

Características de las principales áreas sísmicas de Cuba

Mario Octavio Cotilla Rodríguez^{1*}, Diego Córdoba Barba¹, Leonardo Álvarez Gómez²

¹Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Físicas.

Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica. Plaza de Ciencias 1. 28040, Madrid, España.

²Ministerio de Transporte e Infraestructuras.

Managua, Nicaragua

*macot@ucm.es

Resumen

Se presentan datos y argumentos que sustentan el conocimiento de las diez principales áreas sísmicamente más activas de Cuba. Para su delimitación se consideran varios elementos sismotectónicos. La base del trabajo incluye una revisión profunda de las publicaciones sobre la Provincia Sismotectónica y las cuatro Unidades que la componen. Su sismogénesis la determinan las interacciones entre las placas. Con ellas se configuran los sistemas de fallas, intersecciones y nudos, bloques y celdas geodinámicas. Se hace un diagnóstico de lugares con posibles afectaciones por terremotos fuertes y asegura que el peligro sísmico es de menor nivel que en países vecinos.

Palabras Claves: Cuba, peligro sísmico, terremoto, sismicidad.

Abstract

Some statistics and arguments that support understanding the ten main seismic regions of Cuba. Several seismotectonic factors are considered for their delimitation. This work is based on a detailed examination on the literature-base information on Seismotectonic Province and its Units. The seismogenesis is determined by the plate interactions, which are used to configure the faults, intersections, knots, blocks, and geodynamic cells systems. A diagnostic of locations with probable affectations from strong earthquakes indicates that the seismic hazard in the study area is smaller than in neighboring countries.

Keywords: Cuba, seismic hazard, earthquake, seismicity

Introducción

Cuba es un archipiélago localizado en la región del Caribe, pero desde el punto de vista tectónico, está en la placa de Norteamérica (Figura 1.1). Su actividad sísmica se documenta desde 1528 en la ciudad primada de Baracoa, en la costa nororiental. Con el poblamiento, sucesivo e ininterrumpido, desde el este de la Isla hacia el oeste (Tabla 1; Figura 1.2), los reportes aumentaron significativamente. Las primeras informaciones (siglos XV-XVIII) las emitieron mayoritariamente las autoridades españolas, por lo que se estableció que la región Suroriental no

era la única activa (Figura 2).

En Cuba, incluso actualmente, persiste la falsa creencia de que es únicamente la zona de Santiago de Cuba la que puede ser afectada por terremotos. Esto se debe principalmente a la baja frecuencia de terremotos fuertes y a la escasa educación en materia de peligro sísmico de la población. Por ello, los autores dedicamos este trabajo a proponer un nuevo modelo de áreas con mayor peligrosidad sísmica.

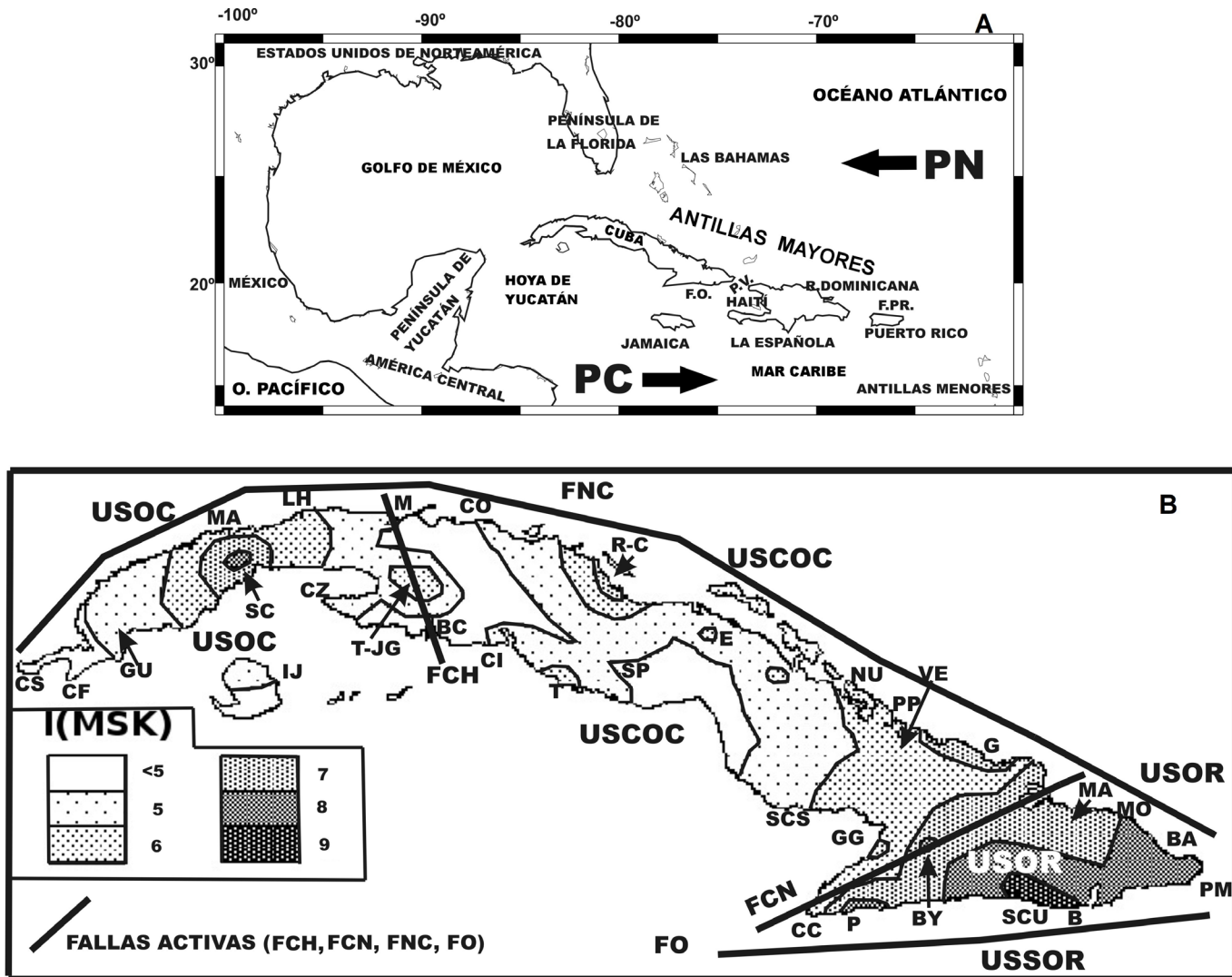


Figura 1. Cuba en el Caribe. A) Localización geográfica y tectónica. Abreviaturas: F.O.=Fosa Oriente, F.PR=Fosa Puerto Rico; P.V.=Paso de los Vientos; PC=Placa Caribe, PN=Placa Norteamérica. Las flechas negras gruesas indican dirección de movimiento.

