

EXPLORACIÓN ESTADÍSTICA DE DATOS SÍSMICOS EN PUERTO RICO EN EL PERIODO DE DICIEMBRE 2019 HASTA ENERO 2021¹

Shirley Huanca², Roberto Trespalacios³, Zulma Acevedo⁴, Dalia Alizo⁵,
Angelie Nieves⁶, Clara Isaza⁷, Mauricio Cabrera-Ríos⁸

RESUMEN: En diciembre de 2019, Puerto Rico experimentó un incremento notorio de actividad sísmica principalmente en las regiones sur y suroeste de la isla. Los cientos de edificios y hogares dañados o destruidos propiciaron la instalación emergente y temporal de múltiples refugios para damnificados y demostraron lo poco preparado que estaban los municipios para emergencias de esta índole y magnitud. En particular, Guánica y Guayanilla reportaron los mayores impactos tanto en la cantidad como en la magnitud de sismos, sin embargo, varios pueblos cercanos también fueron afectados significativamente. A pesar de que en febrero de 2020 hubo una disminución de estos fenómenos, las fluctuaciones en ocurrencia y magnitud persistieron. La pandemia de COVID-19, al ser una emergencia de alcance global, eclipsó aquella de los sismos, dentro de muchas otras emergencias. En este trabajo se ofrecen datos y resúmenes estadísticos sobre tales eventos en un período comprendido desde la primera semana de diciembre de 2019 hasta la segunda semana de 2021 que pueden ser de utilidad para futuros investigadores en el área de ingeniería sísmica y ramas afines.

Palabras claves: actividad sísmica, infraestructura, refugios, Suroeste de Puerto Rico, terremotos

STATISTICAL EXPLORATION OF SEISMIC DATA IN PUERTO RICO FROM DECEMBER 2019 TO JANUARY 2021

ABSTRACT: In December 2019, Puerto Rico experienced an increment in seismic activity, especially in the South and Southwestern regions of the island. The hundreds of buildings and homes damaged or destroyed prompted the hasty installation of multiple shelters and showed the little preparedness of the municipalities of the island to face emergencies of this kind and magnitude. The municipalities of Guánica and Guayanilla reported the largest impacts in terms of number and magnitudes of earthquakes. Surrounding municipalities, however, were also importantly affected. Despite a decrease in seismic activity in February 2020, event occurrences and magnitudes continued to fluctuate. The COVID-19 pandemic, due to its global reach, eclipsed many other emergencies including that of the seismic activity in the island. This study provides data and statistical summaries on this activity from the first week of December 2019 until the second week of 2021 that may be useful for future researchers in the area of seismic engineering and related fields.

Keywords: seismic activities, infrastructure, refugees, southwest area of Puerto Rico, earthquakes

¹ Artículo recibido el 6 de febrero de 2022 y aceptado para publicación el 30 de abril de 2022.

² Miembro, *The Applied Optimization Group*, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez (UPRM), Mayagüez, Puerto Rico 00681-9041. Email: Shirley.huanca@upr.edu

³ Miembro, *The Applied Optimization Group* & Profesor e Investigador, Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Tecnológica de Bolívar, Calle del Bouquet Carr. 21 #25-92, Cartagena de Indias, Colombia. Email: Roberto.trespalacio@upr.edu

⁴ Estudiante, Departamento de Ingeniería Industrial & Miembro, *The Applied Optimization Group*, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez. Email: Zulma.acevedo3@upr.edu

⁵ Miembro, *The Applied Optimization Group*, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez. Email: Dalia.alizo@upr.edu

⁶ Estudiante Graduada, *Colorado State University* & Pasado Miembro, *The Applied Optimization Group*, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez. Email: Angelie.nieves1@upr.edu

⁷ Catedrática Auxiliar, Departamento de Biología & Co-directora, *The Applied Optimization Group*, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez. Email: Clara.Isaza@upr.edu

⁸ Catedrático, Departamento de Ingeniería Industrial; Programa Graduado de Bioingeniería & Co-director, *The Applied Optimization Group*, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez. Email: Mauricio.cabrera1@upr.edu

INTRODUCCIÓN

Puerto Rico, la menor de las Antillas Mayores del Caribe, experimentó un aumento en actividad sísmica en diciembre del año 2019. Desde esa fecha, los sismos de mayor impacto a la población ocurrieron en el área sur y suroeste del país. Un terremoto es un temblor rápido y repentino de la tierra provocado por el rompimiento y desplazamiento de roca en las placas tectónicas. Los terremotos ocurren a lo largo de grietas en la superficie de la tierra llamadas líneas de falla, y se pueden sentir en grandes áreas a pesar de que, por lo general, duran menos de un minuto (Bommer y Martínez-Pereira, 1999). Las ubicaciones directamente debajo y encima de la superficie de la tierra donde comienza el terremoto se denominan hipocentro y epicentro, respectivamente. Dos de las principales medidas que caracterizan a un sismo son la magnitud y la profundidad; la magnitud mide la cantidad aproximada de energía liberada por la tierra durante el sismo; y actualmente, la escala de magnitud de momento (denotada por M_w) es la escala estándar utilizada para dar información sobre terremotos. Ésta es una escala logarítmica y en ella el aumento de 1 unidad en la magnitud del terremoto representa un incremento de 10 veces en la amplitud medida, lo cual equivale a una liberación de energía 32 veces mayor (USGS, 2020).

Los terremotos han ocasionado un gran impacto negativo en la economía, desarrollo y demografía de los pueblos del sur de Puerto Rico. Muchas familias tuvieron que abandonar sus hogares para poder protegerse ya que gran parte de las viviendas fueron catalogadas como inestables o inseguras. El gobierno central en conjunto con los representantes locales adecuó una serie de refugios temporales con los cuales se dio albergue a aquellas familias cuyo riesgo del colapso de sus viviendas fuera muy probable.

En este trabajo, se hace una exploración estadística de los fenómenos sísmicos desde finales del 2019 a los inicios del 2021, buscando renovar la atención a su estudio. Es importante seguir enfatizando la prevención de pérdida de vidas humanas y, en ese aspecto, conocer más sobre el período descrito puede ser una herramienta útil para dar soporte a la creación de planes de emergencia efectivos y eficientes como lo señalan varias fuentes (DW, 2020). En efecto, durante los sismos se perdieron vidas, hogares, iglesias, colegios, bancos y el efecto psicológico en la población es todo menos desdeñable.

ANTECEDENTES

Este trabajo se centra en el análisis de los sismos ocurridos en Puerto Rico durante el periodo del 01-12-2019 a las 00:00:00 hasta el 15-01-2021 a las 23:59:59. Después de mediados del año 2019, más precisamente durante la última semana del mes de septiembre (23-09-2019 a las 11:23 p.m.), se presentó una secuencia sísmica que inició con un evento principal de magnitud 6.0 M_w en el Cañón de la Mona, y que produjo posteriormente una serie de sismos (RSPR, 2019; López et al., 2020). Una segunda secuencia sísmica se presentó a partir del 28-12-2019 a las 6:35 p.m. con un sismo de magnitud 4.7 M_w con epicentro a 11 km al sureste de Guánica el cual fue registrado sobre la falla Punto Montalva (NBBPMfz) y fue seguido de cuatro sismos ocurridos también en Guánica dentro de las 3 horas siguientes. Las magnitudes, horas y ubicaciones de cada uno de estos cuatro sismos son respectivamente: uno de 3.7 M_w a las 7:35 p.m. a 11 km al sur de Indios, uno de 3.5 M_w a las 8:34 p.m. a 14 km del sureste de Guánica, uno de 5.0 M_w a las 9:06 p.m. a 9 km al sur de Indios y uno de 4.70 M_w a las 9:21 p.m. a 11 km al sureste de María Antonia (Voces del Sur, 2019).

