona central, donde no se cuenta con información de fallas, el valor de PGA resulta menor. Si el valor máximo de PGA obtenido es de 963 gal cercano a la Falla Septentrional, hacia la Falla Matheux se obtiene valores de 460 gal. En la traza de la Falla Enriquillo, el valor de PGA alcanza los 760 gal en el segmento oriental y 730 gal en el segmento occidental. Este valor contrasta con el obtenido en el método zonificado, donde en esta zona el valor de PGA obtenido fue de 240 gal.

En el caso de SA(0.2s) PR 475 años los mayores valores obtenidos sobre las fallas son: 992 gal en la Falla Septentrional, mientras que el valor obtenido es de 980 gal en la falla Matheux, y 1018 gal en la zona oeste de la falla Enriquillo.

Respecto a los mapas presentados para PR 975 años, se debe indicar que para los tres grupos de fallas considerados el valor de peligrosidad alcanza los 1000 gal. Observando el mapa se puede dar cuenta que para este período de retorno la distribución de la peligrosidad se mantiene homogénea en todo el territorio.

Para el período de retorno de 2475 años, los valores presentados son muy semejantes, sin embargo la distribución de la peligrosidad se denota más uniforme en respectivo de 0.2s. Los valores altos corresponden a la zona de las fallas, donde se detecta el valor más alto de 1000 gal.

### 5.3.3 Comparativa de resultados

Se ha realizado la comparación entre los resultados de peligrosidad obtenidos mediante los métodos zonificado e híbrido con reparto de tasas, para tener una referencia de la influencia de las fallas. A continuación se indican los valores para PGA y SA(0.2s) como más representativos, resultantes de la diferencia entre el método híbrido y el zonificado.

Observando la Figura 5-29, para el caso de PGA PR 475 años, se puede determinar que los valores mínimos en el método zonificado son mayores a los del método híbrido, especialmente en las zonas donde no hay fallas. Los valores altos corresponden a los obtenidos en las zonas de fallas por el método híbrido, dado que el aporte de las fallas en este método es muy importante. En las Figuras 5-30 y 5-31 se muestran los resultados para PGA PR 975 y 2475 años.

Para el caso de SA(0.2s) los resultados muestran valores muy altos en toda la isla con respecto de los del método zonificado.

Para PR 475 y PR 975 años calculados con el método híbrido se denota una clara influencia de las fallas Matheux y Enriquillo, donde la diferencia alcanza los 500 gal y 315 gal, respectivamente. En el centro de la Isla los valores comparados con el método zonificado son menores, es decir donde no hay presencia de fallas. Para PR 2475 los valores obtenidos con el método híbrido son mayores en todo el territorio. Como muestra se exponen las Figuras 5-32 y 5-33 para el caso de SA(0.2s) PR 475 años y SA(1.0s) PR 475 años.

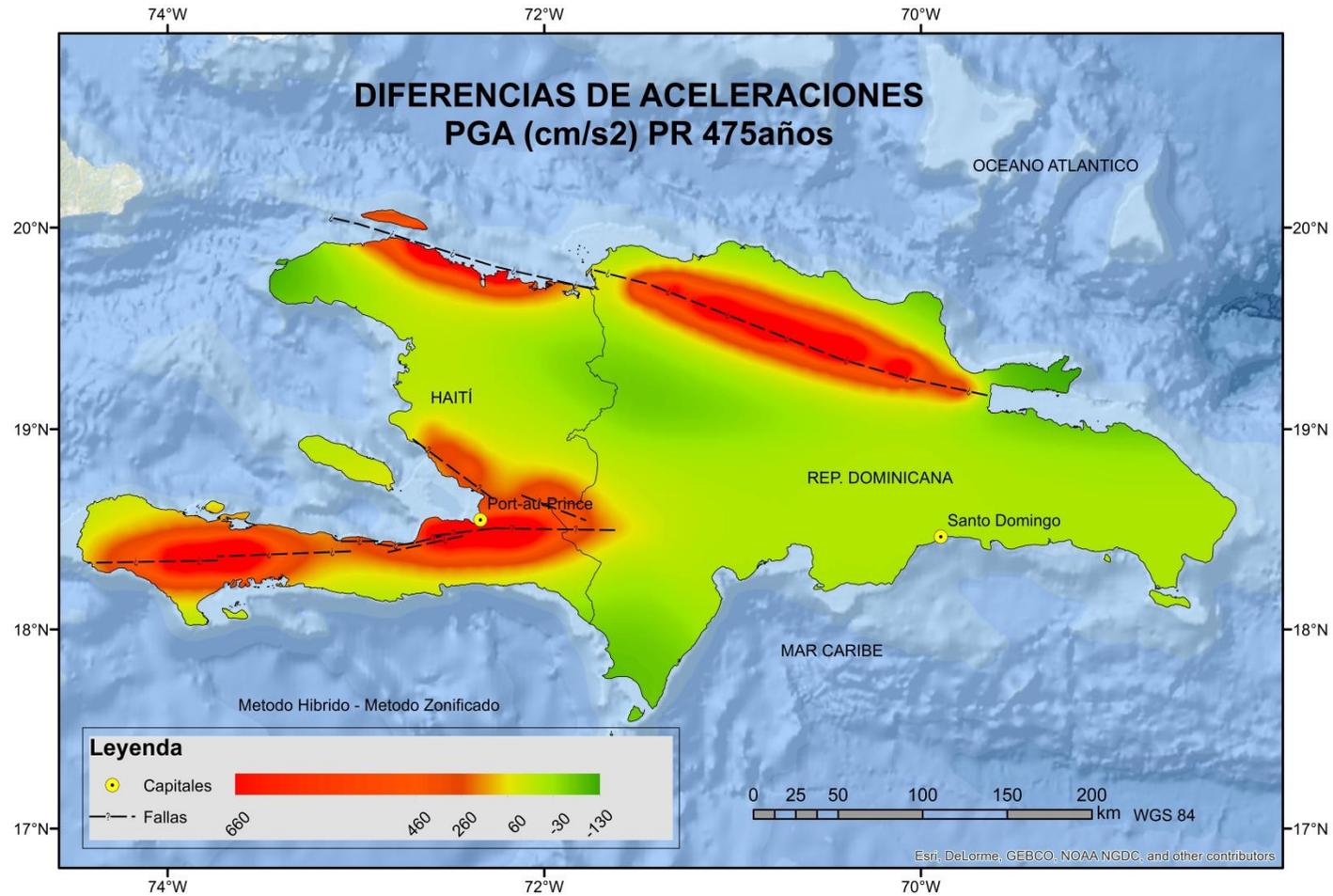


Fig. 5-29. Diferencias para PGA entre Método híbrido y zonificado. PGA 475años

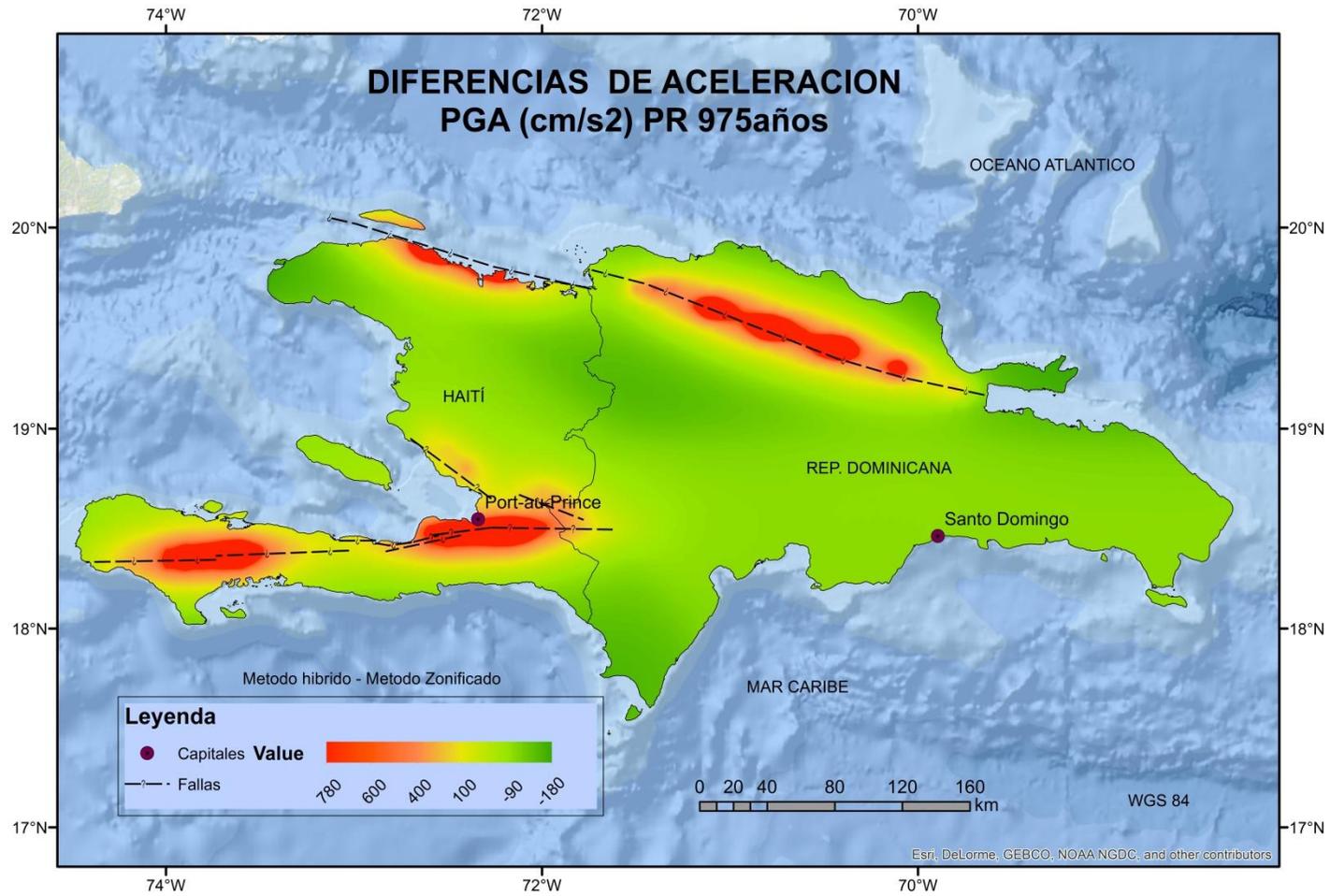


Fig. 5-30. Diferencias para PGA entre Método híbrido y zonificado. PGA 975años

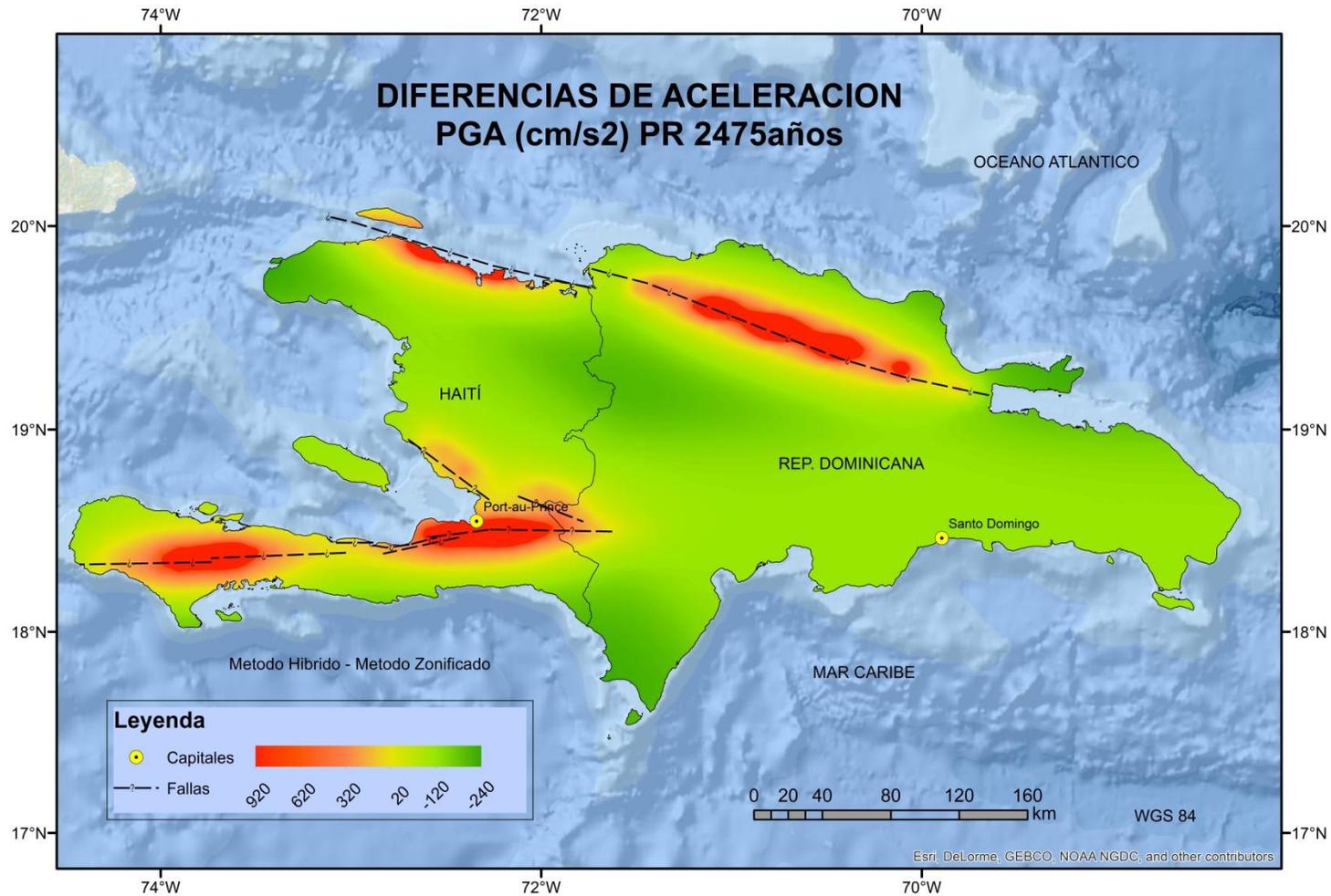


Fig. 5-31 Diferencias para PGA entre método híbrido y método zonificado. PGA2475

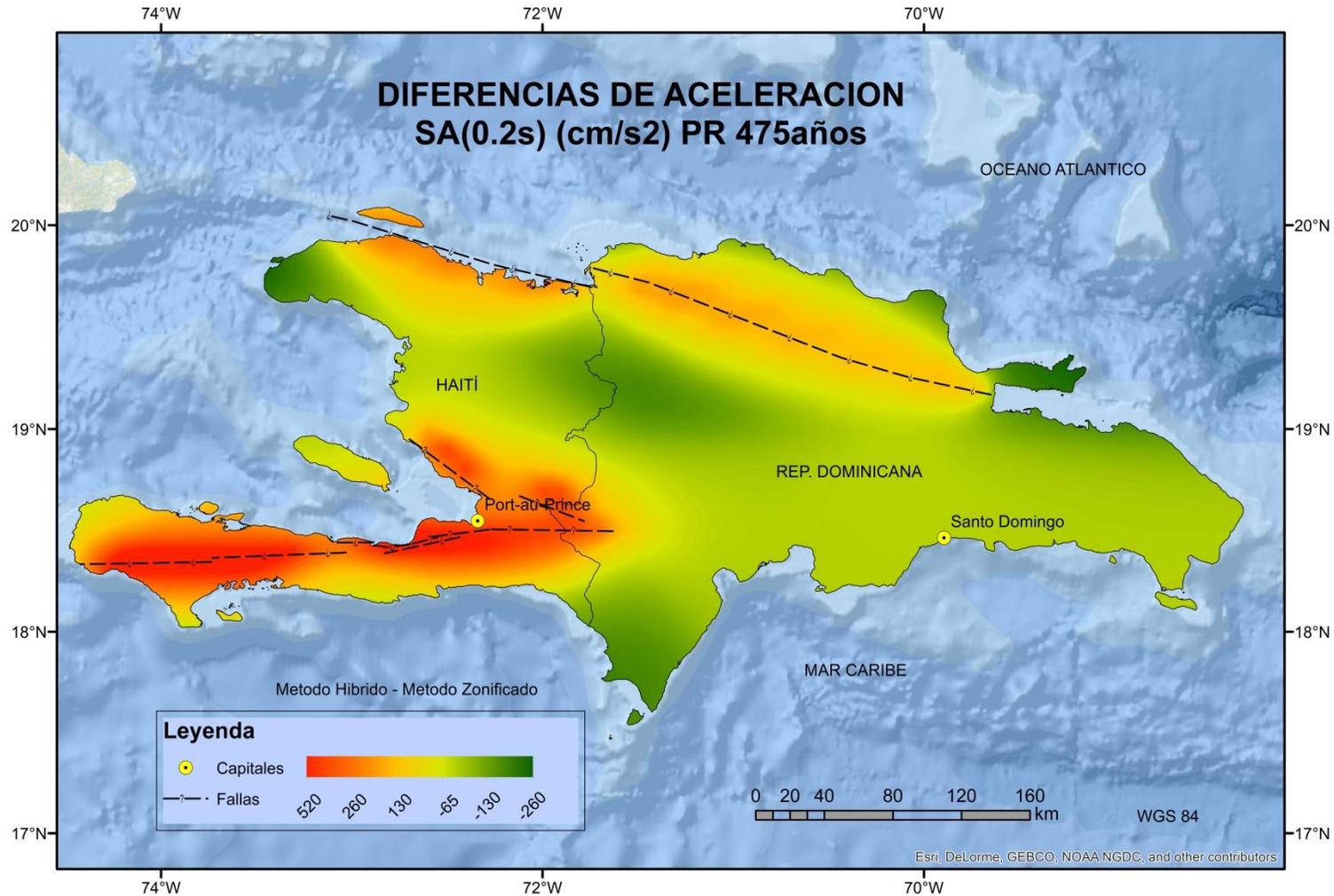


Fig. 5-32 Diferencias para SA(0.2s) PR 475 años. Método híbrido y método zonificado

