



Ciencia en su PC

ISSN: 1027-2887

manuela@megacen.ciges.inf.cu

Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago
de Cuba

Cuba

Caballero-Cornier, Luis Felipe; Chuy-Rodríguez, Tomás Jacinto; Rivera-Álvarez, Zulima Caridad
ESTIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SUELO BAJO
ACCIÓN SÍSMICA. CASO DE ESTUDIO: EDIFICIO EMCOMED
Ciencia en su PC, vol. 1, núm. 1, 2018, Enero-Marzo 2019, pp. 68-85
Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago de Cuba
Cuba

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181358269010>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UAEH
redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

ESTIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SUELO BAJO ACCIÓN SÍSMICA. CASO DE ESTUDIO: EDIFICIO ENCOMED

GROUND BEHAVIOR ESTIMATION UNDER SEISMIC ACTION. STUDY CASE: ENCOMED BUILDING

Autores:

Luis Felipe Caballero-Cornier, felipe@cenais.cu¹

Tomás Jacinto Chuy-Rodríguez, chuy@cenais.cu¹

Francisco Calderín-Mestre, calderin@uo.edu.cu, Universidad de Oriente.
Santiago de Cuba, Cuba.

Zulima Caridad Rivera-Álvarez, zuli@cenais.cu¹

¹ Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. Santiago de Cuba.
Cuba.

RESUMEN

La realización de mediciones geofísicas complementadas con el conocimiento de calas ingeniero-geológicas permite aclarar el efecto de sitio y estimar el comportamiento dinámico del suelo ante un terremoto. Esto se validó con el estudio realizado en el edificio de la Empresa Comercializadora y Distribuidoras de Medicamentos (ENCOMED), lo que demostró que en este lugar no se debe producir licuación y que la señal sísmica se debe amplificar aproximadamente en dos veces de acuerdo con este procedimiento.

Palabras clave: mediciones geofísicas, licuación, efecto de sitio.

ABSTRACT

The accomplishment of geophysical measurements complemented with the knowledge of engineer-geological coves, allows to clarify the effect of site and to estimate the dynamic behavior of the soil before an earthquake. This was validated in the study carried out in the ENCOMED building, demonstrating that in this place no liquefaction must take place and seismic signal must be amplified approximately twice according to this procedure.

Key words: geophysical measurements, liquefaction, site effect.

INTRODUCCIÓN

La historia sísmica documentada de Cuba comenzó a partir del siglo XVI, cuando algunos terremotos destruyeron de forma parcial la ciudad de Santiago de Cuba. Estos terremotos fueron generados en la zona de fallas Oriente, con epicentros paralelos a la costa y la mayoría mar adentro (Chuy, 2014). La mayor concentración de la actividad sísmica puede ser observada alrededor de Santiago de Cuba, donde se han sentido los terremotos más fuertes (1766 y 1852), ambos con intensidad 9,0 MSK; así como el de 1932 con 8,0 MSK (Chuy, 2014). El resto del país es afectado con menor frecuencia, se destaca el terremoto de San Cristóbal de 1880, en la actual provincia Artemisa, con intensidad máxima de 8,0 MSK.

La parte suroriental de Cuba representa la de mayor peligro sísmico y dentro de esta región la provincia Santiago de Cuba es la que mayor riesgo presenta. Esto se debe a su proximidad con la falla Oriente, en la cual se encuentra una estructura geólogo-tectónica llamada Promontorio Santiago, localizado en una zona donde se concentra gran cantidad de energía. Como consecuencia de esto, en este contacto entre las placas se generan los terremotos más energéticos del país, como los 20 de gran intensidad que han azotado a la ciudad desde su fundación como villa en el año 1515 (Chuy, 2014). Estos terremotos han causado pérdidas de vidas humanas y cuantiosos daños económicos.

