

Historia de la sismicidad del segmento Islas Caimán-Cabo Cruz (Cuba), en el marco de la zona de entre placas Norteamérica-Caribe.

Seismicity history of the Cayman Islands-Cabo Cruz segment (Cuba), in the framework of the North America-Caribbean plate boundary zone.

Cotilla-Rodríguez, Mario Octavio¹; Córdoba-Barba, Diego¹; Álvarez-Gómez, Leonardo² ✉

¹Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Físicas.

²Ministerio de Transporte e Infraestructuras, Managua, Nicaragua.

Recibido: 04/10/2018
Aceptado: 22/07/2019

© 2021-Revista Tierra (Earth Journal) IGG-CIGEO



Este trabajo está licenciado bajo una [Licencia Internacional Creative Commons 4.0 Atribución-NonComercial-CompartirIgual](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Resumen

El segmento marítimo de Cabo Cruz, al SO de Cuba Oriental, demuestra en ~526 años una actividad sísmica fuerte, con la ocurrencia de los terremotos de: 1551 (M~6,6), 1852 (M~7,7), 1917 (M7,4), 1990 (M5,9), 1992 (M6,8), 2007 (M6,2) y 28.01.2020 (M7,7). Los siete terremotos fueron perceptibles y en ningún caso han ocurrido tsunamis ni víctimas mortales. En ese entorno tectónico está la intersección (o nudo) de las fallas activas Oriente (O-E) y Cauto-Nipe (SO-NE), donde también hay una significativa agrupación de epicentros registrados con la red de estaciones de Cuba, desde el año 1979. No hay relación sismotectónica de las anteriores con la falla Septentrional de Haití, que es la más activa de la región.

Palabras clave: Cabo Cruz, Cuba, sismicidad histórica, terremoto

Abstract

The maritime segment of Cabo Cruz, to the SW of Eastern Cuba, demonstrates in ~526 years a strong seismic activity with the occurrence of the earthquakes of: 1551 (M~6,6), 1852 (M~7,7), 1917 (M7,4), 1990 (M5,9), 1992 (M6,8), 2007 (M6,2) and 28.01.2020 (M7,7). The seven earthquakes were perceptible and in no case has generated tsunamis or death victims. In this tectonic environment is the intersection (or knot) of the Oriente (W-E) and Cauto-Nipe (SW-NE) active faults, where there is also a significant grouping of epicenters registered with the Cuban network, since 1979. No seismotectonic relationship was found with the Northern fault of Haiti which is the most active of the region.

Keywords: Caribbean, Cruz Cape, Cuba, earthquake, historical seismicity

1. INTRODUCCIÓN

Se conoce, desde la llegada de los españoles en el siglo XV, que la región septentrional del Caribe (Figura 1A) ha sufrido terremotos y tsunamis. Ella incluye seis países: Cuba, Haití, Islas Caimán, Jamaica, República Dominicana y Puerto Rico. La Tabla 1 muestra datos generales de interés. En la zona marítima al SO de Cuba Oriental, en torno a Cabo Cruz, están Islas Caimán y Jamaica y hay actividad sísmica. Ahí han ocurrido, históricamente y en la actualidad, terremotos de magnitudes importantes, varios de ellos perceptibles; pero sin víctimas mortales. Los focos, poco profundos, están situados en el trazo de la falla sismo-activa Bartlett-Caimán, Oriente. No hay datos sobre tsunamis. El pasado 28 de enero del 2020 el USGS registró un terremoto (M7,7) (Figura 2A) que se sintió en varios países: Bahamas, Cuba (localidades: Cienfuegos, Guantánamo, Holguín, Isla de la Juventud, La Habana, Las Tunas, Pinar del Río y Santiago de Cuba), Haití, Islas Caimán, Jamaica, México (localidades: Campeche, Quintana Roo, Tabasco, Veracruz y Yucatán) y Estados Unidos de Norteamérica (al S de Florida). Éste es uno de los eventos más fuertes ocurridos en el Caribe Septentrional.

El objetivo, principal, es mostrar, con datos y resultados obtenidos a partir de este estudio y trabajos previos de los autores, del artículo, y también otros especialistas, que la región Islas Caimán-Cabo Cruz (Figura 1A) constituye un segmento sismo-activo, de la zona de entre placas Norteamérica-Caribe, y que se distingue: 1) del segmento Cabo Cruz-Punta de Maisí (al E); 2) de la rama Guatemala-Swan (al O).

2. MARCO TECTÓNICO

La configuración del apartado se fundamenta en los siguientes trabajos previos: Bachhuber et al. (2010), Benford et al. (2012), Bowin (1968), Burke et al. (1984), Calais y Mercier de Lépinay (1992), Case et al. (1984), CAYTROUGH (1979), Cotilla (1998), Cotilla y Franzke (1994), Cotilla y Udías (1999), Cotilla y Córdoba (2009, 2017), Cotilla et al. (2007, 2018, 2019), Dixon et al. (1998), González et al. (2003), Goreau (1983), Heubeck y Mann (1991), Holcombe et al. (1973), Lewis y Draper (1990), Mann et al. (1984, 1985), Molnar y Sykes (1969), Nishenko et al. (1996), Renard et al. (1992), Rosencratz y Mann (1991), Rosencratz y Sclater (1986), Rosencratz et al. (1988), Rubio et al. (1994), Ruellan et

al. (2003), Scotese (1999) y Taber (1920, 1922). De las cuales se deduce que la estructura principal con actividad sísmica de la región Islas Caimán-Cuba Oriental es la falla Oriente (Figura 2A) que: 1) se identifica hasta la Punta de Maisí; 2) y se subdivide en tres segmentos (Cotilla, 1998). Más al E, a continuación del Paso de los Vientos, al N de Haití la falla Septentrional es de otro tipo (Figura 2B). Ésta también es activa, segmentada y de mayor nivel. Esos dos sistemas de fallas forman parte del límite entre las placas de Norteamérica, donde está Cuba, y la del Caribe, donde están Jamaica y Haití. Las Islas Caimán (archipiélago de origen volcánico) son el enlace entre las fallas activas Swan y Oriente. Ambas se encuentran en las inmediaciones de un Centro de Generación (o Dispersión) de corteza oceánica. A partir de las Islas Caimán y hacia el O se describe el sistema de fallas transformante sismo-activo Swan: 1) con longitud L~700 km dirección aproximada E-O; 2) la cual constituye otra parte del límite de las placas Caribe-Norteamérica; 3) y se continúa hacia América Central con las fallas activas Polochic-Motagua. La segmentación y actividad sísmica del sistema Chixoy-Polochic-Motagua-Swan (Figura 3A) se aprecia con cinco eventos fuertes: M7,6 (10.01.2018); M7,5 (1.06.1785; 22.07.1816/ >20 muertos; 4.02.1976/ 23.000 muertos); M7,3 (28.05.2009/ 7 muertos).

En el N de la placa Caribe (~3,2.106 km²) está la depresión Bartlett-Caimán (hmáx-7.686 m) (Figura 1A). Esta estructura oceánica es un centro de generación de corteza con L~1.000 km. Tiene 110 km de ancho y se asume activo desde el Eoceno Medio, y una velocidad de expansión ~1,5 cm/año. Se configura una pequeña elevación de tipo divergente submarina, dentro del Mar Caribe. La fosa Oriente es una estructura estrecha y apaisada, E-NO, relacionada con fallas transformantes. Su localización está entre las Islas Caimán y el E de Cuba Oriental. Ella participa en el mencionado límite de las placas y ahí está Cabo Cruz, donde han ocurrido varios terremotos fuertes (Figura 2A).

Es habitual, aunque incorrecto, encontrar en la literatura que la otra fosa, al E de la región y al N de Puerto Rico (hmáx-8.350 m) está en el Mar Caribe (Figura 1A). Esto no es sólo un error geográfico sino también sismotectónico. Esa fosa está en el Océano Atlántico, subregión donde se transita de la subducción del Arco de las Antillas Menores hasta el N de La Española (Figura 3B), con la placa Norteamericana subduciendo

Tabla 1. Datos de Países del Caribe Septentrional

País/ Capital	Año del arribo europeo/ Población (10 ⁶) habitantes	Altitud máxima (m)/ Área (km ²)	Longitud (km): costas/máxima	Primera perceptibilidad
Cuba/ La Habana	1492/ 11.177	1.974/ 111.634	~5.750/ ~1.260	1528
Haití/ Puerto Príncipe	1492/ 7.939	3.175/ 26.876	1.771/ ~430	1493
RD/ Santo Domingo	1492/ 8.265	2.680/ 48.351	1.575/ 390	1493
PR/ San Juan	1493/ 3.835	1.338/ 9.104	501/ 150	1493
IC/ George Town	1503/ 0,35	43/ 264	160/ ~50	1493
Jamaica/ Kingston	1494/ 3.505	2.230/ 11.060	800/ 243	1502
Total de habitantes	~35.000.000			

a la del Caribe. Las dos fosas son diferentes en geometría, estructura y geodinámica. En la fosa Oriente no han ocurrido tsunamis locales y los mecanismos focales, de los terremotos más fuertes, son principalmente transcurrentes; mientras en la de Puerto Rico sí han ocurrido y los mecanismos son de tipos inverso y de convergencia, principalmente (Figura 1B). Ninguna de las islas de nuestro interés tiene actividad volcánica.

En la placa Caribe se sitúan varios países: Belice, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Haití, Honduras, Jamaica, Panamá, Puerto Rico, República Dominicana, Nicaragua, y parte de México. Ella interacciona con cuatro placas: Cocos (~3.106 km²), Nazca (~12.0.106 km²), Norteamérica (~76.106 km²), Suramérica (~43.6.106 km²) (Cotilla et al., 2019). El límite de las placas Caribe-Norteamérica es una estructura heterogénea de primer orden. El segmento Cabo Cruz-Punta de Maisí (Figura 1A) exhibe a lo largo de la costa S de Cuba Oriental, diferencias en cuanto a: 1) hipsometría, morfología y características neotectónicas; 2) representación en los campos gravimétrico, isostático y magnético; 3) sectores con marcadas influencias transpresivas y transtensivas; 4) actividad sísmica; 5) tipos y combinaciones de estructuras transversales secundarias asociadas. Se han identificado y caracterizado, de O-E, tres zonas: 1) Cabo Cruz-Pilón; 2) Pilón-Baconao (donde está el mayor gradiente del relieve del Caribe); 3) Baconao-Punta de Maisí. Ninguno de ellos ha generado tsunamis.

