

## **Efecto de sitio en las estaciones acelerográficas de la ciudad Santiago de Cuba utilizando movimientos fuertes**

### **Site effect at the accelerograph units from Santiago de Cuba city by using strong movements**

Sandra Rosabal-Domínguez<sup>1\*</sup>, Zulima Rivera-Álvarez, Madelín Villalón-Semanat

<sup>1</sup>Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Santiago de Cuba.

\*Autor para la correspondencia: [sandra@cenais.cu](mailto:sandra@cenais.cu)

---

#### **Resumen**

Se realizó por primera vez en Cuba un análisis del efecto de sitio en las estaciones acelerográficas de la ciudad de Santiago de Cuba, empleando registros acelerográficos de movimientos fuertes correspondientes al terremoto de Haití del 14 de agosto de 2021 con magnitud de 7.2. Se empleó la descripción litológica en superficie y en profundidad. Se utilizó el método de la interpretación directa de la transformada de Fourier. Como resultados principales se obtuvo que la estación APTO ubicada sobre suelo blando muestra los mayores valores de amplitud (APTO 69.625), así como los mayores valores de periodo (0.430 s) ubicada sobre los depósitos marinos, arenas y guijarros de playa y bancos de tormenta, en comparación con la estación ABON (0.195 s). El máximo valor de frecuencia (5.139hz) corresponde a la estación ABON.

**Palabras clave:** movimientos fuertes; efectos de sitio; estaciones acelerográficas; Santiago de Cuba.

#### **Abstract**

An analysis of the site effect at accelerograph units from Santiago de Cuba is carried out for the first time in Cuba; using accelerograph records of strong movements corresponding to the Haiti earthquake on August 14, 2021 of magnitude 7.2. The method of direct interpretation of the Fourier transform is used. The main results show that the APTO station, located on the soft soil of marine deposits, beach sand and pebbles, and storm banks, shows the

highest amplitude values (APTO 69.625), as well as the highest period values (0.430 s), compared to the ABON station (0.195 s). The maximum frequency value (5,139 Hz) corresponds to the ABON station.

**Keywords:** strong movements; site effect; accelerograph units; Santiago de Cuba.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

Al nivel internacional son disímiles las investigaciones realizadas para evaluar los efectos de sitio por diversos métodos; por ejemplo, usando movimientos fuertes en Colombia, Girón, Salcedo y Pérez (2020) determinan el contenido frecuencial para el sismo del 27 de agosto de 2013, con epicentro en la cabecera municipal de Restrepo en el departamento del Valle del Cauca. De ahí establecen que, aunque se describen periodos altos en la señal recibida en cada una de las estaciones, la evolución temporal de las ondas sísmicas muestra que las frecuencias en los espectros de Fourier son variables y dependen de las condiciones geológicas, mas no de los parámetros instrumentales, de tal manera que los depósitos de suelo se comportan como filtros para la energía de alta frecuencia.

También en Colombia, Mayorga y otros investigadores (2020) determinan el efecto de sitio por movimiento fuerte estudiando los valores de aceleración horizontal y vertical de estaciones acelerográficas cercanas al epicentro y alejadas de este. Por otra parte, Flores y Lozano (2007) determinan el contenido frecuencial dominante de un conjunto de 69 señales de fuentes sismogénicas cercanas a la ciudad de San José de Cúcuta, obtenidas mediante la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia (RNAC) del Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS).

Las técnicas utilizadas para el análisis espectral son la transformada de Fourier y la transformada Wavelet, mediante sus respectivos espectros de amplitudes. Se simula el efecto local de los sismos para dos perfiles de suelo de formaciones litológicas diferenciadas. Los análisis se realizan haciendo uso de herramientas computacionales, programas como EERA, SeismoSignal, DEGTRA A4 y MATLAB.

En Cuba no existen estudios de efectos de sitio empleando movimientos fuertes registrados por estaciones acelerográficas, por lo que el presente estudio es el primero que se realiza sobre efectos de sitio en la ciudad de Santiago de Cuba empleando registros acelerográficos. La red de estaciones acelerográficas de la ciudad Santiago de Cuba comenzó su instalación en

el 2017 (Rosabal *et al.* 2021) y hasta diciembre de 2021 contaba ya con 28 estaciones.