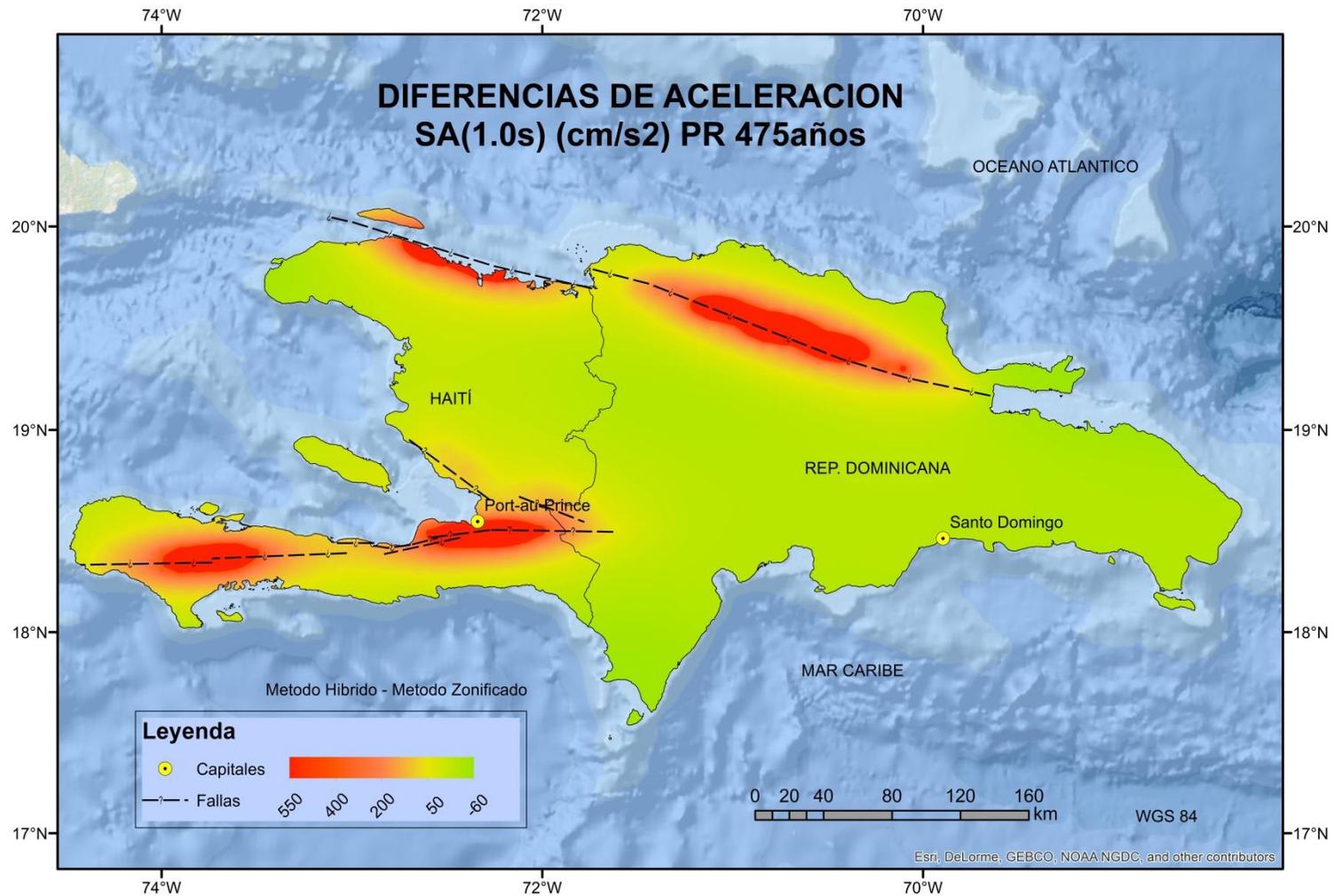


Fig. 5-33 Diferencias para SA(0.1s) PR 475 años. Método híbrido y método zonificado

En comparación con otros estudios realizados en la zona, como el de Benito et al., (2012) y Frankel et al., (2011) se puede desprender que la inclusión de las fallas en el cálculo de la peligrosidad influye notablemente. Por ejemplo para valores de PGA PR475 años, el estudio de Benito et al., (2012) indica valores cercanos a 380gal, mientras que Frankel et al., (2011) obtiene valores próximos a 600gal, como se indica en la Figura 5-34. Es de notar que la morfología de los mapas es muy similar.

La República Dominicana ha desarrollado su Norma sísmica en el año 2011, donde divide al país en dos zonas de acuerdo al nivel de aceleración sísmica espectral, la Zona I corresponde a la zona norte donde tiene influencia la falla Septentrional y la Zona II donde tiene influencia la falla Enriquillo, como se indica en la Figura 5-35. Esta norma presenta valores de aceleración espectral de referencia para períodos cortos de  $T = 0.20$  seg. y  $T = 1.0$  seg.

### PGA (%g) with 10% Probability of Exceedance in 50 Years

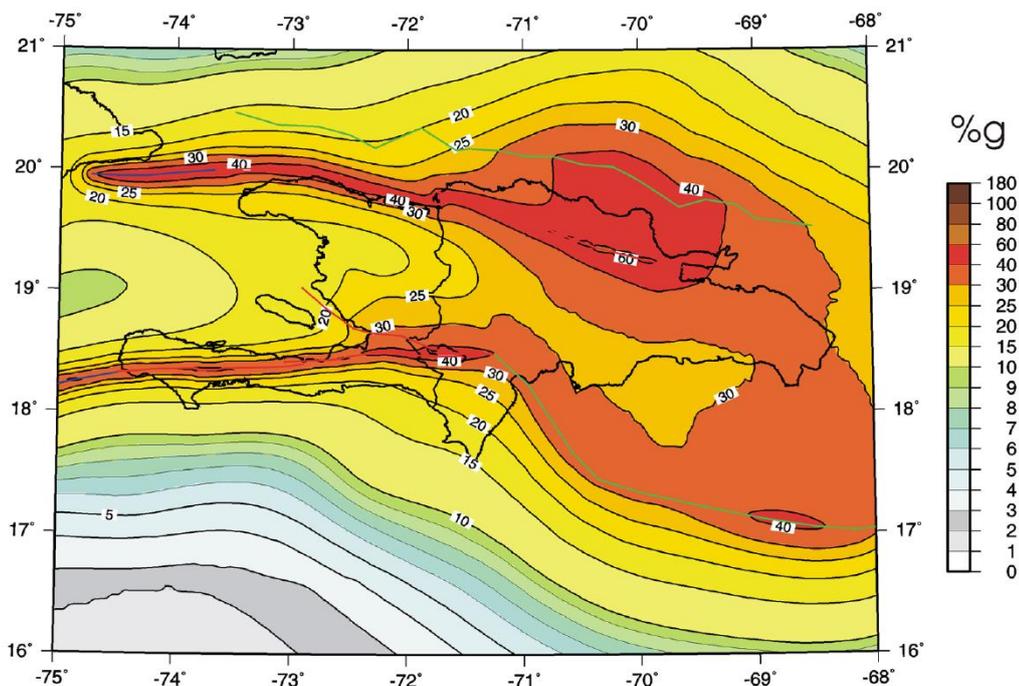


Fig. 5-34. Mapa peligrosidad obtenido por Frankel et al., (2011) para PGA en PR475 años

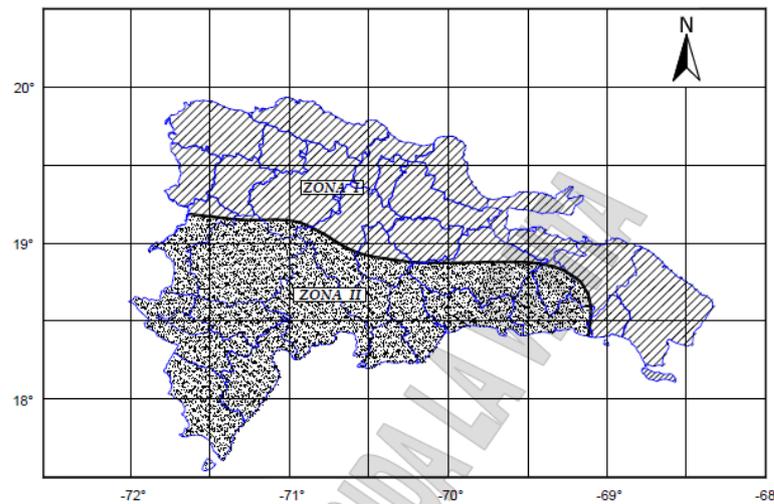


Fig. 5-35 (b). Zonificación sísmica propuesta en la Norma sísmica de Rep. Dominicana

Los valores que propone esta norma, en la Zona I para una aceleración espectral de referencia para un período corto de SA(0.2s) es de 1.55g equivalente a 1520 gal para un período de retorno de 2475 años, dando a entender la importancia de la actividad de la falla en esa zona. Para la zona de influencia de Enriquillo el valor normado es de 931.0 gal.

## CAPITULO VI

## CONCLUSIONES

## 6. CONCLUSIONES

En este Trabajo Fin de Master se ha realizado el proceso completo de estimación de la Peligrosidad Sísmica en la República de Haití siguiendo la metodología probabilista (PSHA). A continuación se indican las conclusiones referentes a las etapas del estudio:

- Catálogo sísmico: se ha elaborado el catálogo sísmico de la zona de El Caribe en torno a la Isla La Española, actualizando el catálogo elaborado por el grupo GIIS en proyectos anteriores (cubriendo el período 1551 - 2011) hasta 2014, accediendo a las principales agencias de registro de eventos. Este catálogo ha sido homogenizado a magnitud momento  $M_w$ ; depurado de réplicas y premonitores y corregido por falta de completitud para la correcta obtención de parámetros sísmicos necesarios para el cálculo de la peligrosidad.

En este apartado es necesario indicar la falta de estaciones de monitoreo en Haití. A pesar de haberse realizado un estudio de redes de monitoreo (Dorfeuille, 2013) hasta la fecha no se ha podido establecer en el país una base firme para el registro completo de eventos que puedan dar soporte a las investigaciones, que permita actualizar el catálogo constantemente, favorecer la elaboración de normativas sismorresistentes y sobre todo disponer de los datos necesarios para toma de decisiones y medidas de protección y mitigación del riesgo sísmico.

- Para la depuración del catálogo se ha utilizado el modelo de Gardner- Knopoff (1974) con ventanas temporales y espaciales utilizadas y calibradas en la zona del Caribe, que tiene características similares a la zona de estudio. Sin embargo es necesario la formulación de los parámetros propios para Haití de cara a futuros estudios.
- Los años de completitud no varían respecto a los obtenidos por Benito et al (2012) en razón del tiempo transcurrido y la magnitud de los sismos registrados en el período 2011 – 2014 (4.0 – 6.4  $M_w$ ).
- Se han obtenido nuevos parámetros sísmicos para el cálculo de la peligrosidad sísmica. Los parámetros obtenidos para la zonificación profunda se han calculado ajustando una recta de Gutenberg - Richter; así también para las zonas corticales 1,2 y 6, dentro de las cuales no se encuentra ninguna falla que se haya modelizado de manera independiente. Para la zonas 3, 4 y 5, donde si hay fallas conocidas que se han incluido en el cálculo como zonas sismogénicas independientes, se ha utilizado la metodología híbrida propuesta por Bungum (2007) basada en el reparto de la tasa de momento sísmico. En este método se igualó el momento sísmico anual liberado en la región con el momento sísmico anual acumulado en la misma.

- Las fallas tomadas en cuenta para el estudio corresponden a las familias: Septentrional, Mathuex Neiba y Enriquillo. Las posibles rupturas se han modelizado en dos segmentos cada una. La falla de Enriquillo en principio presentaba siete segmentos, pero se han agrupado en los dos siguientes: segmento este (Miraoane, Goabe, Dufort, Nomance, Dumay) y segmento oeste (Les Cayeux este y oeste).
- Se han obtenido mapas de peligrosidad por el método clásico zonificado y por el método híbrido, considerando zonas y fallas como unidades independientes. Al comparar ambos tipos de mapas, se observa un aumento de la peligrosidad entorno a las fallas con el segundo método, poniendo de manifiesto la importancia de la inclusión de éstas como elementos independientes en el cálculo de la peligrosidad.
- La morfología de los mapas zonificados es uniforme en los distintos períodos calculados, presentan valores más altos en la zona donde se traslapan la zona superficial y profunda. Los máximos de PGA alcanzan valores de 345 gal para un período de retorno de 475 años, 470 gal para 975 años y 679 gal para un PR 2475 años. Los valores de menor PGA se localizan hacia la zona oeste de la Falla Enriquillo, segmento Les Cayeux, lo que puede ser contrastado con los resultados del método híbrido.
- Los mapas obtenidos con la metodología híbrida resaltan valores de peligrosidad altos en las zonas de fallas; mientras que en la zona central, donde no se cuenta con fallas, los valores son bajos. En resumen, los valores máximos encontrados en las ordenadas espectrales de corto, intermedio y largo período son:
  - Para PGA (corto período de movimiento):
    - PR 475 años, valores máximos de 963 gal cerca de la Falla Septentrional, 460 gal hacia la Falla Matheux, 760 gal en el segmento oriental de la traza de la Falla Enriquillo, y 730 gal en el segmento occidental.
    - PR 975 años, valores máximos de 1200 gal hacia la Falla Septentrional, 600 gal en la Falla Matheux, y 980 gal en la Falla Enriquillo.
    - PR 2475 años, valores máximos de 1500 gal en la Falla Septentrional, 900 gal en la Falla Matheux, y 1300 gal en el segmento oriental de la Falla Enriquillo, y 1000 gal en el segmento occidental.