B) Provincia Sismotectónica y sus Unidades. Abreviaturas: US=Unidad Sismotectónica, USOC=Occidental, USCOC=Centro Occidental, USOR=Oriental, USSOR= Suroriental. Las cuatro US están delimitadas por las fallas activas: FCH=Cochinos, FCN=Cauto-Nipe, FNC=Nortecubana, FO=Oriente. Localidades: B=Baconao, BA=Baracoa, BC=Bahía de Cochinos, BY=Bayamo, C=Cienfuegos, CC=Cabo Cruz, CO=Corralillo, CZ=Ciénaga de Zapata, E=Esmeralda, GI=Gibara, GU=Guane, IJ= Isla de la Juventud, LH=La Habana, M= Matanzas, MA= Mayarí, NU=Nuevitás, P= Pilon, PM=Punta de Maisí, R-C=Remedios-Caibarién, SCU=Santiago de Cuba, SC=San Cristóbal, SCS=Santa Cruz del Sur, SP=Sancti Spiritus, T=Trinidad, T-JG=Torriente-Jagüey Grande, VE=Velasco. El mapa de Intensidades Máximas reportadas en Cuba (1528-1990) es de Chuy-Rodríguez, 1999) con seis zonas de Intensidad (<5-9).

Tabla 1. Datos generales sobre algunas localidades de Cuba.

Nº	Localidad	Fundación/ Habitantes (10 ³)	Nº	Localidad	Fundación/ Habitantes (10 ³)
1	Bahía de Cochinos	1850/ 0.1	10	La Habana	1514/ 2,141.7
2	Baracoa	1511/ 79.8	11	Matanzas	1693/ 145.2
3	Bayamo	1513/ 238.58	12	Moa	1939/ 57.7
4	Cabo Cruz	1494/ 0.1	13	Pilón	1779/ 29.5
5	Caibarién	1832/ 38.5	14	Remedios	1513/ 45.6
6	Candelaria	1809/ 19.5	15	San Cristóbal	1830/ 29.1
7	Corralillo	1879/ 21.6	16	Sancti Spíritus	1514/ 141.0
8	Gibara	1817/ 71.1	17	Santiago de Cuba	1515/ 444.9
9	Guane	1878/ 35.7	18	Torriente	1687/ 7.3
10	Jagüey Grande	1840/87.8	19	Trinidad	1514/ 75.0

Nota: Población de Cuba en 2018 era de 11,338,138 (<https://datosmacro.expansion.com/demografia/poblacion/cuba>)

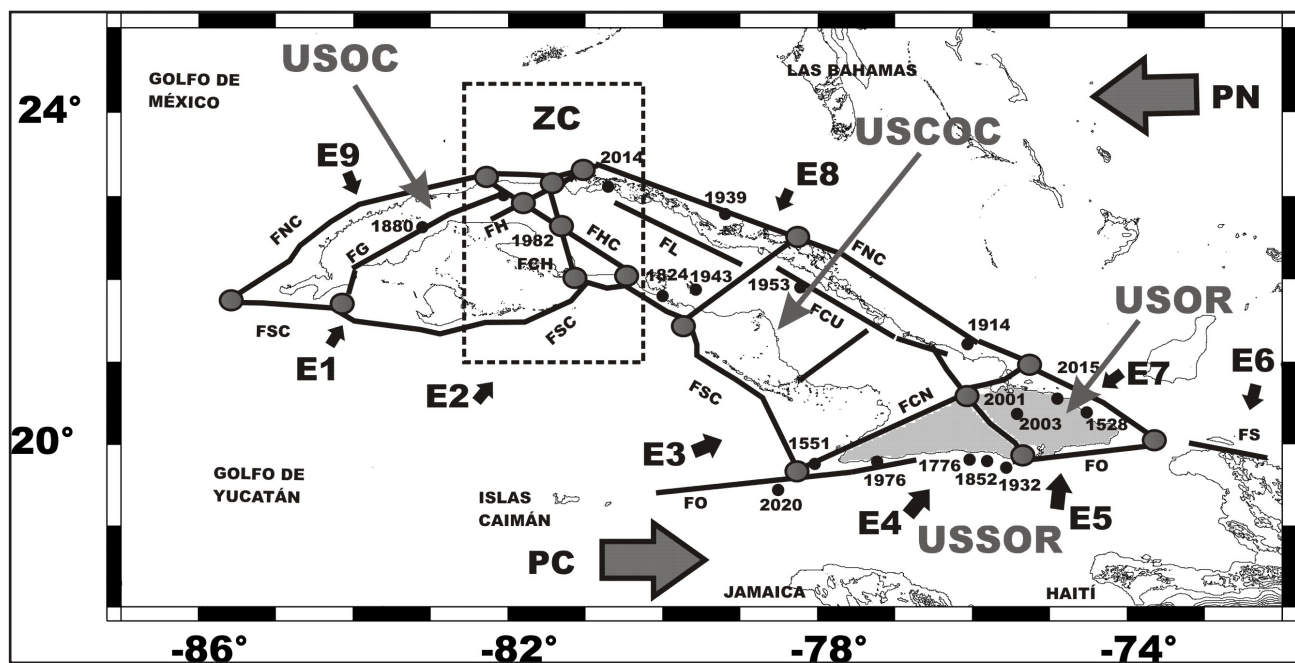


Figura 2. Mapa sismotectónico simplificado de Cuba. Fallas indicadas con líneas negras: FCU= Cubitas, FG=Guane. FH=Hicacos, FHC=Habana-Cienfuegos, FL=Las Villas, FS=Septentrional, FSC=Surcubana). Los epicentros son los círculos pequeños negros con año; El tensor σ_{hmax} se indica con la flecha negra pequeña y letra-número (E1-5). Las intersecciones o nudos son los círculos de color gris con borde negro. El sentido de movimiento de las placas PC=Caribe y PN=Norteamérica se indica con flechas gruesas de color gris. Las Unidades Sismotectónicas son: USOC=Occidental, USCOC=Centro-Occidental, USOR=Oriental, USSOR=Suroriental (siglas en gris) y ZC=Zona de cambio estructural en el rectángulo discontinuo.