En el extremo oriental de Cuba, inmediaciones de Punta de Maisí, hay una convergencia de tres fallas: Nortecubana, Oriente y Septentrional

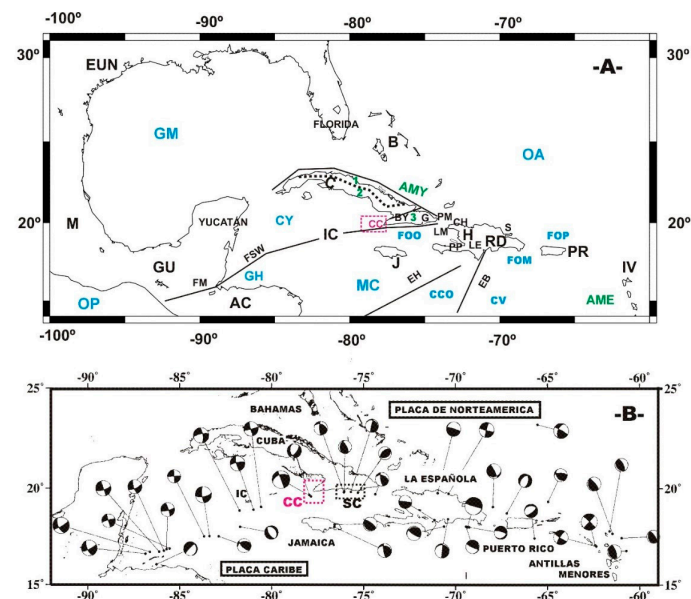


Figura 1. Localización de la zona de estudio (modificadas de Cotilla, 2014). A) Cuba y su entorno. Aparecen: 1) localidades, países, regiones (América Central=AC, Antillas (Mayores=AMY, Menores=AME), Bayamo=BY, Cabo Cruz=CC, Cabo Haitiano=CH, Cuba=C, Cuencas de (Colombia=CCO, Venezuela=CV, Yucatán=CY), Escarpes de (Beata=EB, Hess=EH), Estados Unidos de Norteamérica=EUN, Golfos de (Honduras=GH, México=GM), Guatemala=GU, Haití=H, IC, Islas Vírgenes=IV, J, La Môle Saint Nicolas=LM, Lago Enriquillo=LE, Mar Caribe=MC, México=M, Océano (Atlántico=OA, Pacífico=OP), PR, Punta de Maisí=PM, Puerto Príncipe=PP, RD, Samaná=S); 2) fosas (Muertos=FOM, Oriente=FOO, Puerto Rico=FOP); 3) área de estudio (rectángulo CC); 4) morfoestructuras de C (Occidental=1; Centro-Occidental=2; Oriental=3); 5) fallas (Motagua=FM, Swan=FSW). Las siglas son las mismas en las tablas y figuras. B) Algunos de los mecanismos focales del Caribe Septentrional. Aparecen: 1) soluciones de mecanismos focales; 2) áreas de interés /rectángulos CC y SC).

(Figura 2A). Aparentemente, las características morfoestructurales y neotectónicas de Guantánamo (donde está Punta de Maisí) y del NO de Haití son prácticamente las mismas. Esas regiones distan ~170 km y están separadas por el Paso de los Vientos. Son conocidos los valores de las: 1) áreas (km²) de: 1.1) Punta de Maisí=2.700; 1.2) del N de Haití=3.800, 2) dimensiones lineales (km) de la Península N de Haití: 2.1) W-E=19,7; 2.2) N-S=23,5. Tienen la misma litología en las terrazas costeras; pero las deformaciones y los elementos fluviales en Haití, no están en Guantánamo. Desde la perspectiva geodinámica están localizados en dos placas diferentes. En consecuencia, tienen sentido de movimiento diferente; también la actividad sísmica es diferente, siendo superior en Haití (Figuras 3A-B) y con ocurrencia de tsunamis locales. En Guantánamo no hay sismo-dislocaciones y se descarta su existencia en el entorno de San Antonio del Sur (Mmáx5,0) (Cotilla y Córdoba, 2010A, 2015). El tramo Cabo Cruz-Baconao, incluye dos sectores de la falla Oriente y tiene mayor nivel sísmico (Mmáx7,2), no posee esas formas. En el año 1933 una expedición norteamericana NPE (Navy-Princeton Exploration, 1933) realizó mediciones gravimétricas en ese entorno. Usamos para nuestro análisis dos de sus figuras. En la F9 aparecen dos sistemas de alineamientos de dirección: A) E-O en el N de La Española hasta el N de Punta de Maisí; B) NO-SE por Bahamas hasta Punta de Maisí. Esto se corresponde con las figuras 2 y 3; además, es evidente que hay un cruce de estructuras y que no relacionan la dirección E-O con la falla Oriente. Por otra parte, la segunda de sus figuras (F4) permite delimitar un enorme bloque sumergido entre Jamaica e Islas Caimán, que marca el límite N de la fosa. Ella es una anomalía tectónica dentro de la fosa en las inmediaciones de Cabo Cruz. También sostienen que: 1) la banda de anomalías negativas E-O, delimitada en el N de Puerto Rico-Haití, se interrumpe abruptamente en Punta de Maisí; 2) las anomalías son muy positivas en la fosa de Bartlett; luego, no tienen relación contemporánea con las negativas de Puerto Rico-Haití; 3) en la fosa, segmento de Cuba Oriental, las fallas son de tipo normal y en un arreglo de sistemas de bloques; 4) la Depresión Cul-de-Sac está sujeta a un campo de esfuerzos compresivo, muy diferente al de la fosa. Concluyen que esas dos zonas son de diferente naturaleza, lo que coincide con Cotilla et al. (1998).

La interpretación del NPE se corresponde con resultados para Cuba (Cotilla y Córdoba, 2015; Cotilla et al., 1998), Jamaica (Cotilla y Córdoba, 2009) y La Española (Cotilla et al., 2007). Se asegura que: 1) Cuba, Jamaica y La Española son estructuras emergidas y segmentadas; 2) la zona límite de placas del Caribe Septentrional se compone de un conjunto de celdas (o bloques) geodinámicas limitadas por fallas activas; 3) hay varias intersecciones de estructuras, a modo de nudo que se corresponden directamente con la sismicidad registrada; 4) en las inmediaciones del Paso de los Vientos, entre Punta de Maisí y Haití se identifica el nudo NMG1; 5) en el megabloque La Española, y Haití en particular, hay dos islas (de la Tortuga y de la Gonave) (Figura 2B) que tienen una figura geométrica muy similar, alargada de E-O y estrecha de N-S. Ellas, desde el punto de vista tectónico, están localizadas al E del Paso de los Vientos y de la fosa Oriente. Ambas están, aproximadamente, al O del meridiano Jacmel-Puerto Príncipe-Artibonite; y sus principales características son: 5.1) Isla Tortuga (L=37 km/ Ancho=7 km/ Área=180 km²) forma parte de un microbloque al N de La Española, en el Océano Atlántico, y está afectada por la falla Septentrional. El relieve es muy accidentado y tiene una cordillera central (hmáx450 m) con una serie de tres terrazas basculadas y orientadas al N. La costa N es muy abrupta. Predominan los suelos arenosos y con limo, en la parte costera, y arcillosos en las zonas más altas. Colón llegó en 1492; 5.2) Isla Gonave (L=60 km/ Ancho=15 km/ Área=743 km²) está al W de Puerto Príncipe, en el Golfo de la Gonave, Mar Caribe. El relieve es de montaña (hmáx300 m). La litología predominante es de calizas; 6) en Cuba Oriental no hay islas; 7) Jamaica es una morfoestructura de menor orden que Cuba y La Española, situada al S de la fosa Oriente, con un conjunto de estructuras menores y activas. El patrón de las fallas es, mayoritariamente, de tipo lateral izquierdo. Jamaica no pertenece, completamente, a la microplaca Gonave; pero tiene como límites al N y S (los sistemas Oriente y Walton-Enriquillo-Plantain Garden, respectivamente). Al NO están las Islas Caimán y al E La Española. La parte occidental de esta última, aproximadamente la mitad, pertenece a la microplaca Gonave, y la otra parte está en la microplaca La Española-Puerto Rico. El tipo litológico y las direcciones principales de las estructuras, y las características gravimétricas no se corresponden con los de Cuba Oriental.

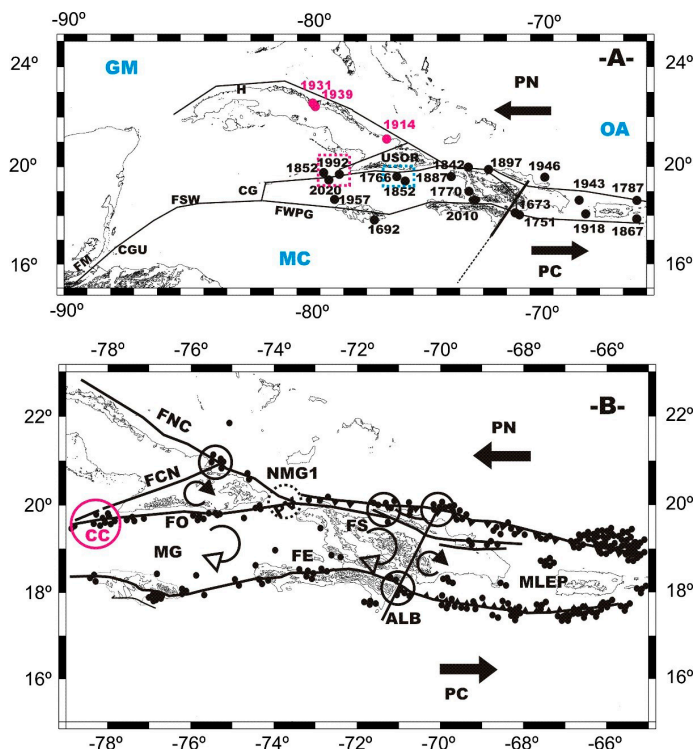


Figura 3. Marco tectónico simplificado del Caribe Septentrional (modificada de Cotilla et al., 2007). A) Aparecen: 1) placa de Norteamérica=PN; microplaca Caribe=MC; 2) sentido de desplazamiento de placas y microplacas (flechas negras gruesas); 3) Centro de dispersión de Islas Caimán (CG); 4) fallas y alineamientos (líneas continuas negras: Motagua=FM, Swan=FSW); 5) localidades, regiones (Cuenca de Guatemala=CGU, Golfo de México=GM, La Habana=H, Mar Caribe=MC, Unidad Sismotectónica Oriental=USOR); 6) epicentros (ver Tabla 2); 6.1) más fuertes (círculo negro y año de ocurrencia); 6.2) significativos (círculo rojo y año de ocurrencia/ tsunamis (ver Tabla 7)). B) Aparecen: 1) región (Paso de los Vientos=PV); 2) microplacas (Gonave=MG, La Española-Puerto Rico=MLEP); 3) fallas y alineamiento (líneas continuas negras: Beata=ALB, Cauto-Nipe=FCN, Enriquillo=FE, Nortecubana=FNC, Oriente=FO, Septentrional=FS, Swan-Walton-Platain Garden=FSWPG); 4) sentido de movimiento de las placas (flechas negras); 5) movimiento relativo de los bloques (líneas curvas con flecha); 6) epicentros; 7) zonas de intersección de fallas (círculos continuos); 8) nudo de Cabo Cruz (18.10.1551; 07.07.1852; 20.02.1917; 26.08.1990; 25.05.1992; 4.02.2007; 28.01.2020); 9) Nudo NMG1 (círculo negro discontinuo).

(1990, 1997, 1998, 2007a), DesRoches et al. (2011), Dolan y Wald (1998), Frankel (1984), McCann y Pennigton (1990), Mocquet (1984), Perrot et al. (1997), Prentice et al. (1993, 1994, 2003), Ten Brink et al. (2004) y Van Dusen y Dosen (2000). La tabla 2 incorpora una selección de terremotos de Cuba, Haití, Islas Caimán, Jamaica y República Dominicana. Para su elaboración se usaron los criterios de Álvarez et al. (1990) sobre fiabilidad de los especialistas y servicios sismológicos seleccionados como fuentes. Ella no es ecléctica, pero si depurada y contrastada.

Las tablas 3-5 son resúmenes sobre la actividad sísmica del territorio de estudio. Las cantidades de terremotos con M>7 son del mismo orden y el mayor número está asociado a La Española (21). En la Tabla 6 se presentan los terremotos fuertes ocurridos en las inmediaciones de Cabo Cruz para el periodo 1551-2020 (Figuras 3A-B). Es importante indicar que aquí no han ocurrido tsunamis. Con las Islas Vírgenes, Jamaica y La Española han sido asociados algunos terremotos fuertes y tsunamis locales (Tablas 4 y 7). En estos casos no hay vínculo alguno con volcanes. Algunos de esos tsunamis han afectado, significativamente, a los territorios vecinos (ejemplos: 8.02.1843/ M~8,0; 20.11.2007/ M7,4). Las informaciones sobre tsunamis en el Caribe Septentrional y Cuba han sido publicadas en los trabajos de Cotilla (2011), y Cotilla y Córdoba

Tabla 3. Resumen de la Tabla 2.