A diferencia de la secuencia sísmica que inició el 23-09-2019 en el Cañón de la Mona, esta última secuencia iniciada el 28-12-2019 sobre la falla Punto Montalva (NBBPMfz) se sintió fuertemente en todo Puerto Rico y afectó principalmente de manera importante a los pueblos de las zonas sur y suroeste de la isla con sismos recurrentes a partir de ese día. Se presentaron dos terremotos, uno de 5.80 M_w el 6 de enero de 2020 a las 6:32 a.m. a 9 km del sureste de Indios seguido por el evento más importante de la secuencia

sísmica que tuvo una magnitud de 6.4 Mw ocurrido en menos de 24 horas, exactamente a las 4:24 a.m. del 7 de enero de 2020; ambos se dieron sobre la falla Punto Montalva (NBBPMfz) y sorprendieron a gran parte de la población en sus hogares, el del día 7 de enero por la hora en que ocurrió y el del día 6 por ser uno de los días feriados más importantes de la isla, el Día de Reyes.

Debido a la recurrencia de los sismos, pero sobre todo a la magnitud de estos dos terremotos, se decidió analizar desde la secuencia sísmica del 28 de diciembre de 2019 hasta el 15 de enero de 2021. Es importante mencionar que en el año 2019 ocurrieron en total 6509 sismos, equivalente a 1.8 veces el promedio anual de sismos (3,542) registrados en Puerto Rico desde el 2014; sin embargo, esa cifra representa aproximadamente la mitad de los sismos ocurridos en el 2020 que cerró con una cifra de 3.5 veces ese promedio (12,489 sismos).

EXPLORACIÓN ESTADÍSTICA

El estudio de actividad sísmica en el periodo de estudio se basó en 69,570 datos recopilados (USGS, 2020) y 41,742 cantidades estadísticas calculadas a partir de ellos. Se presentan entonces tablas y gráficas que comprenden 13,914 sismos (3,687 ocurridos en tierra y 10,227 en el océano).

La Figura 1 muestra los pueblos de Puerto Rico donde se evidenció la mayor cantidad de sismos. El área que se analizó es de un radio de 60 km a partir del centroide de los eventos, un área que cubre al menos el 99% de los sismos alrededor de Puerto Rico y que ocurrieron en el periodo de estudio. Además, en la Figura 1 se observa la gran proporción de sismos en los dos grupos de magnitud mayor o igual que 2.08 Mw y menor que 4.24 Mw (identificados con color verde y amarillo respectivamente) frente a los otros rangos, como los 71 sismos con magnitud mayor o igual que 4.24 Mw (colores naranja y rojo) que representan el 0.51% del total, los más significativos a pesar de su porcentaje pequeño. En el mapa también se puede observar que el 100% de los sismos con magnitud mayor a 5.32 Mw (color rojo) ocurrió en el área suroeste de Puerto Rico, ya sea en tierra o en el mar, y todos ocurrieron en un radio aproximadamente de 25 km del centro de masa. Más adelante veremos que la Tabla 1 retoma información de la Figura 1 y añade un análisis de magnitudes.

Entre los resultados que se obtuvieron al analizar la base de datos “Earthquake” de USGS, a partir de la información de latitud y longitud se rescató información sobre las localizaciones de los epicentros de cada sismo en el período de estudio, encontrando así un total de 144 localizaciones. La cantidad de incidencias según la localización fue muy variada y más adelante se muestran detalles de las 37 localizaciones más destacadas según ese número; sin embargo, a partir de la Figura 2, es importante mencionar que las primeras 9 localizaciones que lideran esta jerarquía de epicentros en tierra (3, 687) fueron: Montalva (Guánica), Boca (Guayanilla), Barinas (Yauco), Carenero (Guánica), Costa (Lajas), Tallaboa Poniente (Peñuelas), Indios, Cedro y Magas (en Guayanilla los tres). Estas 9 localizaciones muestran frecuencias superiores a 125 sismos y en conjunto con las del océano acumulan 13,140 sismos (aprox. 94.44% del total).

Por otro lado, a partir de la localización es importante reconocer y presentar resúmenes de datos y gráficos según el pueblo al que pertenecían; el diagrama de barras de frecuencia de sismos por pueblo y localización de la Figura 2 es uno de ellos. Esta Figura nos permite detectar también entre todas las localizaciones epicentro aquellos pueblos que sobresalen tanto por la cantidad de sismos como por su magnitud. En este sentido, se destacan 6 pueblos con el mayor número de sismos significativos, siendo Guánica y Guayanilla los pueblos con mayor cantidad de sismos ocurridos en tierra con: 1,284 y 1,203 respectivamente (67.5% del total), seguidos por Yauco, Lajas, Peñuelas y finalmente Cabo Rojo (ver Figura 2). Es importante resaltar que del total de pueblos no considerados en la Figura 2 destacó Ponce,

cuya cantidad de sismos es similar a la de Cabo Rojo; y que a su vez fue el epicentro de un sismo de 4.4 Mw, una magnitud resaltante. Ponce muestra también un promedio de magnitud de sismos superior a 2.5 Mw durante el periodo considerado. El valor de la magnitud para los 13,914 registros de sismos muestra un comportamiento relativamente variable y sesgado a la derecha, con una mediana de 2.54 Mw y muchos valores fuera de rango.

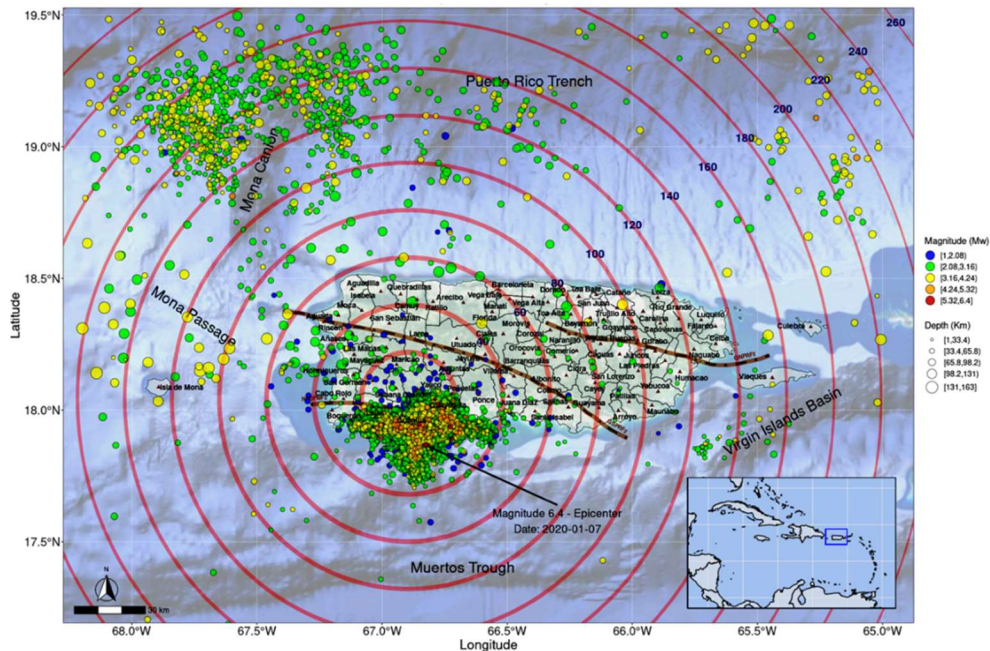


Figura 1: Actividad sísmica en Puerto Rico (01-12-2019 a 15-01-2021) por magnitud y profundidad. Cada sismo está representado por un círculo; el color define la magnitud en escala ascendente: azul, verde, amarillo, naranja y rojo. El tamaño del círculo, define la profundidad del sismo, también en escala ascendente, es decir; a mayor profundidad, mayor tamaño.