Neotectónica

Para la preparación de este apartado se han empleado los trabajos de Cotilla (2014), Cotilla-Rodríguez (2017), Cotilla y Córdoba (2017, 2018), Cotilla *et al.*, (2007, 2020) y Mann y Burke (1984). Se considera que Cuba es una estructura insular del norte caribeño de 110,922 km², que en conjunto con otras islas vecinas se conocen como Arco de las Antillas Mayores (longitud de ~4.800 km) (Figura 1.1). Constituye un megabloque emergido y en ascenso diferencial entre sus partes que está incorporado tectónicamente al borde meridional de la placa Norteamérica. Las particularidades estructurales, complejas y heterogéneas, fueron adquiridas en dos etapas del desarrollo geológico: 1) orogenia cubana -Eoceno Medio-; 2) neotectónica -Post Eoceno Superior-, las cuales se caracterizan, por movimientos compresivos, transpresivos y verticales oscilatorios. Éstos son los responsables de la diferenciación y la división en bloques, y del desarrollo de una cobertura sedimentaria poco deformada que cubre, parcialmente, a las estructuras pre neotectónicas y que se reflejan en el relieve. La división se produjo a partir de los límites tectónicos de la etapa pre Eoceno Superior, como zonas favorables a rupturas, aunque con otro estilo y tendencia, principalmente vertical. La complejidad estructural se evidencia en los cortes geológicos e investigaciones geofísicas indican que se encuentran apiladas, mezcladas, desplazadas y dislocadas diferentemente en distintas zonas estructurales.

El megabloque cubano, en ocasiones denominado microplaca, se compone de un conjunto articulado de bloques, fallas, intersecciones de fallas, o nudos y celdas geodinámicas. En él sobresale el límite de las placas Caribe y Norteamérica, la falla Bartlett-Caimán, que en el sector Islas Caimán-sur de Cuba Oriental se conoce como falla Oriente. Éste es un límite tectónico activo de primer orden en la dimensión regional.

Sismicidad y sismotectónica

En el Caribe Septentrional la historia sísmica demuestra que: 1) la $M_{\text{máx}}$ estimada es 8.2; 2) han ocurrido: 2.1) ~100 terremotos fuertes; 2.2) 28 tsunamis locales; 3) se han producido ~106 fallecidos y cuantiosas pérdidas económicas. A modo de ejemplo, del peligro sísmico y real, se dan las siguientes cifras comparativas: 1) Los dos terremotos de 1907 en Jamaica produjeron ~2,000 muertos; el terremoto de 2010 de Haití ocasionó ~316,000 muertos y pérdidas estimadas por 14x10⁹ USD (Cotilla, 2007, 2012; Cotilla-Córdoba, 2017, 2018). Esos valores son muy superiores a los determinados para Cuba por (Cotilla-Rodríguez, 1993; Cotilla 2010, 2014; Cotilla y Álvarez, 1997).

Cotilla (2012) realizó un análisis exhaustivo de la historia sísmica del Caribe Septentrional y determinó los datos mostrados en la Tabla 2. Ellos indican que Cuba tiene, en cifras, el menor peligro sísmico. De acuerdo con la Tabla 2.10 (Síntesis de la Sismicidad de Cuba para períodos de tiempo de 50 años e Intensidades MSK, periodo 1521-1990) de Chuy-Rodríguez (1999) se constató que de un total de 961 eventos, hay sólo 10 para el intervalo de 1521-1750 y en el periodo 1751-1990 son 951. Evidentemente se corresponde perfectamente con lo argumentado en la introducción respecto al sucesivo y sostenido poblamiento del archipiélago. Además, en la Tabla 2.4 (Cantidad de reportes de sismos perceptibles en la provincia Santiago de Cuba, de I= III a I= IX (escala MSK1978), para el mismo periodo y del mismo autor) hay 537 terremotos. Eso significa que 414 se asocian a la mayor parte del territorio cubano. La proporción o tasa superficie territorial/ años es de 0.17 en Santiago de Cuba y de 0.02 en el resto del archipiélago. Esto justifica la falsa creencia mencionada anteriormente.

Tabla 2. Datos de terremotos y tsunamis en la región.

	Cuba	Jamaica	Haití	República Dominicana	Puerto Rico	Total
Terremotos con $M \geq 7.0$	4	4	7	12	6	33
Tsunamis locales	2	8	11	3	4	28
La Española	Terremotos con $M \geq 7.0 = 19$			Tsunamis locales = 14		

Las zonas sismogénicas de Cuba (Figura 2) son áreas en general alargadas, donde descansan la concentración de epicentros, la mayor actividad sísmica con relación al entorno, y los esfuerzos, relativamente, uniformes y coherentes. Las zonas sismogénicas delimitadas por los autores, se basan en estudios de percepción remota, neotectónica, tectónica activa y datos contenidos en catálogos de terremotos históricos e instrumentales.

Los resultados de Álvarez *et al.* (1985, 1990, 1999, 1999a, 2015, 2017), Chuy (1989), Chuy-Rodríguez (1999), Cotilla (2007, 2010, 2012, 2014a, 2016, 2017), Cotilla y Álvarez (1997) y Cotilla y Córdoba (2010, 2018) permiten sostener que Cuba es una Provincia Sismotectónica del sur de la placa de Norteamérica. En ella los tipos de sismicidad bien definidos son de interior de placa Norteamericana y entre placas (Norteamérica-Caribe). El segundo tipo es el más importante y está localizado en la zona suroriental. En las tres Unidades Sismotectónicas (Occidental=USOC, Centro-Occidental=USCOC, y Oriental=USOR) de Cuba, está el primer tipo de sismicidad, que es de menor nivel en cuanto a frecuencia de ocurrencia y energía de los terremotos. La Unidad Sismotectónica Suroriental (USSOR), es la zona de contacto entre las placas en el sur de Cuba Oriental -Cabo Cruz y Punta de Maisí- (Figuras 1.2 y 2). Indicamos que la USOR, está definida entre tres líneas de fallas activas -Oriente, Nortecubana y Cauto-Nipe- como una estructura peculiar ya que tiene características de las otras unidades. Cotilla y Álvarez (1997) la denominaron como unidad de tipo intermedio y la incluyeron en la Zona Límite de Placas [ZLP] definida por Mann y Burke (1984) (Figura 3). Ésta es una extensa banda sismogénica que incluye los terremotos indicados en la Tabla 3.

La ausencia o escasas estaciones sísmicas permanentes en las USOC y USCOC, siempre ha limitado la detección de terremotos débiles. El CENAI (2020) opera actualmente 18 estaciones y asegura que tiene planeada la instalación de otras, pero aún quedan zonas sin cobertura (Cotilla *et al.*, 2020). En la Tabla 4 se han seleccionado cinco terremotos para ilustrar la actividad sísmica en las cuatro US. Hasta el momento ningún terremoto en Cuba ha tenido manifestaciones en la superficie. Dos de los muchos terremotos ocurridos en la USOR están en la Tabla 3. En esta US hay gran cantidad de terremotos de baja energía que son producto de la influencia de la transmisión de tensiones desde el límite de placas. Estos eventos son de interior de placa (Tablas 5 y 6).