País	Eventos/ años	Periodo	Rango de		
			M	h (km)	Fallecidos
Cuba	36/ 342	1678-2020	4,4-7,8	10-59,6	~100
Haití	45/ 458	1562-2020	4,0-8,2	10-60	~350.000
Islas	65/ 168	1852-2020	4,0-7,5	6-60	-
Caimán					
Jamaica	50/ 353	1667-2020	4,0-7,75	16-33	~5.000
RD	51/ 458	1562-2020	5,0-7,7	8,8-104,4	~5.000
Tasa (años)= 16		Totales	247/ M≥7= 34		~360.000

Tabla 4. Terremotos de M>7,0 en el Caribe Septentrional (Cotilla y Córdoba, 2015)

M	7,0-7,5	7,6-7,9	8,0-8,2	Total	Tasa (años)
Cantidad	23	4	2	29	18

Tabla 5. Terremotos (M>7,0) del Caribe Septentrional registrados por el USGS

Fecha	M/ h (km)	Fecha	M/ h (km)	Fecha	M/ h (km)
28.01.2020	7,7/ 14,8	8.08.1946	7,5/ 15	28.05.2009	7,3/ 10
29.07.1943	7,7/ 15	4.02.1976	7,5/ 5	11.10.1918	7,1/ 15
4.08.1946	7,5/ 15	10.01.2018	7,5/ 19	12.01.2010	7,0/ 13

(2011, 2018). Los datos confirman que: 1) en Cuba Suroriental: 1.1) no se han generado tsunamis; 1.2) no hay sismo-dislocaciones ni "paleo-sismo-dislocaciones"; 1.3) la falla Oriente tiene tres segmentos activos; 1.4) la falla Oriente tiene dos relaciones sismo-activas diferentes (con la falla Cauto-Nipe (segmento occidental, Cabo Cruz) y la falla Nortecubana (segmento oriental, Punta de Maisí)); 2) las fallas Oriente y Septentrional no tienen relación de continuidad; 3) la zona de mayor peligro es La Española y en particular, el N de Haití. La Figura 3B muestra parte de la sismicidad reciente proporcionada por el USGS. En ella se han incluido las fallas y el alineamiento transversal de Beata e indicado con círculos las seis intersecciones principales, resaltando en discontinuo la ausencia de terremotos en el Paso de los Vientos.

Chuy y Álvarez (1988) confeccionaron un catálogo (57 terremotos/ periodo 1502-1971) para La Española. Los datos indican que: 1) la intensidad sísmica/ cantidad de eventos es: 10/ 1, 9/ 9, 8/ 12, 7/ 16, y 6/ 19; 2) la profundidad (km) es de 0-70; 3) hay siete tsunamis; 4) los tsunamis se asocian a cuatro localidades del: 4.1) N (Cabo Haitiano, La Môle Saint Nicolas y Samaná); 4.2) S (Azua-Beata); 5) la tasa (años) es ~21, similar al de los tablas 3 y 4. Proponen (su Figura 1) dos zonas sismogeneradoras, a modo de bandas longitudinales E-O y paralelas, al N y S. Estas se confirman con los estudios de: 1) González y Vorobiova (1989) sobre la profundidad de los terremotos; 2) Cotilla et al. (1990, 1990A) sobre la ocurrencia de terremotos fuertes. Los tres trabajos sostienen que: 1) la mayor actividad sísmica (profundidad/ magnitud) ocurre en La Española y no en Cuba; 2) hay fragmentación de la sismicidad, y que los epicentros se encuentran bandas irregulares con escalones; 3) las bandas delimitadas no tienen continuidad hacia Cuba. Para tener información sobre la certidumbre de las informaciones de sismicidad histórica, y en particular sobre los terremotos fuertes, en Haití hay que considerar tres lugares, muy frecuentemente, indicados, pero con pocas imprecisiones y errores, en figuras y catálogos de terremotos. Todos se están en la zona N y se vinculan con la falla Septentrional: 1) Môle Saint Nicolas (terremoto de 23.09.1887/ M~7,9); 2) Port de Paix e Isla de la Tortuga (terremotos de: 7.10.2018/ 00:11:51/ M5,9/ h24 km/ 20,034 N 73,013 W/ 18 muertos; 7.10.2018/ 20:00:18/ M5,4/ h23 km/ 20,041 N 73,014 W; 2.03.1994/ 03:38:03/ M5,4/ h59,2 km/ 19,803 N 72,99 W); 3) Cabo Haitiano (terremoto de 7.05.1842/ M~8,2). De forma resumida se tienen estos datos: 1) Môle Saint Nicolas (Área=227,07 km2/ 19,80 N 73,38 O): el punto más cercano a Cuba, y al que llegó Colón el 5.12.1492; 2) Port de Paix (Valparaiso) (Área=329,41 km2/ 19,95 N 72,83 O): fundada en 1644 por los españoles; 3) Cabo Haitiano (Guanico) (Área=53,5 km2/ 19,75 N 72,20 O): primer asentamiento español (La Navidad) en La Española, días después de llegar a La Mole. En 1670 los franceses fundaron la ciudad.

El estudio de Álvarez et al. (1990) sobre la sismicidad determinada del entorno de Cabo Cruz.

Tabla 6. Terremotos significativos del entorno de Cabo Cruz.

1	2	3	1	2	3	Tasa(años)
28.01.2020/ 19:10:24	7,7/ 3/	19,421 78,763/14,8	18.10.1551/ 12:00	6,6/ 8/ 7	19,6 77,8/ 15	94
20.02.1917/ 19:29:32	7,4/ 3/	19,9 78,4/	4.02.2007/ 20:56:59	6,2/ 4/	19,372 78,518/ 10	
25.05.1992/ 16:55:04	6,8/ 7/	19,61 77,87/ 23	26.08.1990/ 07:53:42	5,9/ 8/	19,59 77,87/ 10	

Tabla 7. Tsunamis del Caribe Septentrional

País	Fecha/ Total
Cuba	1.11.1755 (Lisboa); 18.11.1867; 1.10.1931 y 4.08.1939 (falla Nortecubana)/ 4
Haití	15.09 y 21.11.1751; 1769; 3.06.1770; 11.02 y 03.1755; 18.12.1775; 7.05.1842; 8.03.1860; 23.09.1887/ 10
Islas Vírgenes	16.04.1690; 18.11.1867; 11.03.1874/ 3
Jamaica	1.03.1688; 7.06.1692; 3.10.1780; 1.08.1781; 27.10.1787; 11.11.1812; 12.08.1881; 14.01.1907/ 8
PR	11.10. y 24.10.1918; 8.08.1946; 1.11.1989/ 4
RD	18.10.1751; 4.08.1946; 31.05.1953/ 3

con la red de estaciones de Cuba Oriental (1979-1990) sugiere que los terremotos registrados (con más de seis estaciones) tienen agrupamientos en dos zonas: 1) Suroriental, y en particular en tres áreas (de O a E): 1.1) Cabo Cruz; 1.2) inmediaciones de Santiago de Cuba-Baconao, la de mayor nivel; 1.3) Punta de Maisí; 2) Noreoriental (Nipe). Ellas se vinculan con las trazas de dos pares de fallas: 2.1) Oriente y Cauto-Nipe; 2.2) Oriente y Nortecubana, respectivamente. Cotilla et al. (2007a) ilustran (sus figuras 3A-B) y discuten, en profundidad, la actividad sísmica; y comprueban el “vacío” sísmico en el Paso de los Vientos y el mayor volumen de deformación sismotectónica de La Española en Haití. Esto fue indicado por Rubio et al (1994) al confirmar la existencia de la microplaca Gonáve y sostener que el límite tectónico en la zona, Punta de Maisí-N de Haití, es difuso y muy diferente en cuanto a: topografía, dirección de las fracturas, densidad de epicentros, profundidad de los terremotos, magnitudes máximas, mecanismos focales y fallecidos por terremotos. La figura “Near Jamaica Tectonics” de la red sísmica de Jamaica incluye, para el marco de 16°-22° N/ 70°-84° O (Islas Caimán, Haití, Jamaica y Cuba Oriental), un conjunto de epicentros. En esa publicación se destaca que en Cuba Oriental hay: 1) tres agrupaciones de epicentros (Cabo Cruz, Nipe y Santiago de Cuba); 2) un “vacío” relativo en Punta de Maisí. En la Figura 1, de Frankel et al. (2011), se muestra la sismicidad de 1900-2010. Ella también muestra el “vacío” sísmico en el Paso de los Vientos. Además, se puede discriminar, con los datos de la red cubana, para dos periodos, superpuestos, 1979-1993 y 1984-1990, que la densidad de epicentros tiene valores diferentes para distintas localidades. Así se tiene: Pilón-Baconao=0,55/ 0,50; Cabo Cruz=0,31/ 0,30; Cauto-Nipe=0,09/ 0,12; y Punta de Maisí=0,05/ 0,05. Esto confirma que la mayor actividad sísmica está en las inmediaciones de Santiago de Cuba y Cabo Cruz, y no en Punta de Maisí.

El USGS ha registrado, sobre la falla Oriente, segmento costero Mías-Cajobabo-Juaco (Figura 2a): 1) sólo dos terremotos perceptibles de I=3 (12.02.2010/ 12:09:14/ M5,3/ h10 km/ 19,855 N 74,378 O; 23.09.2016/ 23:08:49/ M5,0/ h10 km/ 19,886 N 74,383 O)). Se determina un rectángulo virtual (17,225-20,451 N 71,104-77,783 O/ que incluye a Cuba Oriental, Haití y Jamaica/ M2,5-7,0/ 1.01.1980-1.01.2020/ con 377 terremotos) y diferencian tres áreas nucleadas en: 1.1) Puerto Príncipe (35 %); 1.2) Port Royal (27 %); 1.3) Santiago de Cuba (21 %); 2) confirma que la actividad sísmica entorno de Guantánamo es de poca relevancia, que los focos son, mayoritariamente, <20 km y que no existe, prácticamente, actividad sísmica en el Paso de los Vientos (Tabla 8).

Conocidos: 1) la localización del epicentro de 28.01.2020, y que la región no sufrió afectaciones importantes; 2) la figura de su perceptibilidad (aproximadamente circular presentada por el USGS, con centro en las inmediaciones de Islas Caimán-Cabo Cruz); 3) que el terremoto del 7.07.1852 (Ms~7,8) (para el que hay muchos datos macrosísmicos (I(MSK)=3-5 en Cuba y Jamaica (Álvarez y Chuy, 1985))) y que está ubicado, aproximadamente en esas coordenadas y tiene una figura similar de perceptibilidad (Figuras 2A y 3A), se sostiene que ambos eventos son parte del entorno sismotectónico de Cabo Cruz. Lamentablemente, en otros trabajos sobre la sismicidad de la región, no se ha considerado este terremoto de 1852. Esos autores realizaron, para ese sismo, un análisis con ajuste a un modelo de isosistas elípticas y estimaron: 1) la magnitud (7,8); 2) el área y la figura aproximadas de la perceptibilidad (Figura 4). El valor de la magnitud pareció, entonces, exagerado; ya que habitualmente

Tabla 8. Datos de terremotos recientes en Guantánamo

Terremotos	35
M/ h (km)/ Cantidad	M/ h (km)/ Cantidad
<3,0/ <10/ 11	4,0-5,0/ 20-31/ 15
3,0-4,0/ 10-20/ 4	5,0-5,6/ 10-20/ 5

en el análisis de terremotos históricos, como es el caso, las magnitudes grandes se asocian con intensidades altas. Esto fue motivo de no pocas discusiones en Cuba, y en el catálogo de Álvarez et al. (1999) se fijó MI~7,5. Ahora se observa que los dos terremotos tienen un mismo patrón de intensidades; así que ambos son similares, y las discrepancias en cuanto a la mayor perceptibilidad del evento del año 2020 se explica por la mejora en las comunicaciones. Consideramos que ellos tienen igual magnitud (7,7).