- Para SA(0.2s) (período intermedio, en la meseta del espectro):
  - PR 475 años: los mayores valores obtenidos sobre las fallas son: 992 gal en la Falla Septentrional, mientras que el valor obtenido es de 980 gal en la falla Matheux, y 1018 gal en la zona oeste de la Falla Enriquillo.
  - PR 975 años: los mayores valores sobre las Fallas son: 990 gal en la Falla Septentrional, 980 gal Matheux, y cercano a los 1020 gal en la Falla Enriquillo.
  - PR 2475 años: se presentan valores máximos de 1000 gal en todas las fallas.
- Para SA(1.0s) (período largo del movimiento):
  - PR 475 años: en la Falla Septentrional se localiza un valor máximo de 770 gal, 360 gal en la Falla Mathuex, y 700 en el segmento oriental de la Falla Enriquillo, y 500 gal en el segmento occidental.
  - PR 975 años: mayores valores obtenidos sobre las fallas: 900 gal en la Falla Septentrional, 600 en la Falla Matheux, y 800 en la Falla Enriquillo.
  - PR 2475 años: valores mayores de 1000 gal sobre la Falla Septentrional, 700 gal sobre la Falla Matheux, y 800 en la Falla Enriquillo.
- Se han obtenido los espectros UHS, con el método zonificado e híbrido, donde se nota la clara influencia de las fallas en el cálculo de la peligrosidad. Estos espectros han sido obtenidos para la capital, Puerto Príncipe. Los espectros obtenidos con el segundo método son más altos, hecho que puede explicarse por la proximidad de las fallas de Enriquillo a la capital.
- En comparación con estudios realizados en la zona por Benito et al., (2012) los resultados obtenidos son más altos en tanto en lo referente a valores de PGA como de SA(0.1, 0.2, 0.5, 1 y 2s). La Norma de República Dominicana presenta valores muy similares a los del estudio mencionado, pero contrastaban con los más elevados de Frankel et al, (2011).
- Este análisis muestra la importancia de establecer distintos modelos de estimación de la peligrosidad donde se involucren la mayor cantidad de variables en el estudio, en particular los parámetros de actividad de las fallas.

## CAPITULO VII

# PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y ECONÓMICA

## 7. PLANIFICACION TEMPORAL Y ECONÓMICA

### 7.1 Planificación temporal

La planificación temporal propuesta para este estudio se indica en la Tabla 20, donde se expone con detalle las tareas realizadas para alcanzar los objetivos propuestos, los recursos tanto humanos como económicos asignados y la distribución temporal.

Tabla 20. Planificación temporal del estudio

Actividades	Recursos Humanos	Recursos materiales	Distribución temporal (6 meses )							
			Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6		
Recopilación de información	1 MIGC	1 Ordenador	■	■						
Actualización de catálogo	1 MIGC	1 Ordenador		■	■	■				
Cálculo parámetros sísmicos	1 MIGC Asesoría GIS	1 Ordenador				■	■			
Estudio modelos de atenuación	1 MIGC Asesoría GIS	1 Ordenador						■	■	
Cálculo peligrosidad Método zonificado	1 MIGC Asesoría GIS	1 Ordenador								■
Cálculo peligrosidad Método híbrido	1 MIGC Asesoría GIS	1 Ordenador								■
Análisis de resultados	1 MIGC Asesoría GIS	1 Ordenador							■	■
Edición del informe	1 MIGC	1 Ordenador, impresora material de papelería								■

MIGC: Master en Ingeniería en Geodesia y Cartografía

### 7.2 Valoración económica del estudio

Para el desglose de la valoración económica se consideran los gastos directos e indirectos. Los gastos directos son que incurren directamente con la elaboración de los productos o servicios. Estos incluyen la materia prima y la fuerza laboral directamente utilizada.

## 7.2.1 Gastos directos

### Recursos Humanos

Los profesionales que se consideran en la realización de este estudio se indican en la siguiente Tabla 21:

Tabla 21. Profesionales que se consideran en el estudio y su valoración económica.

Recursos Humanos	Coste (€)
1 Ingeniero en Geodesia y Cartografía	14000.0
1 Asesor tectónico	5600.0
1 Asesor sísmológico	9400.0
Total A) RRHH	29000.0

En la siguiente Figura 7-1 se indica la distribución de costes del personal.

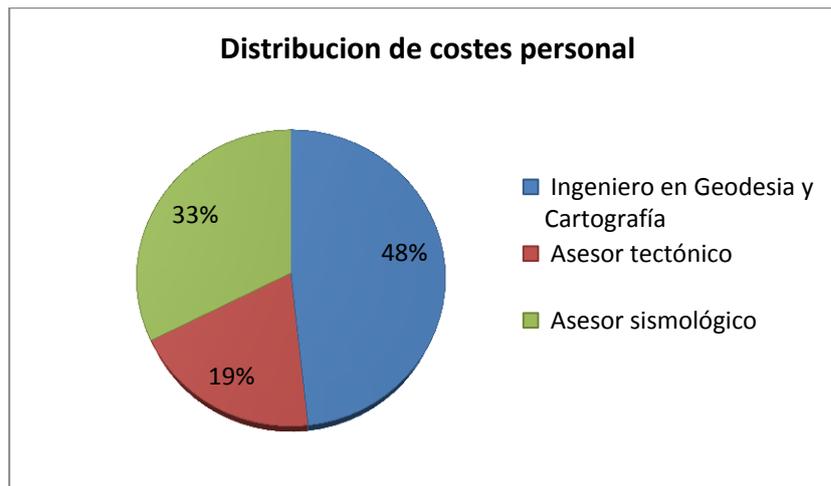


Fig. 7-1 Distribución de costes de personal

### Recursos materiales

En este apartado se desglosa los costes de adquisición de equipo y software necesarios para la ejecución del proyecto. Se propone que una vez finalizado el proyecto los equipos pasaran a disposición del grupo de trabajo, por lo tanto, la amortización de este rubro repercutirá en proyectos futuros. En la Tabla 22 se indica los costes correspondientes a recursos materiales.

Tabla 22. Recursos materiales del proyecto

Recursos materiales	Coste (€)
Ordenador	1400.0
Impresora	300.0
Material papelería	400.0
Licencias software	6000.0
B) Total materiales	8100.0

Como licencia de software se considera la adquisición de ArcGis valorada en 12000€/año aproximadamente, se considera este software por ser el más conocido y utilizado en empresas.

En la Figura 7-2 se muestra la distribución de los costes correspondientes a materiales.

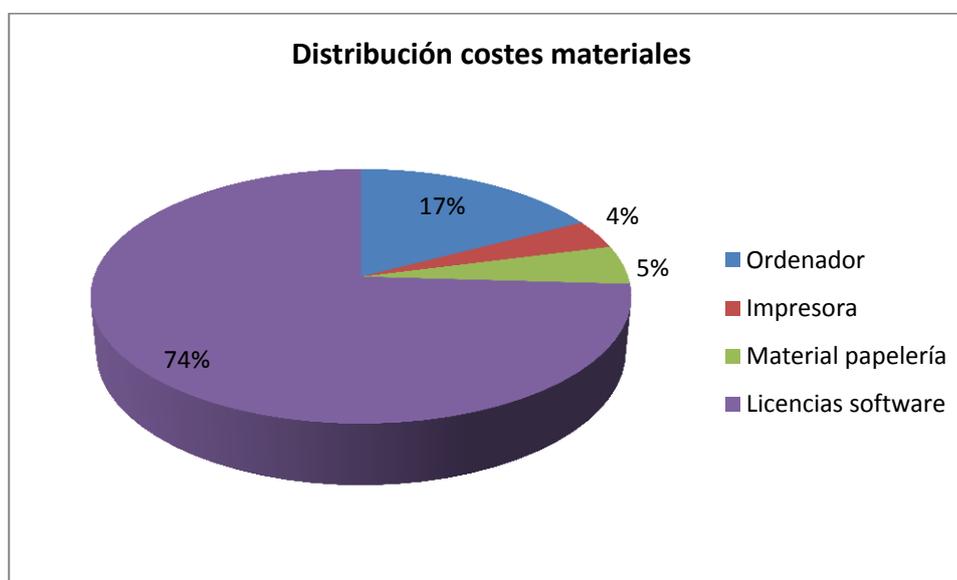


Fig. 7-2 Distribución de costes materiales

### 7.2.2 Costes indirectos

Los gastos indirectos son gastos necesarios para la producción del producto o servicio pero que no se incurren directamente con esta producción.

Se estipula un 20% de costes indirectos del total de la evaluación económica, que se identifican con el beneficio económico o industrial, en la Tabla 23 se indica el valor asumido para este costo.

Tabla 23. Costes indirectos asociados al proyecto

Costos indirectos	Coste (€)
20% B.I	7420.0
C) Indirectos	7420.0

La valoración económica total se indica en la Tabla 24.

Tabla 24. Valoración total del proyecto

Costos finales	Euros (€)	
A Recursos humanos	29000.0	
B Recursos materiales	8100.0	
C Costos indirectos	7420.0	
	Subtotal	44520.0
I.V.A	21.00%	9349.0
	TOTAL	53869.0

El costo total del proyecto asciende a CINCUENTA Y TRES OCHO CIENTOS SESENTA Y NUEVE CON 00/100 EUROS. (53869.00 €).

En la Figura 7-3 se muestra la distribución de los costes totales del proyecto.

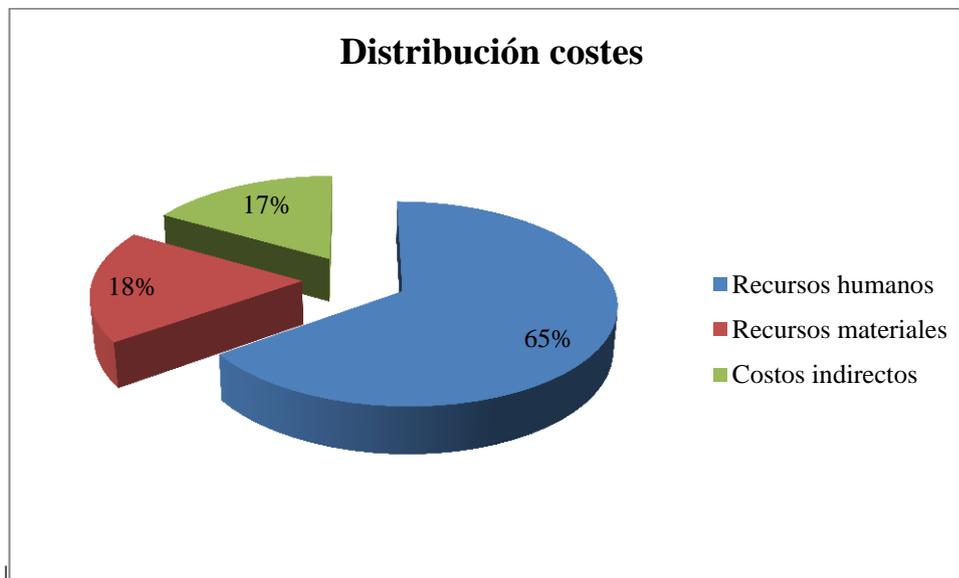


Fig. 7-3 Distribución de costes del proyecto

## CAPITULO VIII

## REFERENCIAS



## 8. REFERENCIAS

ANDERSON J. (1979). Estimating the seismicity from geological structure for seismic-risk studies. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 69: 135–158.

BENITO OTERINO, B., Cervera Bravo, J., Molina Palacios, S., Navarro Bernal, M., Doblas Lavigne, Miguel de las, Martínez Díaz, J.J., Belizaire, D., Enomoto, T., Córdoba Barba, D. & Torres Fernández, Y. 2012, "Evaluación de la peligrosidad y el riesgo sísmico en Haití y aplicación al diseño sismorresistente".

BENITO, B. Y JIMÉNEZ, E. (1999): Peligrosidad sísmica. *Física de la Tierra*, **11**, 13-47, 155N: 0214-4557

BENITO, B., C. Lindholm, E. Camacho, Á. Climent, G. Marroquín, E. Molina, W. Rojas, J. J. Escobar, E. Talavera, G. Alvarado, Y. Torres (2012). A New Evaluation of Seismic Hazard for the Central America Region. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 102 N°2. pp. 504-523 (Abril 2012).

BENITO, B. 2009, "Amenaza sísmica en América central", *Pure and Applied Geophysics*, vol. 169, pp. 1519-1537.

BOZZONI, F., Corigliano, M., Lai, C.G., Salazar, W., Scandella, L., Zuccolo, E., Latchman, J., Lynch, L. & Robertson, R. 2011, "Probabilistic seismic hazard assessment at the eastern Caribbean Islands", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 101, no. 5, pp. 2499-2521.

BUNGUM H. (2007). Numerical modelling of fault activities. *Computers and Geosciences*. 33(6): 808- 820.

CALAIS ERIC (2007). Projet d'identification de la menace sismique en Haití. Bureau des Mines et de l'énergie (BME).

CALAIS, E., Mazabraud, Y., Mercier de Lepinay, B., Mann, P., Mattioli, G., Jansma, P., 2002. Strain partitioning and fault slip rates in the north-eastern Caribbean from GPS measurements. *Geophys. Res. Lett.*, 29: 1856, doi:10.1029/2002GL015397.

CAVALLO, E., POWELL, A. & BECERRA, O. 2010, "Estimating the direct economic damages of the Earthquake in Haití\*", *The Economic Journal*, vol. 120, no. 546, pp. F298-F312.

CORNELL C.A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 58: 1583-1606.

CRAMER, C. H. (2001): A Seismic Hazard Uncertainty Analysis for The New Madrid Seismic Zone, *Engineering Geology*, vol. 62, pp. 251-266.



DE SAINT, MEDERIC., Louis Elie Moreau 1797, *Description topographique, physique, civile, politique et historique de la partie française de l'isle Saint Domingue (etc.)*, Moreau de Saint-Mery.

DORFEUILLE, J.M.H. 2013, Diseño de la red sísmica digital por satélite Haitiana.

FRANKEL A.D., Mueller C., Barnhard T., Perkins D., Leyendecker E., Dickman N., Hanson S. and Hopper M. (1996). National seismic-hazard maps: documentation June 1996. US Geological Survey. 96-532.

FRANKEL, A., S. Harmsen, C. Mueller, E. Calais And J. Haase: Seismic Hazard Maps for Haití. *Earthquake Spectra, Volume 27, No. S1, pages S23.S41, October 2011. Earthquake Engineering Research Institute*

GARCIA-MAYODORMO J. Y A. SUAREZ (1999): Sismicidad y peligrosidad sísmica de la República Dominicana. UPM. Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno.

GORUM, T., van Westen, C.J., Korup, O., van der Meijde, M., Fan, X. & van der Meer, Freek D 2013, "Complex rupture mechanism and topography control symmetry of mass-wasting pattern, 2010 Haití earthquake", *Geomorphology*, vol. 184, pp. 127-138.

HADDEN, R.L. & MINSON, S.G. 2010, *The Geology of Haití: An Annotated Bibliography of Haití's Geology, Geography and Earth Science*, .

HANKS T.C. and Kanamori H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*. 84: 23480-23500.

HAYES, G. P., Briggs, R. W., Sladen, A., Fielding, E. J., Prentice, C., Hudnut, K., Mann, P., Taylor, F. W., Crone, A. J., Gold, R., Ito, T., and Simons, M., 2010. Complex rupture during the 12 January 2010 Haití earthquake, *Nature Geoscience* 3, 800–805.

JANSMA, P. E., Mattioli, G. S., Lopez, A., Demets, C., Dixon, T. H., Mann, P., Calais, E., 2000. Neotectonics of Puerto Rico and the Virgin Islands, northeastern Caribbean, from GPS geodesy. *Tectonics*, 19(6): 1021-1037.