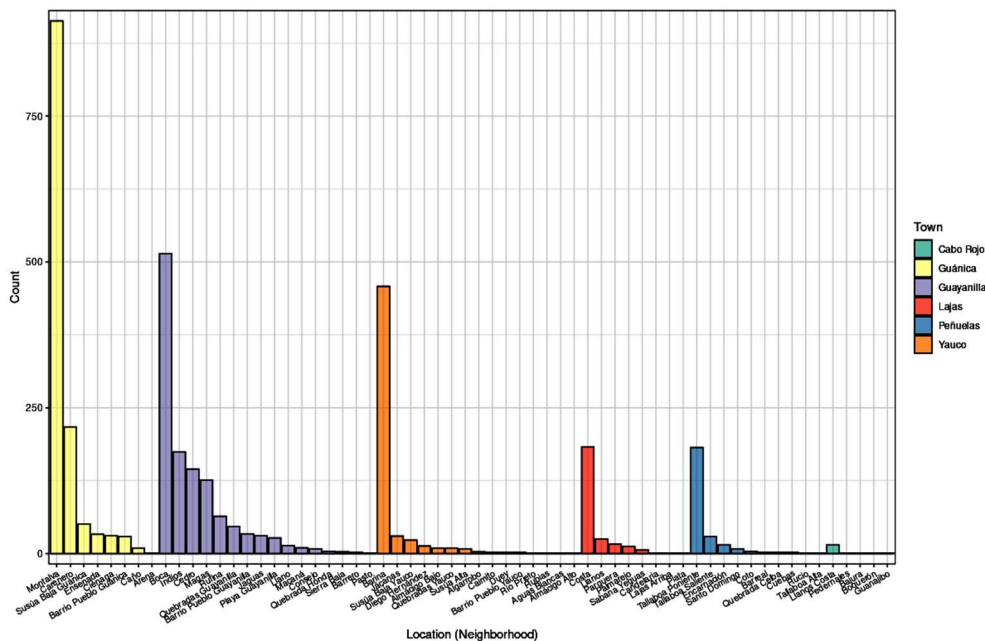


Figura 2: Localización de la mayor frecuencia de sismos por pueblo.

Tabla 1: Número de sismos de magnitud mayor a 4 Mw por lugar o pueblo y localización.

LUGAR O PUEBLO	LOCALIZACIÓN	MAGNITUD (MW)			TOTAL
		4.0 - 4.42	4.5 - 4.9	5.0 - 6.4	
Océano; 78%	Océano	66	25	13	104
Guayanilla; 7.5%	Magas	0	0	1	1
	Indios	1	0	1	2
	Boca	3	2	0	5
	Cedro	1	0	0	1
	Playa Guayanilla	1	0	0	1
Guánica; 10%	Carenero	0	1	0	1
	Montalva	8	4	0	12
	Ensenada	1	0	0	1
Ponce; 1%	Canas	1	0	0	1
Peñuelas; 1.5%	Tallaboa Saliente	1	0	0	1
	Tallaboa Poniente	1	0	0	1
Yauco; 2%	Barinas	3	0	0	3
TOTAL		87	32	15	134

Del número total de sismos, se observó que 134 tuvieron una magnitud igual o mayor a 4.0 Mw, 87 de los cuales presentaron magnitudes entre 4.0 y 4.4 Mw, 32 entre 4.5 Mw y 4.9 Mw; y 15 mayores o iguales a 5.0 Mw (Tabla 1).

La Tabla 1 muestra el resumen del número de sismos con magnitud mayor o igual a 4Mw por lugar o pueblo y localización, en ella podemos observar que 104 de los 134 sismos (78%) de gran magnitud tuvieron como epicentro el mar, 13 de los cuales tuvieron una magnitud mayor que 5.00 Mw. Analizando los epicentros de los sismos ocurridos en tierra, Guánica y Guayanilla fueron pueblos epicentro del 17.5% del total de sismos (ver Tabla 1). De ellos dos, se resume que Guánica fue el pueblo de Puerto Rico con mayor cantidad de sismos en tierra (10%), 12 de los cuales tuvieron como epicentro al sector Montalva; luego sigue el pueblo de Guayanilla con 7.5% del total de sismos fuertes, 2 de los cuales fueron de magnitud mayor o igual que 5.00 Mw con epicentros en Indios y Magas. Les siguen en ese orden: Yauco, Peñuelas y Ponce que representan juntos casi el 4.5% restante. Estos cinco pueblos coinciden con el mayor número de sismos registrados en todo Puerto Rico de la Figura 2; sin embargo, Guayanilla destaca más entre ellos por los dos sismos de magnitud mayor o igual a 5.0 Mw.

Por otro lado, respecto a las localizaciones es importante mencionar que Montalva, Boca y Barinas prevalecen como las localizaciones del número de sismos de magnitud mayor que 4.0 Mw (20 de los 134); Indios y Magas por su parte se destacan por haber sido epicentros cada uno de un sismo de magnitud superior a 5.0 Mw y un máximo de 6.4 Mw (Tabla 1). Al analizar la profundidad global del total de los sismos estudiados, se obtiene que aproximadamente 3,479 (el 25% del total) tuvieron una profundidad de 7 km o más; el 50% de los sismos tuvieron una profundidad igual o mayor a 11.52 km.

La magnitud y profundidad para los sismos dentro de los 6 pueblos (y sus respectivas localizaciones) con mayor incidencia, y relevantes entre todos los sismos registrados en el periodo analizado se muestran en las Figuras 3 y 4. Ambas figuras muestran valores descriptivos de la distribución de los datos por sector que son comparativos y permiten identificar gráficamente valores fuera de rango de magnitud y profundidad por epicentro (la Figura 3 por pueblos mientras que la Figura 4 lo hace para las principales localizaciones dentro de cada pueblo). En este entender, respecto a las variables magnitud y profundidad comparadas entre los 6 pueblos con mayor incidencia de sismos (ver Figura 3), se observó que con excepción de Cabo Rojo, todos presentan sismos con mediana de magnitud entre 2.38 Mw y 2.54 Mw; Guayanilla y Guánica tienen muchos valores fuera de rango (sismos de magnitud igual o mayor que 3.5 Mw), Peñuelas tuvo una mediana de magnitud de sismos mayor que las demás, y Cabo Rojo fue el de menor de entre los 6 (tal como se observó en la Figura 2), seguido por Yauco que fue epicentro de tres sismos de mayor magnitud (uno de 4.17 Mw y dos de 4.20 Mw). La Figura 3 resalta también la proporción de sismos con magnitudes mayores que 4.00 Mw de los tres pueblos más destacados (Tabla 1).

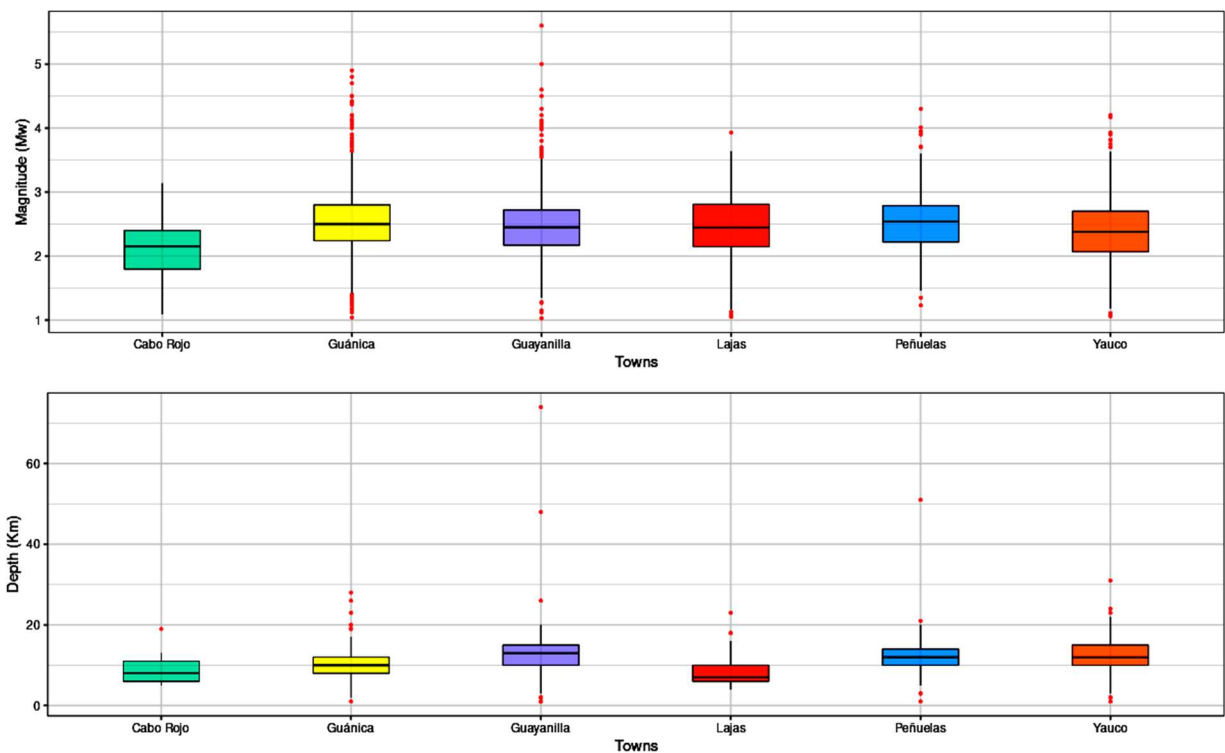
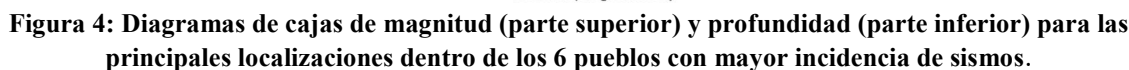