Para reafirmar la sismicidad de la falla Cauto-Nipe (Figura 2A) hay cuatro terremotos perceptibles en las inmediaciones de Bayamo: 10.1624 (M~5,2)/ 30.01.1924 (M5,6)/ 3.08.1926 (M4,8)/ 25.12.1926 (M5,4). Estos eventos son de tipo interior de placas en la Unidad Sismotectónica Oriental (Figura 2A). Vinculado a esa ciudad está el terremoto del 18.10.1551 (M~6,6/ Imáx8/ h13 km) que produjo su destrucción, que tenía ~300 habitantes y era la más importante de Cuba. Unos 220 km le separan del nudo de Cabo Cruz. Esta “anomalía” en la intensidad y los daños en comparación con los cuatro eventos más fuertes (1852 (h30 km) y 2020 (~h15 km)/ M7,7; 1917/ M7,4; 1992 (h23 km)/ M6,8), también localizados en ese nudo, sugiere que es debida a la menor distancia y profundidad del foco.

4. SISMOTECTÓNICA

El análisis, parte de trabajos realizados por: Cotilla (1998, 2014), Cotilla y Álvarez (2001), Cotilla y Córdoba (2010b, 2015, 2017), Cotilla y Franzke (1994), Cotilla et al. (1990, 1997, 1998, 2007, 2007a, 2019), Prentice et al. (2010), Vireux et al. (1997) y Wiggins-Grandison y Atakan (2005). Desde el primer trabajo de mecanismos focales del Caribe (Molnar y Sykes, 1969) el conocimiento sobre la cinemática y dinámica de la región ha mejorado (Figura 1B). Esto se debe al incremento de las estaciones sismológicas permanentes y al nuevo equipamiento. Para el Caribe Septentrional las soluciones de mecanismos focales, periodo 1980-2007, no variaron, significativamente, en el tiempo como se aprecia en las figuras 5 y 6 de Cotilla (1998) y Cotilla et al. (2007a), respectivamente. La Figura 10 de Moreno (2002) tiene 25 mecanismos focales en Cuba Oriental (fallas: 1) Nortecubana tres; 2) Oriente 22). No hay eventos sísmicos al E de Guantánamo. Moreno et al. (2002) presentan, en su Figura 7, catorce mecanismos focales (once del año 1998, dos de 1999 y uno de 1992) para el entorno de Cabo Cruz. Todos están de acuerdo con la prevalencia del movimiento transcurrente a la izquierda. Los rangos de magnitud/ profundidad (km) son: 1) 1998 (2,9-3,6/ 10-26); 2) 1999 (3,3-3,4/ 9-26), respectivamente. Con las figuras 1.1.4.1 (sismicidad) y 1.1.4.2 (mecanismos focales) de Núñez-Escribano (2014) se valora la diferenciación del territorio. Cotilla y Córdoba (2015) caracterizaron los mecanismos focales: 1) en cuatro zonas, para esta región aplicando el método de Rivera y Cisternas (1990); 2) se distingue, la diferenciación de Cuba Oriental y La Española. El análisis realizado permite comprobar que los mecanismos de tipo normal e inverso predominan, con componentes transcurrentes en las inmediaciones de Puerto Rico-La Española. Ésas son también las zonas que han experimentado en el tiempo los terremotos más fuertes de la región.

Es habitual, en sismotectónica, en el estudio del foco de terremotos

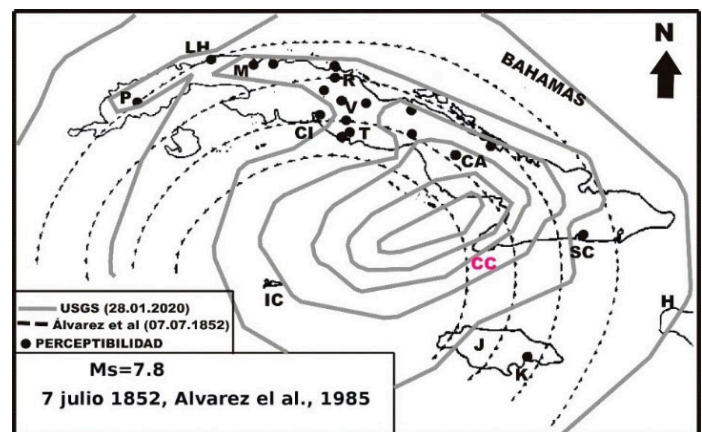


Figura 4. Perceptibilidad de los terremotos de 7.07.1852 y 28.01.2020. Aparecen: Camagüey=CA, Cienfuegos=CI, Haití=H, Islas Caimán=IC, Jamaica=J, Kingston=K, La Habana=LH, Matanzas=M, Pinar del Río=P, Remedios=R, Santiago de Cuba=SC, Trinidad=T, Las Villas=V.

fuerzas obtener el Tensor del Momento Sísmico [TMS] (Aki, 1966). Éste es un tensor simétrico, de segundo orden, cuyas componentes están relacionadas con la situación de los esfuerzos en la región focal y representa, de forma general, el proceso físico (Gilbert, 1970; Backus y Mulcahy, 1976). Así, con su cálculo se conocen, mediante descomposición: 1) los parámetros de los planos de falla del mecanismo focal; 2) el momento sísmico escalar y la magnitud momento Mw (Cotilla, 1998). El momento sísmico escalar está directamente relacionado con las dimensiones de la fractura (Jost y Herrmann, 1979). Todos los Servicios Sismológicos Internacionales tienen implementado, de forma automática, este proceso (Dziewonski et al., 1981; Krieger y Heimann, 2012). La descomposición del tensor de momento, que permite obtener el valor del porcentaje del dipolo vectorial lineal compensado [DVLC] en cada solución, se realiza sobre los datos que facilitan los mencionados Servicios, y en nuestro caso se utiliza el software MoPaD (Krieger y Heimann, 2012). Los resultados para la región, tomados de Lamont-Doherty Earth Observatory [LDEO], Columbia University, aparecen en dos grupos en las figuras 5 y 6 donde hay cuatro tipos de mapas: A1-B1 tensor de momento; A2-3-B2-3 orientación de ejes P y T de las soluciones de doble par; A4-B4 porcentaje de doble par en las soluciones. La Figura: 5, con los terremotos de Mw≥6, muestra que: 1) la mayoría de ellos se caracterizan por una cinemática de desplazamiento por el rumbo casi puro, a excepción de dos eventos: 25.05.1992 en Cabo Cruz y una de las réplicas de 12.01.2010 en Haití; 2) los valores del % de solución del dipolo vectorial lineal compensado [DVLC] son mayores para los eventos de 2020 (35% Cabo Cruz), 2018 (21% E de la Isla de Swan), 2010 (44% Haití) y 1992 (27% Cabo Cruz) respecto a la mayoría (20%). Esto indica que en esos casos los focos tienen mayor complejidad. Una interpretación plausible es la localización de los focos en segmentos tectónicos diferentes, dentro de la Zona Límite de Placas Caribe-Norteamérica. La Figura 6B1 muestra para los terremotos de Mw≥5, que incluyen las réplicas del terremoto de 2010 en Haití y del segmento Cabo Cruz-Punta de Maisí, en Cuba Oriental. Se observa que al W de Cabo Cruz se mantiene el desplazamiento lateral, pero en el segmento Cabo Cruz-Punta de Maisí y Haití hay predominio de fallamiento inverso con un alto valor de DVLC (65%). Estos datos sustentan la segmentación de las estructuras sismogénicas, y permiten considerar que los eventos de M<6, generalmente, se producen en fallas secundarias, entre ellas las transversales. Además, está demostrado que los sentidos de ruptura en Cabo Cruz y Pílon son en sentido y dimensión diferentes (Cotilla y Córdoba, 2010; Cotilla y Udías, 1999) y se corresponden con dimensiones fractales diferentes (Cotilla y Córdoba, 2010a).

Cotilla et al. (1998) con base en la sismicidad de Cuba Oriental y en particular en Cabo Cruz y Punta de Maisí, definen y clasifican las concentraciones de epicentros y asocian como nudos (intersecciones) a los pares de fallas: 1) Cauto-Nipe y Oriente; 2) Nortecubana y Oriente, respectivamente. Cotilla et al. (2007a) sostienen que las fallas: 1) Nortecubana (83 terremotos perceptibles/ h2-40 km) es el límite septentrional de la Provincia Sismotectónica Cuba; 2) Cauto-Nipe es el

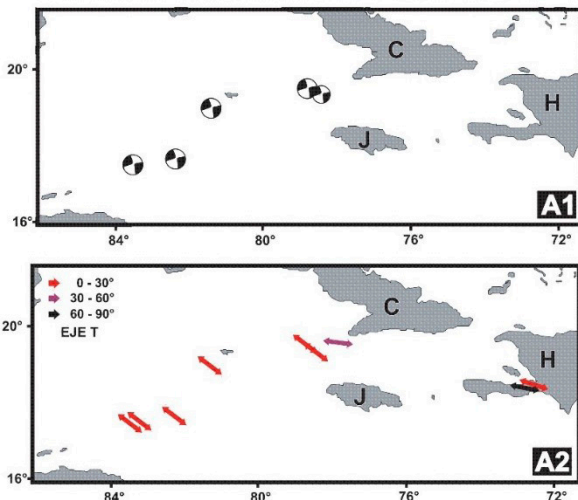


Figura 5. A1-A2 Análisis sismotectónico (M>6,0).

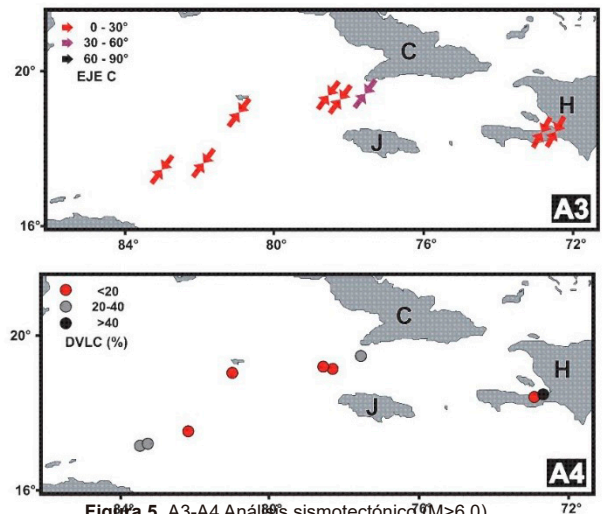


Figura 5. A3-A4 Análisis sismotectónico (M>6,0).

