

La susceptibilidad a la licuefacción en el emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal, Cuba Occidental

Alexis Ordaz-Hernández.
José Ramón Hernández-Santana
Tomás Jacinto Chuy-Rodríguez
José Antonio García-Gutiérrez

Resumen

La investigación se enfoca en la evaluación de la susceptibilidad a la licuefacción de los sedimentos cuaternarios del emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal, provincia de Artemisa, Cuba. El área de estudio está próxima al epicentro estimado para el terremoto del año 1880, considerado el más fuerte en Cuba Occidental ($M=6,0$); este antecedente sísmico, unido al contexto geológico, sugiere condiciones favorables para la ocurrencia del fenómeno de licuefacción. En el estudio se aplicaron dos métodos: el primero, basado en las propiedades de la fracción fina del suelo, y el segundo, fundamentado en la comparación entre el esfuerzo cíclico de un sismo y la resistencia a licuar de los sedimentos estudiados. Los resultados definen los estratos de arenas arcillosas y las mezclas mal graduadas de grava, arena y arcilla, como los más susceptibles a licuar en la ciudad de San Cristóbal. Los mapas derivados del trabajo indican la distribución de las áreas potencialmente susceptibles a la licuefacción, lo cual es muy útil para la toma de decisiones respecto al ordenamiento urbano.

Palabras clave

Licuefacción; esfuerzo cíclico; fracción fina; sedimentos.

The soil liquefaction susceptibility in San Cristobal city- Western Cuba

Abstract

The objective of this investigation is to assess the level of susceptibility of the quaternary sediments present in the area of the San Cristobal city, province of Artemisa, Cuba. The area of study is near the epicenter of an earthquake occurring in 1880; which has been considered as the most powerful earthquake ever in the West of Cuba (M=6.0). The seismic activity combined with the geological context suggests favorable conditions for liquefaction occurrence. Two methods were applied during this investigation: one method is based on the properties of fine fraction soil and the other one is based on the comparison between the cyclic stress ratio and the liquefaction strength of the sediments. The results indicate that in the city of San Cristóbal, the layer of clayey sands and mixtures of poorly graded gravel, sand and clay are more liquefaction susceptible. The maps generated during the investigation indicate the distribution of the potential areas prone to liquefy. This is very useful information for decision making for urban development.

Keywords

Liquefaction; cyclic stress; fine fraction; sediments.

1. INTRODUCCIÓN

La actividad sísmica originada por la liberación súbita de la energía acumulada durante los procesos de deformación de la corteza terrestre no constituye un evento desconocido en el archipiélago cubano, donde se reconocen dos tipos de sismicidad: interplaca e intraplaca.

La primera está relacionada con la interacción entre las placas de Norteamérica y del Caribe, siendo la de mayor significado en el país, por su capacidad para generar sismos de 8,0 grados de magnitud Richter y haber sido responsable de 22 de los 28 terremotos de gran intensidad reportados en Cuba (Chuy 2003).

La segunda, asociada a fallas activas de tipo regional y local, se caracteriza por su baja frecuencia, focos someros y una magnitud de moderada a débil. Sin embargo, reportes históricos e instrumentales registrados entre el año 1528 y el presente, tanto en el occidente como en el centro de Cuba, evidencian la ocurrencia, asociada a este tipo de sismicidad, de seis sismos de gran intensidad, entre los que se encuentra el terremoto de 8 grados de intensidad MSK en San Cristóbal, actual provincia de Artemisa, en el año 1880 (Chuy 2003; Cotilla & Córdoba 2011).

Dentro de la visión regional y local de la sismicidad, sobre todo en cuencas sedimentarias (CS), el fenómeno de licuefacción ocupa uno de los focos de primordial atención. La licuefacción se produce cuando determinados tipos de suelos afectados por terremotos desarrollan elevadas presiones intersticiales de forma rápida (sin drenaje), dando lugar a una pérdida de la resistencia al corte y a la rotura del suelo, el que se comporta como un líquido.

A nivel mundial, este fenómeno constituye una de las direcciones de investigación de mayor relevancia, asociada con los estudios de peligrosidad sísmica (Aydan et al. 2004; Andrus et al. 2006 y Muhunthan & Worthen 2011). Las CS, generalmente con predominio de depósitos poco consolidados y en condiciones de aguas subterráneas someras, constituyen sitios muy favorables para el desarrollo de procesos de licuefacción que, en ocasiones, abarcan columnas sedimentarias de hasta 14 m, como ocurrió en el lago Sapanca, Turquía, en el año 1999, donde deposiciones de abanicos fluviales, rápidas y recientes, con notable saturación hídrica, favorecieron el desastre (Kanibir et al. 2006). Otros procesos similares han ocurrido en la localidad de Olancho, California, en substrato arenoso de poco espesor, con régimen hídrico subsuperficial favorable a la licuefacción (Holzer et al. 2010).