Figura 3: Diagrama de cajas de magnitud (parte superior) y profundidad (parte inferior) para los 6 pueblos con mayor incidencia de sismos.

En la distribución de profundidad de los sismos ocurridos comparados por pueblos se observa que los valores en los 6 pueblos oscilan entre 7 km y 13 km, de ellos tanto Cabo Rojo como Lajas describen los

Al ser analizadas estas dos variables respecto a la localización epicentro de los sismos mostrados en la Figura 4, las diferencias son más marcadas entre las localizaciones pertenecientes a los 6 pueblos. Se observa menos similitud en su distribución y mayor variabilidad en los valores tanto de magnitud como de profundidad; un ejemplo de esto es que el sector epicentro predominante del pueblo de Guánica fue Montalva; sin embargo, la magnitud mediana de esta localización fue $Me=2.52M_w$, menor frente a otro sector como Barrio Pueblo Guánica cuya mediana fue de $Me=2.6M_w$.

Por otro lado, en lo que respecta a la profundidad por localización (parte inferior de la Figura 4), se ve que Coto en Peñuelas, Caño en Guánica, Macano en Guayanilla y Susua Alta en Yauco presentan mayor variabilidad en cuanto a la profundidad de los sismos ocurridos.



Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol.22 (1)

Puerto Rico, Gran Falla del Sur de Puerto Rico (GSPRFz), depresiones de Islas Vírgenes y Anegada, Pasaje de la Mona, Trinchera de Los Muertos y Gran Falla del Norte de Puerto Rico (GNPRFz).

Del número de sismos más fuertes y por tanto más relevantes del estudio clasificados por región sísmica (Tabla 2), se observa que el 88% del total tuvo como epicentro a la Falla Punto Montalva (NBBPMfz) y 7.5% al Cañón de la Mona con 10 sismos de magnitud de entre 4.0 Mw y 4.9 Mw.

Las otras dos regiones sísmicas que forman parte del conjunto de sismos significativos son: la Gran Trinchera del Norte y la Gran Falla del Sur de Puerto Rico (GSPRFz).

Tabla 2: Número de sismos de magnitud mayor a 4Mw por región sísmica y epicentro.

FALLA SÍSMICA	LUGAR	MAGNITUD (MW)			TOTAL
		4.0 - 4.42	4.5 - 4.9	5.0 - 6.4	
Punto Montalva (NBBPMfz); 88%	Océano 77%	57	21	13	91
	Tierra 23%	18	7	2	27
Cañón de la Mona; 7.5%	Océano 100%	9	1	0	10
	Tierra 0%	0	0	0	0
Gran Trinchera del Norte; 3.7%	Océano 100%	2	3	0	5
	Tierra 0%	0	0	0	0
Gran Falla del Sur de Puerto Rico (GSPRFz); 0.75%	Océano 100%	1	0	0	1
	Tierra 0%	0	0	0	0
TOTAL		87	32	15	134

Al analizar la Figura 5 que incluye los diagramas de caja comparativos de magnitud y profundidad para las Fallas: Punto Montalva (NBBPMFz), región sísmica del 91% de los sismos estudiados y Cañón de la Mona. Aunque esta última sólo representa cerca al 4% del total de sismos, supera tanto en la mediana de magnitud como de profundidad a la primera; además de ser la región sísmica principal epicentro de los pueblos de Aguadilla y Rincón, ambos con sismos de magnitud promedio de 2.87 Mw y valores máximos de magnitud de 4.10 Mw (Aguadilla) y 3.10 Mw (Rincón).

En general, evaluando estas dos regiones se puede ver una distribución similar respecto a la simetría y dispersión de los valores de magnitud para ambas fallas; sin embargo, la magnitud de los sismos debidos a la falla Cañón de la Mona muestra valores más altos con una mediana de $Me=3.05$ Mw. Mientras que en la falla Punto Montalva (NBBPMfz) la mediana es de $Me=2.49$ Mw; esto lo que significa es que aproximadamente el 50% de los sismos de la Falla Cañón de la Mona fueron mayores o iguales que 3.05 Mw mientras que en la falla Punto Montalva (NBBPMfz) aproximadamente el 25% de los sismos fueron mayores o iguales que 2.8 Mw (tercer cuartil de $Q3=2.8$ Mw aprox.); esto hace también determinante a la Falla Cañón de la Mona en la distribución de magnitud de los sismos analizados.

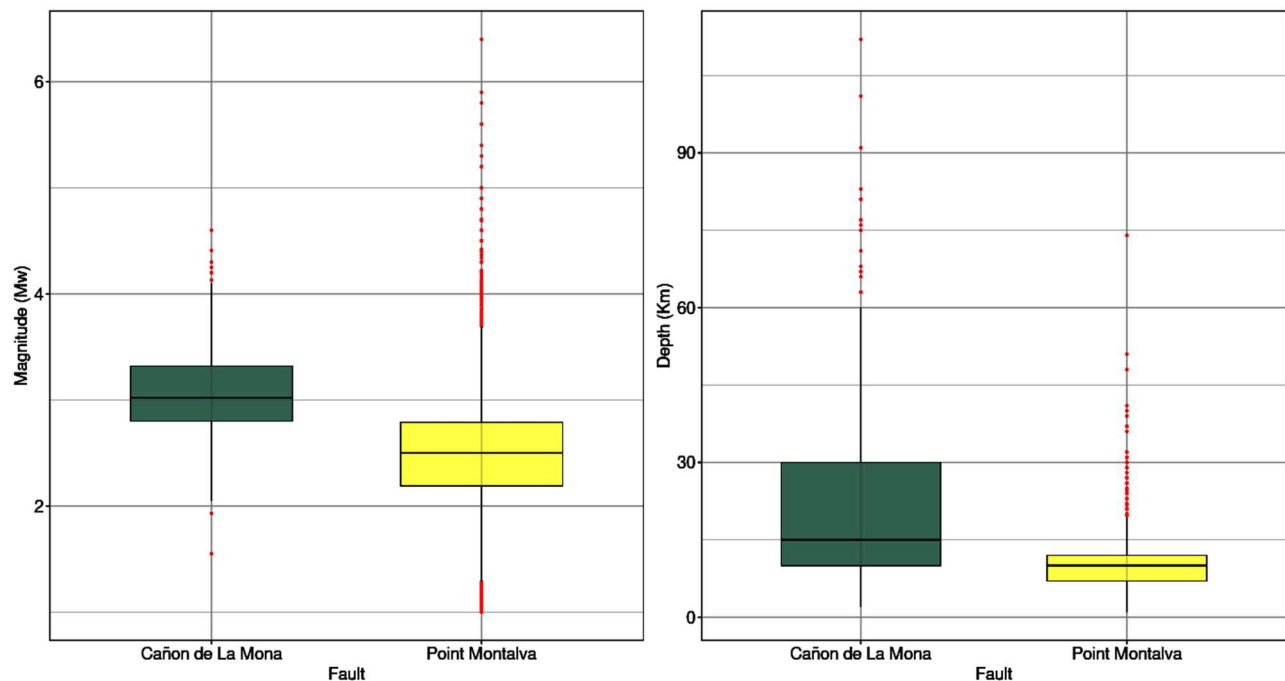


Figura 5: Actividad sísmica comparativa en magnitud (izquierda) y profundidad (derecha) para la Fallas: Punto Montalva (NBBPMfz) y Cañón de la Mona.