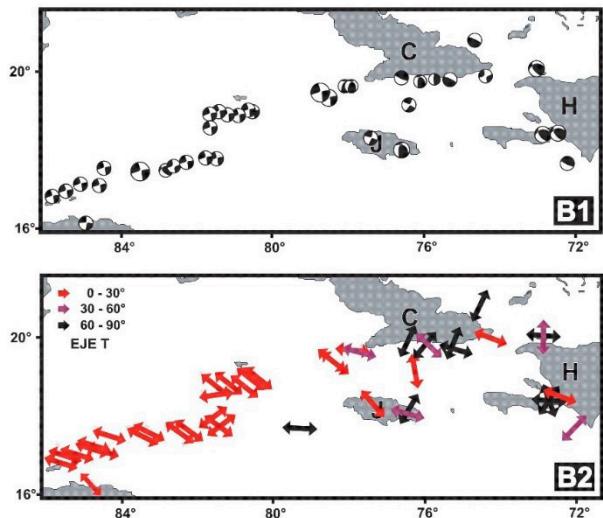


Figura 6. B1-B2 Análisis sismotectónico (M>5,0).

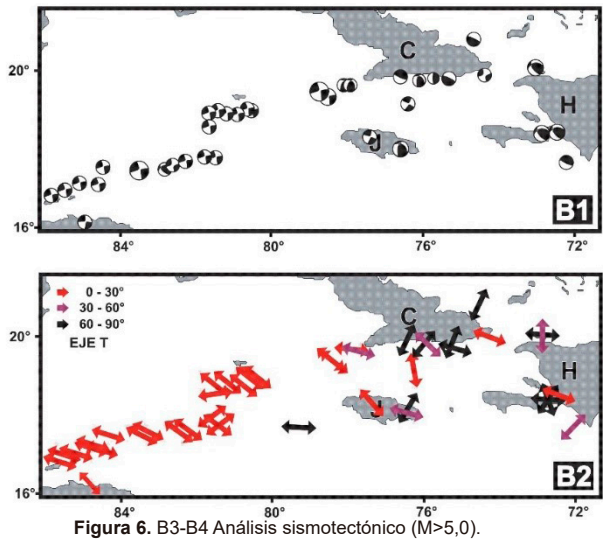


Figura 6. B3-B4 Análisis sismotectónico (M>5,0).

límite transversal de las Unidades Sismotectónicas Occidental y Oriental, y la actividad sísmica ya se comentó. En el mapa sismotectónico estas fallas tienen: 1) Nortecubana: ~1.000 km/ categoría II/ seis segmentos/ Mmáx6,2; 2) Cauto-Nipe: ~150 km/ categoría II/ dos segmentos/

Mmáx6,6; 3) Oriente: >1.000 km/ categoría I/ 3 segmentos/ Mmáx7,3. El segmento central de la Nortecubana originó dos tsunamis locales, ninguno en el oriental, donde Baracoa (Figura 3, Tabla 7). La Mmáx6,2 está en el occidental. La cinemática de la Unidad Oriental aparece en la Figura 2 y diferencia de la microplaca Gonáve.

El terremoto del 2020 (Mw7,7) tiene algunas características interesantes desde el punto de vista sismotectónico relativas a: 1) la ocurrencia espacio-temporal: 1.1) no hay premonitores en el mes anterior; 1.2) casi tres horas después del evento principal se genera “una réplica” fuerte (MW6,1/ 21:55:16)/ ~210 km al W-WSW; 1.3) a partir de ese momento, la mayoría de las réplicas está alrededor de ella (Figura 7); 2) la longitud

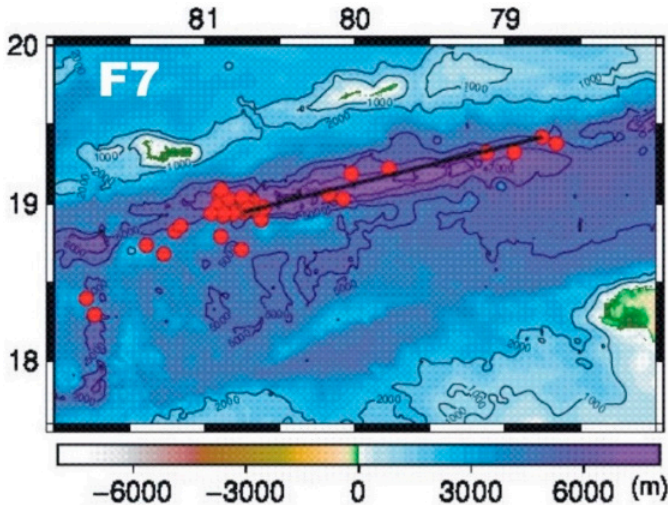


Figura 7. Epicentros del terremoto del 28.01.2020 y sus réplicas. Aparecen sobre un fondo batimétrico (GEBCO, 2015): 1) el evento principal; 2) las réplicas; 3) una línea negra gruesa entre el terremoto principal (extremo derecho) y la primera réplica más fuerte (extremo izquierdo).

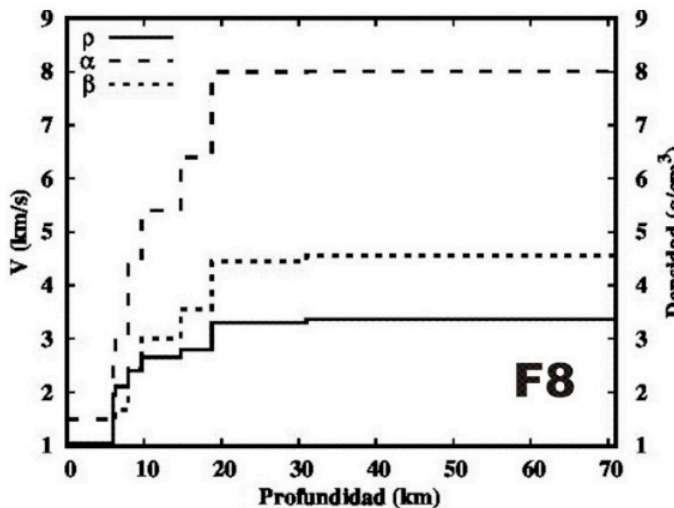


Figura 8. Modelo de estructura de la corteza. Aparecen Funciones de Green $\alpha=VP$, $\beta=VS$, y ρ =densidad.

de ruptura usando las relaciones de: 2.1) Wells y Coppersmith (1994)/ 160 km; 2.2) Blaser et al. (2010)/ 173 km; 2.3) Kiran et al. (2017)/ 200 km. El intervalo calculado de valores de ruptura, 160-200 km, es ligeramente inferior al observado de 210 km con respecto a las réplicas. Así, se suponen tres cosas, no mutuamente excluyentes: A) el evento principal indujo la réplica fuerte en un segmento vecino y ésta al resto de réplicas; B) en la zona no se pueden aplicar dichas fórmulas; C) la réplica principal es una barrera. Esto se ha indicado para otras regiones (Herráiz et al., 2000). Lamentablemente, el nivel de detección de las redes internacionales no permite una mejor precisión para completar la serie sísmica; 3) ancho y profundidad de la ruptura: 3.1) la línea que une los dos epicentros principales tiene rumbo 255°. Ese valor coincide, aproximadamente, con el de la solución doble par de fuerzas del GCMT (Global Centroid Moment Tensor, 2020) (Az/ Buz/ Desliz) = (257°/ 89°/ 03°); 3.2) esa línea se extiende por la zona más profunda de la fosa oceánica de Caimán (hmedia=6 km). Evidentemente, está en una zona oceánica pura (Rosencratz y Mann, 1991), por lo que el espesor de la corteza no es grande. También más al E, donde está la fosa Oriente, se estima que la corteza es <25 km (Álvarez et al., 2002); 3.3) la profundidad máxima de las réplicas fue de 14,9 km, aunque la mayoría fue de 10 km. Por ello, se consideran excesivas las estimaciones, a partir del cálculo de regresiones, del ancho de falla: 1) Wells y Coppersmith (1994)/21 km; 2) Blaser et al. (2010)/26 km; 3) Kiran et al. (2017)/29 km. Así, se asegura que el plano de falla es más largo y estrecho de lo que se asume en función del valor de magnitud.

La Figura 8 muestra un modelo de la estructura estratificada de la corteza (Álvarez et al., 2002) entorno al terremoto de 2020. A continuación, se estudia la influencia del terremoto del 2020 en los segmentos vecinos. Por lo que se valoran las deformaciones co- y post-sísmica para un semi-espacio visco-elástico estratificado. Con ese propósito, se emplea el programa PSGRN/PSCMP (Wang et al., 2006) que está basado en la teoría de la dislocación visco-elástica-gravitacional (Wang, 2005). Éste modela las funciones de Green para dislocaciones en el foco en ese tipo de medio y descompone la contribución de cada una de ellas para obtener, entre otras cosas: desplazamientos, esfuerzos, inclinaciones y el cambio del esfuerzo de fractura de Coulomb $[\Delta EFC]$. Se incorporan al proceso los datos: del mecanismo focal del terremoto, las dimensiones de la falla, el deslizamiento supuesto, y los coeficientes: de fricción en la falla (μ) y de Skempton (B).

Los cálculos se realizan para un área aproximada, de 850 km x 660 km, con centro en el punto medio de la línea que une a los dos terremotos mayores. Se consideraron: 1) las dimensiones lineales de: 1.1) de longitud (distancia entre esos dos terremotos) de 213 km; 1.2) ancho de 15,8 km (valor ajustado del área correspondiente por la fórmula de Wells y Coppersmith (1994) 3235,9 km², considerando una fuente rectangular); 2) deslizamiento 2,1 m (valor intermedio entre los obtenidos de las fórmulas de Wells y Coppersmith (1994) y Kiran et al. (2017)); 3) valor del coeficiente $\mu=0,7$; 4) coeficiente de Skempton= 0,95. Éste indica la importante influencia de la presión de poros que existe en una falla con un espejo de agua de ~6 km. Finalmente, se alcanzan los resultados para la superficie y la profundidad de 10 km (Figura 9).

Las zonas con $\Delta EFC > 0$ son más propensas a la ocurrencia de réplicas de los terremotos que aquellas con $\Delta EFC < 0$. En este caso, la zona con mayor valor positivo está a lo largo de la falla principal, tanto a 0 km como a 10 km; pero en el segundo los valores son ~20 veces mayores. Esto explica la preferencia de 10 km para la profundidad de las réplicas. En el caso de los desplazamientos en direcciones N-S y E-O, aunque los valores a 10 km son algo mayores que a 0 km, la diferencia no es significativa. Los desplazamientos en la dirección: 1) E-O muestran el patrón clásico de un corrimiento por el rumbo sinestro; 2) N-S presentan sus valores máximos en el extremo O de la falla, donde está la mayor

Tabla 9. Segmentos de fallas activas

	1	2	3	1	2	3
Motagua-Swan	7,5/ 30	/Transcurrente	Septentrional 1 (H-Mo)	8,2/ 40	10/ compresivo,	Transcompresivo,
Oriente 1 (IC-CC)	7,8/ 25	/Trans-tensivo	Septentrional 2 (Mo-S)	7,5/ 60		3/ Trans-compresivo
Oriente 2 (CC-B)	6,8/ 30	/Trans-compresivo	Enriquillo 1 (PP-A)	7,5/ 20		5 / Transcurrente
Oriente 3 (B-PM)	5,9/ 30	/Trans-tensivo	Enriquillo 2 (A-FOM)	7,5/ 60		3/ Trans-tensivo
Walton	6,0/ 30	/Transcurrente	Plantain Garden	7,75/ 30		8/ Transcurrente

Notas: Segmento de falla=1; Mmáx/hmáx (km)=2; Tsunami/Mecanismo predominante=3; Azua=A, Baconao=B, Cabo Cruz=CC, FOM, Haití=H, Islas Caimán=IC, Punta de Maisí=PM, Montecristi=Mo, Puerto Príncipe=PP.

cantidad de las réplicas. En los lóbulos positivos del ΔEFC , para las cuatro direcciones, tienen valores muy bajos, y con excepción del lóbulo O, no están presentes réplicas u otros terremotos.