El objetivo principal del trabajo fue la caracterización del suelo subyacente a la cimentación, sometido a la acción de cargas dinámicas. El mismo será complementado por los resultados de las mediciones geofísicas y la información geológica para el área en particular. Su importancia radica en ser un referente para el estudio de cimentaciones presentes o futuras, lo cual permite caracterizar las condiciones de los suelos en el emplazamiento. A partir de los resultados de las mediciones geofísicas y calas ingeniero-geológicas se pueden caracterizar los suelos desde el punto de vista dinámico, para estimar el comportamiento de los mismos mediante metodologías y programas de cómputos especializados.

El área de estudio seleccionada para la validación es la del edificio de la Empresa Comercializadora y Distribuidoras de Medicamentos (EMCOMED), otrora Droguería Mestre y Espinosa, situada en la ciudad de Santiago de Cuba, frente al Paseo Alameda. En la Figura 1 se muestra la ubicación de este edificio, así como de las mediciones instrumentales y las calas ingeniero-geológicas llevadas a cabo.

Según Salinas (2014), “el factor desencadenante del mayor daño posible durante un terremoto es la intensidad de la sacudida sísmica del subsuelo”. Esta es la razón por la que fue escogida esta área, ya que ha sido una de las más afectadas de Santiago de Cuba; lo cual se ha podido corroborar a través de reportes, ya sean testimonios visuales y verbales, de los daños que en el pasado produjeron sismos de gran intensidad sobre el subsuelo, las edificaciones y personas. Esta respuesta sísmica del área estudiada no es más que la aparición del efecto de sitio por las malas condiciones del suelo que sirve de base a sus estructuras.

De acuerdo con Gualdrón (2013) “la cimentación es la parte de la estructura encargada de la cimentación de las cargas actuantes hacia el estrato portante del suelo, comprimiéndose este y originándose asentamiento en toda la estructura”. Mientras más estudios de suelo se lleven a cabo en un área determinada mejor será la elección del diseño de la cimentación para una estructura. De ahí que estos estudios son de vital importancia para estimar el comportamiento del suelo y su posterior impacto sobre las estructuras suprayacentes.

Limaico (2015) plantea que la cimentación es un conjunto de elementos estructurales encargado de transmitir todos los esfuerzos generados por la estructura al suelo, de forma que estos no superen su esfuerzo admisible, ni generen deformaciones admisibles en el mismo. El objeto de estudio del trabajo de investigación fue el estudio del suelo que subyace en una cimentación, de manera que se tengan los elementos necesarios para hacer una estimación del comportamiento de este suelo ante cargas dinámicas relevantes, hasta el punto que dañen las estructuras situadas sobre este.



Figura 1. Ubicación del área de estudio y las mediciones realizadas
Imagen tomada de *Google Earth* (2017)

La Empresa Comercializadora y Distribuidoras de Medicamentos (EMCOMED) es una empresa de vital importancia para la distribución de medicamentos en el territorio. En esta se almacenan para su posterior entrega a las distintas instituciones de salud de la provincia, por lo que es la única de su tipo en el área. Por su categoría ocupacional se clasifica como una obra ordinaria (Cuba, Oficina Nacional de Normalización NC, 2017).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para estimar el comportamiento del efecto de sitio se partió de un procedimiento diseñado por Caballero (2017), cuyos pasos son los siguientes:

1. Ubicación del área objeto de estudio.
2. Búsqueda de información de afectaciones sufridas en el área por terremotos fuertes en épocas anteriores.
3. Búsqueda de información geológica local y puntual a través de investigaciones ingeniero-geológicas del suelo donde se ubique el área.
4. Empleo de métodos instrumentales por etapa de trabajo (organización de los trabajos de campo y gabinete).
5. Determinación de la probabilidad de ocurrencia de fenómenos inducidos en el sitio como licuación y los deslizamientos del suelo.
6. Valoración de las condiciones del suelo para determinar la respuesta ante la acción de cargas dinámicas.

7. Validación del cumplimiento de los objetivos del procedimiento.

Por información del Instituto de Geología y Paleontología de Cuba (IGP) (2013), desde el punto de vista geológico el área de emplazamiento del edificio EMCOMED está sobre los depósitos marinos del cuaternario (MQ1v), formado por depósitos marinos de playas: arenas calcáreas y cuarzosas con restos de conchas, guijarros de playa y bancos de tormenta.