El presente estudio tuvo el objetivo de evaluar, mediante la transformada de Fourier, los efectos de sitio en las estaciones acelerográficas de la ciudad Santiago de Cuba, utilizando registros acelerográficos de movimientos fuertes.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

Como material base se empleó el esquema geológico de la Cuenca de Santiago de Cuba a escala 1.25 000 (modificado de Medina *et al.* 1999) y datos geotécnicos de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA 2022) que constan en las bases de datos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENASIS).

Se utilizó el método de amplitudes espectrales o interpretación directa de la transformada de Fourier. Este consiste en calcular el espectro de Fourier de las componentes horizontales del movimiento fuerte y obtener frecuencias y periodos predominantes.

Una de las técnicas experimentales más efectivas en la valoración del efecto de sitio implica el uso de acelerógrafos y sismógrafos ubicados en terrenos tanto blandos como firmes para registrar eventos con magnitudes moderadas y grandes, de tal manera que se puedan comparar los propios registros sísmicos y, sobre todo, los espectros de amplitudes de Fourier para conocer la respuesta sísmica de los diferentes tipos de terreno (Gutiérrez *et al.* 2014). En este caso se eligió un sitio de referencia, necesariamente en terreno firme (rocoso) que sirviera de base de comparación para los registros y espectros obtenidos a partir de estaciones en terreno blando (Gutiérrez *et al.* 2014).

### **2.1. Evaluación del efecto de sitio**

Para evaluar el efecto de sitio en la ciudad de Santiago de Cuba empleando los registros acelerográficos de movimientos fuertes era necesario contar con varios eventos de magnitud moderada o fuerte y tener una estación en roca y estaciones en suelo blando para corroborar los valores de amplificación y frecuencias dominantes que pueden variar en función del azimut, profundidad, magnitud y distancia epicentral.

El 14 de agosto de 2021 a las 8:29 am se reportó un evento localizado en las coordenadas 18.383 de latitud norte y los -72.515 de longitud oeste, con una profundidad de 10 km. Tuvo magnitud de 7.2 (SSNC 2021) y se ubicó a 33 km al suroeste de Puerto Príncipe, Haití. Este sismo a pesar de su distancia a la cuenca de Santiago de Cuba, su magnitud e intensidad sísmica,

provocó efectos de sitio. Las señales acelerográficas se procesaron con el programa Seismosignal (SeismoSoft 2013).

En el 2021, la red acelerográfica de la ciudad Santiago de Cuba contaba con estaciones sobre varios tipos de perfiles de suelo: B, C, D y E (NC46:2017). Cuando ocurre el evento del 14 de agosto de 2021, solo se contaba con la estación ABON, situada sobre roca (perfil de suelo B, según NC46:2017). Basado en el esquema geológico de la cuenca Santiago de Cuba (Medina *et al.* 1999), se toma esta estación para el estudio del efecto de sitio.

La estación acelerográfica ABON se sitúa sobre el grupo El Cobre, compuesto por diferentes tipos de rocas vulcanógenas y vulcanógeno-sedimentarias en distintas correlaciones y combinaciones alternantes, muy variables, tanto en sentido vertical como lateral. Las transiciones entre las litologías a veces son bruscas y otras graduales y en muchos casos es prácticamente imposible establecer delimitaciones entre ellas. Las rocas más abundantes son las tobas, tobas aglomeráticas, lavas y lavas aglomeráticas de composición andesítica, andesitodacítica y dacítica, raramente riolítica, riodacítica y basáltica (Léxico Estratigráfico de Cuba 2013).

En la base de datos del CENAIIS que contiene la información geotécnica de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA), no se registra ninguna cala cercana a la estación acelerográfica ABON.

La estación acelerográfica APTO se sitúan sobre sedimentos del Cuaternario ( $mQ_{IV}$ ), constituidos por depósitos marinos, arenas y guijarros de playa y bancos de tormenta (Medina *et al.* 1999). Estos sedimentos se caracterizan por una velocidad de propagación de una onda cortante menor que 150 m/s. Según la NC46:2017 el perfil de suelo se clasifica como E.

La cala cercana a la estación APTO es S594, a 68 m de distancia, a profundidad de 15,10 m, y nivel freático a los 0,50 m. Está compuesta por cinco capas de diferentes espesores, que a continuación se describen.