En la Provincia Sismotectónica de Cuba las dos grandes zonas sísmicas se caracterizan a partir de 17 elementos propios de su actividad (Tabla 7). Otro rasgo notable es la distribución regular espacio-temporal de los principales terremotos en las USOC y USCOC (Tabla 8). De ellas se aprecia la muy diferente frecuencia de repetición entre terremotos fuertes que en la USOC es de ~100 años (sólo el terremoto de 1880; Cotilla, 2014); el tiempo en USCOC es de ~25 años (terremotos de 1914 y 1939; Cotilla, 2014). La falla Nortecubana es la responsable de la mayor actividad sísmica del interior de placa y la mayor $M_{\text{máx}}$ 6.2 registrada y determinada en la zona de interior de placa está en dos áreas diferentes y distantes ~800 km con un periodo de recurrencia de ~35 años (San Cristobal y Gibara).

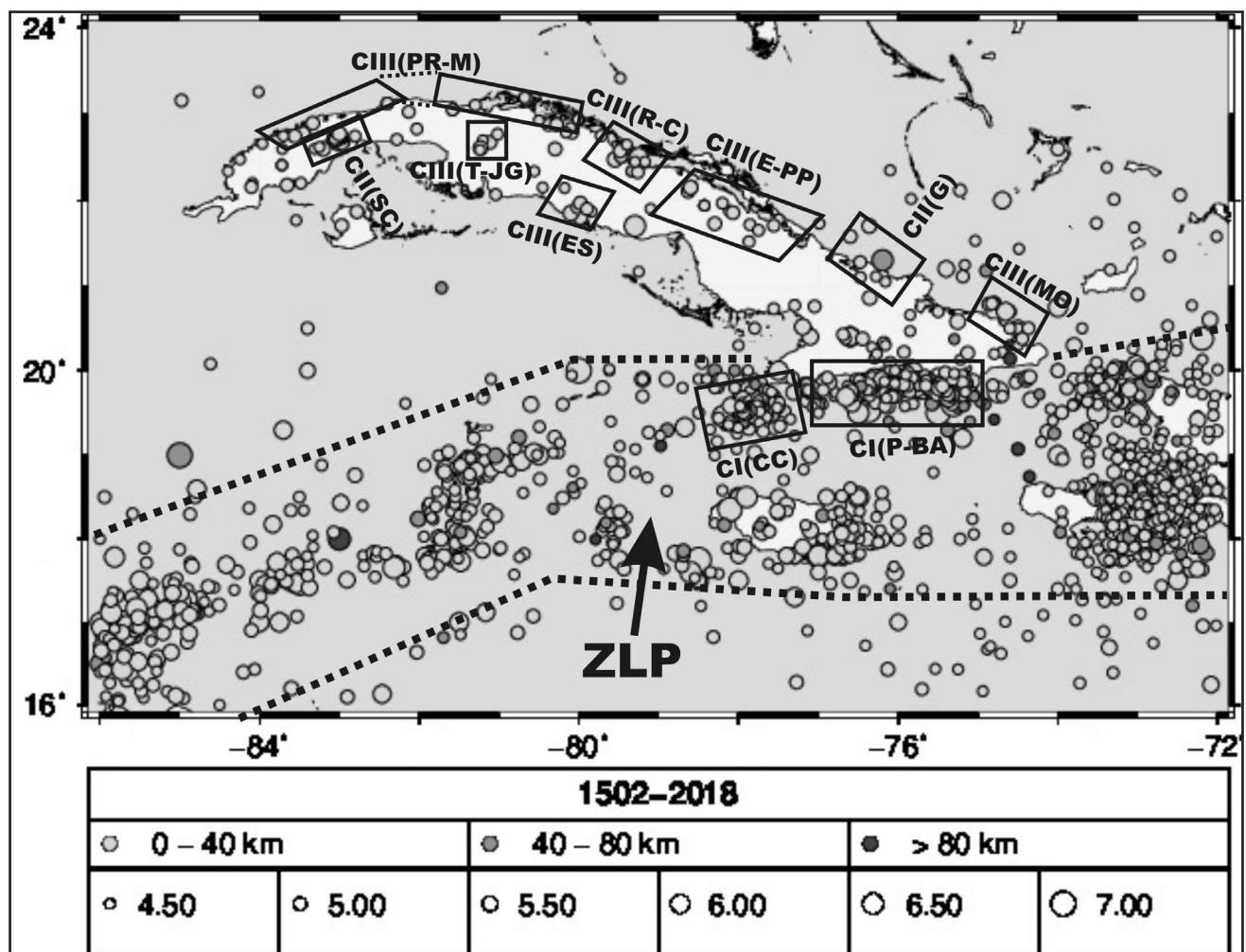


Figura 3. Mapa de las áreas sísmicas de Cuba. Aparecen: 1) epicentros de terremotos (CENAI, 2019); 2) áreas de actividad sísmica (rectángulos con siglas (ver Tablas 9-11)); 3) los trazos discontinuos delimitan la Zona Límite de Placas -ZLP-).

Tabla 3. Datos de dos terremotos perceptibles en la zona de interior de placa (USOR).

Fecha	M/ I/ h(km)	Coordenadas (N O)	Localizado	Perceptible	Isosistas
2003.10.13	4.6/ V/ 10	20,284 75,649	Mayarí	Si	Si
2001.11.19	4.2/ V/ 33	20,610 76,096	falla Cauto-Nipe	Si	Si

Tabla 4. Características de los principales terremotos de Cuba.

US	Terremoto más fuerte/ Tiempo	Mmáx/ Imáx/ h(km)	Coordenadas (N O)	Isosistas/ Perceptibilidad (10^3 km^2)/ Índice de forma/ Réplicas	Pérdidas ($10^6 \text{ \$}$)	Fallecidos/ Heridos	Ruptura (km)	Tsunami local
OC	1880.01.23/ 4:30:00	6.2/ VIII/ 25	22.7 83.0	Si/ 40/ 0.68/ 65	1	3/ 20	35	No
COC	1914.02.28/ 3:21	6.2/ VII/ 50	21.30 76.20	Si/ 25/ 0.75/ 9	<0.01	-/ 2	15	No
OR	2003.10.13/	4.6/ V/ 33	20.284 75.649	Si/ 20/ 0.71/ 5	-	-	-	No
SOR	1766.06.11/ 00:00	7.2/ IX/ 30	19.9 76.1	Si/ 85/ 0.79/>60	10	40/ 700	80	No
	2020.01.28/ 19:10:24	7.7/ III/ 14.8	19.419 78.156	Si/ 25/ 0.83/>20	-	-	79	No

Notas: 1) US=Unidad Sismotectónica; 2) OC=Occidental, COC=Centro-Occidental, OR=Oriental, SOR=Suroriental; 3) Todas las intensidades sísmicas en el texto están en MSK (1978)]. Notas: 1) US=Unidad Sismotectónica; 2) OC=Occidental, COC=Centro-Occidental, OR=Oriental, SOR=Suroriental; 3) Todas las intensidades sísmicas en el texto están en MSK (1978)].