Por otro lado, se puede observar que, pese a que sólo el 4% del total de sismos se presentó en el Cañón de la Mona, esta falla fue epicentro de seis sismos de magnitudes mayores o iguales que 4.2 Mw y el 75% de los sismos de los cuales fue epicentro, tuvieron magnitudes mayores o iguales que 2.8 Mw. Respecto a la Falla Punto Montalva (NBBPMfz), es la región epicentro de 118 de los 134 sismos más fuertes, con magnitudes mayores o iguales que 4.0 Mw (aprox. 88%).

Según el estudio de la profundidad para estas principales Fallas (parte derecha de la Figura 5), se observó que los sismos de la Falla Punto Montalva (NBBPMfz) tuvieron una profundidad media de poco menos de 10 km, mientras que los sismos ocurridos en el Cañón de la Mona son sesgados a la derecha y con mayor dispersión (*Media* = 21.97 km).

En la Figura 6, se muestra la distribución mensual de la cantidad de sismos ocurridos durante el periodo de estudio y podemos resaltar la gran diferencia observada de la cantidad de sismos ocurridos en enero de 2020 respecto a los demás meses de ese año y la primera quincena del 2021; esos más de 4500 sismos del mes de enero de 2020, se redujeron en tres cuartas partes durante el mes de febrero y fueron disminuyendo paulatinamente hasta antes de julio de ese año en que volvieron a aumentar para luego continuar decreciendo con excepción de los meses de noviembre y diciembre en que aumentaron ligeramente, para finalmente disminuir drásticamente en enero de 2021.

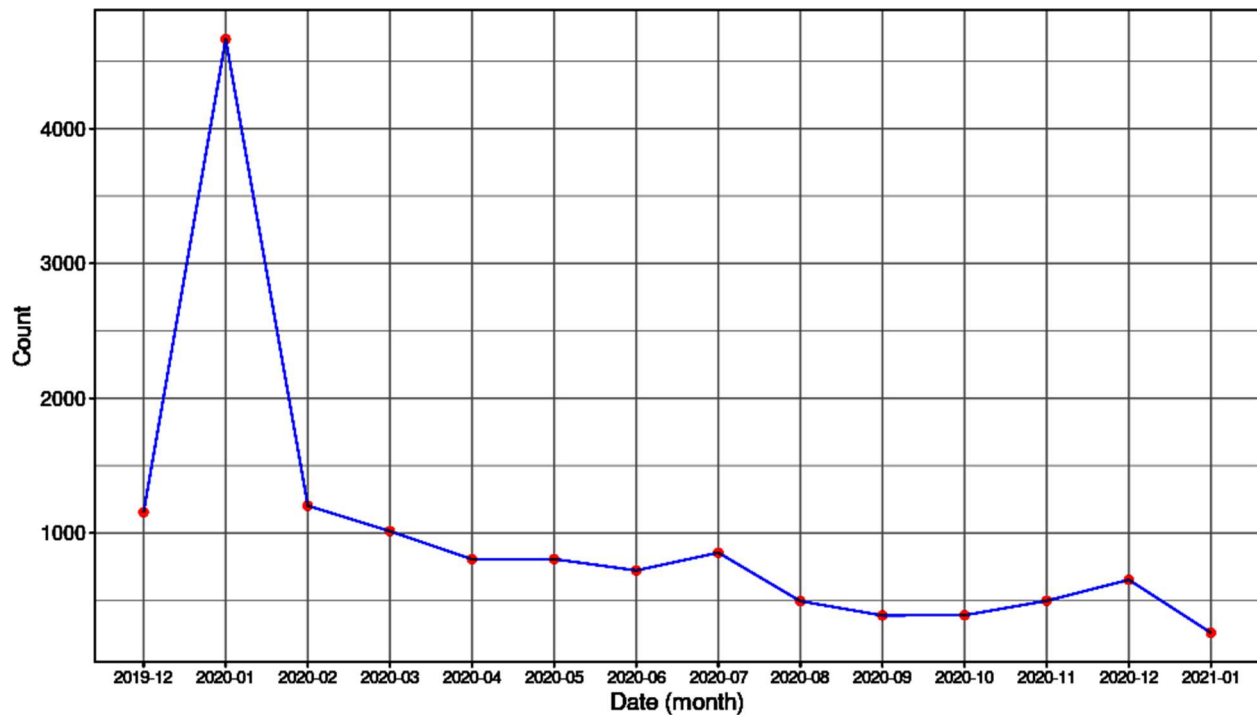


Figura 6: Serie de tiempo del número de sismos en Puerto Rico (01-12-2019 a 15-01-2021).

La distribución del conteo de sismos por área se muestra en la Figura 7, en ella podemos notar que aproximadamente el 91% de los sismos se presentan en una región circular cuyo centro es el centro de masa de todos los sismos que ocurrieron durante el periodo de estudio; a esta región la denominamos *región I*. El área de la *región I* es de 5 026 km². Por otro lado, el área completa que abarca nuestro análisis es la región rectangular cuyas coordenadas son: latitud 17.2° S, 19.5° N y longitud 68.2° W, 65° E; esta región tiene un área de 76 748.9 km² (ver Figura 1). A la región que está fuera de la *región I* pero dentro de la región completa de estudio, se le llamó *región II*. Cabe recalcar que las regiones *I* y *II* son muy diferentes no sólo en tamaño, sino que presentan algunas características importantes desde el punto de vista del análisis sismográfico.