La información puntual del suelo en el área está apoyada por los resultados plasmados en los informes de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) (2014, 2015). Para este trabajo se tuvieron en cuenta los resultados de ambos informes, ya que hay similitud en las propiedades físico-mecánicas del suelo, puesto que las perforaciones están situadas muy próximas unas de otras; por consiguiente, tienen la misma composición y distribución espacial de las capas. Estos informes recogen los resultados de 5 calas ingeniero-geológicas llevadas a cabo en la minifábrica de cerveza Puerto del Rey, ubicada a unos 60 m del edificio EMCOMED.

En la tabla 1 se muestran algunas de las propiedades físico-mecánicas del suelo a partir de los resultados de estas calas ingeniero-geológicas; las mismas serán utilizadas para evaluar diferentes fenómenos, tales como la licuación del suelo y la amplificación de la señal sísmica.

Tabla 1. Propiedades físico-mecánicas de los suelos de emplazamiento en el área del Paseo La Alameda, obtenidas a partir de los resultados de laboratorio

Propiedades	Relleno	Capa 1	Capa 2	Capa 3
Número de golpes (SPT)	5	4	11	30
Límite líquido (LL) %	43	76	52	55
Límite plástico (LP) %	25	21	21	21
Índice de plasticidad (IP) %	18	55	31	34
Peso específico (γ_s) kg/m ³	2650	2720	2683	2650
Humedad natural (Wn) %	25	27.23	26	23.4
Densidad húmeda (γ_f) kg/cm ³	1921	1897	1927	1949
Densidad seca (γ_d) kg/cm ³	1537	1485	1529	1579
Densidad saturada (γ_{sat}) kg/cm ³	1959	1934	1962	1982
Índice de poros (e) s/d	0.72	0.84	0.75	0.68
Saturación (S) %	92	88	93	31
Módulo de deformación (E) Kpa	700	600	9000	20000
Coefficiente de Poisson (μ) s/d	0.35	0.40	0.40	0.41
Grava %	16	4	2	6
Arena %	20	26	24	32
Finos %	64	70	74	62

Fuente: ENIA (2015)

Estas muestras tienen la siguiente composición litológica y espesor de capa:

- Losa de hormigón masivo entre 0.19 y 0.45 m de espesor.
- Capa de relleno heterogéneo formado por arena arcillosa, con grava, restos de ladrillo y capa vegetal; su compacidad es baja. Espesor promedio 1m.
- Capa 1: arcilla muy plástica arenosa: arcilla de granos finos, de plasticidad muy alta; arena de granos finos a medios, húmeda, de consistencia baja, restos de fósiles marinos en los primeros intervalos. Espesor promedio igual a 5.30 m.
- Capa 2: arcilla muy plástica con arena, arena de granos finos a medios, húmeda, de consistencia dura. Espesor no determinado en la perforación.

El método geofísico empleado fue el de sísmica de refracción y el principio de su utilización, dado por Caballero y Rivera (2015), es el siguiente:

Tiene como objetivo determinar las variaciones de las ondas longitudinales (V_p) con la profundidad asociándola con las diferentes

capas. Se basa en el registro de los frentes de onda, generados por una fuente artificial de energía, leyendo en los registros los tiempos de los primeros arribos (p. 15).

Para entender el principio de funcionamiento se empleó una tecnología fabricada por la compañía italiana PASI, Modelo 16SG12-N, cuyas partes principales con sus funciones son:

1. Mandarria para energizar el suelo mediante golpes que generan ondas elásticas 12.
2. Geófonos o receptores que receptionan la señal de las ondas
3. Equipo de medición combinado marca PASI, modelo 12S12-16G, de 12 canales, que tiene incluido un sismógrafo para transformar la señal eléctrica y visualizar el registro.