MANN, P., 1999. Caribbean Sedimentary Basins: Classification and Tectonic Setting from Jurassic to Present. En Hsü, K. J., (Series Ed.). *Sedimentary Basins of the World*, 4. Caribbean Basins. Mann, P. (Ed.), Elsevier Science, N. Y. 4: 3-31.

MORA, S., A. Roumagnac, J. P. Asté, E. Calais, J. Haase, J. Saborío, M. Marcello, J.E Milcé and N. Zahibo: République d'Haití. Analysis of Multiple Natural Hazards in Haití (NATHAT). Report prepared by the Government of Haití, with support from the World Bank, the Inter-American Development Bank, and the United Nations System. Port-au-Prince, Haití. March 26, 2010.



PAULTRE, P., Calais, É., Proulx, J., Prépetit, C. & Ambroise, S. 2013, "Damage to engineered structures during the 12 January 2010, Haití (Léogâne) earthquake 1", *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 40, no. 8, pp. 777-790.

PÉREZ-ESTAÚN, A., Hernaiz Huerta, P., Lopera, E., Joubert, M., Escuder Viruete, J., Díaz de Neira, A., Monthel, J., García-Senz, J., Ubrien, P. & Contreras, F. 2010, "Geología de la República Dominicana: de la construcción de arco-Isla a la colisión arco-continente", *Boletín Geológico y Minero*, vol. 118, no. 2, pp. 157-174.

PRENTICE, C., Mann, P., Crone, A., Gold, R., Hudnut, K., Briggs, R., Koehler, R. & Jean, P. 2010, "Seismic hazard of the Enriquillo-Plantain Garden fault in Haití inferred from palaeoseismology", *Nature Geoscience*, vol. 3, no. 11, pp. 789-793.

REITER, L. (1990): *Earthquake Hazard and Analysis, Issues and Insights*. Columbia University Press, New York, 254 p.

RIVAS MEDINA, A. 2014, Contribución metodológica para incorporar fallas activas en la modelización de la fuente dirigida a estimaciones de peligrosidad sísmica. Aplicación al sur de España.

STEIN, S. Y WYSESSION, M. (2003): *An introduction to seismology, earthquakes, and EarthStructure*. Blackwell Publishing, 498 p.

STIRLING, M. W., M. C. Gerstenberger, N. J. Litchfield, G. H. McVerry, W. D. Smith, J. Pettinga, and P. Barnes (2008). Seismic hazard of the Canterbury region, New Zealand: New earthquake source model and methodology. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*. 41: 51–67.

WAHLSTRÓM, R. Y GRÜNTAL, G. (2000). Probabilistic seismic hazard assessment (horizontal PGA) for Fennoscandia using the logic tree approach for regionalization and non-regionalization models. *Seismological Research Letters*, vol. 72, pp. 33-45.

WELLS D.L. AND COPPERSMITH K.J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 84: 974-1002.

WESNOUSKY S.G., Scholz C.H., Shimazaki K. and Matsuda T. (1983). Earthquake frequency distribution and the mechanics of faulting. *Journal of Geophysical Research*. 88: 9331-9340.

WOO G. (1996). Kernel Estimation Methods for Seismic Hazard Area Source Modeling. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 86-2: 353-362.

## CAPITULO IX

### ANEXOS

## 9. ANEXOS

### 9.1 Mapas peligrosidad método zonificado

Los mapas de peligrosidad obtenidos por medio del método zonificado se muestran en este apartado, en la Tabla 25 se indica el mapa y el número de figura correspondiente. Los mapas que ya han sido presentados en el Capítulo V no se indican en esta Tabla.

Tabla 25. Mapas de peligrosidad método zonificado y Figura asignada

Mapas peligrosidad sísmica, Método zonificado		
Coordenada espectral	PR975	PR2475
SA(0.1s)	Figura 9-1	Figura 9-4
SA(0.5s)	Figura 9-2	Figura 9-5
SA(2.0s)	Figura 9-3	Figura 9-6

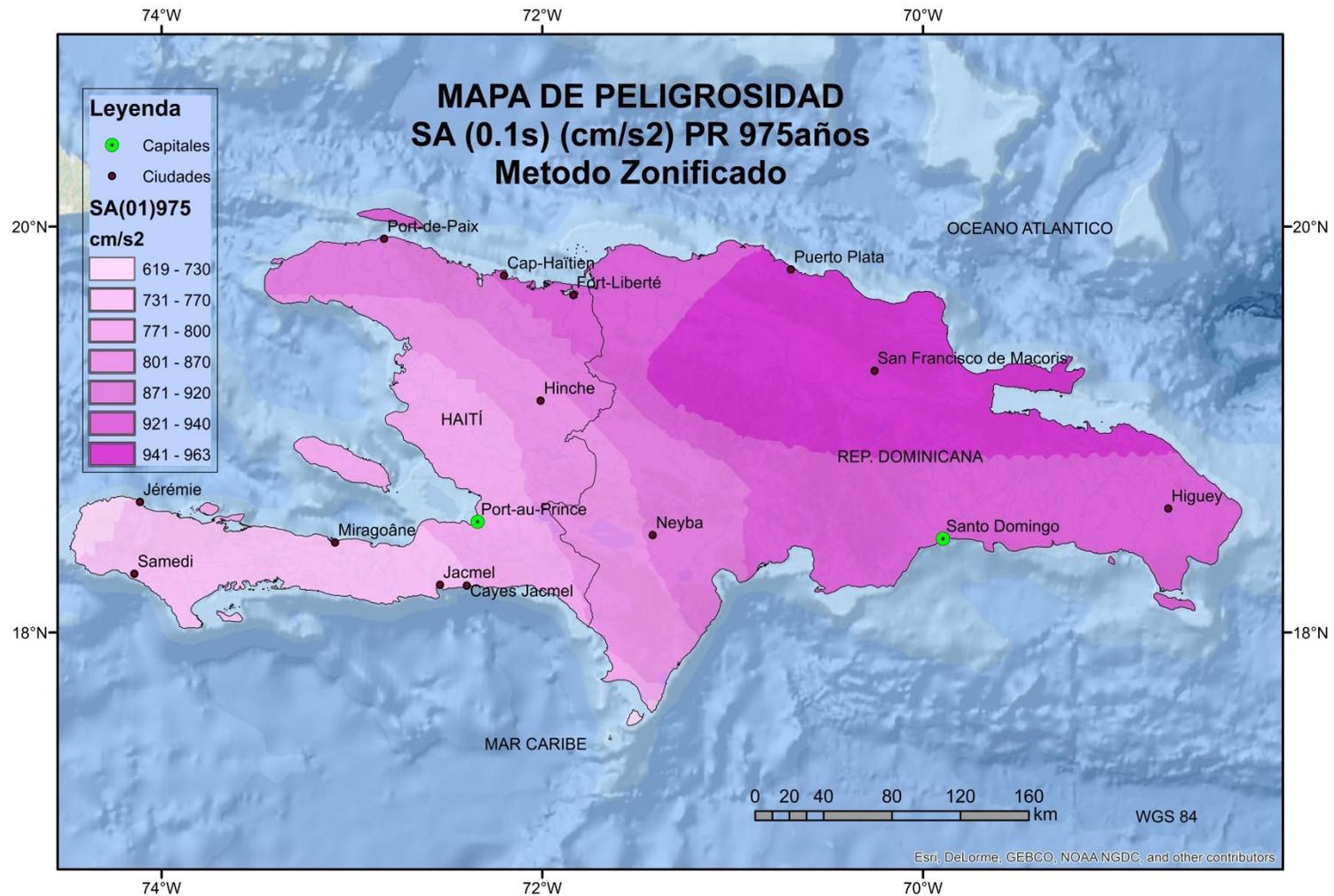


Fig. 9-1 Mapa de Peligrosidad sísmica. SA(0.1s) PR975 años



Fig. 9-2 Mapa de Peligrosidad sísmica. SA(0.5s) PR975 años

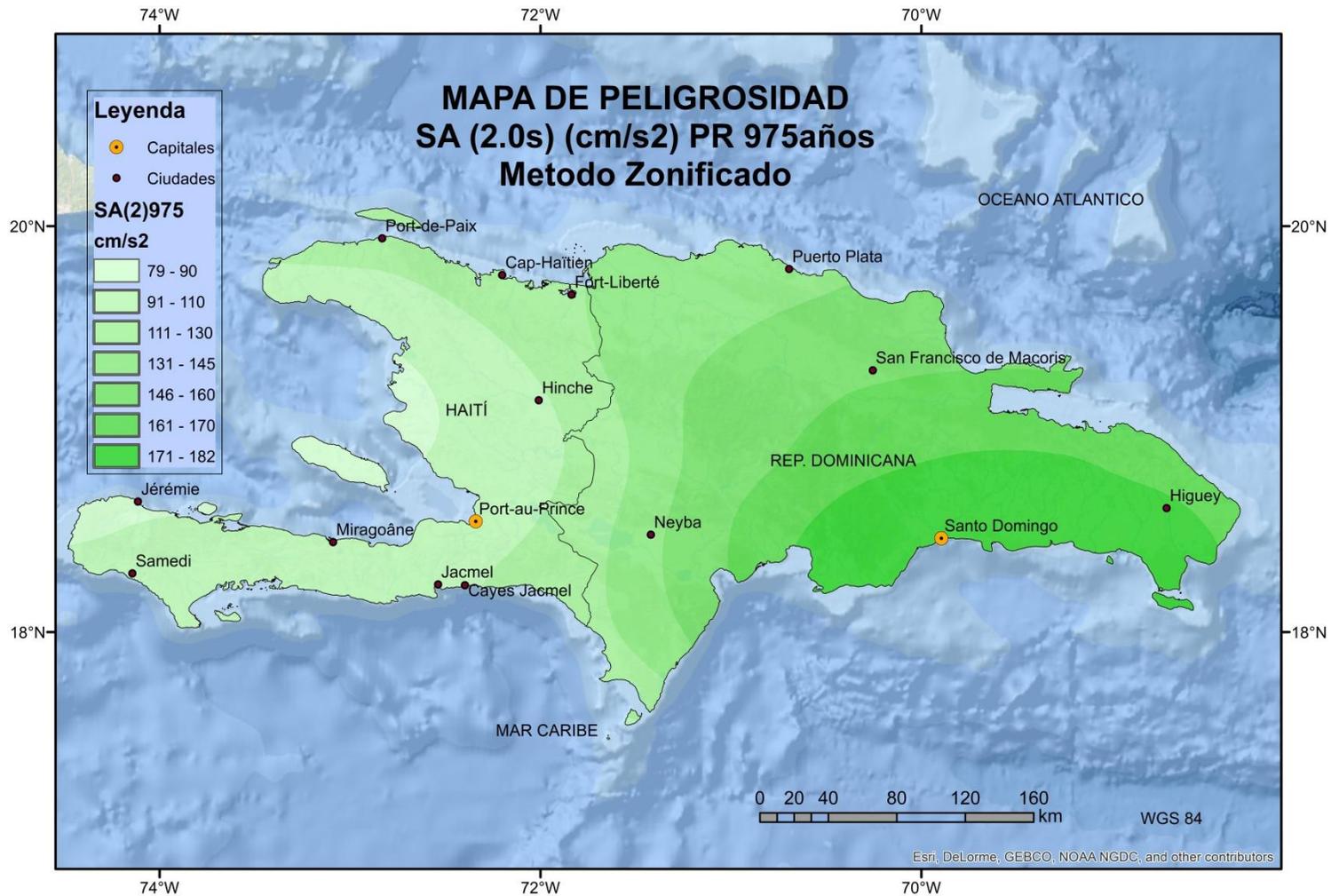


Fig. 9-3 Mapa de Peligrosidad sísmica. SA(2.0s) PR975 años

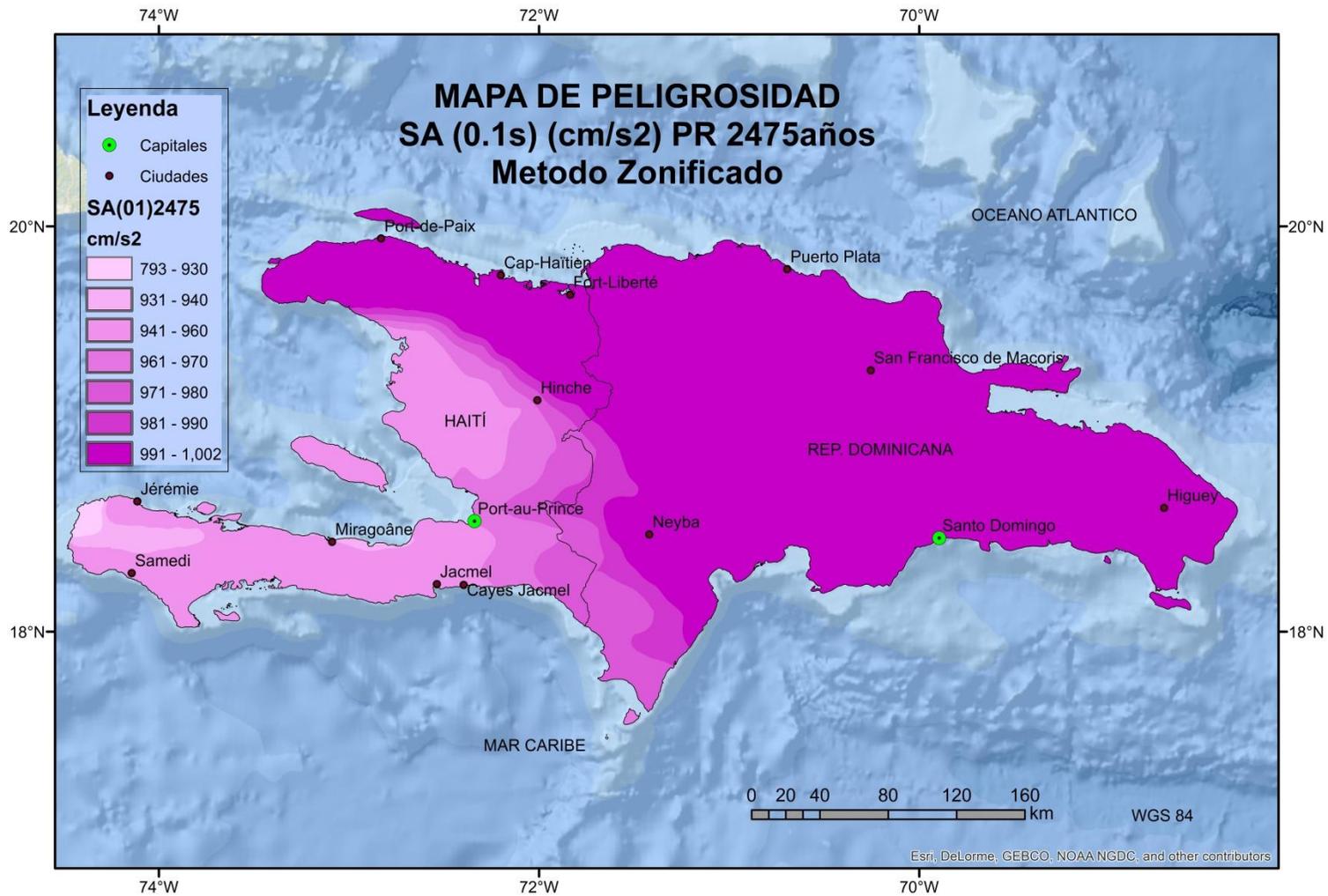


Fig. 9-4 Mapa de Peligrosidad sísmica. SA(0.1) PR2475 años



Fig. 9-5 Mapa de Peligrosidad sísmica (SA 0.5s) PR2475 años



Fig. 9-6 Mapa de Peligrosidad sísmica (SA 2.0s) PR2475 años

## 9.2 Mapas peligrosidad método híbrido

En la Tabla 26 se indica el mapa de peligrosidad y la Figura asignada.