Tabla 5. Datos de los eventos más fuertes en las áreas de interior de placa (USOC y USCOC).

Fecha/ US	M/ I/ Réplicas	Coordenadas (N O)	Isosistas/ Epicentro en/ Tipo/ Índice de forma/ Área (10^3 km^2)	Falla/ Ruptura (km)
1880.01.23/ OC	6.2/ 8/ 65	22.70 83.00	Si/ Tierra/ completa/ 0.68/ 40	G/ 35
1914.02.28/ COC	6.2/ 7/ 9	21.30 76.20	Si/ Mar/ media/ 0.75/ 25	NC/ 15
1939.08.15/ COC	5.6/ 7/ 24	22.50 79.25	Si/ Mar/ media/ 0.71/ 19	NC/ 20

Notas: 1) US=Unidad Sismotectónica; 2) OC=Occidental, COC=Centro-Occidental; 3) G=Guane, NC=Nortecubana.

Tabla 6. Resumen de terremotos asociados a la falla Nortecubana.

	Segmento [cantidad de eventos/ rango M/ rango h (km)]				
Terremotos	Occidental	Central	Oriental	Total/ Años	
Históricos	21/ 2.5-4.2/ 10-20	13/ 3.1-4.5/ 10-15	1/ 5.0/ 10	35/ 408	
Instrumentales	25/ 2.5-4.4/ 10-20	166/ 0.1-6.2/ 2-74	111/ 0.2-5.6/ 2-74	302/ 123	Tasa
Total	46	179	112	337/ 530	0.64

Tabla 7. Principales características de las grandes zonas sísmicas de Cuba.

Nº	Características	Sismicidad	
		Entreplacas	Interior de placa
1	Magnitud máxima/ Profundidad máxima (km)	7.7/ 60	6.2 / 25
2	Distancia máxima entre eventos fuertes (km)	100	825
3	Periodo de repetición (años)	~80	>100
4	Área máxima de afectación (km ²)	110.000	40.000
5	Distancia máxima de perceptibilidad (km)	~800	~300
6	Epicentro	Mar	Tierra y mar
7	Isosistas	Medias	Completas y medias
8	Intensidad máxima	IX	VIII
9	Estimado de la ruptura máxima (km)	85	58
10	Terremotos producidos (%)	~75	<25
11	Rangos de magnitud/ cantidad de terremotos	7.2-6.0/ 6; 5.9-5.0/ 18	6.2-6.0/ 2; 5.9-5.0/ 3
12	Cantidad de muertos	>100	~20
13	Categoría de las zonas sismogénicas	1	2-5
14	Cantidad de zonas sismogénicas lineales	1	12
15	Cantidad de intersecciones activas	3	14
16	Cantidad de celdas geodinámicas	1	10
17	Unidades Sismotectónicas	USSOR	USOC, USCOC, USOR

Nota:USSOR=Unidad Sismotectónica Suroriental, USOC=Unidad Sismotectónica Occidental, USCOC=Unidad Sismotectónica Centro-Occidental, USOR=Unidad Sismotectónica Oriental.

Tabla 8. Datos (espaciales y temporales) de los principales terremotos en las USOC y USCOC.

Sitio 1 (M)/ Sitio 2 (M)	Distancia (km)	Tiempo transcurrido (Años)	US
San Cristóbal (6.2)/ Gibara (6.2)	825	34	OC-COC
San Cristóbal (6.2)/ Remedios Caibarién (5.6)	400	59	OC-COC
San Cristóbal (6.2)/ Torriente Jagüey Grande (5.0)	200	102	OC-OC
Gibara (6.2)/ Remedios-Caibarién (5.6)	450	25	COC-COC
Gibara (6.2)/ Torriente-Jagüey Grande (5.0)	620	68	COC-OC
Remedios-Caibarién (5.6)/ Torriente-Jagüey Grande (5.0)	175	43	COC-OC

Notas: 1) US=Unidad Sismotectónica; 2) OC=Occidental, COC=Centro-Occidental.

Discusión

Los resultados de Armenian *et al.* (1997), Radulian *et al.* (2000), Witze (2010), Hall (2011) y Housemann (2018) centran la atención en los ambientes sismogénicos de interior de placa y entre placas para las ciudades grandes de Europa, similar a lo realizado para Cuba en este trabajo. Hay varios ejemplos de procedimientos específicos, para la identificación de la vulnerabilidad de las ciudades (Álvarez *et al.*, 1985, 1990; Real *et al.*, 1996; Ulomov, 1999; García-Pérez *et al.*, 2003; Maldonado-Rondón y Chio-Cho, 2005; Qaisar y Akhtar, 2005; Grünthal *et al.*, 2010).

Con esos datos y nuestros resultados se han identificado en Cuba diez áreas con sismicidad diferencial y significativa (Tablas 9, 10, 11 y Figura 3). Ellas son por orden alfabético: 1) Cabo Cruz, 2) Caibarién, 3) Escambray, 4) Esmeralda-Puerto Padre, 5) Gibara, 6) Moa, 7) N de Pinar del Río-N de Matanzas, 8) Pilón-Baconao, 9) Torriente-Jagüey Grande, 10) San Cristóbal. La separación en áreas mencionada es evidentemente una

aproximación muy económica a la microzonación sísmica.

Esas áreas están divididas en tres categorías (CI, CII, y CIII) (Figura 3) a partir de la localización tectónica del terremoto, la magnitud, la frecuencia de ocurrencia, la cantidad de fallecidos y la superficie afectada. Entre las áreas delimitadas están Cabo Cruz y Pilón-Baconao, las cuales son las zonas de mayor nivel energético de Cuba. Ellas están localizadas en el límite entre las placas y han afectado históricamente al suroriente de la Isla e incluso, significativamente, a la ciudad de Bayamo, en la zona interior. Los periodos de recurrencia estimados de estos eventos son <100 años. Se destaca que entre los rasgos distintivos de estas zonas, los eventos no producen tsunamis locales y que el sector de Cabo Cruz es una intersección (o nudo) de fallas (Oriente y Cauto-Nipe) y el de Pilón-Baconao es la falla Oriente (Figura 2).