Para realizar el procesamiento del perfil sísmico se utilizó el grupo de programas de refracción sísmica SeisImager, de la Empresa Geometrics, en su variante Pickwin (Pickwin, 2011). Este *software* permite realizar las lecturas de los sismogramas, para luego iniciar el procesamiento de la información mediante la construcción de un modelo de profundidad desde el archivo de datos de entrada preparado por el programa; asimismo, el programa calcula las velocidades de los estratos mediante técnicas de mínimos cuadrados.

De acuerdo con la Organización Panamericana de la Salud (OPS) (2003), se resumen 7 factores importantes, demostrados mediante la experiencia práctica, que determinan el potencial de un suelo para licuarse:

1. Distribución del tamaño de los granos. La arena uniformemente gradada, con granos poco finos o muy gruesos (arena limpia), tiene mayor probabilidad de licuarse y es posible que se vuelva más densa. Las arenas limosas y gravas también son susceptibles a la licuación bajo cargas cíclicas muy severas.
2. Profundidad de las aguas subterráneas. Puede ocurrir licuación si existe agua subterránea en el punto de la columna del suelo donde se está produciendo la densificación. Mientras menor sea la profundidad, menor será el peso del recubrimiento del suelo y el potencial de que ocurra

densificación. Por tanto, mientras menor sea el nivel de las aguas subterráneas, mayor será la probabilidad de que ocurra licuación.

3. Densidad. La licuación ocurre principalmente en suelos sueltos, saturados y no cohesivos. Ese suelo puede densificarse cuando está sujeto a una carga cíclica. La tendencia a densificarse reduce el volumen de suelo y agua e incrementa la presión de poros si los mismos se llenan de agua. Cuando la presión de poros se vuelve igual a la tensión media total, el suelo pierde su resistencia y se licua. Si el suelo es denso, habrá menos posibilidad de que se produzca la licuación.
4. Peso del recubrimiento y profundidad del suelo. Las tensiones entre partículas aumentan a medida que se incrementa la presión del recubrimiento. Mientras mayor sea la tensión entre las partículas, menor será la probabilidad de que ocurra la licuación. Por lo general, la licuación ocurre a profundidades menores de 9 metros, y rara vez ocurre a profundidades mayores de 15 metros.
5. Amplitud y duración de la vibración del terreno. La capacidad del suelo para resistir una vibración provocada por un sismo sin causar fallas depende de la intensidad del movimiento del terreno, incluida tanto su amplitud como su duración. Los movimientos más fuertes tienen mayor probabilidad de causar fallas. La licuación de suelos bajo condiciones de tensión provocadas por un terremoto puede ocurrir cerca del epicentro durante terremotos pequeños o moderados, o a cierta distancia en caso de terremotos moderados a severos.
6. Edad del depósito. Los suelos débiles y no cohesivos por lo general son jóvenes. Con el tiempo, actúan dos factores para incrementar la resistencia de un suelo típico: la compactación y varios procesos químicos (que actúan para cementar los granos del suelo). Una regla general es que los depósitos anteriores al pleistoceno tardío (más de 500.000 años de antigüedad) tienen poca probabilidad de licuarse, excepto si sufren una vibración bastante fuerte; mientras que los depósitos del holoceno tardío (menos de 3.000 años de antigüedad) tienen mayor probabilidad de licuarse.

7. Origen del suelo. El suelo depositado por procesos fluviales se sedimenta fácilmente y sus granos tienen poca probabilidad de compactarse. De manera similar, los rellenos artificiales no compactados, generalmente por debajo del nivel del agua, pueden tener deficiencias similares. Por otro lado, los sedimentos depositados glacialmente, en particular aquellos sobre los cuales ha pasado un glaciar, generalmente ya son bastante densos y tienen menor probabilidad de licuarse.