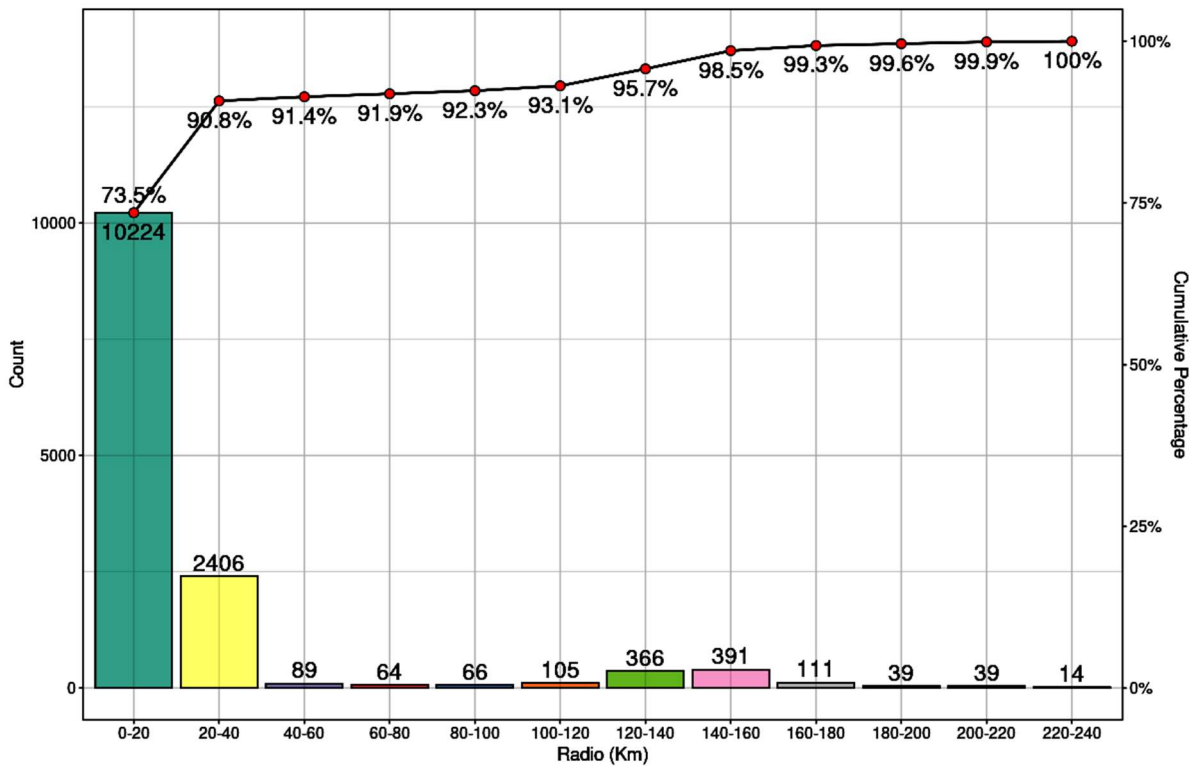


Figura 7: Conteo Acumulado de Sismos respecto a un radio en km (centrados en Punto Montalva).

Se observó por ejemplo que la energía sísmica media por semana durante el periodo del 01-12-2019 hasta el 15-01-2021 para la *región circular I* fue de 368.7 MJ; mientras que, para el mismo periodo, la energía sísmica media por semana de la *región II* fue de 3288.7 MJ. Por lo tanto, el promedio para la *región I* es $0.073 \frac{\text{MJ}}{\text{km}^2}$ y $0.043 \frac{\text{MJ}}{\text{km}^2}$ para la *región II*; es decir que, la *región I* mostró 1.7 veces más propensión a la actividad sísmica que la *región II*; a pesar de que la *región I* es 15 veces más pequeña que la *región II*.

Considerando estas relaciones se puede determinar que, un terremoto de magnitud igual a 8.0 Mw libera energía equivalente a 10^{11} MJ; como ejemplo de esto tenemos que, la energía liberada por una explosión nuclear de 10 kilotones es de 10^6 MJ y equivale a un terremoto de magnitud igual a 5.5 Mw.

Con el análisis anterior, se puede observar que la *región I*, que comprende la parte suroeste de la isla de Puerto Rico, mantuvo una importante actividad sísmica durante el año 2020. Por otro lado, de acuerdo al comportamiento de las series de tiempo de la Figura 8, Figura 9 y Figura 10, existen indicios fuertes para estimar que la actividad sísmica fue también significativa durante el resto del 2021.

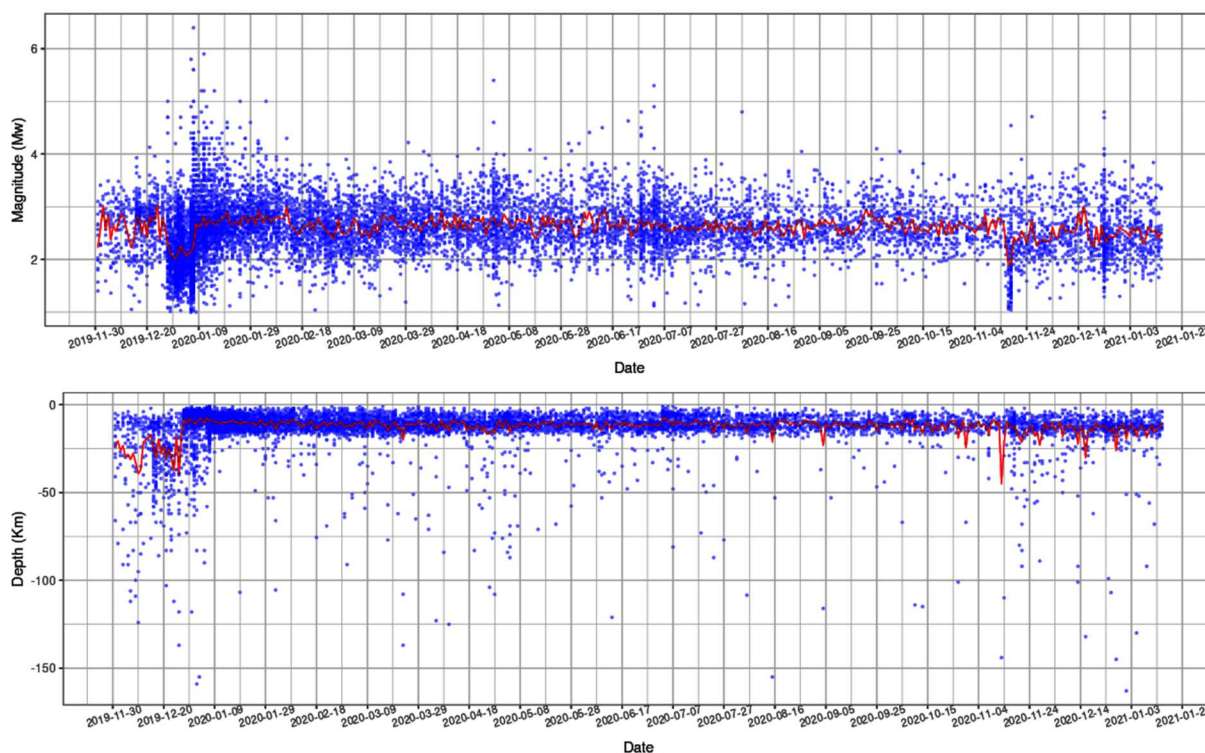


Figura 8: Serie de tiempo de la actividad sísmica en la Falla Punto Montalva (NBBPMfz) por magnitud y profundidad (01-12-2019 a 15-01-2021).

La Figura 8, además de resaltar los sismos más significativos que fueron sentidos en Puerto Rico, muestra a su vez la variación de la magnitud y profundidad de estos a través del tiempo. Esta figura presenta la serie de tiempo de la magnitud y profundidad de los sismos ocurridos sobre la Falla Punto Montalva (NBBPMfz); y respecto a ambas variables podemos distinguir un cambio importante y significativo desde el 28-12-2019 al 20-01-2020, en donde se nota un fuerte aumento en la cantidad de sismos registrados. No obstante, la magnitud promedio de estos sismos no es muy elevada hasta los días 6 y 7 de enero de 2020 que fueron las fechas en las cuales ocurrieron los dos eventos más destacados del período bajo estudio, un sismo de 5.80 Mw a las 6:32 a.m. hora local el día 06-01-2020 y el terremoto de 6.4 Mw del 07-01-2020 con una duración de 37 segundos y que es el tercer terremoto más fuerte de la historia de Puerto Rico. Ambos sismos ocurrieron en la falla de Punto Montalva (NBBPMfz) y fueron secundados días después por un tercer sismo de magnitud mayor que 5 Mw ocurrido en la mañana del sábado 15-01-2020. Estas tres fechas forman parte de este primer intervalo de tiempo de cambio significativo en esta serie de tiempo. Por otro lado, en la parte inferior de la Figura 8, también vemos que surgió un aumento en el promedio de la profundidad de los sismos a partir del 01-12-2019 hasta el 08-01-2020.