- Primera Capa (1a). Compuesta por relleno, asbesto residual en algunos sectores. (1b). Compuesta por relleno, arcilla arenosas mezcladas con fragmentos de roca volcánica, densidad baja, saturada. (1c). Constituida por relleno, arenas gravosas, arena arcillosa mezcladas con fragmentos de roca volcánica, a veces mezcla con material de construcción, densidad media, saturada.
- La segunda capa es cieno constituido por arcillas muy plásticas gris oscuro, a veces mezcladas con material carbonatado. El carácter del

cieno varía, ya que aumenta el contenido de arena y de fragmentos de roca volcánica.

- La tercera capa es un conglomerado constituido por arcilla arenosa carmelita a grisáceo, mezclada con gravas y fragmentos de roca volcánica.
- La cuarta capa formada por material calcáreo margoso de carácter arcillo arenoso.
- La quinta capa es de arena de grano medio mezclada con fragmentos de roca volcánica, severamente intemperizadas.

El perfil estratigráfico P16-5 (Rosabal *et al.* 2020) describe 4 m de arcilla y 9 m de arena.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el terremoto de Haití del 14 de agosto 2021, la aceleración pico (PGA) en las dos componentes horizontales (HNN y HNE) son correlacionables; sin embargo, en la vertical (HNZ) se observan bajo valores (Tabla 1).

Tabla 1. Valores de aceleración pico (PGA) en las estaciones acelerográficas

<b>ESTACION ACELEROGRAFICA</b>	<b>PGA HNE(cm/s<sup>2</sup>)</b>	<b>PGA HNN(cm/s<sup>2</sup>)</b>	<b>PGA HNZ(cm/s<sup>2</sup>)</b>
<b>APTO</b>	45,373	48,102	16,140
<b>ABON</b>	41,445	29,520	12,941

Las Figuras 1 y 2 muestran los parámetros del movimiento fuerte del suelo producido por el sismo del 14 de agosto de 2021 para las estaciones ABON y APTO, respectivamente. Se evidencian las diferencias de amplitud en los registros acelerográficos obtenidos en los suelos blandos (E) de las estación APTO, con respecto al registro de la estación ABON en roca (suelo B).

