

# Escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el municipio de Guantánamo\*

**Leonor Villalón Poulut**

lvpoulut@geologia.ismm.edu.cu

**Yilian de la Caridad Torres Turcas**

ytturcas@geologia.ismm.edu.cu

**Olga Contreras Endi**

ocendi@geologia.ismm.edu.cu

Especialidad: Ingeniería Geológica

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

**Resumen:** Se delimitaron los escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el municipio de Guantánamo. La investigación tuvo el objetivo de evaluar las condiciones ingeniero-geológicas de los suelos de este municipio para determinar su potencial de licuefacción. Se analizó la posibilidad de amplificación de las ondas sísmicas teniendo en cuenta el efecto de sitio, a partir de las propiedades físico-mecánicas del área de estudio. El sistema de indicadores aplicado incluyó parámetros ingeniero-geológicos que permitió caracterizar el área de estudio. Como resultado se delimitan escenarios susceptibles a la licuefacción en el municipio de Guantánamo para magnitudes sísmicas iguales y mayores a seis grados.

**Palabras clave:** Licuefacción; procedimiento; sismos; susceptibilidad sísmica.

---

\* Trabajo tutorado por la M. Sc. Liuska Fernández Diéguez  
Recibido: 6 mayo 2018/ Aceptado 12 noviembre 2018.

## **Delimitating susceptible soils to liquefaction provoked by large earthquakes in Guantánamo municipality**

**Abstract:** The susceptible soils to liquefaction provoked by large earthquakes in Guantánamo municipality were delimited. The aim of this research is to evaluate the engineer-geological conditions of the soils of this municipality to determine their liquefaction potential. The possibility of amplifying seismic waves was analyzed taking into account the site effect, from the physical-mechanical properties of the study area. It was applied an indicators system that included engineer-geological parameters that allowed characterizing the study area. As a result, susceptible soils to liquefaction in Guantánamo municipality are defined for seismic magnitudes equal to and greater than six degrees.

**Key words:** Liquefaction; process; earthquakes; seismic susceptibility.

## Introducción

Los terremotos están entre los eventos geológicos más conocidos, la actividad sísmica que se produce en la litosfera terrestre está inducida por la liberación súbita de la energía acumulada en las rocas. Esta energía se libera cuando los esfuerzos a los que está sometida la litosfera producen el movimiento de una falla. Estos fenómenos naturales constituyen una amenaza severa, a causa de las irregularidades de los intervalos temporales en que se manifiestan y la imposibilidad de predecir con exactitud el momento de su ocurrencia.

La amenaza sísmica tiene el potencial de producir una pérdida sobre las personas, sus bienes y el entorno, en general, los cuales poseen una determinada vulnerabilidad según ciertas características que los hacen susceptibles de ser afectados o de sufrir efectos adversos.

Durante los terremotos el movimiento del terreno puede causar una pérdida de la firmeza o rigidez del suelo que da como resultados el desplome de edificaciones, deslizamientos de tierra, daños en las tuberías, entre otros. El proceso que conduce a esta pérdida de firmeza o rigidez es conocido como licuación del suelo.

La licuefacción representa todos los fenómenos donde se dan excesivas deformaciones o movimientos como resultado de transitorias o repetidas perturbaciones de suelos saturados poco cohesivos (Perucca, Pérez & Navarro, 2006).

La licuefacción ha ocurrido a lo largo de la historia sísmica del país, no estando exento de volver a ocurrir, ya que existen ambientes sedimentarios propicios para que se manifieste por sollicitación sísmica en cercanía de los grandes sistemas de fallas activas que cruzan la región oriental de Cuba, donde se ubican ciudades de gran importancia.

La mayoría de los estudios encaminados a la ocurrencia de este fenómeno en Cuba se han realizado en la provincia de Santiago de Cuba debido al gran riesgo sísmico que presenta, pero la provincia de Guantánamo también posee un alto riesgo sísmico, ya que el área de estudio se encuentra muy cerca de la zona sismogeneradora Bartlett-Caimán capaz de generar sismos fuertes. Más del 60 % de los sismos fuertes reportados en el país han tenido su epicentro en Santiago de Cuba.