Se puede destacar que el aumento del promedio en la profundidad de los sismos coincide con el aumento de la cantidad y la magnitud de ellos; un ejemplo de esto es que dentro del primer periodo de cambio desde fines de diciembre hasta unos días después del terremoto del 07-01-2020 se reportaron los sismos con mayor profundidad de ese periodo; siendo los tres más profundos mayores a 25 km; dos de ellos ocurrieron en los días 29-12-2019 y uno el 02-01-2020. Posteriormente a este primer periodo, las series de la magnitud y de la profundidad de los sismos se estabilizaron para nuevamente mostrar un aumento en la magnitud el día 02-05-2020 con un sismo de 5.4 Mw como su punto máximo. Más adelante, hubo un nuevo incremento del promedio de los sismos alrededor del 03-07-2020 a las 4:49 p.m., con un sismo de magnitud 5.30 Mw también en la falla de Punto Montalva (NBBPMfz). Finalmente, tenemos un incremento del promedio en las vecindades de la fecha del día 27-12-2020. Existe un punto de cambio en la serie de la magnitud del total de sismos estudiados ocurridos en Puerto Rico los cuales son presentados en la Figura 9; este punto se da el día 07-01-2020 a las 3:29 a.m. en donde se registra un sismo de 2.48 Mw, con una profundidad de 3 Km ocurrido en la región de la falla Punto Montalva (NBBPMfz).

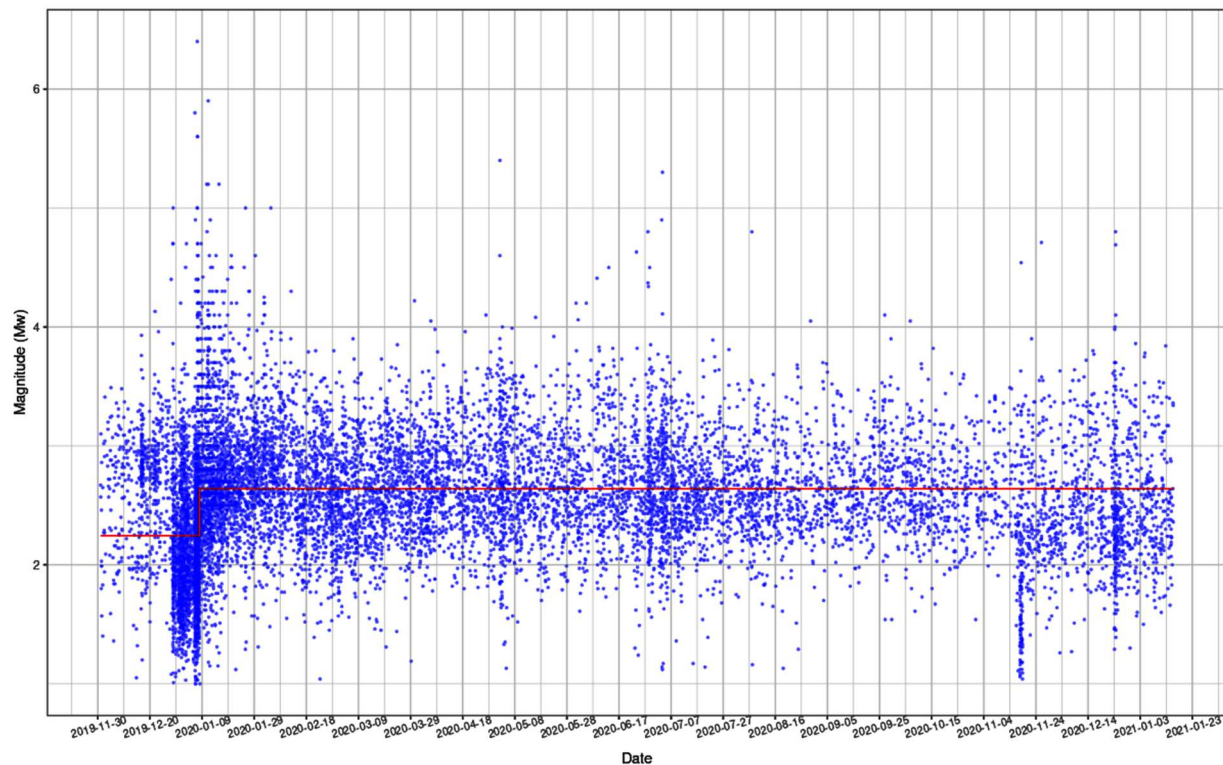


Figura 9: Detección del punto de cambio en la serie de tiempo de la actividad sísmica en Puerto Rico según magnitud (01-12-2019 a 15-01-2021). Se usó el algoritmo PLT del paquete zoo de R para detectar el punto de cambio.

Esta ruptura es la antesala del aumento en la magnitud promedio de los sismos en la serie que fue de 2.25 Mw; y posteriormente aumenta a 2.64 Mw para mantenerse estable en lo sucesivo hasta el día 07-11-2020, fecha en la que hay un descenso del promedio de la magnitud de los sismos que fue de 1.91 Mw (ver Figura 9). Esta disminución se dio por sólo tres días: entre el 16-11-2020 y 18-11-2020; luego regresó a un promedio de 2.43 Mw, el cual es sólo ligeramente inferior a la inicial.

Un comportamiento similar ocurrió con el promedio en la profundidad de sismos, que era de 27.3 km antes del punto de ruptura y que pasó a ser 10.88 km posteriormente (Figura 10).

Ahora, también se puede determinar que durante los tres días en los que el promedio de la magnitud cayó, también la profundidad tuvo un cambio considerable siendo este valor de 12.32 km sobre la superficie.

De la Figura 10, es relevante resaltar que posterior al punto de cambio, con una diferencia de tan sólo 55 minutos, se presenta el evento más importante de nuestro periodo de estudio, el cual fue el terremoto de 6.4 Mw y el cual tuvo una profundidad de 8.95 km (ver Figura 10).

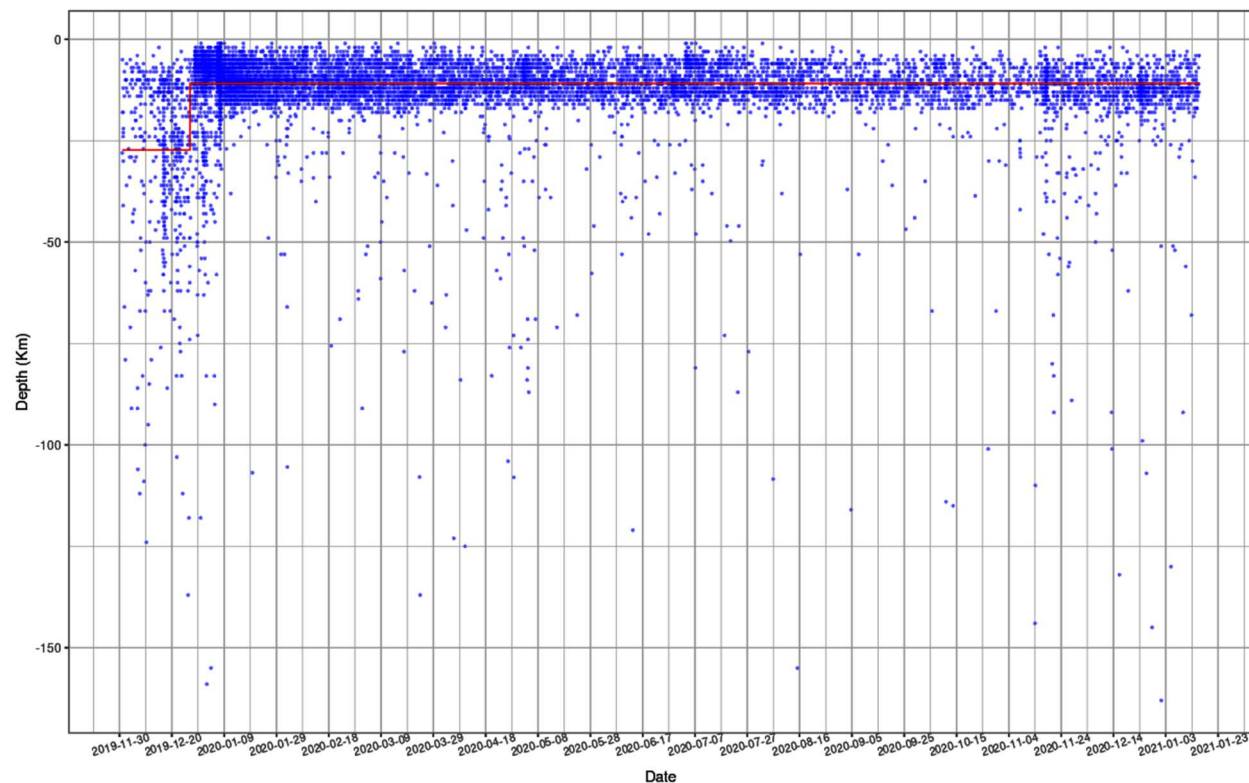


Figura 10: Detección del punto de cambio en la serie de tiempo de la actividad sísmica en Puerto Rico según profundidad (01-12-2019 a 15-01-2021). Se usó el algoritmo PLT del paquete zoo de R para detectar el punto de cambio.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados de análisis de los datos sísmicos ocurridos en Puerto Rico entre el 01-12-2019 y el 15-01-2021 estudiados en la presente investigación, destacamos las siguientes conclusiones.