Desafortunadamente, debido a múltiples factores de tipo técnico, político, financiero y otros, una gran parte de las zonas de moderada y débil actividad sísmica no cuentan con evaluaciones de la susceptibilidad a efectos inducidos por sismos.

En Cuba, los estudios de susceptibilidad a la licuefacción han sido muy limitados, reduciéndose a la ciudad de Santiago de Cuba (Zapata 1996 y Vázquez 2005) y a la ciudad de La Habana (González & Pérez 2000). La necesidad de estos estudios retoma interés en aquellos asentamientos humanos asociados a zonas sismogénicas (ZS) importantes. Siendo este el caso de la ciudad de San Cristóbal, la cual está emplazada sobre los sedimentos de la cuenca Los Palacios y limitada al norte por la ZS más importante en el occidente cubano, la falla Pinar (Orbera et al. 1990).

Precisamente, el objetivo de este trabajo es determinar, dentro de la ciudad de San Cristóbal, cuáles son aquellas áreas donde confluyen las características geotécnicas que pueden propiciar la ocurrencia de la licuefacción. El área de estudio está comprendida entre las coordenadas $83^{\circ} 04' 33''$ y $83^{\circ} 02' 07''$ de longitud oeste y los $22^{\circ} 41' 37''$ y $22^{\circ} 43' 23''$ de latitud norte, con una superficie de 14 km² (Figura 1).

1.1. Constitución geológica

La ciudad de San Cristóbal descansa sobre los sedimentos de la cuenca cenozoica de Los Palacios. Esta estructura deprimida es un monoclinual que buza hacia el sur, con un ángulo muy suave de 7° a 8° , cuya columna estratigráfica está constituida por rocas sedimentarias y vulcano-sedimentarias, que sobreyacen discordantemente sobre un basamento ofiolítico. Este yace a unos 3 km de profundidad y está conformado por restos de corteza oceánica, representados por un complejo ultramáfico de gabros, serpentinitas, basaltos y otras rocas. Sobre el basamento descansan los depósitos de la Fm. Encrucijada, compuestos por basaltos, rocas vulcano-sedimentarias, limonitas y calizas del Cretácico inferior (Aptiano-Albiano), y sobre esta aparecen discordantemente los sedimentos terrígenos carbonatados de la Fm. Los Negros del Cretácico superior (Campaniano-Maestrichtiano), con un espesor de 500-700 m, que incluyen areniscas, aleurolitas polimícticas y vulcanomícticas, con intercalaciones de gravelitas y conglomerados vulcanomícticos y calizas micríticas con rudistas (Cabrera et al. 2004).

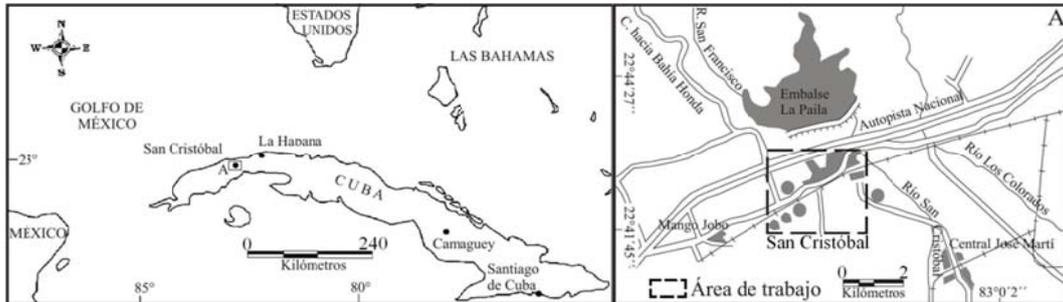


Figura 1. Ubicación geográfica de la ciudad de San Cristóbal, Cuba Occidental.

Sobre estos últimos sedimentos aparecen las formaciones geológicas cenozoicas con una yacencia horizontal y subhorizontal. Entre ellas, y en orden de sobreyacencia, se encuentran: (a) Fm. Loma Candela, representada por arcillas y areniscas calcáreas del Eoceno medio-superior; (b) Fm. Paso Real, compuesta por depósitos carbonatados y terrígenos del Mioceno inferior-medio, que yacen discordantemente sobre la Fm. Loma Candela, estando formados por calizas organógeno-detriticas con intercalaciones de areniscas, arcillas, arenas, calizas dolomitizadas y dolomías, con un espesor de 750 m. Finalmente, la parte superior de la columna estratigráfica está ocupada por conglomerados, gravas, arenas y arcillas arenosas débilmente cementados de la Fm. Guane del Plioceno-Pleistoceno inferior y de la Fm. Guevara de edad Pleistoceno inferior- medio (Cabrera & Peñalver 2001) y por acumulaciones cuaternarias de génesis fluvial (Figura 2).