El segmento este de la falla Oriente, Baconao-Punta de Maisí (Figura 2), también forma parte del límite de placas. Sin embargo, éste es de muy baja energía y las magnitudes de sus terremotos

Tabla 9. Características principales áreas sísmicas de Cuba (Parte A).

Nº	Área	US	Categoría US	Estruc- tura	Denominación de las fallas principales	Longitud (km)	Categoría fallas
1	Cabo Cruz	SOR	US	Nudo	Oriente/ Cauto-Nipe	700/ 240	1/2
2	Pilón-Baconao			Falla	Oriente	490	1
3	San Cristóbal	OC	III		Guane	280	2
4	Caibarién	COC			Nortecubana	270	
5	Gibara				290		
6	Esmeralda-Puerto Padre				Cubitas	135	4
7	N Pinar-N Matanzas	OC			Nortecubana	210	3
8	Torriente-Jagüey Grande	COC		Nudo	Cochinos/ Habana- Cienfuegos	200/ 250	
9	Escambray			Falla	Surcubana	100	
10	Moa	OR			Nortecubana	120	2

Notas: 1) US=Unidad Sismotectónica; 2) OC=Unidad Sismotectónica Occidental, COC=Unidad Sismotectónica Centro-Occidental, SOR=Unidad Sismotectónica Suroriental; OR=Oriental; 3) la numeración de las áreas se mantiene en las siguientes tablas.

Tabla 10. Características principales de las áreas sísmicas de Cuba (Parte B).

Nº	Terremotos	Actividad sísmica/ Réplicas/ Tsunami local	M/ I/ h(km)/ Fallecidos/ Heridos	Área (10 ³ km ²)
1	1551.10.18	Natural/ Si/ No	(6.6)/ IX/ 15/ -/ 7	4
2	1776.06.11		(7.2)/ IX/ 30/ 96/ 1,333	10
3	1880.01.28		(6.2)/ VIII/ 25/ 3/ 20	5
4	1939.08.15		(5.6)/ VII/ 20/ -/ 10	3
5	1914.02.28		6.2/ VII/ 50/ -/ 5	5
6	1953.01.01		4.3/ VI/ 15/ -/ -	0.2
7	2014.01.09		5.0/ V/ 10/ -/ -	1
8	1982.12.16		5.0/ VI/ 20/ -/ 2	1
9	1943.07.30	Inducida/ Si/ No	(4.6)/ VI/ 15/ -/ -	0.3
10	2015.01.21		4.1/ V/ 16/ -/ -	0.5

Tabla 11. Características principales de las áreas sísmicas de Cuba (Parte C).

Nº	Frecuencia (años)	Terremotos similares	Zona de	Siglas (Figura 3)	Categoría
1	<100	5	Entre placas	CI (P-BA)	I
2		>20		CI (CC)	
3	>100	1	Interior de placa	CII (SC)	II
4		1		CIII (R-C)	III
5		1		CII (G)	II
6		3		CIII (E-PP)	III
7		5		CIII (MO)	
8		2		CIII (T-JG)	
9		3		CIII (ES)	
10		10		CIII (PR-M)	

Nota: CC=Cabo Cruz, E-PP=Esmeralda-Puerto Padre, ES=Escambray-Sancti Spiritus, G=Gibara, MO=Moa, P=Pilón-Baconao, PR-M=Pinar del Río-Matanzas, R-C=Remedios-Caibarién, SC=San Cristóbal, T-JG=Torriente-Jagüey Grande.

son ligeramente inferiores al segmento N de la falla Nortecubana. En el gran segmento Baconao-Punta de Maisí no se han producido tsunamis locales ni se han registrado fallecidos por terremotos. La intersección de las fallas Oriente y Nortecubana en Punta de Maisí conforma un nudo. A partir de él y hacia el este, donde está la falla Septentrional, en el norte de La Española, la magnitud de los terremotos es 8,0 y se producen tsunamis locales. Cotilla et al. (2020) discute la falta de relación sismogénica de esa estructura activa con las fallas de Cuba.

La interacción del mosaico de placas en la región del Caribe y la consiguiente transmisión de esfuerzos y deformaciones explican también la actividad sísmica en el interior de Cuba. Para estos casos, todos los terremotos son de menor energía y están localizados en la zona de interior de placa. Sin embargo, entre ellos destacan los eventos de M6.2 en 1880 en San Cristóbal y de 1914 en Gibara (Tablas 2 y 5; Figura 2). Éstos pueden considerarse como excepciones a la regla y los estimados del periodo de recurrencia superan los 100 años. Hasta la fecha no se ha producido ningún otro evento de magnitud igual. En la Tabla 8 hay algunos datos de interés que justifican la actividad de la zona de interior de placa en Cuba, relativa a la falla Nortecubana. De acuerdo con Cotilla (2014a) la tasa aproximada, determinada para los eventos/ años es 0.64. Este valor es inferior al propuesto para la zona límite de placas Cabo Cruz-Baconao de 0.84 donde se genera aproximadamente el 70 % de la sismicidad de Cuba. Esto, evidentemente, responde a su diferente sismogénesis. Este último valor es menor que el determinado para el N de La Española-Puerto Rico de 0.93.

Hay otros terremotos importantes en Cuba y que se han producido en la falla Nortecubana (Tablas 5 y 6; Figura 2), la cual causó el evento de Gibara en 1914 (M6.2), de Remedios-Caibarién en 1939 (M5.6) que generó un tsunami local (Tabla 5), de Moa en 2014 (M5.0) y de Corralillo en 2015 (M4.1) (Cotilla et al., 2020). Los tres terremotos se produjeron en igual cantidad de segmentos

de la falla Norte Cubana pero los dos primeros fueron de origen natural, mientras que el tercero pudo ser por la acción antrópica con trabajos geofísicos y de explotación de petróleo y gas. Esto implica que hay al menos cuatro segmentos de falla como se observa en la Figura 2.

La última área con actividad sísmica significativa en Cuba está en las localidades de Torriente-Jagüey Grande, en la provincia de Matanzas (Figuras 1 y 2). El terremoto del año 1982 indicó que la fuente sísmica es un nudo (Chuy et al., 1983) configurado por la intersección de las fallas Cochinos y Habana-Cienfuegos. Además, la complejidad regional y local se ve en las zonas de Corralillo y Torriente-Jagüey Grande ya que están localizadas en la denominada zona de cambio estructural de Cuba (Figura 2), donde se observa una significativa inflexión de las estructuras de NE a NO, en las inmediaciones del E de Pinar del Río-La Habana-Matanzas, la mayor cantidad de zonas de articulación (nudos) de Cuba.