Otra vía empleada en el trabajo para estimar el potencial de licuación en el área analizada fue a través de los conocidos criterios chinos, utilizados en la Norma Sismorresistente China, propuestos por Wang en 1979 (citado por Brandes, 2003):

1. Fracción de arcilla (finos menores de 0,005 mm) ≤ 15 %.
2. Límite líquido, LL ≤ 35 %.
3. Contenido de humedad natural, $w \geq 0,9$ LL.
4. Índice de liquidez, LI $\leq 0,75$

Según estos criterios, los suelos pueden licuarse si la fracción de arcilla es menor del 15 % (según la definición china de tamaño de arcilla: partículas menores de 0,005 mm), el límite líquido es menor que el 35 % y el contenido de agua es mayor que 0,9 veces el límite líquido (Brandes, 2003).

Se empleó un programa para modelar la amplificación de la señal, llamado Pshake (Sanó & Pugliese, 1991). Este programa se utiliza para analizar la respuesta dinámica del sitio. El mismo es un equivalente lineal de análisis 1-D, ampliamente usado para el cálculo no lineal de la respuesta de sitio. Su función es calcular la respuesta local sísmica de un semiespacio viscoelástico estratificado, en el cual las ondas de corte viajan en la dirección vertical.

RESULTADOS

Sísmica de refracción

Mediante el método sísmico fue confeccionado un perfil con orientación suroeste-noreste, una longitud de 37 m y una profundidad de estudio de 7 a 10

m. En la Figura 2 se muestra el perfil sísmico realizado en áreas del edificio de EMCOMED, a partir de las primeras llegadas de las ondas; se obtuvo del *software* de análisis (Pickwin, 2011) la velocidad de las ondas longitudinales (V_p), que se dividen por capas o estratos en los primeros metros del subsuelo.

Para obtener las velocidades de la onda cortante (V_s), se parte de la expresión de la teoría de las ondas elásticas:

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{1-\mu}{0.5-\mu}}$$

Como para la primera capa el coeficiente de Poisson (μ) es 0.40, se sustituye y resulta lo siguiente:

$$\frac{V_p}{V_s} = 2.45, \text{ de donde } V_s = 162 \text{ m/s}$$

La segunda capa el coeficiente de Poisson es 0.40 (Tabla 1):

$$V_s = 241 \text{ m/s}$$

Y el coeficiente de Poisson en la tercera capa es igual a 0.41 (Tabla 1):

$$V_s = 536 \text{ m/s}$$

Del perfil sísmico de la Figura 2 se puede interpretar lo siguiente:

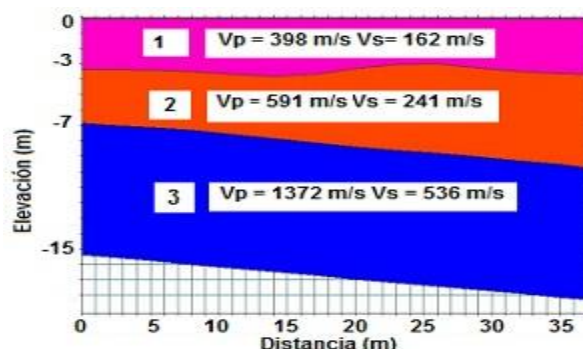


Figura 2. Perfil sísmico de velocidades ondas longitudinales (V_p)

Extraído del programa Pickwin (2011)

- Capa 1: constituye la capa superior, con una velocidad de ondas longitudinales baja, por el orden de 398 m/s y espesor promedio de 3.5 m.; compacidad baja y permeabilidad alta. Por lo tanto, este estrato no sirve para la cimentación de edificaciones como la droguería.
- Capa 2: subyace por debajo de la primera, con una velocidad de ondas longitudinales baja, con un valor de 591 m/s. Su compacidad es baja y permeabilidad alta. Tampoco constituye el estrato resistente para la estructura.
- Capa 3: es la capa más profunda, la velocidad de la onda longitudinal V_p es moderada (1372 m/s), compacidad muy alta y densidad relativa muy densa. Los pilotes de madera se hincaron hasta la superficie de este estrato de acuerdo con la memoria descriptiva encontrada en el Archivo Histórico Provincial de Santiago de Cuba.