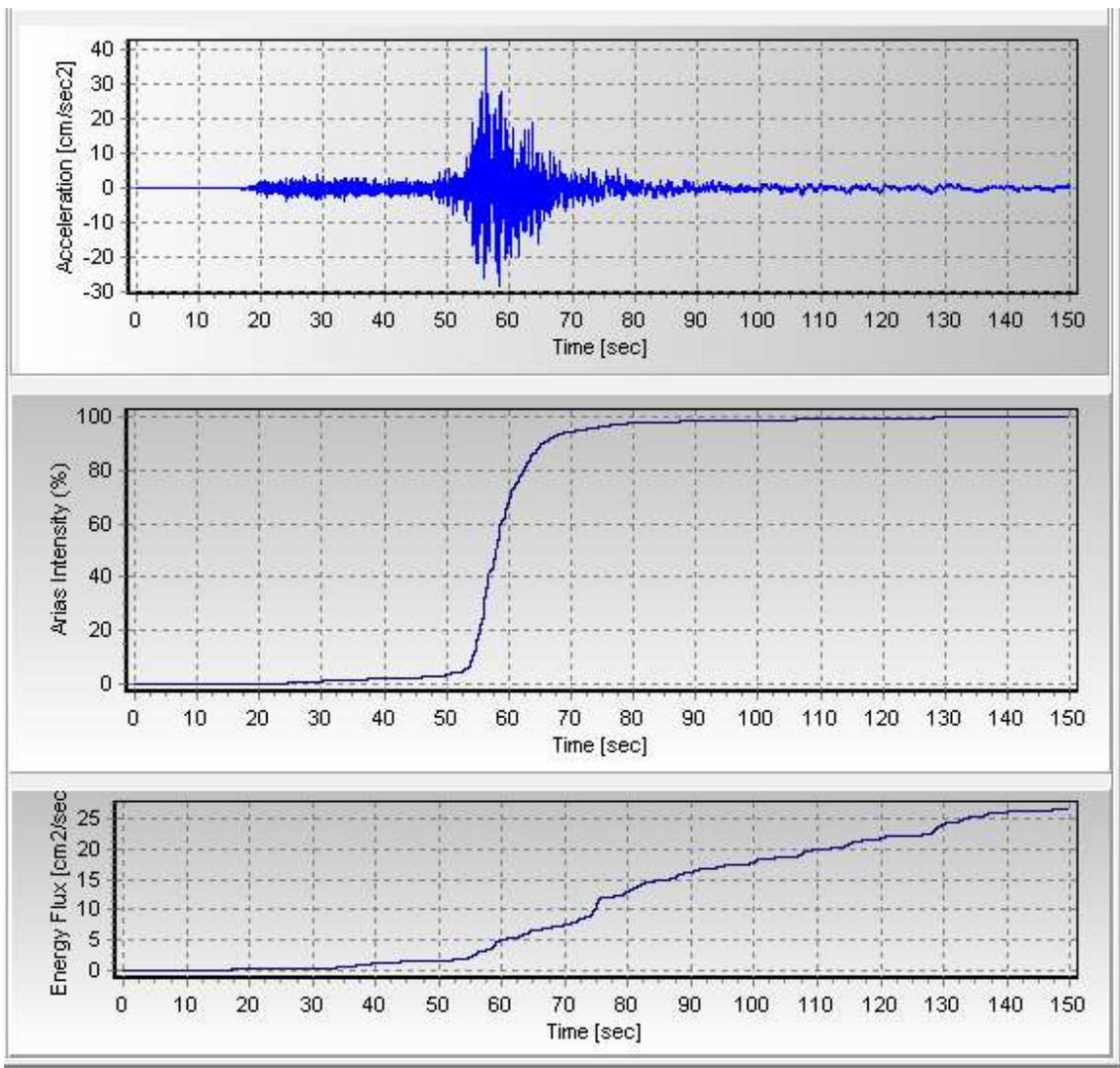


Figura 1. Aceleración, intensidad de Arias y flujo de energía del terremoto del 14 de agosto de 2021, estación ABON, ciudad Santiago de Cuba. Componente HNE.