Los movimientos tectónicos recientes se caracterizan por movimientos verticales responsables de la modelación del sistema de horts y grabens, pero sin restar importancia a la influencia que tienen sobre Cuba y, más remarcada, sobre el sector de Cuba Oriental, los desplazamientos horizontales que ocurren a través de la falla Oriente (Bartlett-Caimán) desde el Eoceno Medio-Superior, generándose un campo de esfuerzos de empuje con componentes fundamentales en las direcciones norte y noreste, que, a su vez, provocan desplazamientos horizontales de reajuste en todo el Bloque Oriental Cubano y que deforman las antiformas del foredeep, en su porción oriental (Tutalení, 2013).

En este trabajo se evalúan las condiciones ingeniero-geológicas de los suelos en el municipio de Guantánamo para saber si son licuables ante un sismo de gran magnitud.

**Sistema de indicadores aplicados para el estudio de la susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en la región oriental de Cuba** (propuesto por Fernández-Diéguez *et al.*, 2016).

Para evaluar el potencial de licuefacción se llevó a cabo mediante un sistema de indicadores en el cual se unifican los parámetros propuestos por diversos autores (Seed & Idress, 1971, 1982); (Wen-shao, 1980) y requisitos obtenidos de la revisión de análisis de casos, donde se propuso con un orden lógico los parámetros que deben cumplirse para que un suelo sea potencialmente licuable. Se hizo difícil determinar los parámetros debido a los diferentes criterios y diferentes factores que se proponían. Después de una exhaustiva revisión de las metodologías formuladas se elaboró una propuesta que brindó un orden lógico y permitió cuantificar el fenómeno, a partir de todo lo antes expuesto se propone analizar las condiciones siguientes:

- **Condiciones geológicas**

La primera condición que debe cumplir un suelo para que sea licuable es que corresponda a depósitos jóvenes (menos de 10 000 años) a las que pertenecen las formaciones del Cuaternario (Holoceno). Debe cumplir, además, que la relación entre el estrato licuable y el no licuable sea menor que 1. Coincidiendo también que el estrato de suelo no licuable encima del licuable debe ser menor de 8,0 m. Para la selección de los sectores se hace una búsqueda en el mapa geológico y se seleccionan las formaciones pertenecientes al cuaternario que están representadas por el color amarillo en sus diferentes variantes.

### • Sismicidad

Otro factor importante para que pueda licuar un suelo es la sismicidad, para ello se analiza la cercanía con una zona sismogeneradora capaz de generar sismos fuertes o magnitud mayor de 5,5 y las aceleraciones de las partículas lleguen a ser iguales o superior  $0,2g/cm^2$ . Para la selección se tiene en cuenta la norma Construcciones Sismo resistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción de Cuba de 1999 (propuesta 2013) en la que aparece un mapa con la zonación de las aceleraciones esperadas para cada municipio de Cuba, además de la tabla de peligro sísmico en las diferentes zonas del territorio nacional donde se muestra el periodo de recurrencia esperado, la aceleración sísmica y la zona sísmica a la que pertenece cada región. Esta información puede ser obtenida, además, de los informes de especialistas del CENAIIS.

### Profundidad del nivel freático

Otro factor importante a tener en cuenta son los valores del nivel freático en el área. Este debe estar cerca de la superficie, se considera potencialmente licuable cuando está a menos de 3 m, por lo general, ocurre a profundidades menores de 9 m; a profundidades mayores de 15 m no se ha reportado la licuefacción de los suelos. Los valores del nivel freático se obtienen a partir de las calas perforadas en el área de estudio.

### Condiciones ingeniero-geológicas

Lo primero que se cumple es que sean depósitos recientes poco consolidados o material de relleno. De los informes ingeniero-geológicos efectuados por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) se seleccionarán las propiedades físicas y mecánicas. Se confecciona una base de datos con los principales parámetros que influyen para que un suelo sea licuable, entre los que se encuentran (límite líquido, índice de plasticidad, humedad natural, densidad húmeda y densidad seca, porcentaje de partículas finas, cortante, saturación, compactación del suelo a partir del N de spt entre otras).