La última frontera refractora a través del método de sísmica de refracción fue detectada entre 7 y 10 m, esta profundidad se corresponde con la información que poseen las calas del sitio y las excavaciones ejecutadas en los años 50 del siglo XX (Archivo Histórico Provincial de Santiago de Cuba). Por consiguiente, coincide con la información anterior acerca del enterramiento de los pilotes de madera hasta esta superficie, que constituye la parte superior del tercer estrato. Los resultados de estas mediciones sísmicas permitieron clasificar el perfil del suelo en D, considerando para ello las condiciones plasmadas en la propuesta de Norma sismorresistente Cuba (2017) para estos tipos de suelo.

Probabilidad de ocurrencia de fenómenos inducidos en el sitio (licuación)

Los suelos finos de arcilla pueden licuarse según lo que se plantea en la propuesta de Norma cubana de sismorresistencia (2017). De acuerdo con esos criterios, Brandes (2003) plantea que los suelos podrían licuarse cuando la fracción de arcilla fuese menor que el 15 %, el límite líquido menor que el 35 %, el contenido de agua mayor que 0,9 veces el límite líquido y el límite de liquidez igual o menor a 0.75.

De acuerdo con la comparación de los valores tomados de las calas ingeniero-geológicas dadas por los informes de la ENIA-Santiago de Cuba (2014 y 2015), no hay una satisfacción, bajo el criterio chino, de que ocurra el fenómeno de la licuación en el área bajo estudio (Ver tabla 2). En otras palabras, los resultados de la comparación con el porcentaje de los parámetros correspondientes para cada capa tienen signo opuesto al que presentan los criterios chinos (Brandes, 2003).

Tabla 2. Valoración de la probabilidad de ocurrencia de la licuación del suelo en el área de La Alameda, según las condiciones del criterio chino (Brandes, 2003)

Estrato	Finos	Límite líquido (LL)	Contenido de humedad (W_n)
1	70>15%	76>35%	27.23<68.4
2	74>15%	52>35%	26.00<46.8
3	62>15%	55>35%	23.40<49.5
4	64>15%	43>35%	25.00<38.0

Por otra parte, la arcilla presente en el sitio es muy plástica, entonces no cumple con los puntos 1 y 3 de la Organización Panamericana de Salud (OPS, 2003), que plantea que la licuación es susceptible para suelo arenoso uniformemente gradado y suelo no cohesivo, suelto y saturado. El suelo del sitio está saturado de agua, pero es cohesivo y no arenoso; por lo que limita la movilidad libre de las partículas durante un movimiento sísmico, impidiendo que se produzca el fenómeno de la licuación.

Análisis de la señal por el programa Pshake

Otro método utilizado para estimar el comportamiento dinámico del suelo fue el Pshake (Sanó & Pugliese, 1991). Como datos de entrada se usan las propiedades mecánicas de los suelos (estáticas: espesores, densidad y velocidad de la onda cortante V_s ; dinámicas, curvas de reducción del módulo de corte y curvas de amortiguación de los suelos) y el movimiento del suelo en el lecho rocoso del sitio de estudio, como espectro de respuesta de peligro uniforme.

En la tabla 3 los parámetros del modelo 1 corresponden al informe de las investigaciones ingeniero-geológicas de 2015 y el 2 a las de 2014. Como la instalación de estudio pertenece a una obra ordinaria, de acuerdo con sus características ajustadas en la propuesta de norma, el factor de amplificación escogido fue medio. De manera que la señal será amplificada en el caso de ocurrir un terremoto local en el área.

En la figura 3 se muestra el espectro de respuesta del suelo del área bajo estudio. Este espectro se les recomienda a los proyectistas para el diseño de nuevas estructuras en el sitio. De esta forma contribuirían a la reducción del riesgo sísmico en el área. El período característico para las edificaciones del sitio oscila entre 0 y 0.5 s por los niveles que presentan las edificaciones localizadas en este sector.