Tabla 26. Mapas peligrosidad sísmica, Método zonificado

Coordenada espectral	PR475	PR975	PR2475
SA(0.1s)	Figura 9-7	Figura 9-8	Figura 9-11
SA(0.5s)	-----	Figura 9-9	Figura 9-12
SA(2.0s)	-----	Figura 9-10	Figura 9-13

## 9.3 Diferencias de aceleración. Método híbrido – Método zonificado

Los mapas de diferencias de aceleraciones entre el método híbrido y método zonificado se indican en la siguiente Tabla 27.

Tabla 27. Listado mapas de diferencias de aceleración

Mapas diferencias de aceleración			
Coordenada espectral	PR475	PR975	PR2475
SA(0.1s)	Figura 9-14	Figura 9-17	Figura 9-22
SA(0.2s)	----	Figura 9-18	Figura 9-23
SA(0.5s)	Figura 9-15	Figura 9-19	Figura 9-24
SA(1.0s)	----	Figura 9-20	Figura 9-25
SA(2.0s)	Figura 9-16	Figura 9-21	Figura 9-26



Fig. 9-7 Mapa de peligrosidad método zonificado. SA(0.1s) PR475 años

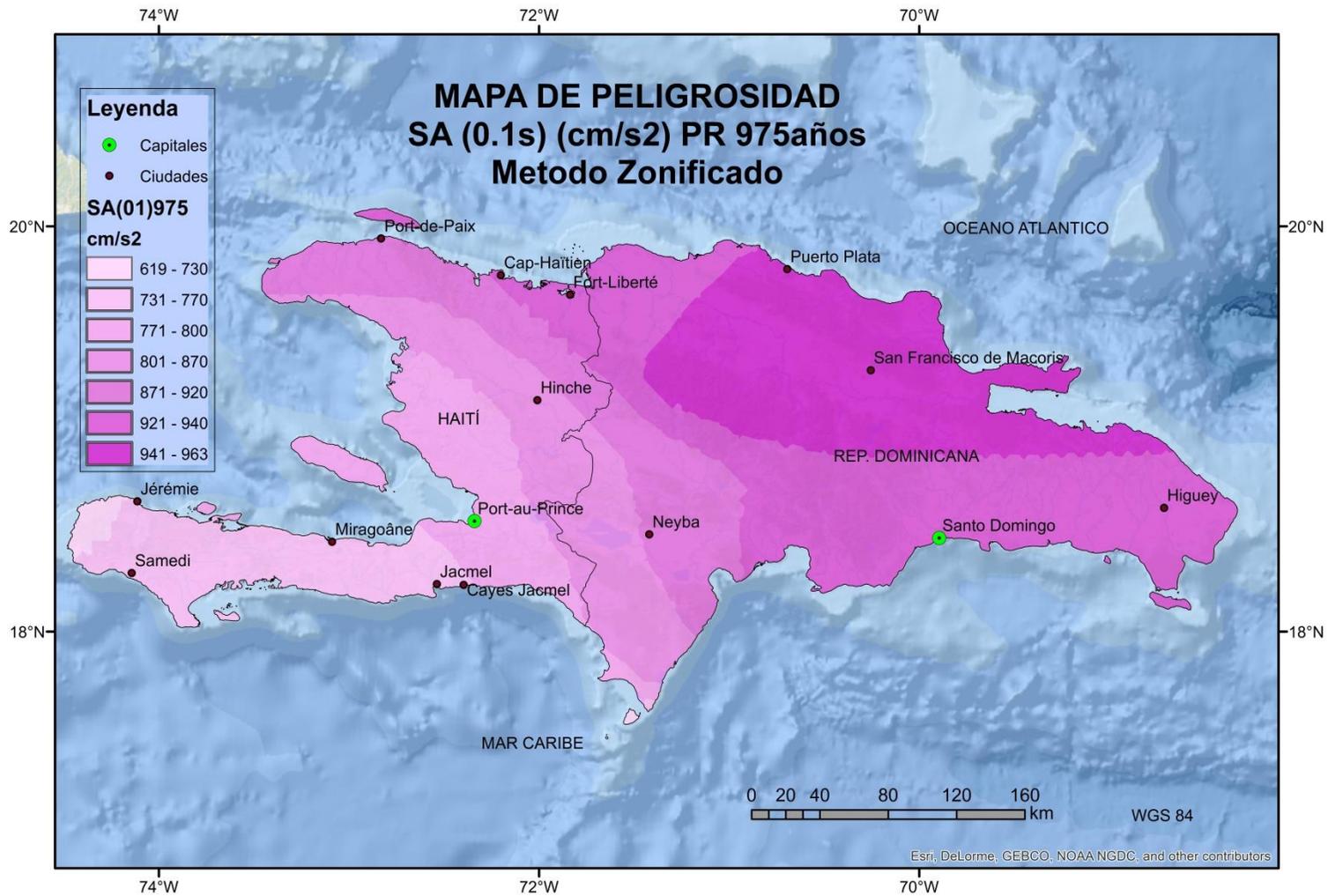


Fig. 9-8 Mapa de Peligrosidad método zonificado. SA(0.1s) PR975 años

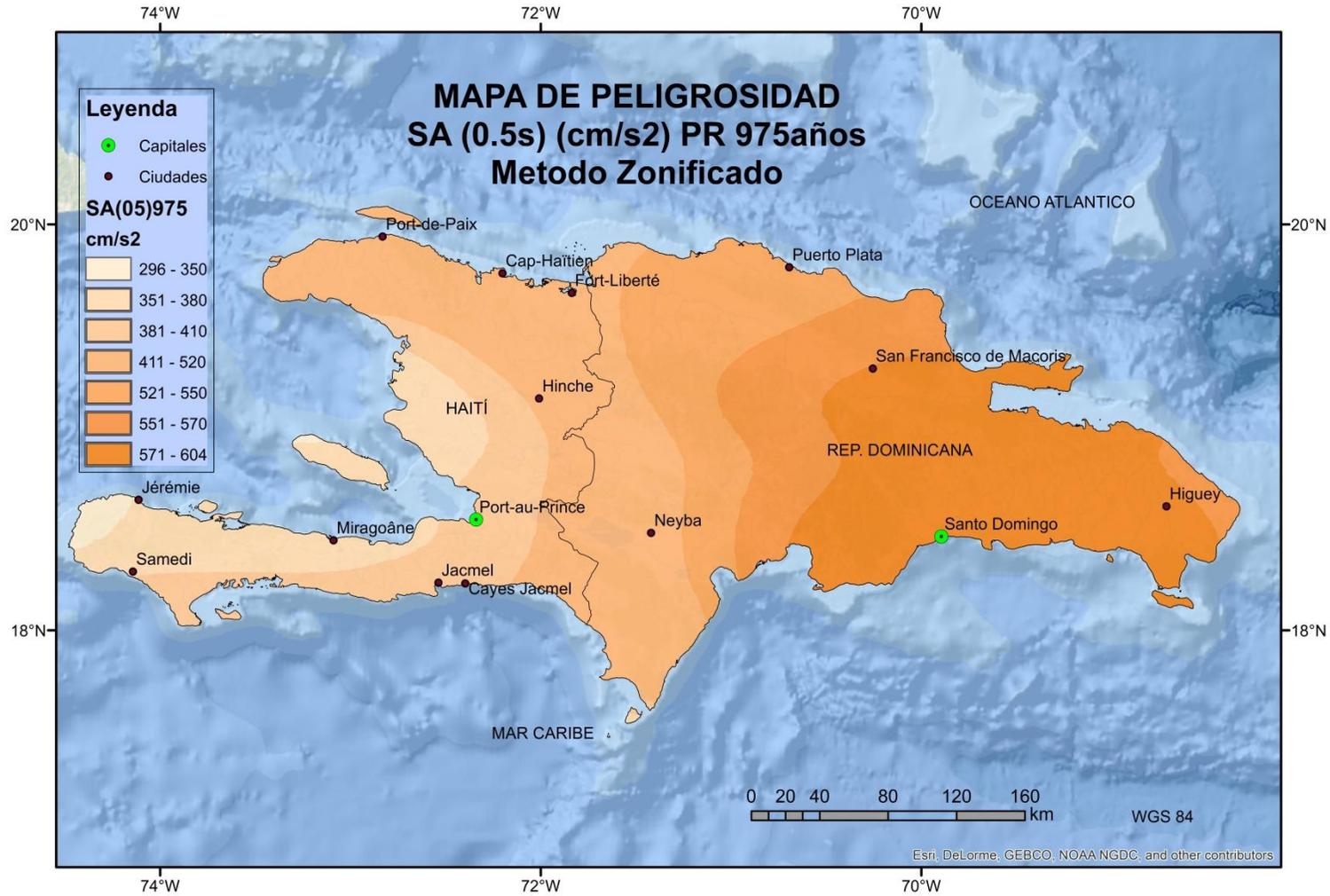


Fig. 9-9 Mapa de Peligrosidad sísmica método zonificado. SA(0.5s) PR975 años



Fig. 9-10 Mapa de Peligrosidad método zonificado. SA(2.0s) PR975 años

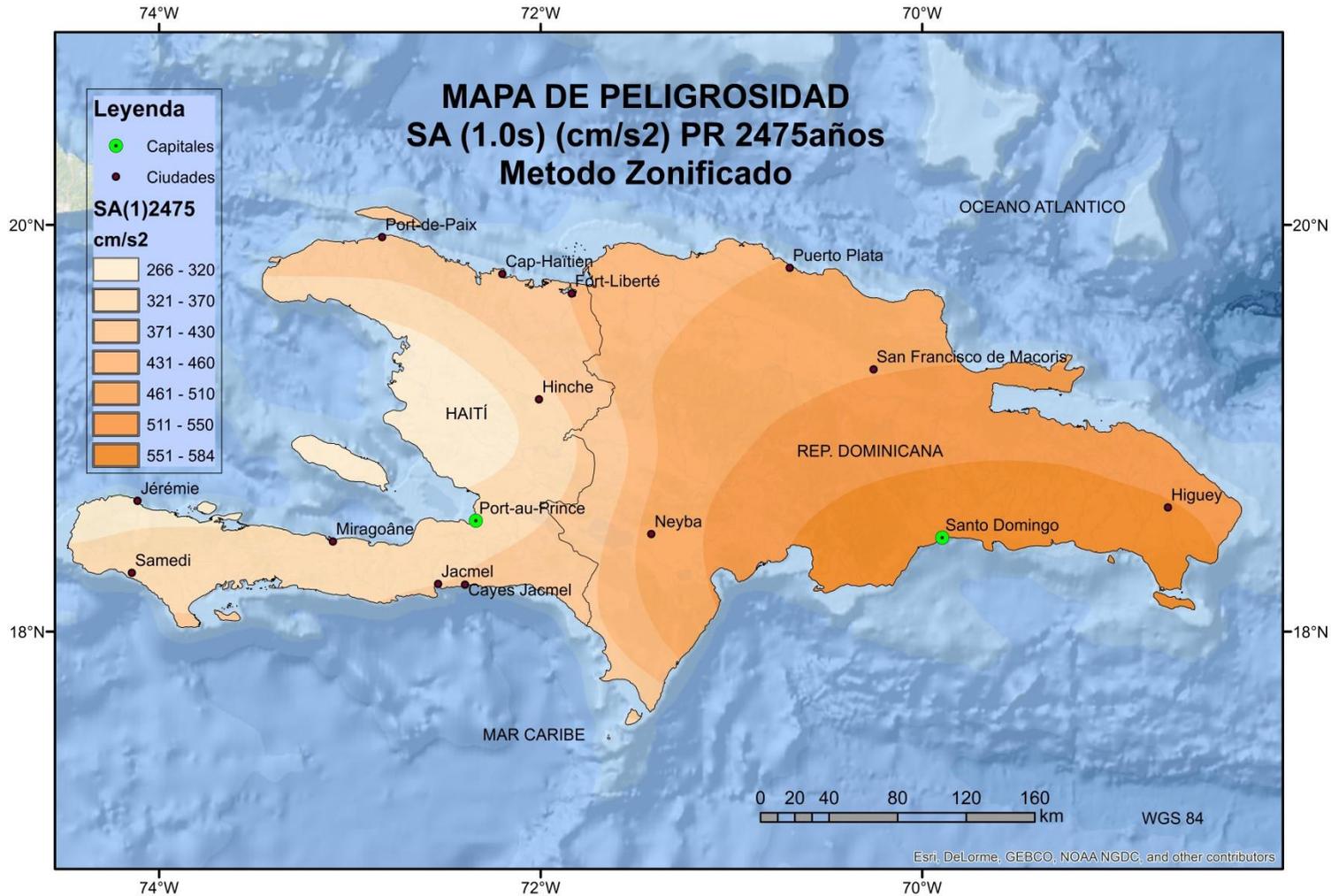


Fig. 9-11 Mapa de Peligrosidad método zonificado. SA(0.1s) PR2475años



Fig. 9-12 Mapa de Peligrosidad método zonificado. SA(0.5s) P2475 años



Fig. 9-13 Mapa de Peligrosidad método zonificado. SA(2.0s) PR2475 años

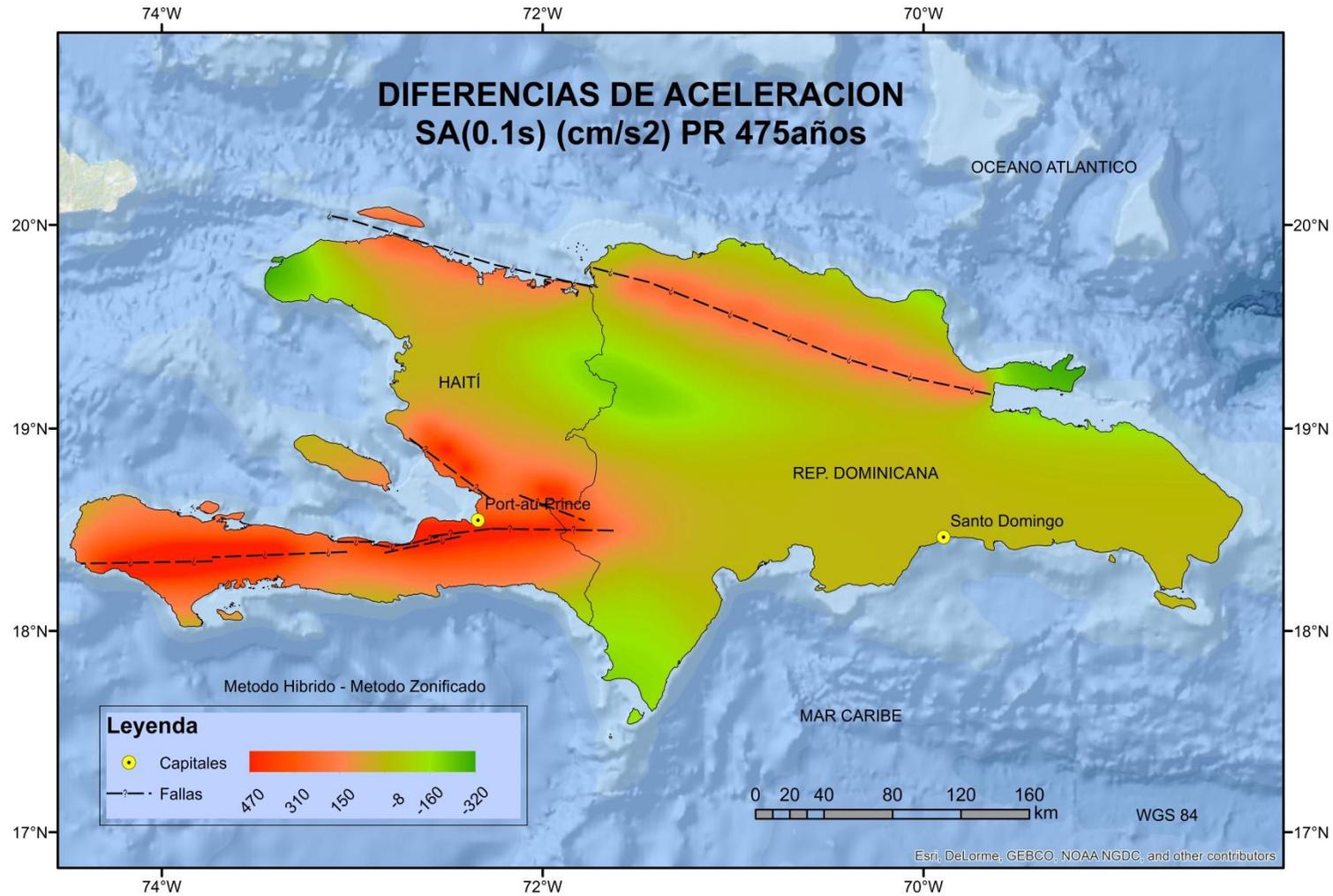


Fig. 9-14 Mapa diferencias de aceleración Método híbrido – método zonificado. SA(0.1s) PR475 años