Específicamente en el área de trabajo afloran los depósitos de las Fm. Guane y Guevara, ambas de origen aluvial-marino. Además, están presentes los sedimentos de origen fluvial, relacionados fundamentalmente con los planos de inundación y las terrazas bajas del río San Cristóbal. Los espesores de estas acumulaciones oscilan entre los 7 y 20 m, aproximadamente (Ordaz et al. 2012). El fenómeno de licuefacción difícilmente ocurre a más de 15 m de profundidad (Tuttle et al. 1990; Gonzales de Vallejo 2002 y Seed et al. 2003). Basado en este criterio, la evaluación de licuefacción en este trabajo se concentrará en los sedimentos aluviales-marinos y fluviales.

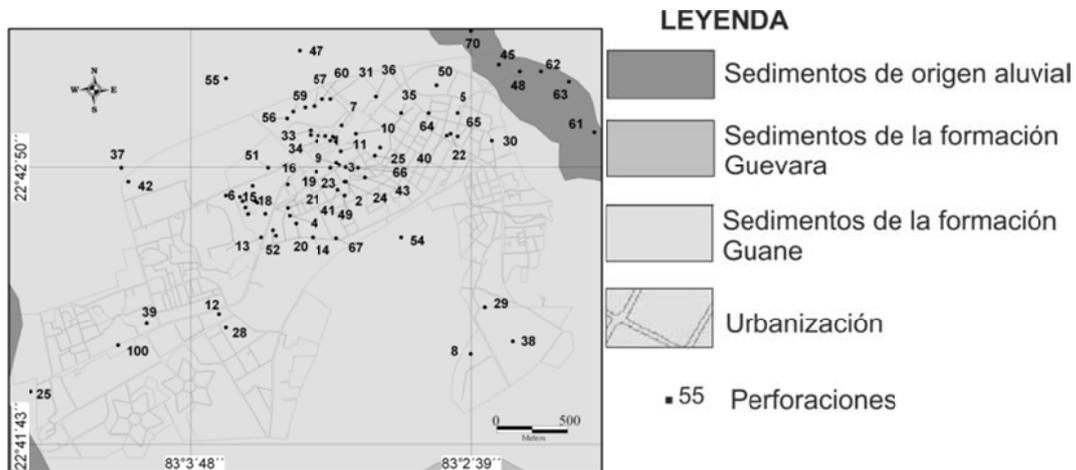


Figura 2. Constitución geológica del emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal y localización de las perforaciones. Escala original 1:100 000 (Instituto de Geología y Paleontología de Cuba 2004).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales topográficos y geológicos

El levantamiento y la interpretación ingeniero-geológica de la ciudad de San Cristóbal ocupó un área de 14 km², correspondientes a las hojas cartográficas 3584-II-d-2, 3584-II-d-3, 3584-II-d-5 y 3584-II-d-6, todas a escala 1:10 000 (Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía 1981). Los trabajos geológicos fueron generalizados y reinterpretados de la hoja g3584-85 San Cristóbal del mapa geológico a escala 1:100 000 (Instituto de Geología y Paleontología de Cuba 2004) y de la interpretación de imágenes satelitales del Landsat y de Google Earth.

El estudio inició con la recopilación de datos geotécnicos e hidrogeológicos para la confección del mapa de susceptibilidad a la licuefacción, a partir de 45 informes técnicos de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA). En total, se estudiaron 80 perforaciones por el método de penetración estándar, con 112 muestras de suelo (Figura 2), de las cuales se extrajeron: descripciones litológicas, niveles de agua someros, densidad natural, contenido de finos, límites de Atterberg y valores de N, donde N corresponde al número de golpes necesarios para hincar 30 cm la cuchara muestreadora, con un peso de golpeo de 63,5 kg y desde una altura de 76 cm. La profundidad de los sondeos osciló entre los 6 y 15 m.

2.2. Métodos

De forma general, son reconocidos cuatro grupos de métodos dirigidos a evaluar la susceptibilidad a la licuefacción:

1. Métodos que evalúan la resistencia a la licuefacción y la comparan con el esfuerzo cíclico del sismo (Seed & Idriss 1971 y Tokimatsu & Yoshimi 1983). En Cuba, fundamentalmente, han sido aplicados los métodos relacionados con este grupo (González & Pérez 2000 y Vázquez 2005), estos incorporan en sus análisis la evaluación de parámetros dependientes del terreno (densidad, N, niveles de agua someros, etc.) y del terremoto (aceleración máxima, magnitud, distancia al epicentro, etc). En otras partes del mundo hay varios ejemplos en la aplicación de estas metodologías en condiciones geológicas similares a las de San Cristóbal (Aydan et al. 2004; Kanibir et al. 2006; Bellana 2009 y otros).
2. Métodos que establecen un valor crítico de la resistencia a la penetración en función N del ensayo de penetración estándar (Taiping et al. 1984 y Zhou 1980)
3. Métodos basados en la aceleración máxima en superficie (Armijo 1995).
4. Métodos basados en las propiedades de la fracción fina del suelo (Brandes 2003)