Tabla 3. Modelos estratigráficos del área de La Alameda. Donde: δf densidad húmeda, v_s velocidad de onda cortante por mediciones geofísicas *in situ*, FA factor de amplificación de la modelación 1D

Modelos	Tipo de suelo	Espesor (m)	δf (Kg/ m3)	v_s (m/s)	FA Alto	FA Medio	FA Bajo
1	Arcilla muy plástica arenosa	5.4	1.90	162	2.42	2.04	1.6
	Arcilla plástica con arena	7.10	1.93	241			
	Arcilla muy plástica arenosa	2.5	1.95	560			
	Roca	-	2.04	800			
2	Arcilla muy plástica arenosa	6.75	1.90	162	2.34	1.95	1.6
	Arcilla plástica con arena	1.8	1.89	241			
	Roca	-	2.04	800			

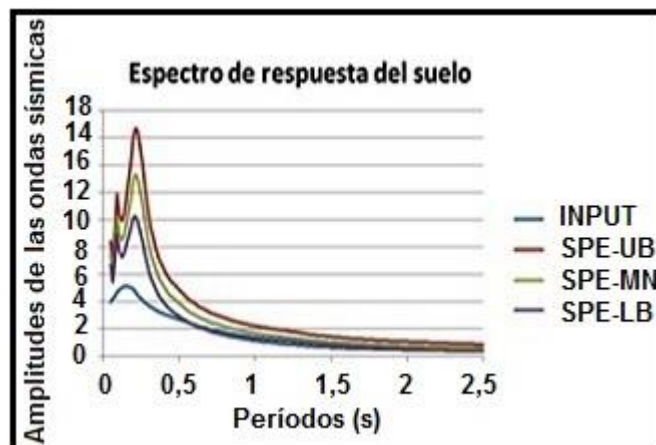


Figura 3. Espectro de respuesta del suelo a partir de la información de los resultados del ENIA (2014)

Extraído mediante el programa Pshake (Sanó & Pugliese, 1991)

DISCUSIÓN

Los resultados del presente trabajo cumplen con las expectativas trazadas, ya que su aplicación demostró que la ocurrencia de un fenómeno inducido, como la licuación de suelo; generado por un sismo de gran intensidad, es nula en el área bajo estudio. Esta afirmación se demuestra a partir del criterio chino (Brandes, 2003), en el cual los datos obtenidos en las investigaciones ingeniero-geológicas muestran signos diferentes a este criterio:

1. Fracción de arcilla (finos menores de 0,005 mm) ≤ 15 %
2. Límite líquido, LL ≤ 35 %
3. Contenido de humedad natural, $w \geq 0,9$ LL
4. Índice de liquidez, LI $\leq 0,75$

Pero si se comparan los resultados de la Tabla 2 con las anteriores condiciones los signos se invierten, es por eso que la ocurrencia de licuación como fenómeno inducido generada por un sismo energético en el sector estudiado es poco probable.

A través de la modelación por el programa Pshake (Sanó & Pugliese, 1991) se obtuvo un factor de amplificación por el orden de 2 (ver Tabla 3); es decir, la amplificación de la señal del suelo puede ser incrementada dos veces por la

acción de un sismo energético, lo cual indica que existe un indudable aumento de la intensidad sísmica en esta área como reflejo de la susceptibilidad del suelo, según evidencia del efecto de sitio. También es muy útil el espectro (Figura 3) obtenido, ya que puede ser tenido en cuenta por los proyectistas en el diseño de obras localizadas en el área estudiada.

El presente trabajo se adecua al estudio y conservación de cualquier patrimonio construido sometido a la acción de cargas dinámicas relevantes, ya que a partir de los resultados de laboratorio y campo se estima el comportamiento del suelo ante cargas relevantes y se detallan los peligros locales del suelo; además, sirve de apoyo a otras investigaciones para la valoración del comportamiento de una estructura en estudios de vulnerabilidad, relación suelo-estructura y riesgo sísmico.