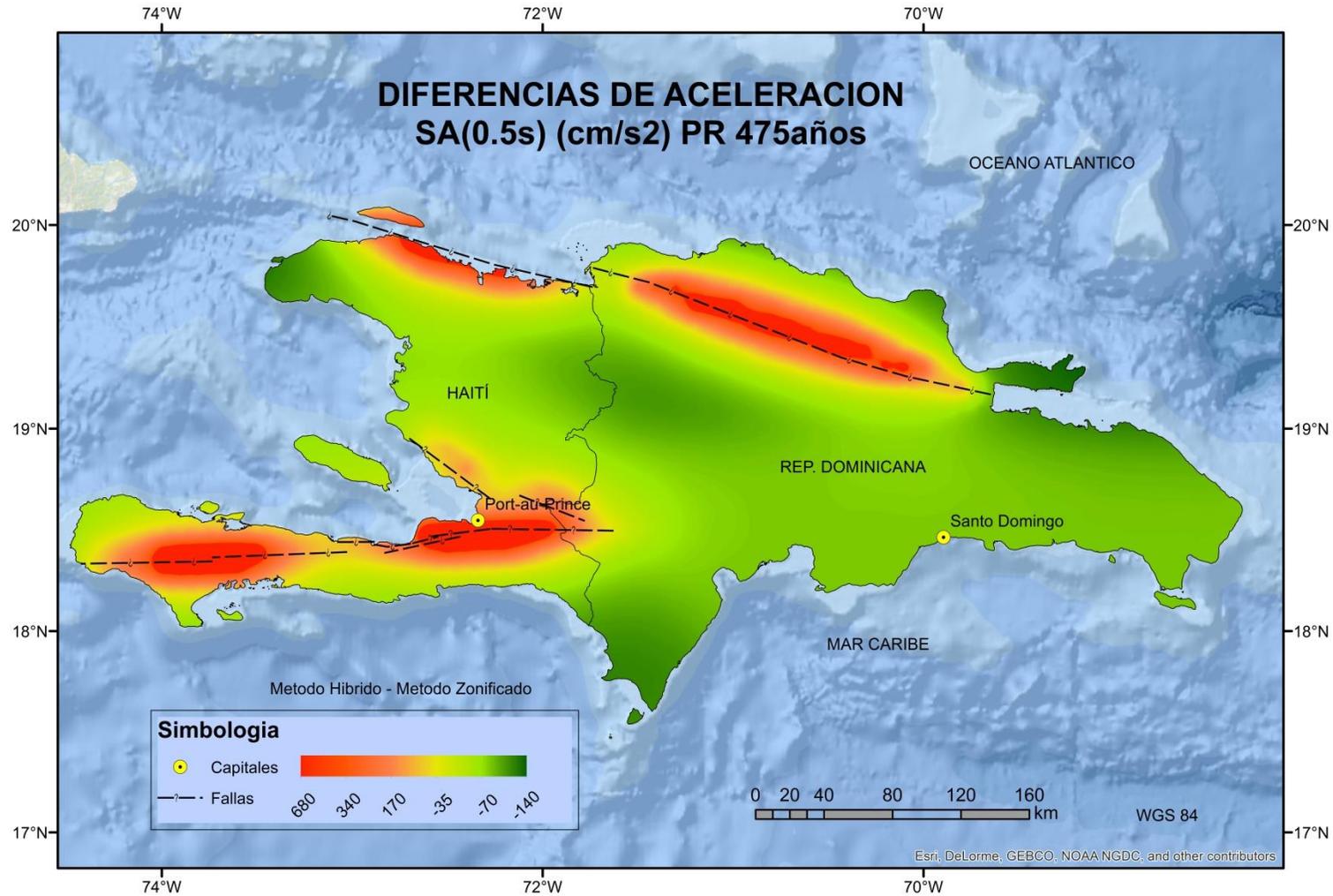


Fig. 9-15 Mapa diferencias de aceleración Método híbrido – método zonificado. SA(0.5s) PR475años

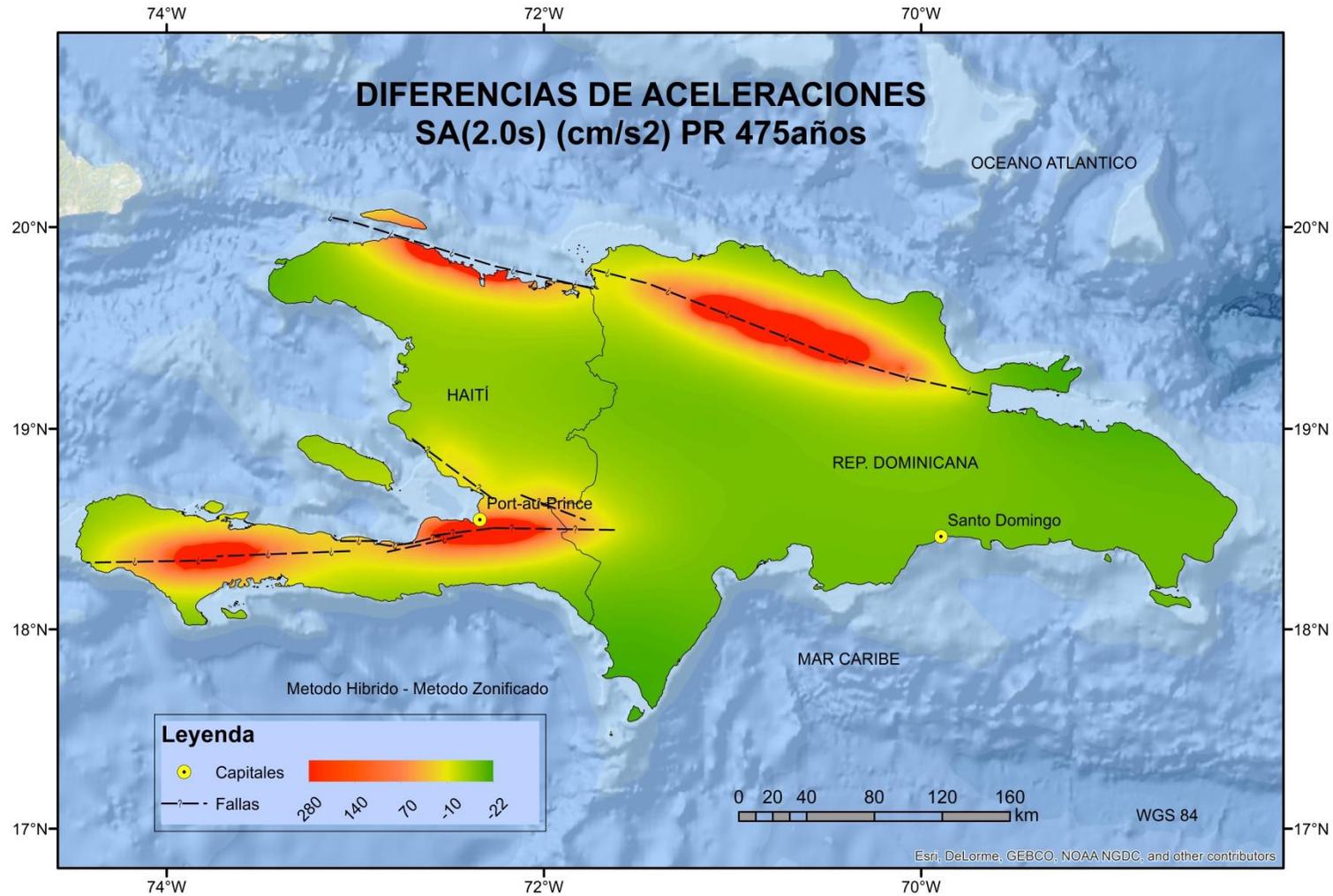


Fig. 9-16 Mapa diferencias de aceleración Método híbrido – método zonificado. SA(2.0s) PR475años

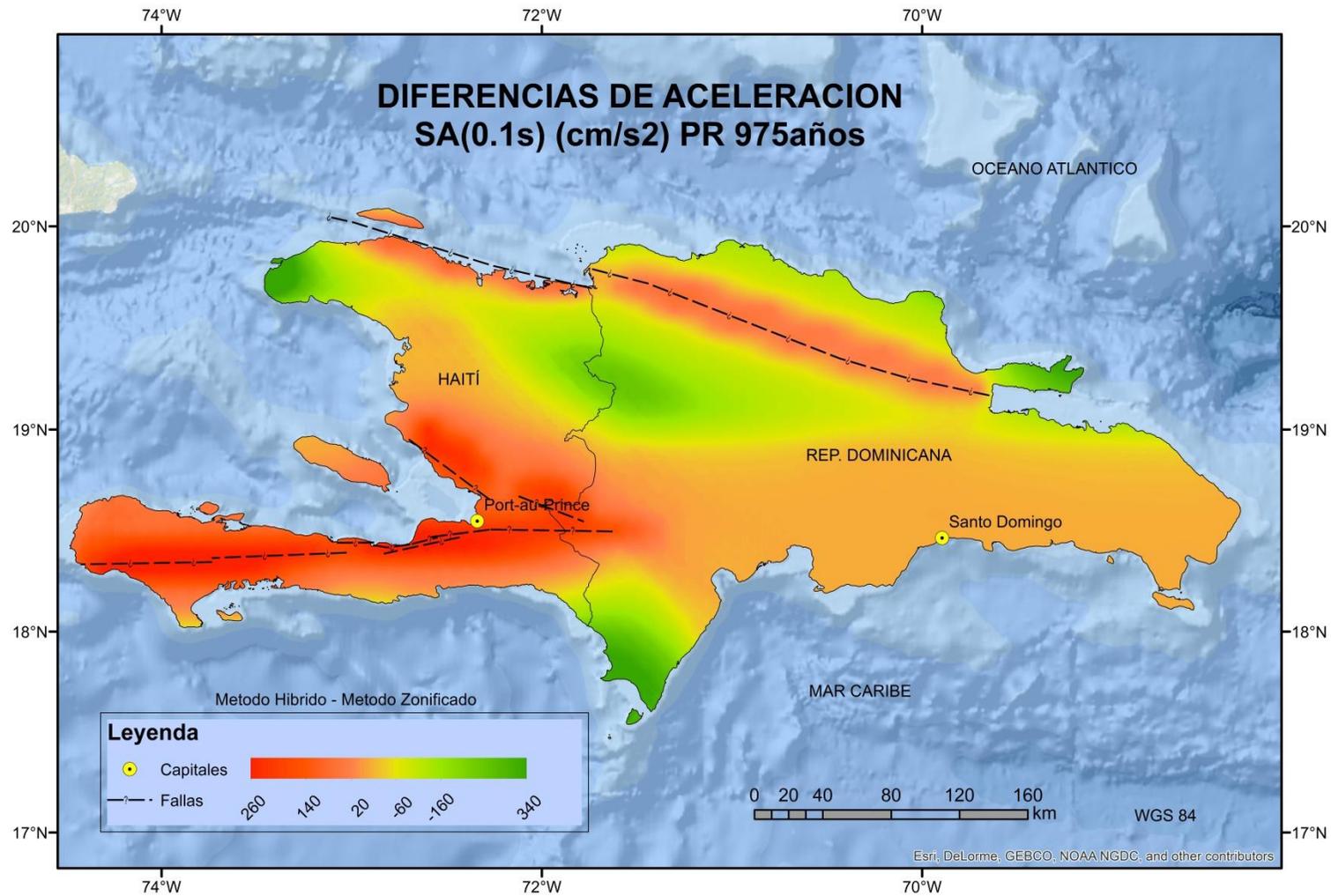


Fig. 9-17 Mapa diferencias de aceleración Método híbrido – método zonificado. SA(0.1s) PR975 años

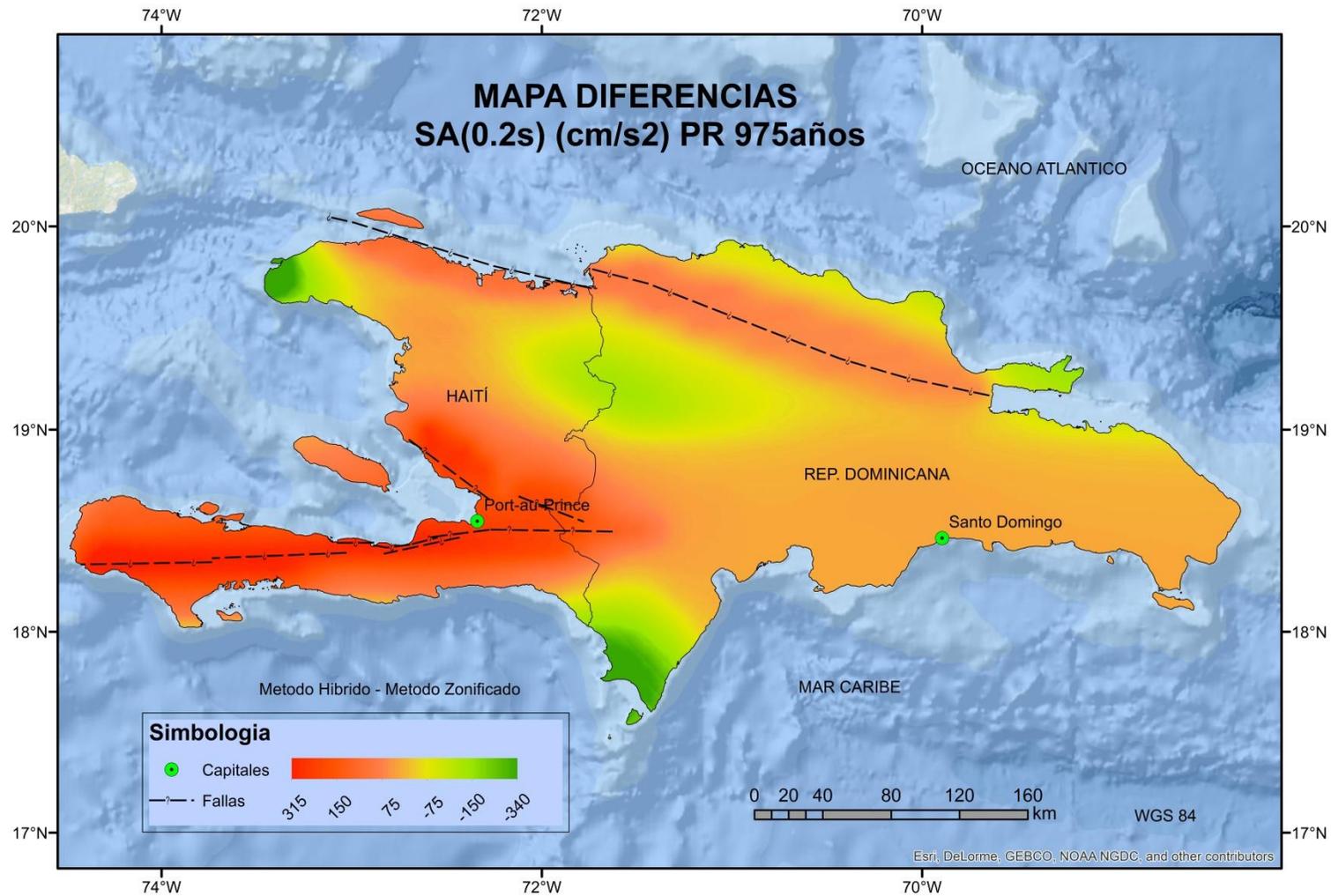


Fig. 9-18 Mapa diferencias de aceleración Método híbrido – método zonificado. SA(0.2s) PR975 años