Para el caso de estudio (ciudad de San Cristóbal), atendiendo a los datos geotécnicos disponibles (descritos en el apartado Materiales topográficos y geológicos), pueden aplicarse los métodos correspondientes al grupo 1 y 4. De acuerdo a la información de partida, ambos grupos de métodos son de viable reproducción en Cuba. Las propiedades geotécnicas involucradas se encuentran almacenadas en los archivos de las empresas vinculadas con las investigaciones ingeniero-geológicas (Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, Recursos Hidráulicos y otras similares). Las variables relacionadas con los terremotos generalmente se extraen de las normas para construcciones sismorresistentes, en el caso cubano la NC 46:1999.

El método de Brandes (2003), basado en las propiedades de la fracción fina del suelo, se empleó como una primera aproximación. Este tipo de métodos se enfocan en el estudio de la capacidad de generación de presión de poros producidos en los suelos finos, no interviniendo variables relacionadas con las acciones que generan la ocurrencia del fenómeno. Posteriormente se aplicará el método Seed & Idriss (1971), el cual posee las ventajas descritas con anterioridad.

Susceptibilidad a la licuefacción de acuerdo con el contenido de finos
Existen algunos parámetros que indican qué suelos pueden o no ser susceptibles a la licuefacción. Las propiedades físico-mecánicas más empleadas son: contenido de finos (CF), límite líquido (LL), contenido de humedad (w) y el número de golpes (N) obtenido en el ensayo de penetración estándar (SPT).

Para la ciudad de San Cristóbal se implementó la propuesta de Brandes (2003), una versión modificada del método de Andrews & Martin (2000). Esta propuesta metodológica se sustenta en los contenidos de arcilla de los suelos y su límite líquido (Tabla 1).

Tabla 1. Criterio para la evaluación de licuefacción de suelos con presencia de finos (Brandes 2003)

	Límite líquido < 32	Límite líquido ≥ 32
Fracción de arcilla < 10%	Susceptible (a)	Pudiera ser susceptible (b) (se recomienda ensayos adicionales)
Fracción de arcilla ≥ 10 %	Pudiera ser susceptible (b) (se recomienda ensayos adicionales)	No susceptible (c)

Susceptibilidad a la licuefacción. Método de Seed & Idriss.

Según el método, el suelo licuará si la razón de tensión tangencial cíclica (CSR), producida por un sismo, es mayor que la resistencia tangencial del suelo:

$$CSR = \frac{\tau_{cm}}{\sigma'_v} = 0.65 \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \frac{a_{max}}{g} r_d$$

Donde:

τ_{cm} = esfuerzo cortante cíclico medio;

σ_v = tensión total;

σ'_v = tensión efectiva;

a_{max} = aceleración máxima horizontal.

Según la norma cubana (NC 46:1999), los suelos de consistencia media del municipio de San Cristóbal presentan una aceleración máxima horizontal de 0,09 g, una probabilidad de ocurrencia del 15 % en un periodo de retorno de 50 años; g = aceleración de la gravedad.

El factor de reducción (r_d) se determinó mediante las modificaciones hechas al método por Youd & Idriss (2001), donde:

$r_d=1,0-0,00765 z$ para $z \leq 9,15$ m; $r_d=1,174-0,0267z$ para $9,15 < z \leq 23$ m

Definidos los valores de CSR, según la expresión anterior, y $(N_1)_{60}$ (valor SPT normalizado), se puede precisar si es posible la licuefacción con el empleo de la Figura 5, para una magnitud de terremoto pronóstico.

$(N_1)_{60}$ es el valor SPT, normalizado para una presión aproximada de 10 t/m^2 y una energía eficaz de golpeo del 60 %:

$$(N_1)_{60} = N C_N C_E C_B C_R C_S$$

Donde:

N =número de golpes del SPT; $C_N=(P_a/\sigma'_v)^{0.5}$. C_N no debe exceder 1,7
 P_a = presión atmosférica ($10 \text{ t/m}^2 \approx 100 \text{ kPa}$); C_E - varía en función de la energía de golpeo del ensayo: para el tipo *donut* $0,5 < C_E < 1,2$, para el tipo *automático* $0,8 < C_E < 1,3$ y para el tipo *safety* $0,7 < C_E < 1,7$; C_B - indica la influencia del diámetro del sondeo: siendo igual a 1,0 para: $65 \text{ mm} < \emptyset < 115 \text{ mm}$; C_R - varía en función de la longitud del varillaje (L): para $L < 3$ corresponde un $C_R=0,75$, para $4 \text{ m} < L < 6 \text{ m}$, $C_R=0,85$ y para $10 \text{ m} < L < 30 \text{ m}$, $C_R=1,0$; finalmente $C_S=1,0$ para tomar muestras estándar.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con la aplicación del criterio de Brandes (2003), la ciudad de San Cristóbal se emplaza mayormente sobre sedimentos no susceptibles a licuar (93 % de la superficie), los sedimentos medianamente susceptibles cubren el 6 % del área y los susceptibles apenas el 1 % (Figura 3). De forma general, solo en pequeños sectores coincidieron las dos condiciones (límite líquido y fracción de arcilla) para catalogarlos como suelos susceptibles. En estos sectores la columna de suelos está conformada, predominante, por arenas, formando estratos de hasta dos metros de espesor, intercalados con lentes de arcilla de 1,5 m.

Ligeramente más propagados espacialmente se encuentran los suelos medianamente susceptibles. Estos coinciden aproximadamente con las terrazas de inundación del río San Cristóbal, en el extremo noreste del área, aunque también se identificaron en algunos sectores dentro de la Fm. Guane (Figuras 3 y 4).

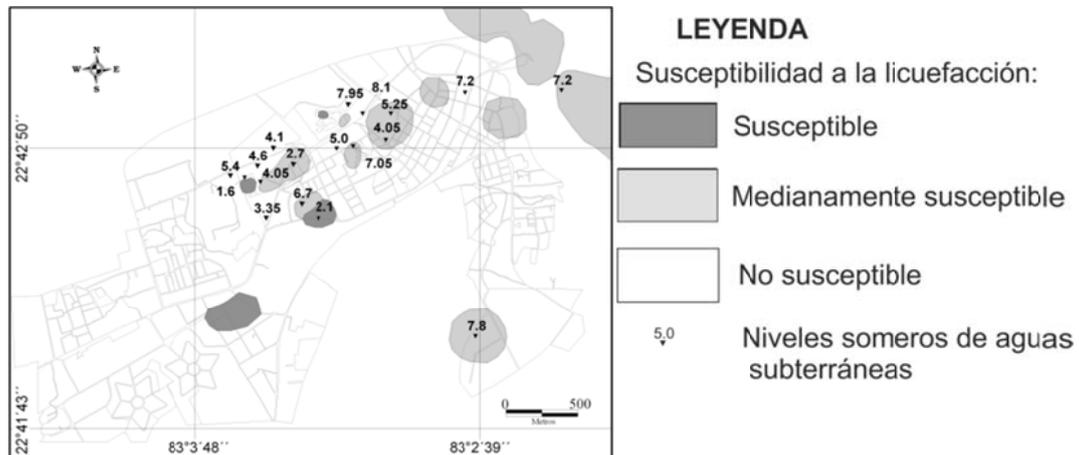


Figura 3. Susceptibilidad a la licuefacción para la ciudad de San Cristóbal, basado en las propiedades de la fracción fina del suelo.

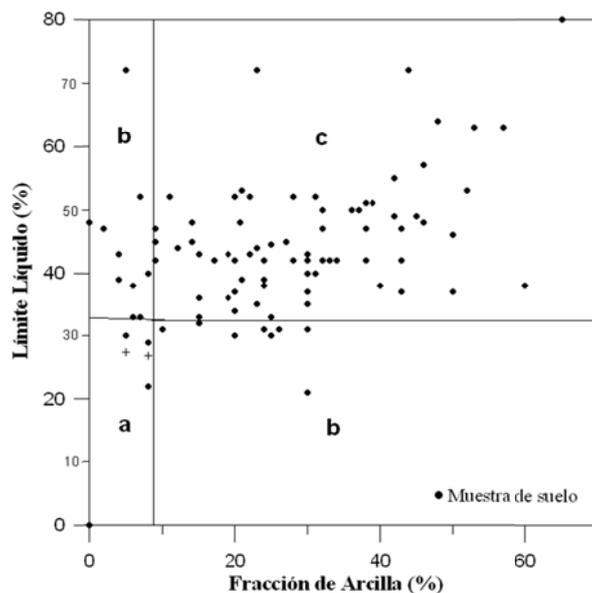


Figura 4. Comportamiento de los suelos en la ciudad de San Cristóbal. Donde: a - Susceptible, b - Medianamente susceptible (requiere estudios adicionales) y c - No susceptible.

Para lograr un mapeo más preciso de los suelos susceptibles a la licuefacción se aplicó el método de Seed & Idriss (1971). Se calculó la razón del esfuerzo cortante cíclico y el valor SPT normalizado en cada perforación. El análisis se efectuó a las profundidades de 1, 2 y 3 m en las 80 perforaciones estudiadas; los cimientos de las construcciones en el sector raras veces sobrepasan esta profundidad. En la Figura 5 se

muestra el comportamiento de los suelos para diferentes magnitudes de terremotos.