Se tiene en cuenta:

- Porcentaje de partículas finas  $\leq 15$
- Límite líquido  $\leq 35 \%$
- Contenido natural de agua  $> 0,9 LL$

- Índice de liquidez  $< 0,75$
- Forma de las partículas. Principalmente redondas
- N de SPT  $< 20$  golpes
- Compacidad relativa (Cr)  $< 75 \%$

Según las características propias de los suelos potencialmente licuables se pueden agrupar como:

- arena fina
- arena media
- arena limosa
- arena con bajo porcentaje de arcilla
- arena con bajo porcentaje de materia orgánica o
- arena con partículas
- sedimentos eluviales, llanuras aluviales y zonas de manglar
- uniformidad de la arena  $C_u < 5$ .

### **Criterios para la selección de escenarios susceptibles a la licuefacción**

Los escenarios propuestos coinciden con varios criterios (Stewart & Kramer, 2004) para determinar si un suelo es licuable o no. El primero que se analizó fue el criterio histórico. No existen reportes de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en el municipio de Guantánamo. Se ha observado que la licuefacción ocurre frecuentemente en los mismos lugares cuando las condiciones del sitio se mantienen constantes, es por esto que la evidencia de la ocurrencia histórica de licuefacción puede ser utilizada como prueba de susceptibilidad en un determinado lugar.

Se tuvo en cuenta la cercanía a una zona sismogeneradora, la probabilidad de ocurrencia y el período de recurrencia de un sismo fuerte así como la sismicidad del área y las posibles amplificaciones de las aceleraciones sísmicas dado el efecto de sitio.

Se analizaron las condiciones geológicas como otro criterio de importancia. Algunos de los escenarios propuestos están cerca de depósitos fluviales y deltaicos, además, hay pequeña representación de depósitos de abanicos aluviales, playas y estuarios, aunque estos no son tan susceptibles como en los casos anteriores mencionados, pero pudieran ser susceptibles. Los suelos de los escenarios propuestos se encuentran semisaturados y saturados dado la pequeña profundidad del nivel freático.

Se analizó, además, la edad de los depósitos. Las áreas que se estudiaron pertenecen a formaciones del Paleógeno donde los estratos son poco consolidados y de poca densidad. Se tuvo en cuenta que los depósitos fueran de arena arcillosa, arena limosa, entre otras con poco contenido de finos que estuvieran uniformemente gradadas y limpias, compuestas de partículas redondeadas preferiblemente. Se analizó la posibilidad de que fueran muelles, tierra recuperada, canal de río abandonado, relleno límite entre las arenas y las tierras bajas, relleno sobre pantano o ciénaga y/o relleno de tierra recuperada por drenaje.

## **Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio de Guantánamo**

### **Condiciones geológicas**

En casi toda la extensión del municipio se presenta la formación San Luis, representado por una gran variedad de rocas clásticas, terrígenas, carbonatadas, de granulometría variada desde las arcillas hasta los conglomerados. Esta formación se caracteriza por el predominio de areniscas de grano fino, medio y de aleurolitas carbonatadas, las cuales, en conjunto constituyen más del 90 % de la formación.

Las areniscas generalmente son de color gris, gris pardusco y pardo (intemperizadas). Están bien estratificadas y el espesor de las capas varía desde algunos centímetros hasta 20–40 cm. Generalmente son de grano fino a medio, a veces grueso, siendo estas de grano fino vulnerables a que ocurra el fenómeno de licuefacción.

Otra formación presente es Camarones, constituida por conglomerados polimícticos, de cantos subredondeados y redondeados, y areniscas polimícticas, de grano grueso. La matriz del conglomerado es de composición arenosa y polimíctica. Estas litologías gruesas transicionan hasta areniscas de grano medio, pero mantienen su composición.

La formación Charco Redondo tiene calizas compactas organodetríticas, fosilíferas, de color variable, predominando los tonos blancos a grises verdosos, poco probable a que exista algún fenómeno de licuefacción.

Formación Jamaica: conglomerados polimícticos de matriz arcilloso-carbonática, con clastos más o menos redondeados y de selección mediana, que corresponden a calizas, metavolcanitas, silicitas y ultramafitas. Pueden contener intercalaciones finas de

arenas y limos. El componente arcilloso de la matriz es predominantemente esmectita, aunque también están presentes las mica-esmectitas, cloritas e hidromicas, poco probable que exista licuefacción.