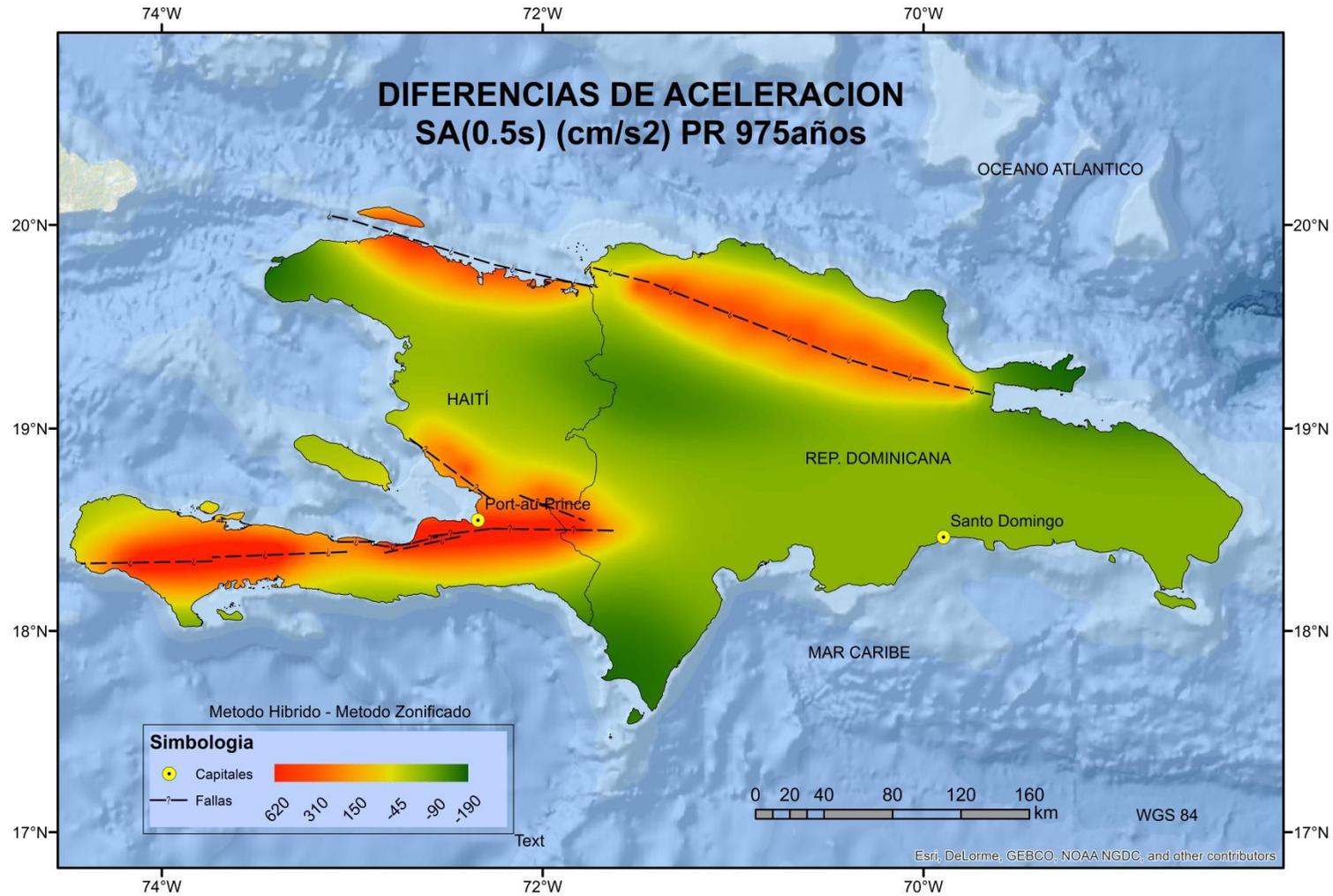


Fig. 9-19 Mapa diferencias de aceleración Método híbrido – método zonificado. SA(0.5s) PR975años

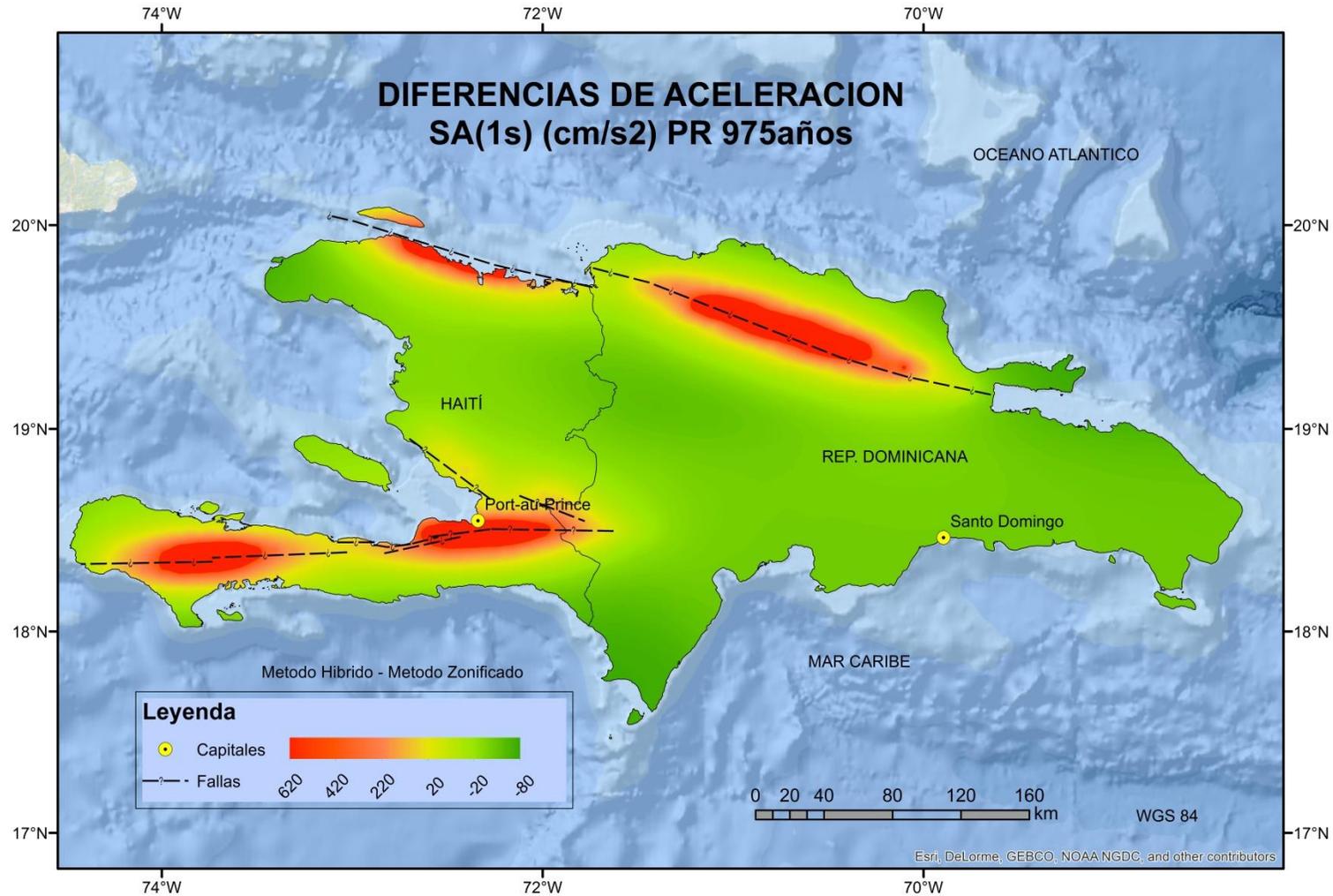


Fig. 9-20 Mapa diferencias de aceleración Método híbrido – método zonificado. SA(1.0s) PR975 años

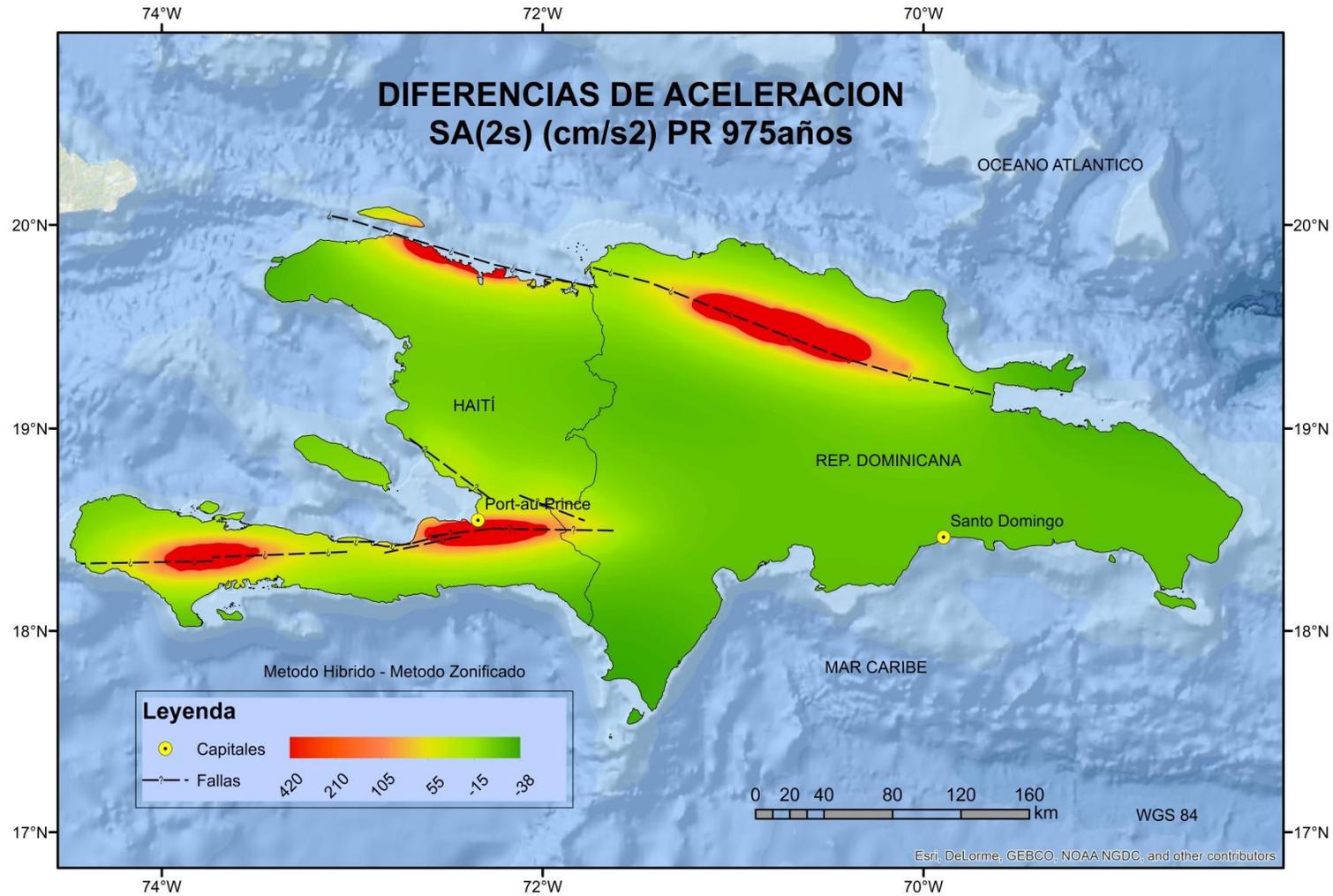


Fig. 9-21 Mapa diferencias de aceleración Método híbrido – método zonificado. SA(2.0s) PR975 años

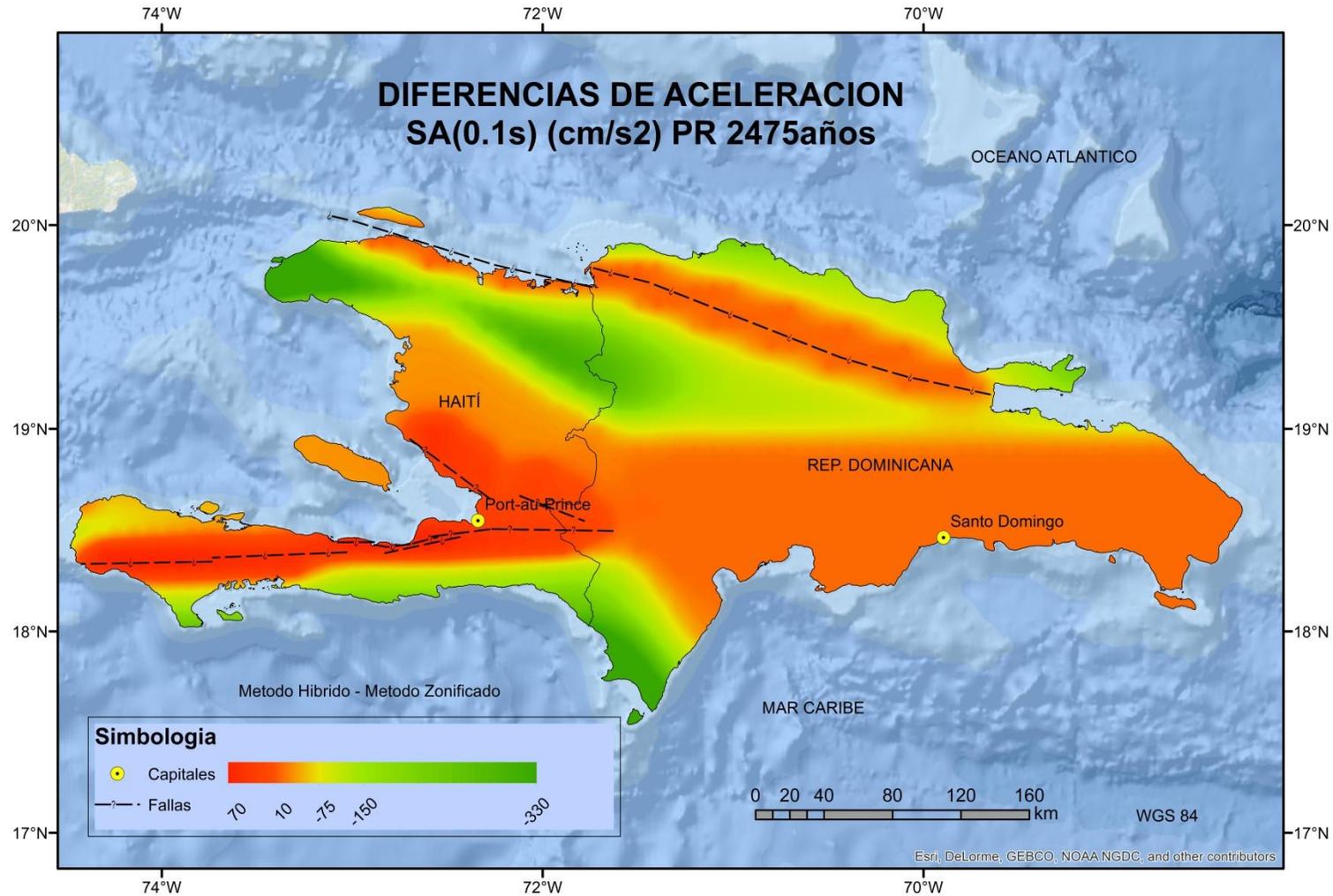


Fig. 9-22 Mapa diferencias de aceleración Método híbrido – método zonificado. SA(0.1s) PR2475 años