Los resultados mostrados en la Figura 5 reafirman el predominio de los suelos no licuables, ya pronosticado por el método de Brandes (2003). El método de Seed & Idriss redujo el área ocupada por los suelos licuables (Figura 6). Además, permitió un pronóstico de elevado peligro para unos 900 m² de superficie, en la localidad de La Muralla (Figuras 5 y 6). Los suelos para este sector deben licuar frente a terremotos de magnitud comprendida entre los 5,3 y 6,0 grados, ya en 1880 el área experimentó uno de 6,2 grados. El sector, clasificado como susceptible, al oeste del centro histórico (900 m²), requiere de especial atención (Figura 7), sobre ellos yacen construcciones de elevada vulnerabilidad (muros de adobe) que datan de inicios del siglo XIX.

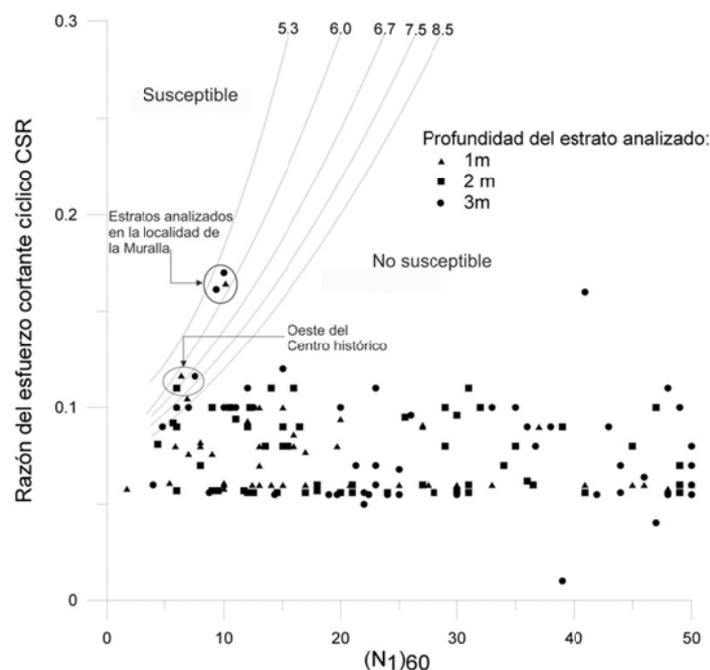


Figura 5. Relación entre el número de golpes normalizado $(N_1)_{60}$ y la razón de esfuerzo cortante cíclico CSR para los suelos de San Cristóbal. Ábaco propuesto por Ho & Kavazanjian (1986).

En general, es difícil establecer reglas en la disposición de los estratos licuables. Son muy comunes las discontinuidades (espesor y profundidad de yacencia) de los sedimentos recientes poco consolidados, que cubren la cuenca de Los Palacios y, en particular, el área que corresponde a San Cristóbal. Sin embargo, se comprueba la susceptibilidad a licuar, en el caso de las arenas arcillosas, SC según el

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y las mezclas mal graduadas de grava, arena y arcilla (GC), cuando coexisten con niveles someros de aguas subterráneas que disminuyen la presión efectiva. La presencia de acuíferos cuaternarios cercanos a la superficie es un elemento característico del área (Ramos *et al.* 1993).

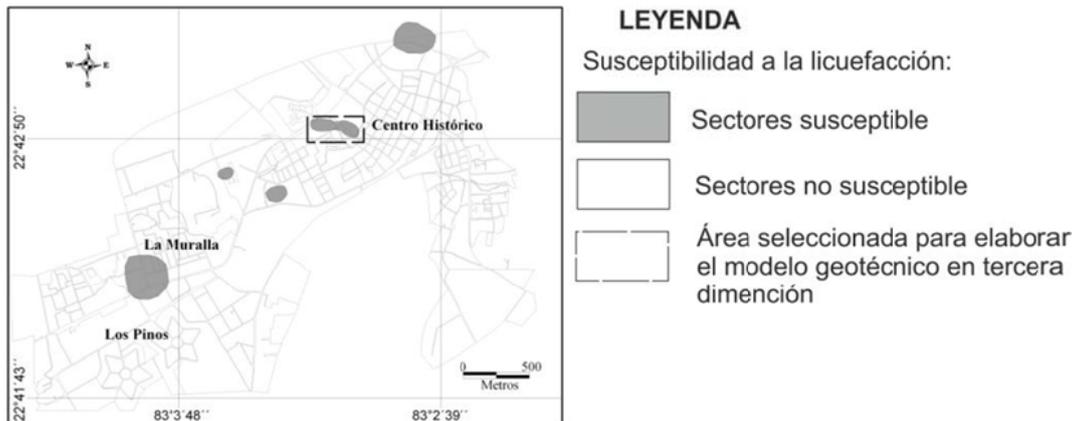


Figura 6. Mapa de susceptibilidad a la licuefacción para la ciudad de San Cristóbal, según la aplicación del método de Seed & Idriss (1971).