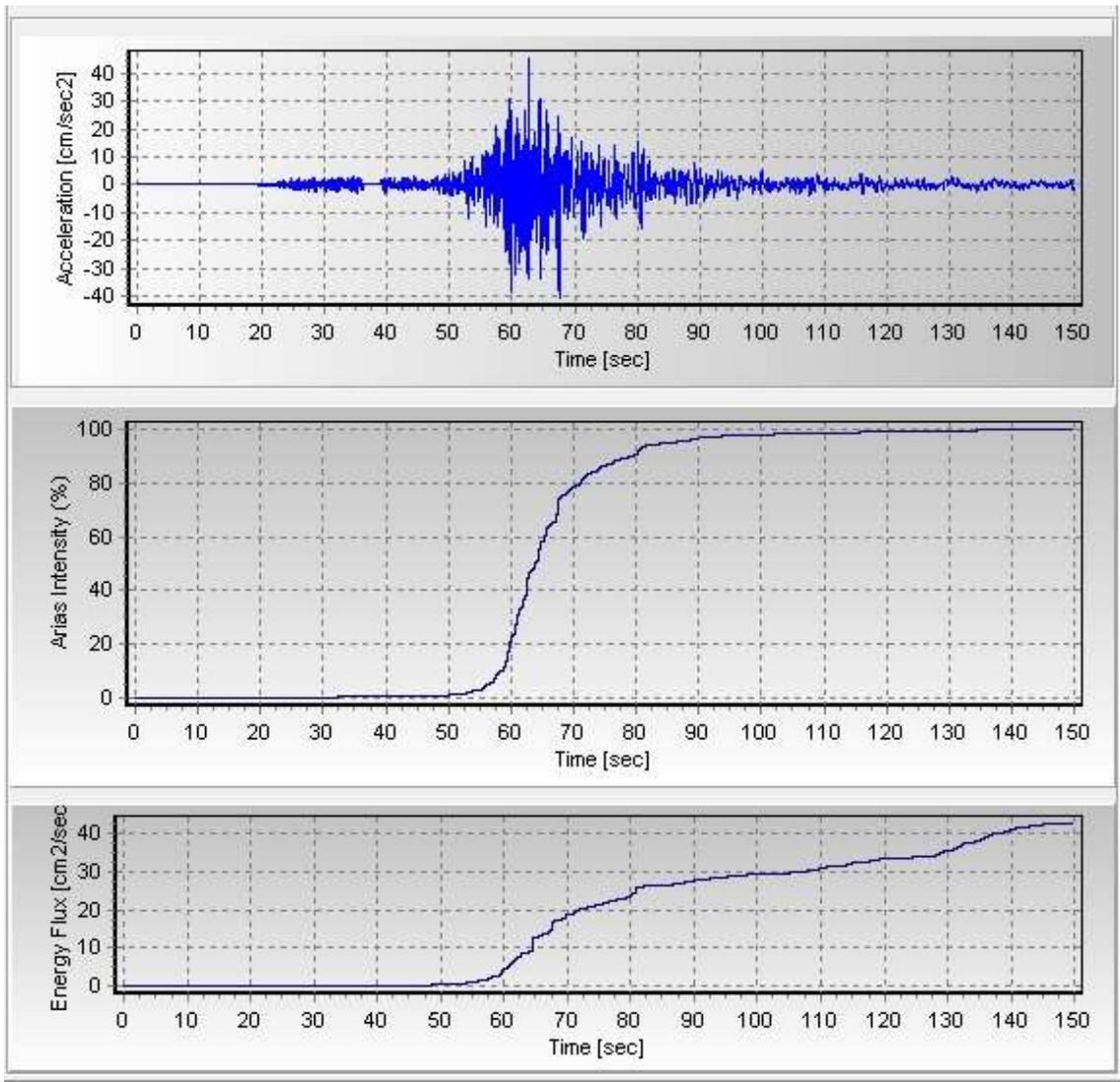


Figura 2. Aceleración, intensidad de Arias y flujo de energía del terremoto del 14 de agosto de 2021, estación APTO, ciudad Santiago de Cuba. Componente HNE.

A pesar de la distancia epicentral, la magnitud e intensidad de este sismo, para la cuenca Santiago de Cuba, en particular para las estaciones ubicadas sobre suelo blando con respecto a la estación en roca, se aprecia una gran diferencia entre los valores de amplitudes espectrales de Fourier (Figuras 3 y 4).

La estación APTO ubicada sobre suelo blando muestra los mayores valores de amplitud (69,625), así como los mayores valores de periodo (0,430 s) en comparación con la estación ABON (0,195 s). El mayor periodo (0,430 s) se refleja sobre los depósitos marinos, arenas y guijarros de playa y bancos de tormenta de la estación APTO. El máximo valor de frecuencia (5,139 Hz) corresponde a la estación ABON (Tabla 2).

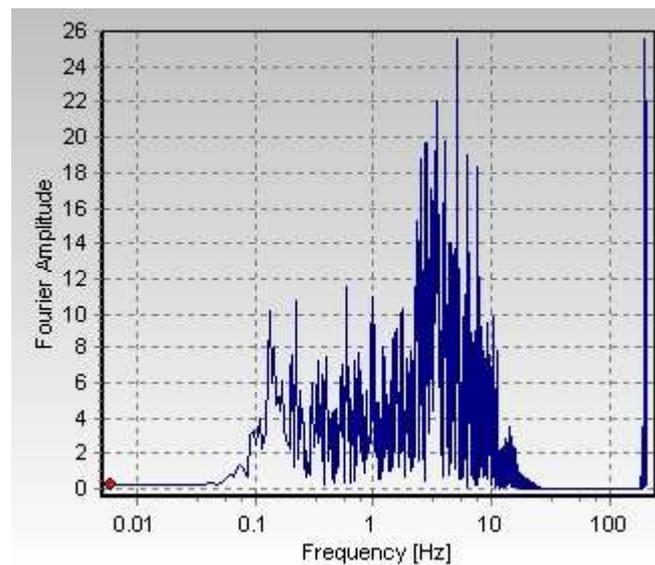


Figura 3. Amplitudes espectrales de Fourier para la estación ABON. Componente HNE.