Otros elementos de importancia que sirven como referencia para considerar posibles afectaciones son las valoraciones del terremoto (M, daños en edificaciones y afectación a la vida humana), del más importante al último más fuerte ocurrido según se muestra en la (Tabla 12), así como la frecuencia de ocurrencia.

Todos los resultados aquí utilizados permiten diagnosticar la ocurrencia de posibles afectaciones en las poblaciones de las áreas activas por un terremoto fuerte. En la Tabla 13 se presenta la cantidad de habitantes, permanentes y flotantes. Por consiguiente es factible centrar, primeramente, los estudios en esos entornos y preparar adecuadamente a sus pobladores ($\sim 2.10^6$ habitantes).

La elaboración de mapas con estimaciones cuantitativas y probabilísticas de la peligrosidad sísmica en Cuba la iniciaron Álvarez *et al.* (1985). Para ello se usó la intensidad, la aceleración pico o PGA y se aplicaron los espectros uniformes de peligro, o UHS (Álvarez *et al.*, 2017).

Tabla 12. Características de algunos terremotos en las áreas sísmicas.

Nº	Área	Más importante			Último más fuerte		
		Año	M/ I/ 10 ⁶ \$	Fallecidos/ Heridos	Año	M/ I/ 10 ⁶ \$	Fallecidos/ Heridos
1	Cabo Cruz	1551	(6.6)/ VIII/<0.01	-/ 7	2020	7.7/ V/<0.001	-/ 49
2	Pilón-Baconao	1766	(7.2)/ VII/ 10	40/ 700	1932	6.75/ IX/ 20	25/ 350
3	San Cristóbal	1880	(6.2)/ VIII/ 1	3/ 20	1937	4.5/ VI/ 0.001	-
4	Caibarién	1939	5.6/ VII/<0.01	-/ 10	1940	3.2/ IV/ -	-
5	Gibara	1914	6.2/ VII/<0.01	-/ 5	1916	3.6/ V/ -	-
6	Esmeralda-Puerto Padre	1953	3.9/ VI/ -	-	1974	3.7/ V/ -	-
7	N Pinar-N Matanzas	2000	5.0/ V/ -	-	2014	5.0/ V/ -	-
8	Torriente-Jagüey Grande	1982	5.0/ VII/ 0.001	-/ 2	2015	4.1/ VI/ -	-
9	Escambray	1943	(4.6)/ VI/ -	-	1985	3.3/ V/ -	-
10	Moa	1998	5.6/ V/ -	-	2015	5.1/ V/ -	-

Tabla 13. Algunas localidades que pueden ser afectadas en las áreas sísmicas.

Nº	Población/ Zona	Habitantes
1	Bayamo, Manzanillo, Niquero, Pilon/ Oriental y Suroriental	~281,000
2	Mar Verde, Palma Soriano, Pilon, Río Carpintero, Santiago de Cuba, Siboney/ Suroriental	~432,000
3	Artemisa, Consolación del Sur, Güira de Melena, La Habana, Los Palacios, San Cristóbal/ Occidental	~150,000
4	Caibarién, La Panchita, Placetas, Remedios, Sagua La Grande/ Norte y Centro	~90,000
5	Antilla, Banes, Gibara, Holguín, Puerto Padre/ Extremo Norte Central	~80,000
6	Esmeralda, Nuevitas, Puerto Padre, Velazco/ Norte Central	~75,000
7	Cárdenas, Colón, Corralillo, La Habana, Mariel, Matanzas, Varadero/ Occidental-Central	~1,000,000
8	Jagüey Grande, Jovellanos, Playa Girón, Playa Larga, Torriente/ Central y Sur	~58,000
9	Casilda, Topes de Collantes, Trinidad/ Sur Central	~78,000
10	Baracoa, Mayarí, Moa/ Norte Oriental	~134,000

Tabla 14. Áreas asísmicas de Cuba.

Nº	Área No Sísmica [Siglas]	Algunas localidades	US
1	Cabo de San Antonio-Ciénaga de Zapata [CSA-CZA]	Aguas Claras, Cabo de San Antonio, Cabo Francés, Ciénaga de Zapata, La Coloma, Isla de la Juventud, Punta Carraguao	OCC
2	E de Sancti Spíritus-Golfo de Guacanayabo [ESS-GG]	Cándido González, Guayabal, La Tomatera, Manantiales, Santa Cruz del Sur, Vertientes	COC

Nota: OCC=Occidental, COC=Centro-Occidental.

En la tabla 14 están las dos áreas asísmicas o de muy bajo nivel que describen bandas, en la zona sur de las USOC y USCOC. Ellas representan ~5 % del territorio, correlacionan con los cambios de dirección de los esfuerzos principales, E1-E3 y la mayor distancia de la falla Surcubana a la línea de costa (Figura 2).

Para finalizar, indicamos que el resultado de la Figura 2 mejora los mapas de regionalización sísmica como el de la Figura 1.2. Consideramos que las áreas de mayor peligro están mejor definidas. Por consiguiente es factible centrar, primeramente, los estudios en esos entornos y preparar a sus pobladores.

Conclusiones

La actividad sísmica natural de Cuba es el resultado de la influencia de las placas Norteamérica y Caribe. En la Provincia Sismotectónica predomina la sismicidad entre placas y de interior de placa. El primer tipo es el de mayor nivel y se asocia a la falla Oriente.

Cuba tiene diez áreas con actividad sísmica significativa diferencial: 1) natural en Cabo Cruz, Caibarién, Esmeralda-Puerto Padre, Escambray, Gibara, Moa, norte de Pinar del Río-norte de Matanzas, Pilón-Baconao, San Cristóbal, y Torriente-Jagüey Grande y 2) la potencialmente inducida por actividad antrópica en el norte de Pinar del Río-norte de Matanzas. Las áreas se dividen en tres categorías (CI, CII, y CIII) a partir de cinco elementos: localización tectónica del terremoto, magnitud, frecuencia de ocurrencia, cantidad de fallecidos, y superficie afectada.

Agradecimientos

Las figuras fueron realizadas por A. García. Muchos datos los recopiló S. Crespillo. Los fondos provienen principalmente del Proyecto KUK-AHPAN RTI2018-094827-B-C21. Se agradecen las indicaciones y sugerencias del revisor anónimo y editores científico y técnico.

Referencias

- Álvarez, L., Vaccari, F. y Panza, G.F., 1999, Deterministic seismic zoning of eastern Cuba, *Pure and Applied Geophysics*, 156, p. 469-486.
- Álvarez, L., Cotilla, M. y Chuy, T., 1990, Informe final del tema 430.03: Sismicidad de Cuba. IGA, Academia de Ciencias de Cuba, 400 pp.
- Álvarez, L., Lindholm, C. y Villalón, M., 2017, Seismic hazard for Cuba: A new approach, *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 107 n. 1, doi:10.1785/0120160074
- Álvarez, L., Villalón, M., Lindholm, C. y Moreno, B., 2015, Peligrosidad y riesgo sísmicos en Cuba y las regiones circundantes. Tarea 2: Peligrosidad sísmica, principios y herramientas, Informe Científico-Técnico del CENAI, 153 pp.