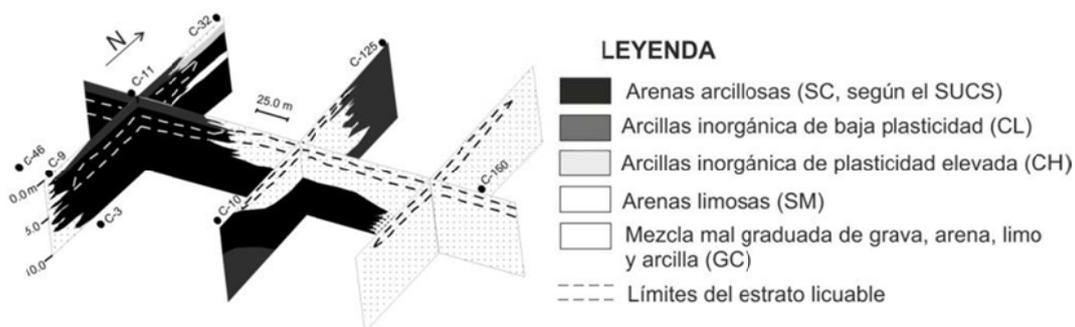


Figura 7. Modelo geotécnico en tercera dimensión de un área potencialmente licuable en el sector oeste del centro histórico de San Cristóbal. SUCS: Sistema unificado de clasificación de suelos.

CONCLUSIONES

La presencia de sedimentos no consolidados constituye un primer indicio de condiciones ingeniero-geológicas favorables a la ocurrencia del fenómeno de licuefacción. En este sentido, se demuestra una constante discontinuidad en los estratos cuaternarios del área, muy común en los sedimentos poco consolidados de las cuencas sedimentarias, sugiriendo la necesidad de estudios en detalle para obras civiles de importancia (puentes, emplazamiento de grupos electrógenos y otros).

Mediante la aplicación del método de Seed & Idriss (1971), en los suelos del emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal se logra definir como estratos licuables, a las arenas arcillosas y las mezclas mal graduadas de grava, arena y arcilla; SC y GC, respectivamente, según sus siglas en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Según la aplicación de los métodos de Brandes (2003) y Seed & Idriss (1971), se estima un área susceptible a licuar del 1 % y 2 %, respectivamente. Sin embargo, se debe prestar especial atención a los sectores licuables presentes en la localidad de La Muralla y en el centro histórico. En este último, se calcula un área de 900 m² susceptibles a la licuefacción, donde predominan construcciones del siglo XIX de alta vulnerabilidad.

REFERENCIAS

- ANDREWS, D. C. A. & MARTIN, G. R. 2000: Criteria for Liquefaction of Silty Soils. Proc. In: 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand: 312-320.
- ANDRUS, R. D.; FAIRBANKS, C. D.; ZHANG, J.; CAMP, W. M.; CASEY, T. J.; CLEARY, T. J. & WRIGHT, W. B. 2006: Shear-Wave Velocity and Seismic Response of Near-Surface Sediments in Charleston. *Bulletin of the Seismological Society of America* 96: 1 897-1 914.
- AYDAN, Ö.; HAMADA, M.; BARDET, J. P.; ULUSAY, R. & KANIBIR, A. 2004: Liquefaction induced lateral spreading in the 1999 Kocaeli earthquake, Turkey: Case study around the hotel Sapanca. In: 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B. C., Canada, 1-6.
- BELLANA, N. 2009: *Shear Wave Velocity as Function of SPT Penetration Resistance and Vertical Effective Stress*. Thesis of Master of Science. University of California, 90 p.
- BRANDES, H. G. 2003: *Geotechnical and Foundation Aspects*. University of Hawaii, Honolulu [Handbook], 61 p.
- CABRERA, M. & PEÑALVER, L. L. 2001: Contribución a la estratigrafía de los depósitos cuaternarios de Cuba. *Cuaternario & Geomorfología* 15: 37-49.
- CABRERA, J.; GUARDADO, R.; PELÁEZ, R. & GONZÁLEZ, N. 2004: Regionalización hidrogeológica de la provincia de Pinar del Río en un SIG. *Minería y Geología* 20(1-2): 24-31.
- CHUY, T. J. 2003: Macrosísmica de Cuba: su aplicación en los estimados de peligrosidad sísmica. *Minería y Geología* 19(1-2): 43-50.
- COTILLA, M. & CÓRDOBA, D. 2011: Study of earthquake of the January 23, 1880, in San Cristobal, Cuba and the Guane Fault. *J. Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 6: 496-518.