CONCLUSIONES

1. Se evaluó el comportamiento del suelo sometido a la acción sísmica a través de los resultados de ensayos geofísicos y de pozo. Estos resultados se lograron mediante la aplicación de programas computarizados especializados en el procesamiento y análisis de la información.
2. La ocurrencia de licuación de suelo en el sitio como fenómeno inducido fue descartada.
3. La amplificación de la señal sísmica del suelo en el área de estudio fue de 2 veces, comparado con un suelo compacto; lo cual demostró la aparición en el área bajo estudio del efecto de sitio por la acción de un sismo severo a fuerte.

RECOMENDACIONES

1. Emplear en el área los resultados de otros métodos y programas aplicados, de manera que haya una continuidad de la presente investigación.
2. Que el trabajo constituya un referente para otros estudios de vulnerabilidad, interacción suelo-estructura e influencia de estos

elementos sobre las edificaciones; de modo que se contribuya a la mitigación del riesgo sísmico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Archivo Histórico Provincial de Santiago de Cuba. *Colección de expedientes de urbanismo*. Serie: Centro de Salud; subserie: Droguería; legajo: 334. Santiago de Cuba, Cuba.

Brandes, H. (2003). Geotechnical and Foundation Aspects. En W. Chen, & Scawthorn, C. (eds.) *Earthquake Engineering Handbook*. London: Taylor and Francis Group.

Caballero, L. F. (2017). *Procedimiento para la estimación del comportamiento del suelo ante fuerzas dinámicas. Caso de estudio: EMCOMED* (Tesis de Maestría). Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba.

Caballero, L. F. y Rivera, Z. (2015). Correlación geológica con la interpretación geofísica al noreste de la ciudad de Santiago de Cuba. *Revista Comunicações Geológicas*, 102(1), 15.

Chuy, T. J. (2014). Terremotos fuertes en el archipiélago cubano. En *Memoria del II taller CIGRD de la XVII Convención de Ingeniería y Arquitectura, CUJAE*. La Habana, Cuba.

Cuba. Oficina Nacional de Normalización NC. (2017). *NC 46:2017: Construcciones Sismorresistentes. Requisitos Básicos para el Diseño y Construcción*. La Habana, Cuba: autor.

Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) (2014). *Informe de investigación ingeniero-geológico en la Mini Fábrica de Cerveza Rey del Puerto* (Archivo de la ENIA Santiago de Cuba). Santiago de Cuba, Cuba.

Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) (2015). *Informe de investigación ingeniero-geológico en la Mini Fábrica de Cerveza Rey del Puerto* (Archivo de la ENIA Santiago de Cuba). Santiago de Cuba, Cuba.

Gualdrón Pernía, K. A. (2013). *Estudios de los riesgos técnicos aplicados al diseño y construcción de cimentaciones para máquinas* (Trabajo de Maestría). Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, España. Recuperado de http://oa.upm.es/21368/1/Tesis_master_Karla_Gualdron_Pernia.pdf

Instituto de Geología y Paleontología de Cuba (IGP). (2013). *Léxico estratigráfico de Cuba*. La Habana, Cuba: Servicio Geológico de Cuba, Ministerio de Energía y Minas.

Limaico, L. M. (2015). *Estudio dinámico y estático de cimentaciones que soportan equipo petrolero e industrial* (Tesis para optar por el título de ingeniero civil). Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ingeniería. Ecuador.

Organización Panamericana de la Salud (OPS). (2003). *Reducción del Daño Sísmico* (Guía para las Empresas de Agua). Oficina Regional para las Américas de la Organización Mundial de la Salud.

PickWin Software. (2011). Version 4.2.0.0. Jun 24 2011. OYO Corporation.

Salinas, J. A. (2014). *Estudio geotécnico-geofísico del comportamiento dinámico del subsuelo para el área metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México*. México: Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra.

Sanó, T. & Pugliese, A. (1991). *Pshake, analisi probabilistica della propagazione delle Onde sismiche*. Ente per le Nuove Tecnologie, L'Energia e L'Ambiente (ENEA), Direzione Sicurezza e Protezione.

Recibido: junio de 2017

Aprobado: diciembre de 2017