La formación Maquey se presenta con alternancia de areniscas, limolitas y arcillas calcáreas de color gris y margas de color blanco a crema, que contienen intercalaciones de espesor variable de calizas biodetríticas, arenáceas y gravelíticas de colores blanco amarillo y crema, ocasionalmente amarillo grisáceo, donde en estas zonas donde predominen las areniscas pudiera ocurrir fenómenos de licuefacción. En las zonas cercanas al litoral existen depósitos aluviales y palustres, todos estos vulnerables a que se produzca algún fenómeno de licuefacción (Colectivo de Autores, 2013), tal como se muestra en la Figura 8.

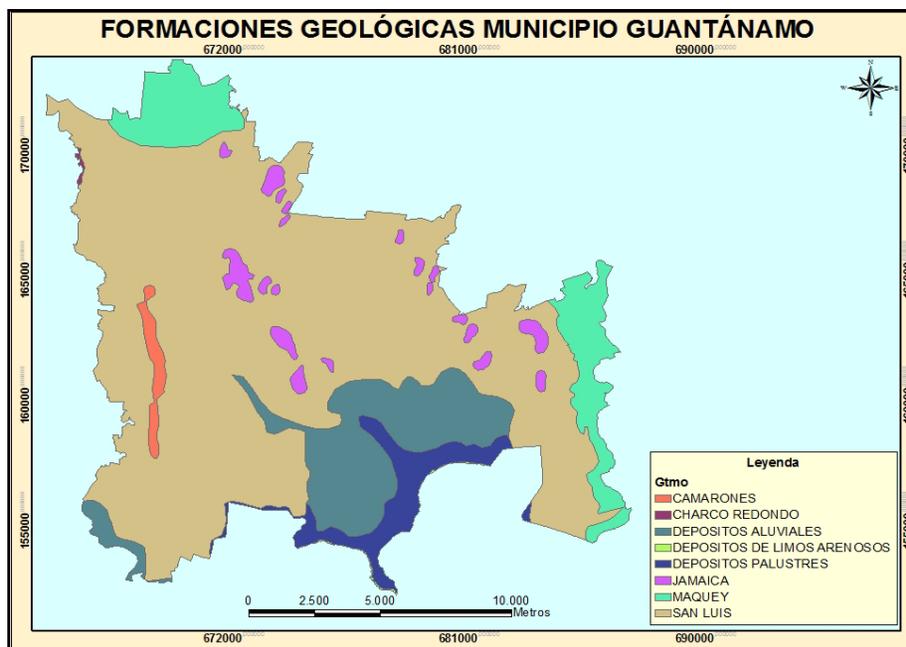


Figura 8. Mapa geológico del municipio de Guantánamo.

## Sismicidad

El municipio de Guantánamo pertenece a la zona sísmica 4, de riesgo sísmico alto, que puede ocasionar daños significativos en las construcciones, por ello se deben tomar medidas sismorresistentes en las estructuras y obras en función de la categoría ocupacional de las mismas y el nivel de protección definido según la probabilidad de exceder un sismo de diseño. Los valores de la aceleración espectral horizontal máxima del terreno para el cálculo  $S_a$  estarán entre 0,50 g-0,80 g para periodos cortos ( $S_s$ ) y

entre 0,20 g-0,30 g para periodos largos ( $S_1$ ) (NC 46-2013 propuesta 0 (proyecto de norma)).

### **Características hidrográficas**

Se destacan importantes cuencas hidrográficas superficiales, como la del Guaso, entre cuyos afluentes principales están el Bano y sus arroyos afluentes: El Salado, Mal Paso, Monacal y Cacao. Gran parte de su curso (más de 9 km) es subterráneo. Se sumerge en el sistema cársico La Tagua (La Deseada, El Avispero, Hondones) y renace en la caverna El Campanario, para continuar su curso superficialmente hasta desembocar en la ensenada de Manatí (bahía de Guantánamo). La profundidad del nivel freático varía entre 0,40 m y 3,60 m.