- GONZÁLEZ, B. & PÉREZ L. D. 2000: Escenarios de peligro sísmico y de fenómenos geotécnicos. En: 2do Taller de Prevención de Desastres, 1-17.
- HO, C. L. & KAVAZANJAN, E. 1986: Probabilistic study of SPT liquefaction analysis. In: Conferencia, Blacksburg, Virginia, 602-616.
- GONZALES DE VALLEJO, L. I. 2002: *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación, 744 p.
- HOLZER, T. L.; JAYKO, A. S.; HAUSSON, E.; FLETCHER, J. P. B.; NOCE, T. E.; BENNETT, M. J.; DIETEL, C. M. & HUDNUT, K. W. 2010: Liquefaction caused by the 2009 Olanca, California (USA), M 5.2 earthquake. *Engineering Geology* 116: 184-188.
- INSTITUTO CUBANO DE GEODESIA Y CARTOGRAFÍA. 1981: Hojas cartográficas 3584-II-d-2, 3584-II-d-3, 3584.II-d-5 y 3584-II-d-6.- Escala 1:10 000. La Habana.
- INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y PALEONTOLOGÍA. 2004: Mapa geológico digital, Hoja Los Palacios 3583.- Escala 1:100 000. La Habana.
- KANIBIR, A.; ULUSAY, R. & AYDAN, Ö. 2006: Assessment of liquefaction and lateral spreading on the shore of Lake Sapanca. *Engineering Geology* 83: 307-331.
- MUHUNTHAN, B. & WORTHEN, D. L. 2011: Critical state framework for liquefaction of fine grained soils. *Engineering Geology* 117: 2-11.
- OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. 1999: Construcciones sismo-resistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción (Norma Cubana-46:1999). La Habana, 101 p.
- ORBERA, L.; GONZÁLEZ, B.; CHUY, T. & ORO, J. 1990: Investigaciones sísmicas en la región de emplazamiento del Centro de Investigaciones Nucleares. Secretaría Ejecutiva para Asuntos Nucleares de Cuba 1, 344 p.
- ORDAZ, A.; CHUY, T. J.; HERNÁNDEZ-SANTANA, J. R. & GARCÍA, J. A. 2012: División geológico-geotécnica aplicada a la zonación sísmica urbana: San Cristóbal, Cuba Occidental. *Cuaternario y Geomorfología* 26: 89-104.
- RAMOS, G.; GARCÍA, J. A. & SARMIENTO, J. 1993: Túneles populares San Cristóbal. Archivo ENIA, Pinar del Río, 60 p.
- SEED, H. B. & IDRIS, I. M. 1971: Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Jl. Soil Mech. F. Div. ASCE* vol. 97, SM 7.
- SEED, R. B.; CETIN, K. O. & MOSS, R. E. 2003: Recent advances in soil liquefaction. [Handbook], 72 p.
- TAIPING, Q.; CHENCHUN, W.; LUNIAN, W. & HOISHAN, L. 1984: Liquefaction risk evaluation during earthquakes. Proceedings of the International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, 15 p.
- TUTTLE, M.; LAW, K. T.; SEEBER, L. & JACOB, K. 1990: Liquefaction and Ground Failure Induced by the 1988 Saguenay, Quebec, Earthquake. *Canadian Geotechnical Journal* 27: 580-589.

- TOKIMATSU, K. & YOSHIMI, Y. 1983: Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content. *Soil and Foundations* 2: 1-12.
- VÁZQUEZ, J. C. 2005: Utilización de parámetros ingeniero geológicos en la precisión de la licuación. Caso Santiago de Cuba. En: 1ra Convención de las Geociencias y la Química aplicadas a la construcción, 1-8.
- YOUNG, T. L. & IDRISSE, I. M. 2001: Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127: 297-313.
- ZAPATA, J. A. 1996: *Utilización de variantes metodológicas de microzonación sísmica en la ciudad de Santiago de Cuba*. Tesis doctoral. CENAI, Santiago de Cuba, 111 p.
- ZHOU, S. 1980: Evaluation of the liquefaction of sand by static cone penetration test. In: 7th WCEE, Istanbul, Turkey, 1-18.

Alexis Ordaz-Hernández

ordaz1978@hispanista.com

Máster en Geología. Profesor Asistente.
Universidad de Pinar del Río, Cuba.

José Ramón Hernández-Santana

santana@igg.unam.mx

Doctor en Ciencias Geográficas. Investigador Titular A. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.

Tomás Jacinto Chuy-Rodríguez

chuy@cenais.cu

Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Titular.
Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Cuba.

José Antonio García-Gutiérrez

jagarcia@enia.vega.inf.cu

Máster en Geología. Profesor Asistente.
Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, Cuba.