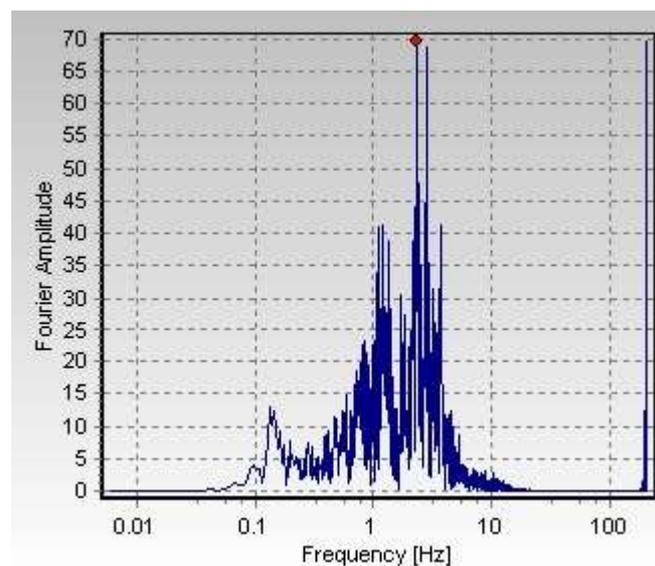


Figura 4. Amplitudes espectrales de Fourier para la estación APTO. Componente HNE

Tabla 2. Amplitudes de Fourier, frecuencia y periodo para las estaciones ABON y APTO

<b>Estación acelerográfica</b>	<b>Perfil de Suelo NC:46-2017</b>	<b>Amplitudes de Fourier en componente HNE</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>Periodo (s)</b>
<b>ABON</b>	B	25,555	5,139	0,195
<b>APTO</b>	E	69,625	2,325	0,430

Los valores de periodo obtenidos pueden servir de base para estudios posteriores donde puedan compararse con los periodos de las estructuras para determinar si existiera el efecto de la resonancia que pudiera derivar en daños mayores sobre las estructuras lo cual implica un mayor riesgo sísmico. El riesgo sísmico de las estructuras donde se encuentran las estaciones acelerográficas ABON y APTO, es medio, basado en una evaluación cualitativa (Candebat *et al.* 2022).

A nivel internacional el estudio del efecto de sitio se ha realizado en diferentes países por diferentes métodos, como por ejemplo en México (Vasquez 2016), a partir de los datos registrados por redes acelerográficas (Comisión Federal de Electricidad, CFE; Centro de Instrumentación y Registro Sísmico A.C, CIRES; y el Instituto de Ingeniería de la UNAM, IIUNAM) de un sismo ocurrido el 20 de marzo de 2012 de magnitud 7,4 y sus réplicas, estima a través de la técnica de cocientes espectrales H/V la presencia de un efecto de sitio y la no linealidad en el suelo. Al observar los resultados de las estaciones CFE se demostró que no todas presentan un efecto de sitio. Para las estaciones CIRES se percibió que en algunas estaciones se presenta claro el efecto de sitio. Y finalmente para la red temporal IIUNAM los resultados arrojan la presencia de un efecto de sitio para sus tres estaciones.

Por otra parte, los trabajos realizados por González-Herrera y demás colaboradores (2020) explican que las causas de los daños para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, asociadas al sismo del 7 de septiembre del año 2017 fue el efecto de sitio presente en los suelos del valle de Tuxtla, los cuales presentan amplificaciones hasta tres veces la aceleración del sismo en roca determinada mediante los registros de los sismos históricos.

En Colombia, Quiñones (2019), a partir del estudio de microzonación sísmica realizado por el Servicio Geológico Colombiano en 1997 desarrolló una red acelerográfica para evaluar la respuesta sísmica de los depósitos de suelo en Bogotá. Para ello se emplearon registros de movimiento débil desde 1999 hasta febrero de 2017, disponibles en la Red Acelerográfica de Bogotá (RAB) y la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia (RNAC) para investigar el efecto de sitio en 20 lugares de la ciudad utilizando la Técnica de Inversión Generalizada-GIT.

Los resultados muestran que el factor de amplificación máximo para estaciones en afloramientos rocosos varía entre 4 y 8 veces, y entre 4 y 13 para las estaciones ubicadas en las colinas y la base de estas. Para los suelos lacustres la amplificación máxima supera el valor de 10 pero es inferior a 20 veces. Para los depósitos aluviales el factor de amplificación está

comprendido en el rango de 4 a 10 veces. La parte más profunda de la cuenca exhibe factores de amplificación por encima de 10 veces.