El segmento septentrional del Caribe, al E de Punta de Maisí, hacia La Española, forma parte de un límite de trans-presión/ trans-compresión de las placas Norteamérica-Caribe. La deformación en sus estructuras se transmite (desde Norteamérica al Caribe) y se absorbe en los sistemas de fallas. La mayor parte son relativamente cortos con segmentos y escalones. En particular Haití tiene dos zonas de fallas activas transcurrentes E-O: Septentrional y Enriquillo. En el relieve se aprecia que las deformaciones son mayores en el N, donde está la falla Septentrional. Ésta está al N de La Española desde el E de El Paso de los Vientos hasta configurar un escalón, discontinuo, en República Dominicana para alcanzar la Península de Samaná. Ahí se han producido varios terremotos fuertes y algunos con tsunamis locales. En las terrazas costeras, emergidas y sumergidas, de Haití, hay evidentes daños tectónicos. La zona de fallas de Enriquillo, más al S, es transcurrente y activa. Ella se desarrolla desde el río Plantain Garden, Jamaica, hasta la República Dominicana en un campo poco deformado y dentro de amplios valles. Esa estructura no muestra daños en el relieve por terremotos. Otro sistema es Matheux-Neiba, muy flexionado en el plano, tiene dirección NO-SE. Éste es de tipo inverso y localiza entre las 2 fallas mencionadas. Las fallas Enriquillo y Matheux-Neiba convergen en Azua-Beata donde la fosa Muertos (h_{máx}~5.500 m) y el alineamiento Beata, y configuran un nudo (Figura 3B).

Nuestras investigaciones demuestran la segmentación de estructuras en el Caribe Septentrional y de Cuba, en particular (Tabla 9). Las estimaciones de magnitud de terremotos fuertes, para 100 años, determinadas por: 1) Cotilla et al. (1990) para La Española-Puerto Rico fueron: 8,2 N de Haití/ 8,0 N Puerto Rico/ 7,5 S y Centro Haití/ 7,8 N República Dominicana/ 7,3 S de República Dominicana; 2) Cotilla et al. (1997) para el Caribe Septentrional fueron: >8,0 N de Haití y N de Puerto Rico/ 7,8 N República Dominicana/ 7,5 S y Centro de Haití. Se sostiene que: 1) la actividad sísmica: 1.1) se diferencia significativamente desde Haití hacia Cuba, inmediaciones del Paso de los Vientos; 1.2) del N de Haití es mucho mayor que en Cuba, en las inmediaciones del Paso de los Vientos; 1.3) del SE de Jamaica es mayor que en Cuba; 1.4) del S de Haití y el SE de Jamaica son similares; 1.5) del N de Haití es mayor que al N de República Dominicana; 1.6) del N de República Dominicana es menor que al N de Puerto Rico, pero esta segunda menor que al N de Haití; 1.7) del Centro y S de República Dominicana es, ligeramente, menor que la del S de Haití; 2) las características de la sismicidad se interpretan como respuesta diferencial a la interacción de las placas y la fragmentación de la Caribe; 3) se han generado tsunamis locales al N de La Española y Puerto Rico y al SE de Jamaica; pero no en Cuba Oriental; 4) la menor actividad sísmica de Cuba con relación a Haití y Jamaica se justifica por la pertenencia de la primera a la placa de Norteamérica, de mucha mayor dimensión y menor deformación que la del Caribe; 5) las magnitudes de los terremotos de Cuba Suroriental son las mayores del megabloque Cuba y se justifican por estar ajustadas a la Zona Límite de las 2 placas; 6) los acoples de las estructuras activas de Cuba Oriental (6.1) y del N de Haití; 6.2) con las Islas Caimán) son muy diferentes. En el segundo caso la actividad sísmica es mayor y descarta la relación de continuidad de las fallas Septentrional y Oriente.

5. DISCUSIÓN

Además de los estudios mencionados aquí se indican unas referencias sobre la ocurrencia preferente de terremotos en zonas de intersecciones de alineamientos, fallas y estructuras de bloques: Assinovskaya y Soloviev (1994), Cotilla (2014), Cotilla y Córdoba (2009, 2017), Cotilla et al. (2019), Gorshkov et al. (2020), Gvshiani et al. (2020), Imaeva et al. (2016), Soloviev et al. (2014), Talwani (1988) y Tayen et al. (2018). A partir de ellos, y considerando también el acierto previo en la localización del **Tabla 10**. Algunos de los terremotos del alineamiento transversal Beata (en La Española)

Fecha/ Tiempo	M/ I/ h(km)	Coordenadas (N - W)	Fecha/ Tiempo	M/ I/ h(km)	Coordenadas (N - W)
8.04.1993/ 19:13:10	5,2/ 4/ 12,8	18,222 71,132	23.01.2012/ 20:50:14	5,1/ 6/ 8,8	19,542 70,077
10.08.1995/ 21:02:57	5,2/ 3/ 58	18,647 70,541	18.01.1995/ 20:45:53	5,0/ 3/ 91,1	18,892 70,333
24.04.1996/ 18:56:72	5,1/ 3/ 82,9	18,884 70,361	8.06.2007/ 13:30:46	5,0/ 3/ 50	18,834 70,315
7.07.2012/ 20:32:38	5,1/ 5/ 26,7	18,243 71,136			

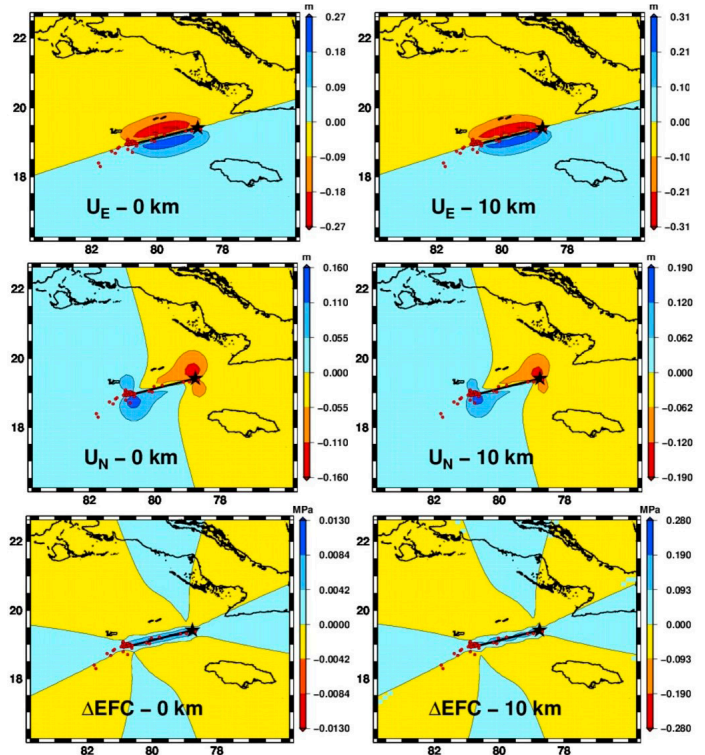


Figura 9. Resultados de la aplicación del programa PSGRN/PSCMP (Wang et al., 2006). Aparecen: 1) estrella negra (epicentro del terremoto principal); 2) línea negra (la falla); 3) puntos rojos (epicentros de las réplicas); 4) UN=Deslizamiento N-S, ΔEFC =Esfuerzo de fractura de Coulomb.

epicentro del terremoto de Spitak, 7.12.1988/ M7,0/ Imáx10, determinado por especialistas soviéticos empleando estas técnicas (Cisternas et al., 1989), se sostiene que: 1) la sismicidad ocurre, y mantiene, en o cerca de las zonas tectónicamente débiles; 2) esas zonas no son aleatorias ni caóticas; 3) las zonas se denominan nudos; 4) los nudos: 4.1) son estructuras tridimensionales de la litosfera, con diferente categoría, de la litósfera que se configuran a partir del cruce o intersección de dos o más sistemas de alineamientos y fallas; 4.2) se localizan en diferentes ambientes tectónicos; 4.3) acumulan la energía y distribuyen las deformaciones del proceso tectónico; 4.4) facilitan, como polos activos, el giro de los bloques; 4.5) permiten que las alineaciones y fallas interactúen, pero mantengan la individualidad. Éste es el caso de la zona de Cabo Cruz, donde las fallas Oriente y Cauto-Nipe demuestran actividad sísmica independiente y conjunta.

En Cuba Oriental Cotilla et al. (1998) han delimitado cinco nudos con actividad. Los autores también los han determinado en Jamaica, La Española y Puerto Rico. La figura 2 de Cotilla y Córdoba (2010b) y la figura 8 de Cotilla et al. (2007) muestran un sistema de alineamientos (SO-NE) transverso-diagonal (L9 o ALB) con nudos de articulación en La Española (desde Beata a Santiago de los Caballeros). Éste es activo con la presencia de terremotos sobre su traza segmentada (Tabla 10) y como escalón morfoestructural, sirve de límite a la diferenciación (al E y O) de la sismicidad (en cuanto a cantidad y profundidad) en las inmediaciones de Enriquillo-Beata-Azua. En la parte E del alineamiento, hacia la fosa de Muertos hay tsunamis y la profundidad predominante de los eventos es 90-100 km; mientras que al O es mucho menor. Por todo eso, se considera, que éste es el límite entre las microplacas de la Gonave y La

Tabla 11. Características principales de las fallas Oriente y Septentrional

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Oriente		~750	3	6,8	1	30	0,17	No	~80	T-Tc	III
Septentrional		~760	8	8,2	12	90	0,43	10	~5.000	T-Tc-C	I

Notas: Falla=1; Longitud (km)=2; Nudos=3; M_{máx}=4; Cantidad de terremotos con M>7=5; Espesor de la capa sísmo-activa=6; Densidad de epicentros (1990-2018)=7; Tsunamis locales=8; Fallecidos=9; Mecanismo predominante=10; Categoría regional=11; Compresivo=C; Transcurrente=T; Trans-compresivo=Tc.

Española-Puerto Rico (Núñez et al., 2015).

La Tabla 11 incluye la información más relevante sobre las fallas Oriente y Septentrional. Se aprecia que la Septentrional es, con diferencia, la de mayor categoría y peligro. Sus terremotos siempre fueron perceptibles en Cuba Oriental, pero no todos los de la falla Oriente fueron percibidos en La Española. Por otra parte, la perceptibilidad de terremotos ocurridos en las inmediaciones de Cabo Cruz (Tabla 6) es significativa hacia el N y NE. Esto se comprobó, principalmente, con el terremoto del 18.10.1551 (M_á6,6) en Bayamo. El área de perceptibilidad determinada es ~40.000 km², muy inferior a la del 28.01.2020 (M_á7,7); pero las afectaciones producidas fueron considerables con el primero de ellos. Colón llegó a Cabo Cruz el 3.05.1494 y la ciudad de Bayamo se fundó en 1513 por Don Diego Velázquez. El nudo de Cabo Cruz (intersección de las fallas Cauto-Nipe y Oriente) está relativamente distante de los centros urbanos, y las afectaciones por terremotos (~90 años), generalmente, no son significativas. Ese periodo es similar al estimado para el segmento de Santiago de Cuba.