- Álvarez, L., Rubio, M., Chuy, T. y Cotilla, M., 1985, Informe final del tema de investigación 310.01: Estudio de la sismicidad de la región del Caribe y estimación preliminar de la peligrosidad sísmica en Cuba, IGA, Astronomía, Academia de Ciencias de Cuba, 2 Volúmenes.
- Álvarez, L., Chuy, T., García, J., Moreno, B., Álvarez, H., Blanco, M., Expósito, O, González, O. y Fernández, A.I., 1999a, An earthquake catalogue of Cuba and neighbouring areas, The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Miramare-Trieste. Internal Report IC/IR/99/1, 60 pp.
- Armenian, H., Melkonian, A., Noji, E. y Hovanesian, A., 1997, Deaths and injuries due to the earthquake in Armenia: A cohort approach, International Journal Epidemiological Association, v. 46, n. 4, p. 806-813.
- Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas [CENAI], 2019, Catálogo de terremotos de la red de estaciones. Fondos del CENAI.
- CENAI, 2020, Estaciones sismológicas permanentes de Cuba www.cenai.cu
- Chuy, T., 1989, Isosistas de terremotos de Cuba. En: Nuevo Atlas Nacional de Cuba, Sección Características Geofísicas, II.3.2. Madrid.
- Chuy-Rodríguez, T.J., Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de peligrosidad y microzonación sísmica, Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Geofísicas, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba, Santiago de Cuba, 1999.
- Chuy, T., Vorobiova, E., González, B., Álvarez, L., Pérez, E., Cotilla, M. y Portuondo, O., 1983, El sismo del 16 de diciembre de 1982, Torriente-Jagüey Grande, Revista Investigaciones Sismológicas en Cuba, n. 3, 44 pp.
- Cotilla-Rodríguez, M.O., Una caracterización sismotectónica de Cuba, Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias, Academia de Ciencias de Cuba, 200 pp., 1993.
- Cotilla, M., 2007, Un recorrido por la Sismología de Cuba, Editorial Complutense. Universidad Complutense de Madrid 200 pp., ISBN: 97-8-47-491827.
- Cotilla, M., 2010, Cuban Seismology, Revista Historia de América, n. 143, p. 43-98.
- Cotilla, M., 2012, Historia sobre la Sismología del Caribe Septentrional, Revista Historia de América, n. 147, p. 111-154.
- Cotilla, M., 2014, Alternative interpretation for the active zones of Cuba, Geotectonics, v. 48, n. 6, p. 459-483.
- Cotilla, M., 2014a, Sismicidad de interior de placa en Cuba, Revista Geofísica, v. 64, p. 93-125.
- Cotilla, M., 2016, The Guane fault, western Cuba, Revista Geográfica de América Central, n. 57, 159-198.
- Cotilla-Rodríguez, M.O., 2017, Evaluation of recent intraplate seismic activity on Cochinos Bay, Cuba, Revista Geográfica de América Central, n. 58, p. 195-222.
- Cotilla, M. y Álvarez, L., 1997, Sismicidad de tipo intermedia en Cuba, Revista Geología Colombiana, n. 22, p. 35-40.
- Cotilla, M. y Córdoba, D., 2010, Study of the Cuban fractures, Geotectonics, v. 44, n. 2, p. 176-202.
- Cotilla, M. y Córdoba, D., 2017, Morphotectonic study of the Greater Antilles, Geotectonics, v. 51, n. 1, p. 89-104.
- Cotilla, M. y Córdoba, D., 2018, Some glimpses of the tsunamigenic potential of the Caribbean region. Google Books, 100 pp.

- Cotilla-Rodríguez, M.O., Córdoba-Barba, D. y Álvarez-Gómez, L., 2020, Nortecubana, la principal falla de interior de placa en Cuba, Google Books, 87 pp.
- Cotilla-Rodríguez, M.O., Franzke, H.J. y Córdoba-Barba, D., 2007, Seismicity and seismoactive faults of Cuba, Russian Geology and Geophysics, v. 48, p. 1-18.
- Hall, S.S., 2011, At fault? Nature, v. 477, p. 264-269, doi:10.1038/477264a
- García-Pérez, J., Castellanos, F. y Díaz, O., 2003, Optimum seismic zoning for multiple types of structures. Earthquake Engineering Structural Dynamics, v. 32, n. 5, p. 711-730.
- Grünthal, G., Ardevsson, R. y Bosse, Ch., 2010, Earthquake model for the European-Mediterranean region for the purpose of GEM1. Scientific technical report STR10/04, 38 pp.
- Housemann, G.A. (2018). Why earthquakes threaten two major European cities: Istanbul and Bucharest. European Review, v. 26, n. 1, p. 30-49 doi.org/10.1017/S1062798717000448
- Maldonado-Rondón, E. y Chio-Cho, G., 2005, Identificación de las zonas sísmicamente más vulnerables en la Ciudad de Bucaramanga. Ingenierías, v. 4, n2, p. 99-115.
- Mann, P. y Burke, K., 1984, Neotectonics of the Caribbean, Reviews of Geophysics and Space Physics, v. 22, p. 309-362.
- Qaisar, A. y Akhtar, N.K., A critical review of the seismic hazard zoning of Peshawar and adjoining areas, Journal of Earthquake Engineering, v. 9, n. 5, 587-607 (2005) doi:10.1080/13632460509350558
- Radulian, M., Mandrescu, M., Panza, G.F., Popescu, E. y Utale, A., 2000, Characterization of seismogenic zones of Romania. Pure and Applied Geophysics, n. 157, p. 57-77.
- Real, Ch.R., DeLisle, M.J. y McCrirk, T., 1996, Provisional seismic zoning for ground failures in portions of Los Angeles and Ventura counties following the 17 January 1994 Northridge earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, v. 86, n. 1B, p. 5.262-5.269.
- Ulomov, V.I., 1999, Seismo-geodynamics and seismic zoning of North Eurasia, Vulcanology and Seismology, v. 4-5. p. 6-22 [in Russian].
- Witze, A., 2010, Two of the biggest US earthquake faults might be linked, Nature, 576, p. 191-192, doi:10.1038/d41586-019-03769-w

Manuscrito recibido: 16 de octubre de 2020

Recepción del manuscrito corregido: 08 de diciembre de 2020

Manuscrito aceptado: 02 de marzo de 2021