Con respecto al número de sismos ocurridos por mes, sobresale el mes de enero de 2020 con más de 4500 sismos, y entre los cuales están dos de los sismos más fuertes (5.8Mw y 6.4Mw) que históricamente hayan afectado a Puerto Rico. Por otro lado, de los 3687 sismos ocurridos en tierra, Guánica y Guayanilla fueron los pueblos con mayor registro, acumulando juntos 2487 de ellos (67.5%). Respecto a las fallas, se observó que el 88% del total de sismos con magnitud mayor a 4.00 Mw tuvo como epicentro a la Falla Punto Montalva. Finalmente, las dos conclusiones más importantes fueron: determinar que el aumento del promedio en la profundidad de los sismos registrados coincide con el aumento de la cantidad y la magnitud de ellos; y encontrar que la *región I* que comprende la parte suroeste de la isla de Puerto Rico pese a ser 15 veces más pequeña que la *región II*; mostró ser 1.7 veces más propensa a la actividad sísmica.

Estos datos deben conllevar al gobierno puertorriqueño a tomar medidas de protección que consideren el bienestar físico y mental de la población. Deben adaptarse los planes de acción para que haya un manejo más eficiente de cara a eventuales movimientos sísmicos en Puerto Rico. Los planes de acción no deben limitarse sólo a la seguridad física que incluye infraestructura, servicios de emergencia, distribución de agua, alimentos y medicamentos, sino también protocolos y servicios para que la población sufra lo menos posibles efectos psicológicos adversos. Las medidas preventivas deben aplicarse a todo Puerto Rico y se debería comenzar en la región suroeste por ser altamente vulnerable.

REFERENCIAS

- Bommer J. J & Martínez-Pereira A. (1999). “The effective duration of earthquake strong motion”, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 3 No.2, pp. 127-172.
- Red sísmica de Puerto Rico, Universidad de Puerto Rico “RSPR”. (2019). Recinto de Mayagüez, Departamento de Geología, “Informe de la actividad sísmica en la región de Puerto Rico e Islas Vírgenes durante el mes de diciembre de 2019” <https://redsismica.uprm.edu/spanish/sismicidad/reportes/2019/boleDiciembre2019.pdf>
- López, A.M., Hughes, K.S., & Vanacore, E. (2020). “Puerto Rico’s Winter 2019-2020 Seismic Sequence Leaves the Island on Edge”, *Temblor*, <http://doi.org/10.32858/temblor.064>.
- USGS. (2020). United States Geological Survey – Latest Earthquakes. Disponible en: <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/earthquakes>.
- Voces del Sur. (2019). <https://www.vocesdelsurpr.com/2019/12/temblor-ampliamente-sentido-en-puerto-rico/>.
- DW. (2020). <https://www.dw.com/es/puerto-rico-carece-de-un-plan-de-acción-ante-terremotos-aseguran-expertos/a-52064237>.

RESEÑA DE AUTORES



S. Huanca-Ochoa

*C*andidata doctoral del Programa Graduado de Bioingeniería en la Universidad de Puerto Rico – Mayagüez (UPRM). Obtuvo el Bachillerato en Matemática mención Estadística en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú y la Maestría en Ciencias en Matemática Estadística en la UPRM. Miembro de “The Applied Optimization Group” del Departamento de Ingeniería Industrial de la UPRM. Las líneas de investigación incluyen el análisis de datos biológicos, el modelamiento y optimización de sistemas biológicos.



R. Trespalacios-Alies

*P*rofesor e investigador del Departamento de Ciencias Básicas de la Universidad Tecnológica de Bolívar, Colombia. Egresado de la Universidad de Cartagena, Colombia donde obtuvo su Bachillerato en Matemáticas y la Maestría en Ciencias en Matemática Estadística en la Universidad de Puerto Rico – Mayagüez (UPRM) con planes de reanudar sus estudios doctorales en UPRM. Miembro de “The Applied Optimization Group” del Departamento de Ingeniería Industrial de la UPRM. Las líneas de investigación incluyen estadística computacional, análisis funcional, y minería de datos.



Z. Acevedo-Figueroa

*E*studiante del Bachillerato de Ingeniería Industrial (ININ) en la Universidad de Puerto Rico – Mayagüez (UPRM). Miembro de “The Applied Optimization Group” del Departamento de Ingeniería Industrial de la UPRM. Las líneas de investigación incluyen la manufactura esbelta, el mejoramiento continuo y el análisis estadístico de datos.

RESEÑA DE AUTORES (CONT.)



D. Alizo-Alique

Egresada de la Universidad de Puerto Rico – Mayagüez (UPRM) donde obtuvo su bachillerato en Ingeniería Industrial en 2021. Miembro de “The Applied Optimization Group” del Departamento de Ingeniería Industrial de la UPRM. Las líneas de investigación incluyen la manufactura, la mejora continua de negocios y el emprendimiento empresarial.



A. Nieves-Jiménez

Estudiante egresada en *Colorado State University* y su enfoque es en Meteorología Tropical. Terminó sus estudios de Bachillerato en Ingeniería Industrial en la Universidad de Puerto Rico – Mayagüez (UPRM) y participará de la graduación de Junio 2022. Fue miembro de “The Applied Optimization Group” del Departamento de Ingeniería Industrial de la UPRM durante sus años subgraduados y el enfoque de sus investigaciones fue combinando Ingeniería Industrial y Ciencias Atmosféricas. Las líneas de investigación incluyen el anejo de emergencias, planificación de desastres y huracanes.



C. Isaza

Catedrática Auxiliar en el Departamento de Biología de la Universidad de Puerto Rico – Mayagüez (UPRM). Egresada de la Universidad de los Andes, Colombia donde obtuvo el Bachillerato en Física y egresada de *The Ohio State University* donde obtuvo el Doctorado en Biofísica. Realizó el Postdoctorado en *Ponce Health Sciences University*, después del cual fungió como Catedrática Auxiliar del Programa de Salud Pública y del Departamento de Ciencias Básicas en la misma universidad. Fue Profesora Investigadora en la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León, México del 2005 al 2008. Es actualmente Codirectora de “The Applied Optimization Group” del Departamento de Ingeniería Industrial de la UPRM. Las líneas de investigación incluyen el análisis de datos biológicos, la biofísica, la salud pública y el estudio de condiciones neurodegenerativas y su posible relación con infecciones virales.



M. Cabrera-Ríos

Catedrático en el Departamento de Ingeniería Industrial y en el Programa Graduado de Bioingeniería en la Universidad de Puerto Rico – Mayagüez (UPRM). Obtuvo la Maestría en Ciencias y el Doctorado en Ingeniería Industrial y de Sistemas en *The Ohio State University* (OSU); su Bachillerato fue en la misma disciplina en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) en México y realizó el postdoctorado en OSU. Fue Profesor Investigador en el Programa de Posgrado en Ingeniería de Sistemas de la Universidad Autónoma de Nuevo León, México del 2003 al 2008. Es actualmente Codirector de “The Applied Optimization Group”. Sus intereses incluyen la caracterización, la modelación y la optimización multicriterio de sistemas de manufactura, biológicos y decisionales.