Cabe destacar que en Cuba existe una red acelerográfica regional (Rosabal-Domínguez *et al.* 2021), sin embargo, aunque sus estaciones no han sido empleadas para determinar el efecto de sitio, sí emplearon los espectros de Fourier. Se realizó un análisis de los valores de amplitud, frecuencia y espectros del terremoto de Cabo Cruz Mw 7.7 a partir de los registros de la red acelerográfica de Santiago de Cuba y de la Estación de las Mercedes (Villalón-Semanat *et al.* 2020). Se emplearon las estaciones AARA, ACAN, ACLI, ADAT, AECE, AKEN, ARAF, AYEL, AZUL (red acelerográfica de Santiago de Cuba) y LMGC (Estación Las Mercedes). El análisis permitió mostrar que los valores de aceleración máxima horizontal, tanto para la Estación de Las Mercedes como para las estaciones de la ciudad de Santiago de Cuba, distantes a 132 km y 340 km del epicentro, respectivamente, no presentaron una variación significativa entre ellos.

Al analizar el espectro de amplitud de Fourier para las estaciones de la ciudad de Santiago de Cuba en comparación con las de la Estación de Las Mercedes, se presume la influencia de la cuenca Santiago en los incrementos de amplitud, ya que los máximos presentan un corrimiento en frecuencia desde 13,09 Hz a 1,20 Hz (0,07 s–0,83 s) hacia la cuenca de Santiago de Cuba.

#### 4. CONCLUSIONES

- Existen diferencias de amplitud entre los registros acelerográficos correspondientes a suelos blandos (E) de la estación APTO, con respecto al registro de la estación ABON en roca (B) para el sismo del 14 de agosto de 2021.
  - La estación APTO, ubicada sobre suelo blando, muestra los mayores valores de amplitud (APTO 69,625), así como los mayores valores de periodo (0,430 s) en comparación con la estación ABON (0,195 s).
  - El mayor periodo (0,430 s) obtenido se refleja sobre los depósitos marinos, arenas y guijarros de playa y bancos de tormenta de la estación APTO.
  - El máximo valor de frecuencia (5,139Hz) corresponde a la estación ABON.
  - Los valores de periodo obtenidos constituyen una base para estudios posteriores para compararlos con los periodos de las

estructuras para determinar si existiera el efecto de la resonancia que pudiera derivar en daños mayores sobre las estructuras lo cual implica un mayor riesgo sísmico.

- El riesgo sísmico de las estructuras donde se encuentran las estaciones acelerográficas ABON y APTO, es medio, basado en una evaluación cualitativa.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENSAIS) por la contribución para la realización de este trabajo.

## 6. REFERENCIAS

Cuba. Servicio Sismológico Nacional de Cuba (SSNC). 2021: *Servicio Sismológico Nacional. Base de Datos*. Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais). Santiago de Cuba.

Datos geotécnicos de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) y que consta en las bases de datos del CENSAIS. 2022: Fondos del CENSAIS.

Candebat, D.; Villalón, M.; Rosabal, S.; Sánchez, J.; Leyva, K. y Savigne, E. 2022: Evaluación del comportamiento sísmico de las edificaciones donde se encuentran las estaciones acelerográficas de Santiago de Cuba. Proyecto: Determinación del efecto de sitio en la ciudad de Santiago de Cuba utilizando registros acelerográficos. Programa Desarrollo de las Investigaciones Sismológicas Aplicadas (DISA). Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENSAIS).

Flores, C. y Lozano, C. 2007: Análisis y tratamiento de señales de fuentes sismogénicas de campo cercano a San José de Cúcuta, Colombia. *Respuestas*, 12(2). ISSN 0122820x.

Girón, L.; Salcedo, E. y Pérez, G. 2020: Análisis espectral del sismo del 27 de agosto de 2013 ocurrido en el Valle del Cauca, Colombia. *Boletín de Geología*, 42(2).