Se confirma que los nudos Cabo Cruz y Punta de Maisí, están sobre el trazo de la falla Oriente, pero se diferencian por: 1) la localización espacial; 2) la ocurrencia de terremotos fuertes; 3) la cantidad de terremotos; 4) los tipos de fallas (intersección de Oriente y Cauto-Nipe); 5) las condiciones geodinámicas. Así, A) el nudo de Cabo Cruz: a.1) está dentro de la depresión Bartlett-Caimán; a.2) tiene siete terremotos fuertes; 3) tiene una alta densidad de epicentros; B) el nudo de Punta de Maisí: b.1) está en una zona de transición lateral de placas; b.2) no tiene terremotos fuertes y la densidad de epicentros es muy baja; b.3) la intersección de fallas, confirmada, es entre Oriente y Nortecubana (límite septentrional del megabloque Cuba). La participación de la falla Septentrional (la más activa de la región N del Caribe) en este nudo es manifiestamente incierta.

6. CONCLUSIONES

El Caribe Septentrional, América Central-Puerto Rico, tiene un conjunto de estructuras que han producido terremotos fuertes (M_á8,2) y tsunamis (~30). Esas zonas de fallas están segmentadas y diferentemente caracterizadas. La de mayor actividad y peligro está en Haití (falla Septentrional, M_á8,2/ >30 terremotos fuertes/ diez tsunamis locales/ ~5.000 muertos). La otra es Oriente (Cabo Cruz-Punta de Maisí) con M_á7,2/ ~80 muertos por terremotos (todos en Cuba)/ sin tsunamis locales.

Las fallas Septentrional y Oriente son parte del límite de las placas Norteamérica-Caribe se vinculan con la microplaca Gonave. La conexión está en el Paso de los Vientos; sin embargo, se diferencian con datos de: 1) relieve; 2) actividad sísmica (cantidad de terremotos, magnitudes, frecuencia de los más fuertes y profundidad); 3) mecanismos focales; 4) generación de tsunamis locales; 5) cantidad de fallecidos. En el sector se localiza la intersección de las fallas Oriente y Nortecubana (M_á6,2). Entre Punta de Maisí y La Môle Saint Nicolas hay pocos eventos sísmicos y todos son de baja magnitud; pero, en el extremo O de Cuba Suroriental, también en la falla Oriente, está el segmento de Cabo Cruz con actividad fuerte: 1551 (M~6,6), 1852 (M~7,7), 1917 (M~7,4), 1990 (M5,9), 1992 (M6,8), 2007 (M6,2) y 2020 (M7,7). Todos son poco profundos (10-23 km), perceptibles (~90 años) y en ningún caso (526 años) ha ocurrido tsunami local ni tampoco una víctima mortal. Aquí se encuentra otra intersección de fallas (Oriente y Cauto-Nipe (>10 eventos perceptibles)) con una agrupación significativa de epicentros registrados por las estaciones cubanas, desde el año 1979.

AGRADECIMIENTOS

La mayoría de las figuras fueron realizadas por A. García. S. Crespillo ha recopilado muchos de los datos. Los fondos provienen principalmente del Proyecto KUK-AHPAN RTI2018-094827-B-C21.

REFERENCIAS

Aki, K. (1966). "Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964. Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress strain drop from the G wave spectrum." *Bulletin of Earthquake Research Institute* 44: 73-88.

Álvarez, L. y Chuy, T. (1985). Isoseismal model for Greater Antilles. En:

Proceedings of the 3rd International Symposium on the Analysis of Seismicity and on Seismic Risk, Liblice Castle, Czechoslovakia, June 17-22: 134-141 pp.

Álvarez, L., Romanelli, F. y Panza, G.F. (2002). "Sismogramas sintéticos en medios anelásticos lateralmente heterogéneos: Suma modal para fuentes sísmicas ubicadas bajo una fosa abisal profunda." *Nuevas Investigaciones Sismológicas en Cuba*: 57-73.

Álvarez, L., Chuy, T., García, J., Moreno, B., Álvarez, H., Blanco, M., Expósito, O., González, O. y Fernández, A.I. (1999). 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.

Assinovskaya, B.A. y Soloviev, S.L. (1994). "Definition and description of the zones of potential earthquake sources in the Barents Sea." *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 29.8: 664-675.

Bachhuber, J.L., Rathje E.M., Cox, B.R., Dulberg, R.A., Kottke, A., Wood C. y GEER team. (2010) Carte géologique de Port-au-Prince, Haïti. Bureau des Mines et de l'Energie, Haïti, Revue 1, 15 décembre.

Backus, G. y Mulcahy, M. (1976). "Moment tensors and other phenomenological descriptions of seismic sources-I: Continuous displacements." *Geophysical Journal Royal Astronomical Society* 46: 341-361.

Bakun, W.H., Flores, C.H. y Ten Brink, U.S. (2012). "Significant earthquakes on the Enriquillo fault system, Hispaniola, 1500-2010: Implications for seismic hazard." *Bulletin of Seismological Society of America* 102.1: 18-30.

Benford, B., DeMets, C. y Calais, E. (2012). "GPS estimates of microplate motions, northern Caribbean: Evidence for a Hispaniola microplate and implications for earthquake hazard." *Geophysical Journal International* 191: 481-490.

Blaser, L., Krüger, F., Ohrnberger, M. y Scherbaum, F. (2010). "Scaling relations of earthquake source parameter estimates with special focus on subduction environment." *Bulletin of Seismological Society of America* 100.6: 2.914-2.926.

Bowin, C.O. (1968). "Geophysical study of the Cayman trough." *Journal Geophysical Research* 73.16: 5.159-5.173.

Burke, K., Cooper, C., Dewey, J., Mann, P. y Pindell, J. (1984). Caribbean tectonics and relative plate motions. Editores: W.Bonini, R.Hargraves, y R.Shagam. En: *The Caribbean-South American plate boundary and regional tectonics*. Geological Society of America, *Memory* 162: 31-63.

Calais, E. y Mercier de Lépinay, B. (1992). "From transtension to transpression along the northern Caribbean plate." *Tectonophysics* 116: 327-350.

Case, J.E., Holcombe, T.L. y Martin, R.G. (1984). Map of geologic provinces in the Caribbean region. Geological Society of America, *Memory* 162: 1-31.

Geological and geophysical investigations of the Mid-Cayman rise spreading center. Initial results and observations [CAYTROUGH]. Editores: M.Talwani, C.Harrison y D.Hays. (1979). En: *Deep drilling results in the Atlantic Ocean: Ocean crust*. Maurice Ewing Ser. 2: 66-93.

Chuy, T. y Álvarez, L. (1988). "Sismicidad histórica de La Española." *Comunicaciones Científicas sobre Geofísica y Astronomía*, 16: 12 pp.

Cisternas, A., Philip, H., Bousquet, J.C., Cara, M., Deschamps, A., Dorbath, L., Dorbath, C., Haessler, H., Jiménez, E., Nercessian, A., Rivera, L., Romanowicz, B., Gvishiani, A., Shebalin, N.V., Aptekman, I., Arefiev, S., Borisov, B.A., Gorshkov, A., Graizer, V., Lander, A., Pletnev, K., Rogoshin, I. y Tatevosian, R. (1989). "The Spitak (Armenia) earthquake of 7 December 1988: Field observations, seismology and tectonics." *Nature* 339: 675-679.

Cotilla, M. "Sismicidad y sismotectónica de Cuba. (1998)." *Revista Física de la Tierra* 10: 53-86.

Cotilla, M. (2011). "¿Tsunamis en Cuba?" *Revista Física de la Tierra* 23: 173-197.

Cotilla, M. (2014). "Alternative interpretation for the active zones of Cuba." *Geotectonics* 48.6: 459-483.

Cotilla, M. y Álvarez, J.L. (2001). "Regularidades sismogenéticas de la unidad neotectónica Occidental de Cuba." *Revista Geológica de Chile* 28.1: 3-24.

Cotilla, M. y Córdoba, D. (2009). "Morphostructural analysis of Jamaica."