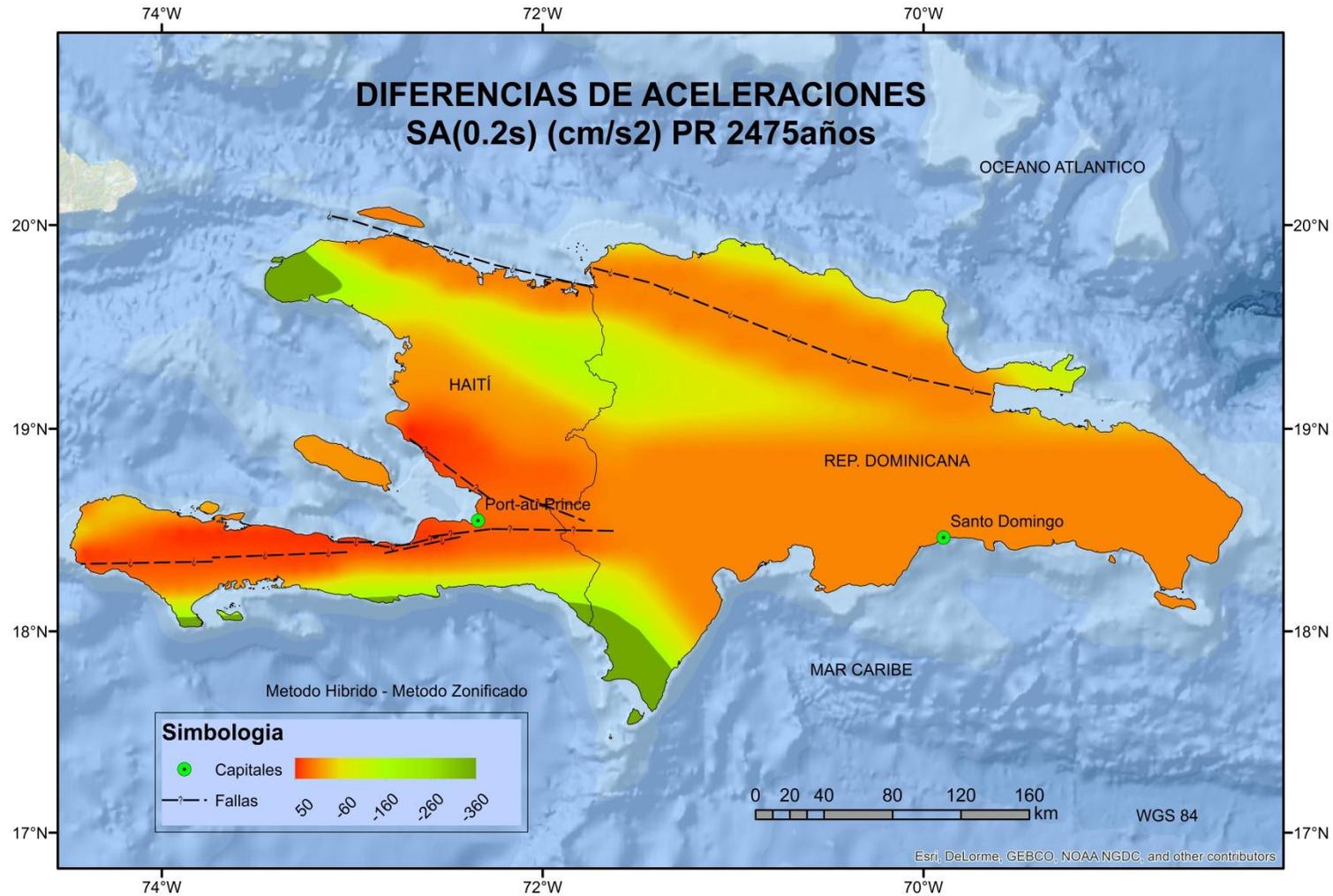


Fig. 9-23 Mapa diferencias de aceleración Método híbrido – método zonificado. SA(0.2s) PR2475 años

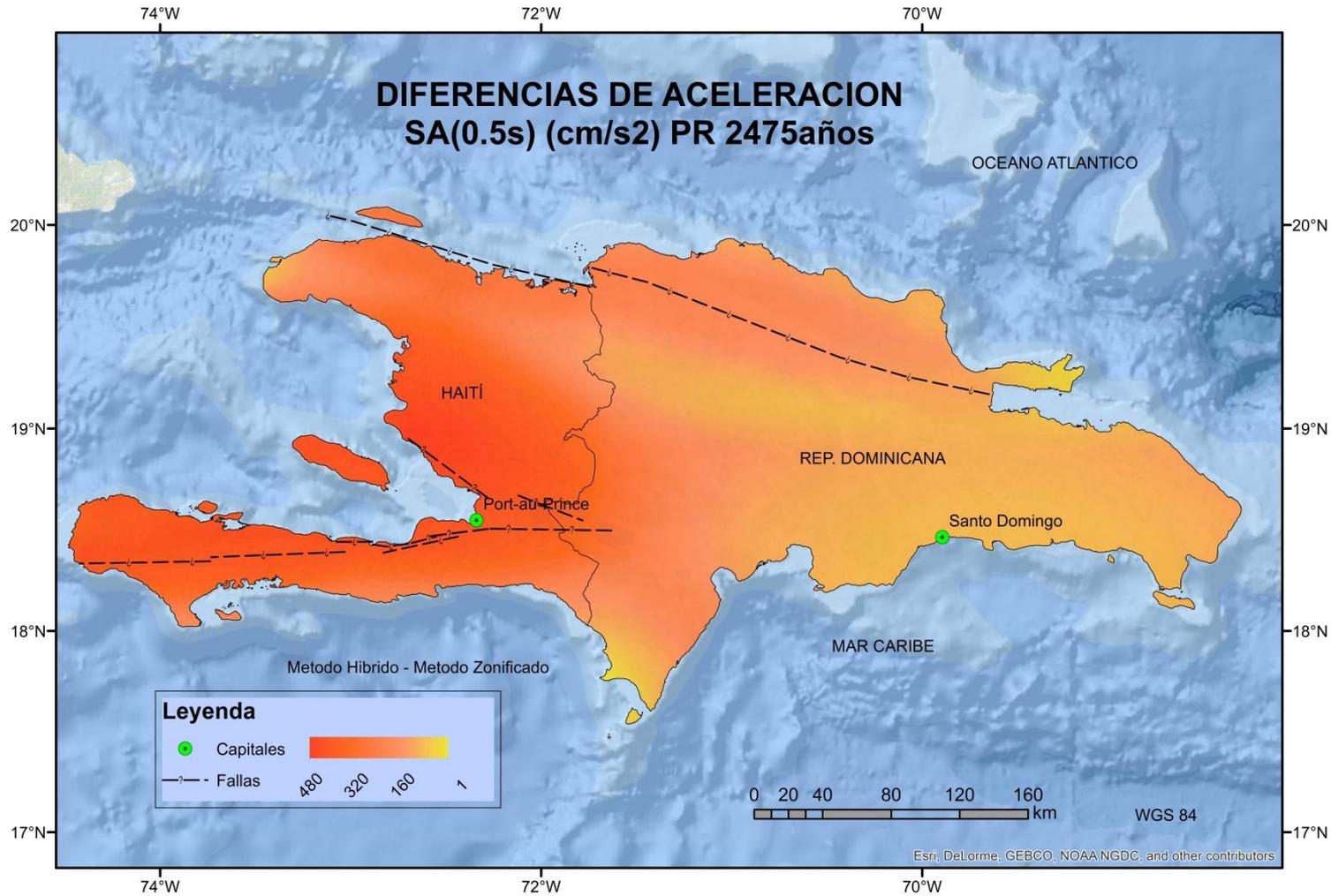


Fig. 9-24 Mapa diferencias de aceleración Método híbrido – método zonificado. SA(0.5s) PR2475 años

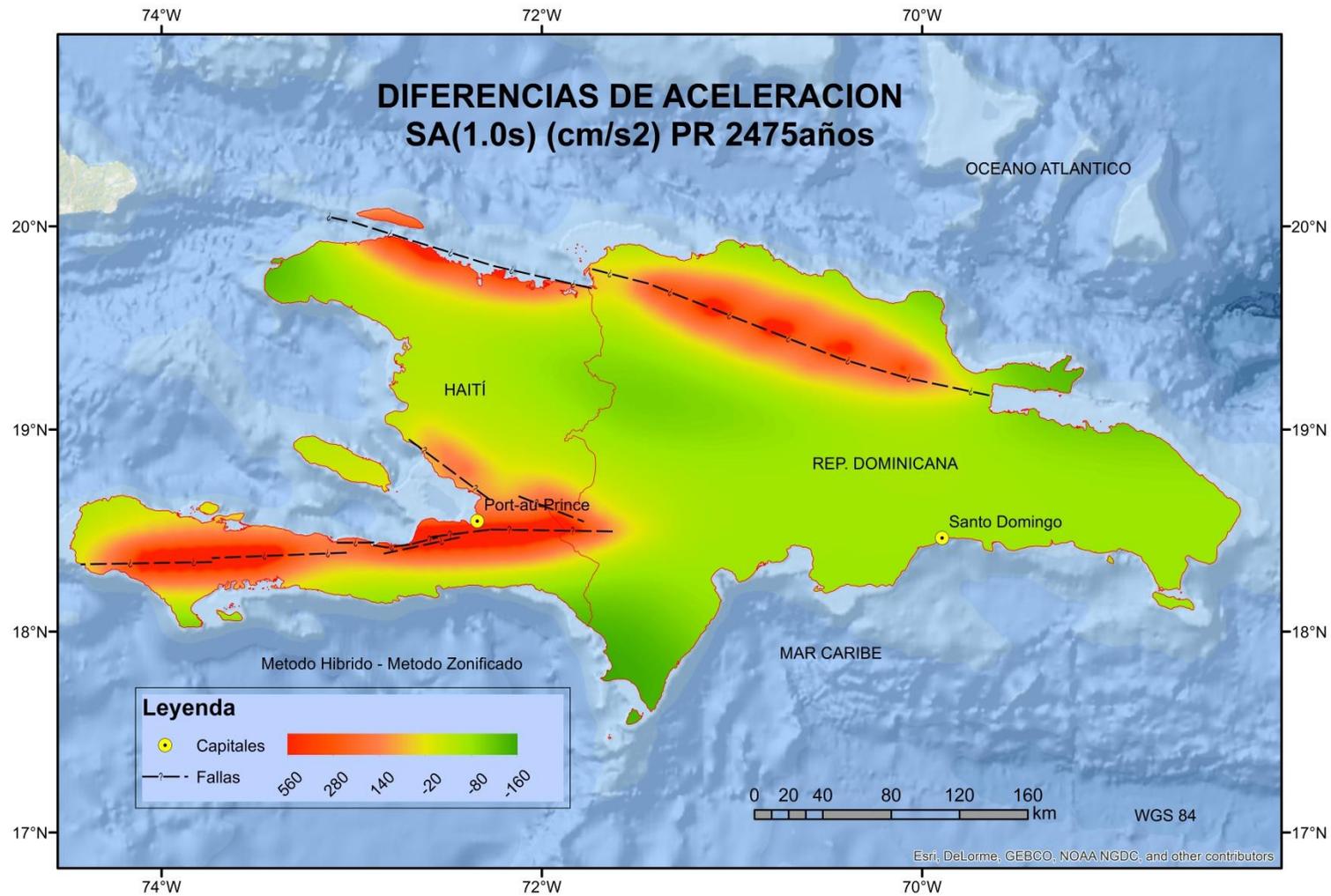


Fig. 9-25 Mapa diferencias de aceleración Método híbrido – método zonificado. SA(1.0s) PR2475 años

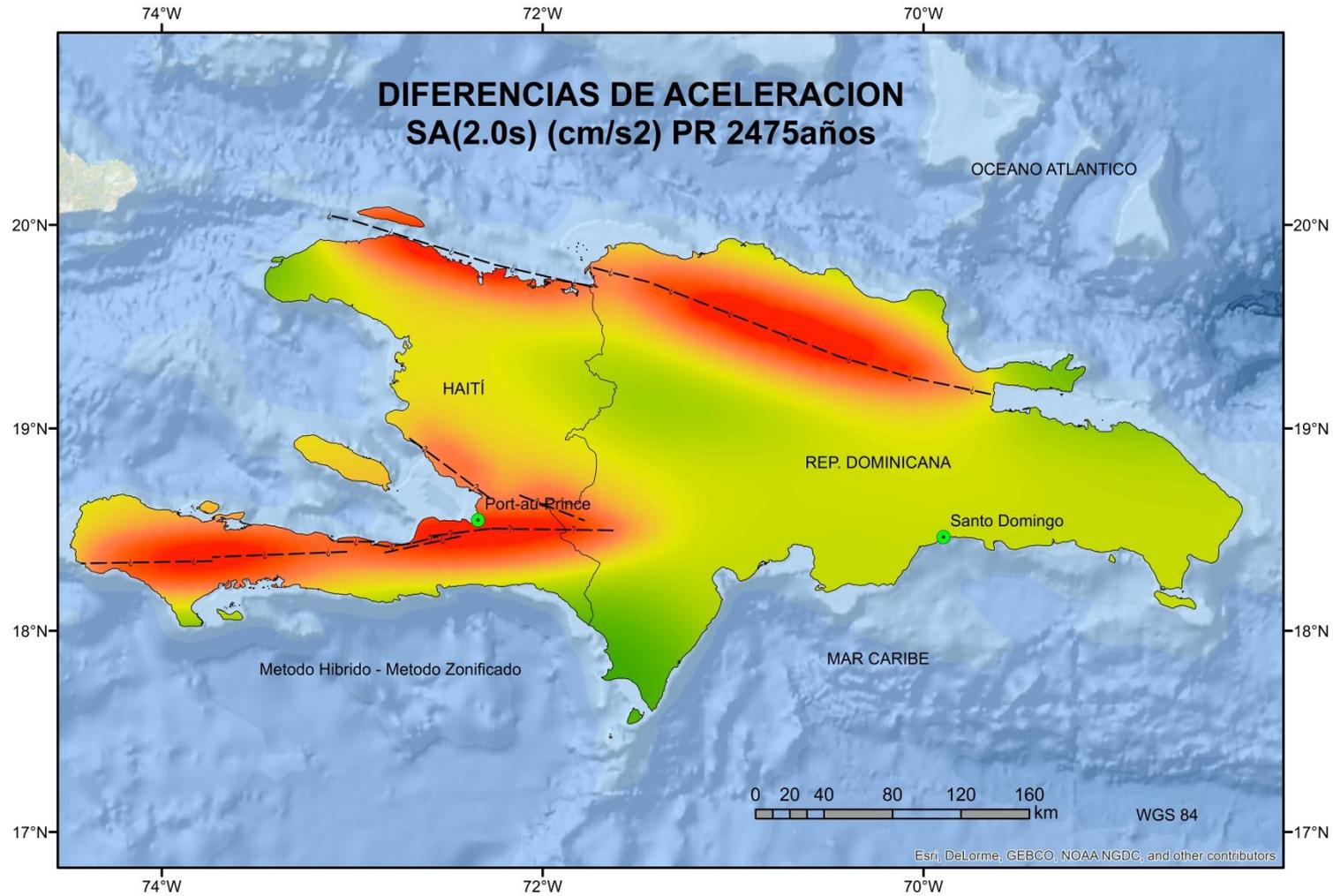


Fig. 9-26 Mapa diferencias de aceleración Método híbrido – método zonificado. SA(2.0s) PR2475años