González, R.; Mora, J.; Aguirre, J.; Aguilar, J.; Paz, J. y Moreno, R. 2020: Efecto de sitio en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, un determinante en los daños históricos en edificaciones. *Ingeniería Sísmica*, 102: 42-64. DOI: 10.18867/ris.102.511

Gutiérrez, C.; Martínez, A.; Gómez, A.; De la Cruz-Reyna, S.; Hernández, T. y Mendoza, M. 2014: *Guía básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de peligros y Riesgos. Fenómenos Geológicos*. Serie: Atlas Nacional de Riesgos. México: Centro de Prevención de Desastres. ISBN: 970-628-902-X.

- Centro Nacional de Información Geológica. 2013: *Léxico Estratigráfico de Cuba*. La Habana: Instituto de Geología y Paleontología. ISBN 978-959-7117-57-5.
- Mayorga, E.; Dionicio, V.; Lizarazo, M.; Pedraza, P.; Poveda, E.; Mercado, O.; Siervo, D.; Aguirre, L.; Bolaños, R.; Garzón, F.; Velásquez, L.; Castillo, L.; García, H.; Mazo, E.; Arcila, M.; Barbosa, D.; Sarabia, A.; López, M.; Días, F.; Valcárcel, J.; ... Bohórquez, O. 2020: *El sismo de mesetas, meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano
- Medina, A.; Escobar, E.; Ortiz, G.; Ramírez, M.; Díaz, L.; Móndeño, F.; Montejo, N.; Dúguez, H.; Guevara, T. y Acosta, J. 1999: Reconocimiento geólogo-geofísico de la cuenca de Santiago de Cuba, con fines de Riesgo Sísmico. Empresa Geominera de Oriente, Santiago de Cuba. 32 p.
- Oficina Nacional de Normalización. 2017: Norma Cubana NC 46:2017: Construcciones Sismoresistentes. Requisitos Básicos para el Diseño y Construcción. 106 p.
- Quiñones, L. 2019: *Evaluación del efecto de sitio mediante la técnica de Inversión Espectral Generalizada en la ciudad de Bogotá D.C, Colombia*. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia.
- Rosabal, S.; Moreno, B.; Montenegro, C.; Chuy, T.; Cutié, M.; Diez, E.; Gonzalez, O.; Palau, R.; Poveda, V.; Oliva, R.; Rivera, Z.; Villalón, M.; Matos, R. y Reyes, O. 2020: Diseño de la red acelerográfica de la ciudad Santiago de Cuba. Informe parcial. Fondos del CENAIS. Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas.
- Rosabal, S.; Palau, R.; Cutie, M.; Oliva, R.; Rivera, Z.; Villalón, S. 2021: Aceleraciones del terremoto del 27 de febrero del 2018 obtenidas por la red acelerográfica de la ciudad de Santiago de Cuba. *Minería y Geología*, 37(3): 274-286. ISSN: 1993 8012.
- SeismoSoft. 2013: "SeismoSignal v5.1- A computer program for signal processing of strong-motion data". Disponible en <http://www.seismosoft.com>
- Vasquez, J. 2016: *Sismicidad, efecto de sitio y análisis sísmico no lineal empleando datos de tres redes acelerográficas en Guerrero y Oaxaca*. Trabajo de diploma. Instituto Politécnico Nacional. México.
- Villalón, M.; Candebat, D.; Rivera, Z. y Sánchez, J. 2020: Análisis de los valores de amplitud, frecuencia y espectros del terremoto de Cabo Cruz Mw 7.7 a partir de los registros de la red acelerográfica de Santiago de Cuba y de la Estación de las Mercedes. Informe parcial. Proyecto Determinación del efecto de sitio en la ciudad de Santiago de Cuba utilizando registros acelerográficos. Programa Desarrollo de las

Investigaciones Sismológicas Aplicadas (DISA). Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS).

## **Información adicional**

### **Conflicto de intereses**

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

### **Contribución de los autores**

SRD: Interpretación de datos, redacción, revisión, caracterización geológica de las estaciones acelerográficas, aprobación de la versión final. ZRA: Caracterización geológica de las estaciones acelerográficas, manejo de la base de datos de calas. MVS: Procesamiento de los registros acelerográficos.

### **ORCID**

SRD, <https://orcid.org/0000-0002-1233-1101>

ZRA, <https://orcid.org/0000-0001-5702-8010>

MVS, <https://orcid.org/0000-0002-9367-1828>

Recibido: 31/05/2022

Aceptado: 05/07/2022