- Geotectonics 43.5: 420-441.
- Cotilla, M. y Córdoba, D. (2010). "The Bayamo earthquake (Cuba) of the 18 October 1551." *International Journal of Geosciences* 1: 1-50.
- Cotilla, M. y Córdoba, D. (2010). "Study of the Cuban fractures." *Geotectonics* 44.2: 176-202.
- Cotilla, M. y Córdoba, D. (2010). "Determination of lineaments in Hispaniola." *Revista Geográfica* 147: 133-154.
- Cotilla, M. y Córdoba, D. (2015). "Guantánamo neo-estructura atípica del Caribe Norte." *Revista Investigaciones Geográficas de Chile* 50: 51-88.
- Cotilla, M. y Córdoba, D. (2017). "Morphotectonic study of the Greater Antilles." *Geotectonics* 51.1: 89-104.
- Cotilla, M. y Córdoba, D. (2018). "Some glimpses of the tsunamigenic potential of the Caribbean región". Google Books: 100 pp.
- Cotilla, M. y Franzke, H.J. (1994). "Some comments on the seismotectonic activity of Cuba." *Zeitschrift Geological Wissenchaft*, 22.3/4: 347-352.
- Cotilla, M. y Udías, A. (1999). "Geodinámica del límite Caribe-Norteamérica." *Revista de la Sociedad Geológica de España* 12.2: 175-186.
- Cotilla, M., Álvarez, L. y Chuy, T. (1990). Determinación de zonas sismogeneradoras de la región oriental de Cuba. Instituto de Geofísica y Astronomía, Academia de Ciencias de Cuba. Informe Científico-Técnico: 15 pp.
- Cotilla, M., Córdoba, D. y Calzadilla, M. (2007). "Morphotectonic study of Hispaniola." *Geotektonika* 5: 38-62.
- Cotilla, M., Córdoba, D. y Núñez-Cornú, F. (2019). "Caracterización sismotectónica de México." *Revista Geográfica de América Central* 2.63: 103-139.
- 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* 48: 1-18.
- Cotilla, M., Rubio, M., Álvarez, L. y Grünthal, G. (1997). "Potenciales sísmicos del arco de las Antillas Mayores." *Revista Geofísica* 46: 129-150.
- Cotilla, M., Bankwitz, P., Álvarez, L., Franzke, H. J., Rubio, M. y Pilarski, J. (1998). "Cinemática neotectónica de Cuba Oriental." *Revista de la Sociedad Geológica de España* 11.1-2: 33-42.
- DesRoches, R., Comerio, M., Eberhard, M., Mooney, W y Rix, G. (2011). "Overview of the 2010 Haiti earthquake." *Earthquake Spectra* 27.1: S1-S21, doi:10.1193/1.3630129.
- Dixon, T., Farina, F., DeMets, C., Jansma, P., Mann, P. y Calais, E. (1998). "Relative motion between the Caribbean and North American plates and related boundary zone deformation from decade of GPS observations." *Journal Geophysical Research* 103: 15.157-15.182.
- Dolan, J. y Wald, D. (1998). The 1943-1953 north-central Caribbean earthquakes: Active tectonic setting, seismic hazards and implications for Caribbean-North America plate motions. En: *Active strike-slip and collisional tectonics of the northern Caribbean plate boundary zone*. Editores: J.Dolan y P.Mann. Geological Society of America, Special Paper 326: 143-169.
- Dziewonski, A.M., Chou, T.A. y Woodhouse, J.H. (1981). "Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity." *Journal Geophysical Research* 86: 2.825-2.852.
- Frankel, A. (1984). Earthquake focal mechanisms along the northern border of the Caribbean plate and their tectonic implications. EOS, *Transactions American Geophysical Union* 64: 1.109 p.
- Frankel, A., Harmsen, S., Mueller, Ch., Calais, E. y Haase, J. (2011). "Documentation for initial seismic hazard maps for Haiti." *Earthquake Spectra*: 12 pp. www.researchgate.net/publication/270368963
- The General Bathymetric chart of the Oceans [GEBCO]. (2015). The GEBCO-2014 Grid, version 20150318. www.gebco.net/data_and_products/historical_data_sets/#gebco_2014
- Global Centroid-Moment-Tensor [GCMT] (2020): Soluciones de centroide-tensor de momento en línea. <https://www.globalcmt.org/>
- González, B. y Vorobiova, E. (1989). "Distribución de las profundidades focales de terremotos con la magnitud en la región de las Antillas Mayores." *Comunicaciones Científicas sobre Geofísica y Astronomía* 8: 7 pp.
- González, E., Cotilla, M., Cañete, C., Díaz, J., Carral, R. y Arteaga, F. (2003). "Estudio morfoestructural de Cuba." *Geografía Física y Dinámica Cuaternaria* 26: 49-69.
- Goreau, P. (1993). Tectonic evolution of the north central Caribbean plate margin. Woods Hole Oceanographic Institution, Massachusetts Institute Technological, Cambridge. Sponsor: National Science Foundation, Washington, DC. September. Report: WHOI-83-34, 248 pp.
- Gorshkov, A., Novikova, O. y Gaudemer, Y. (2020). "Strong ($M > 7.0$) earthquake-prone areas in Hellenides, Greece." *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 56.1: 45-52.
- Gvishiani, A.D., Soloviev, A.A. y Dzeboev, B.A. (2020). "Problem of recognition of strong earthquake prone areas: A state of the art review." *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 56: 1-23.
- Herráiz, M., De Vicente, G., Lindo, R., Giner, J., Simón, J. L. Gómez-Casado, J.M., Vadillo, O. Rodríguez-Pascuas, M. Cicuendez, J.L., Casas, A., Cabañas, L., Rincón, P., Cortés, M., Ramírez, M. y Lucini, M. (2000). "The recent (Upper Miocene to Quaternary) and present tectonic stress distribution in the Iberian Peninsula." *Tectonics*, 19.4: 762-786.
- Heubeck, C y Mann, P. (1991). "Geologic evaluation of plate kinematic models for the North American-Caribbean plate boundary zone." *Tectonophysics* 191: 1-26.
- Holcombe, T., Vogt, P., Mathews, J. y Murchinson, R. (1973). "Evidence for sea-floor spreading in the Cayman trough." *Earth and Planetary Science Letters* 20: 357-371.
- Imaeva, L., Imaev, V., Koz'min, B. y Mel'nikova, V. (2016). "Recent structures and tectonic regimes of the stress-strain state of the earth's crust in the northeastern sector of the Russian Arctic region." *Geotectonics* 6: 535-552.
- Jost, M.L. y Herrmann, R.B. (1989). "A student's guide to and review of moment tensors." *Seismological Research Letters* 60: 37-57.
- Kiran, K.S., Thingbaijam, P., Mai, K. y Goda, K. (2017). "New Empirical earthquake source-scaling laws." *Bulletin of Seismological Society of America* 107.5: 2.225-2.246.
- Krieger, L. y Heimann, S. (2012). "MoPaD- Moment tensor plotting and decomposition: A tool for graphical and numerical analysis of seismic moment tensors." *Seismological Research Letters* 83: 589-595.
- Lewis, J. y Draper, G. (1990). Geology and tectonic evolution of the northern Caribbean region. En: *The Geology of North America, V. H: The Caribbean Region, Chapter 4: 77-140 pp*. Geological Society of America.
- Mann, P., Burke, K. y Matumoto, T. (1984). "Neotectonics of Hispaniola: Plate motion, sedimentation and seismicity at a restraining bend." *Earth and Planetary Science Letters* 70: 311-324.
- Mann, P., Taylor, F., Lawrence Edwards, R. y Then-Lung, K. (1985). "Actively evolving microplate formation by oblique collision and sideways motion along strike-slip faults: An example from the northeastern Caribbean plate margin." *Tectonophysics* 246: 1-69.
- McCann, W. y Pennington, W. Seismicity. (1990). Large earthquakes, and the margin of the Caribbean plate. Editores: G.Dengo y J.E.Case. En: *The Geology of North America, V. H: The Caribbean Region, Chapter 4, 291-306 pp*. Geological Society of America.
- Mocquet, A. (1984). Vitesses de déplacement discontinue le long d'une zone limite de plaques: Caribes-Amerique du Nord. Master Thesis, University of Rennes, France: 53 pp. (en Francés).
- Molnar, P. y Sykes, L. (1969). "Tectonics of the Caribbean and Middle America regions from focal mechanisms and seismicity." *Geological Society of America Bulletin* 80: 1.639-1.684.
- Moreno B. "The new Cuban seismograph network." *Seismological Research Letters* 73.4 (2002): 504-517.
- Moreno, B., Grandison, M. y Atakan, K. (2002). "Crustal velocity model along the southern Cuban margin: Implications for the tectonic regime at an active plate boundary." *Geophysical Journal International* 15.2: 632-645.
- Navy-Princeton Exploration [NPE]. (1933). Gravity expedition to the West Indies in 1932. U.S. Hydrographic Office, Washington: 54 pp.
- Nettles, M. y Hjörleifsdóttir, V. (2010). "Earthquake source parameters

- for the January, 2010, Haiti main shock and aftershock sequence." *Geophysical Journal International* 183: 375-380.
- Nishenko, S., McCann, W. y Wiggins-Grandison, M. (1996). Jamaica: An active restraining bend on the eastern extension of the Swan fracture zone. *Geological Society of America Abstract*: 27 p.
- Núñez-Escribano, D. (2014). Seismic structure of the crust across NE Caribbean plate (Dominican Republic). (Tesis doctoral). Universidad Complutense de Madrid 317 pp.
- Núñez, D., Córdoba, D., Cotilla, M. y Pazos, A. (2015). "Modeling the crust and upper mantle in northern Beata Ridge (Caribe Norte Project)." *Pure and Applied Geophysics* 173.5: 1.639-1.661.
- Perrot, J., Calais, E. y Mercier de Lépinay, B. (1997). "Tectonic and kinematic regime along the northern Caribbean plate boundary: New insights from broadband modelling of the May 25, 1992, Ms=6.9 Cabo Cruz, Cuba earthquake." *Pure and Applied Geophysics* 149: 475-487.
- Prentice, C., Mann, P., Taylor, F., Burr, G. y Valastro, S. (1993). "Paleoseismicity of the North American-Caribbean plate boundary (Septentrional fault), Dominican Republic." *Geology* 21: 49-52.
- Prentice, C., Mann, P., Burr, G. y Peña, L. (1994). Timing and size of the most recent earthquake along the Central Septentrional fault, Dominican Republic. U.S. Geological Survey, Open File Report 94-568.
- Prentice, C., Mann, L., Peña, L. y Burr, G. (2003). "Slip rate and earthquake recurrence along the central Septentrional fault, North American-Caribbean plate boundary, Dominican Republic." *Journal Geophysical Research* 107 doi: 10.1029/2001JB000442.
- Prentice, C., Mann, P., Crone, A., Gold, R., Hudnut, K., Briggs, R., Koehler, R. y Jean, P. (2010). "Seismic hazard of the Enriquillo-Plantain Garden fault in Haiti inferred from paleoseismology." *Nature Geosciences* 3: 789-793.
- Red sísmica de Jamaica. www.mona.uwi.edu/earthquake/jaequake.htm
- Renard, V., Mercier de Lépinay, B. y Buffet, G. (1992). North Caribbean plate boundary: High resolution imagery of the Oriente fault across the Windward Passage and south of Tortuga Island: A model for strike-slip tectonics. EOS, Transactions American Geophysical Union 73: 278 p.
- Rivera, L. y Cisternas, A. (1990). "Stress tensor and fault plane solutions for a population of earthquakes." *Bulletin of Seismological Society of America* 80.3: 600-614.
- Rosencratz, E. y Mann, P. (1991). "Sea MARC II mapping transform faults in the Cayman trough Caribbean Sea." *Geology* 19: 690-693.
- Rosencratz, E. y Sclater, J.G. (1986). "Deep and age in the Cayman trough." *Earth and Planetary Science Letters* 79: 133-144.
- Rosencratz, E., Ross, M. y Sclater, J. (1988). "Age and spreading history of the Cayman trough as determined from depth, heat flow and magnetic anomalies." *Journal Geophysical Research* 93: 2.141-2.157.
- Rubio, M., Cotilla, M. y Álvarez, L. Evidencias sobre la microplaca Gonave. Instituto de Geofísica y Astronomía, Academia de Ciencias de Cuba. Informe Científico-Técnico (1994): 20 pp.
- Ruellan, E., Mercier de Lépinay, B. Beslier, M., Sosson, M., Mooner, C., Leroy, S., Rowe, D. y Cruz-Calderón, G. Morphology and tectonics of the Mid-Cayman spreading (CAYVIC Cruise) (2003). EG-American Geophysical Union-EUG Joint Assembly. Abstract id. 12580.
- Scotese, Chr. (1999). Evolution of the Caribbean sea (100 my-Present): Collision of Cuba with Florida platform and opening of the Cayman trough. PALEOMAP Project. www.scotese.com/caribanim.htm
- Soloviev A., Gvishiani, A., Gorshkov, A., Dobrovolsky, M. y Novikova, O. (2014). "Recognition of earthquake prone areas: Methodology and analysis of the results." *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 50.2: 151-168.
- Taber, S. (1920). "Jamaica earthquakes and the Bartlett trough." *Bulletin of Seismological Society of America* 10.2: 84-88.
- Taber, S. (1922). "The seismic belt in the Greater Antilles." *Bulletin of Seismological Society of America* 12:199-219.
- Talwani, P. (1988). "The intersection model for intraplate earthquakes." *Seismological Research Letter* 59.4:305-310.
- Tayen, N., Phach, P., Shakirov, R., Trong, C., Hung, P. y Anh, I. (2018). "Geoblocks recognition and delineation of the earthquake prone areas in Tuan-Giao area (NO Vietnam)." *Geotectonics* 52.3:359-381.
- Ten Brink, U., Danforth W., Polloni C., Andrews B., Llanes P., Smith S., Parker E. y Uozumi T. (2004). New seafloor map of the Puerto Rico trench helps assess earthquakes and tsunami hazards. EOS, Transactions, American Geophysical Union 85.37.
- U.S. Geological Survey [USGS]. www.usgs.gov/
- Van Dusen, S. y Dosen, D. (2000). "Faulting processes of historic (1917-1962) M>6,0 earthquakes along the North-Central Caribbean margin." *Pure and Applied Geophysics* 157: 719-736.
- Vireux, J., Calais, E., Deschamps, A., Mercier de Lépinay, B. y Bèthoux, N. (1992). Tectonic interpretation of the May 25th 92 Cuban earthquake. EOS, Transactions American Geophysical Union, Meeting, San Francisco
- Wang, R. (2005). "The dislocation theory: a consistent way for including the gravity effect in (visco) elastic plane-earth models." *Geophysical Journal International* 161:191-196.
- Wang, R., Lorenzo-Martin, F. y Roth, F. (2006). "PSGRN/PSCMP- A new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory." *Computers and Geosciences* 32: 527-541.
- Wells, D. y Coppersmith, K. (1994). "New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement." *Bulletin of Seismological Society of America* 84 974-1.002.
- Wiggins-Grandison, M. y Atakan, K. (2005). "Seismotectonics of Jamaica." *Geophysical Journal International* 160.2: 573-580.
- Williams, T. (1995). "Lambert and Mercator Projections in Geology and Geophysics." *Computer and Geosciences* 21: 353-364.