### **Condiciones ingeniero-geológicas**

Los estudios realizados por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) para realizar obras constructivas dieron como resultado los principales tipos de suelo que se encuentran en el área. Se identificaron siete tipos de suelo a partir de la información de las calas realizadas. Fueron clasificados como:

SC: Arena arcillosa

CL: Arcilla de baja plasticidad

GC: Grava arcillosa

CH: Arcilla de alta plasticidad

OH: Arcilla orgánica de alta plasticidad

GM3: Arenisca y aleurolitas polimícticas con cemento calcáreo medianamente meteorizadas

GM4: Arenisca y aleurolitas polimícticas con cemento calcáreo fuertemente meteorizado

ML: Limo

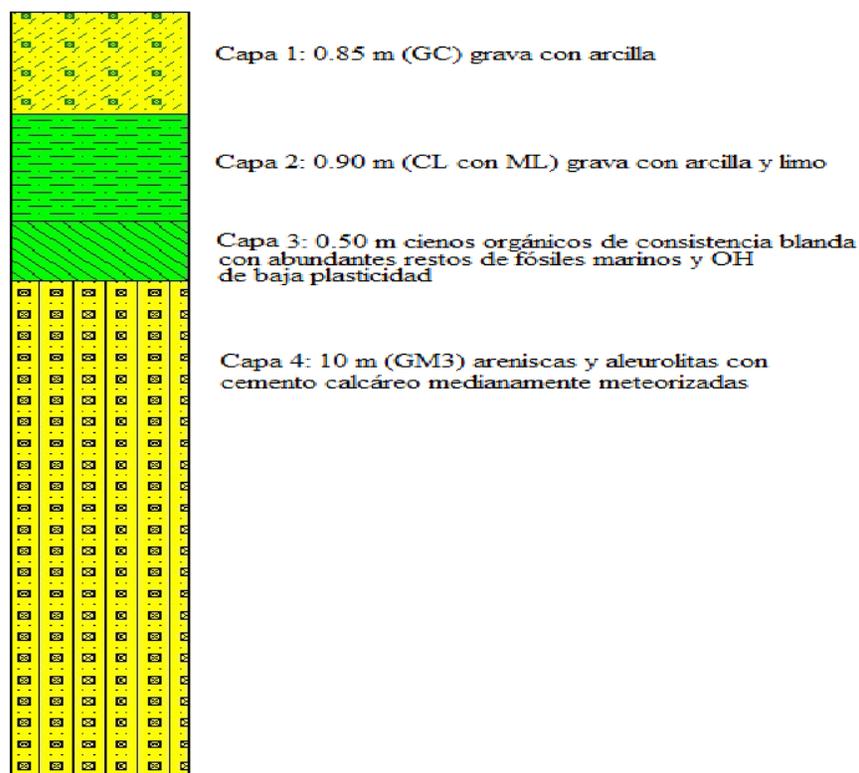


Figura 1. Columna litoestratigráfica esquemática del municipio de Guantánamo.

## Conclusiones

Se aplicó un sistema de indicadores a partir de conjugar factores como: geología, sismicidad, características hidrográficas, condiciones ingeniero-geológicas y el cálculo del factor de seguridad para la licuefacción que permite evaluar el potencial de licuefacción en los escenarios propuestos.

El municipio de Guantánamo presenta sectores susceptibles a la ocurrencia del fenómeno de licuefacción inducido por sismos de magnitudes mayores o iguales a 6. Estos sectores se enmarcan sobre sedimentos de la formación San Luis, Maquey y sedimentos aluviales, siendo los suelos, (CL y ML) arcilla de baja plasticidad y limo y (SC) arena arcillosa con grava no favorables para la construcción de obras.

## Referencias bibliográficas

- COLECTIVO DE AUTORES. 2013. *Léxico Estratigráfico de Cuba*. Centro Nacional de Información Geológica. Inst. Geol. Paleont.
- FERNÁNDEZ-DIÉGUEZ, L.; Guardado-Lacaba, R.; Herrera-Delfín, I.; Oliva-Álvarez, R. & Díaz-Santo, P. 2016. Escenarios susceptibles a la licuefacción inducida por sismos de gran magnitud en Santiago de Cuba. *Minería & Geología* 32(2): 53-69.
- PERUCCA, L.; PÉREZ, A. & NAVARRO, C. 2006. Fenómenos de licuefacción asociados a terremotos históricos. Su análisis en la evaluación del peligro sísmico en la Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61(4): 567-578.
- SEED, H. B. & IDRIS, I. M. 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.* 97(SM9): 1249-1273.
- SEED, H. & IDRIS, I. 1982. *Ground motions and soil liquefaction during earthquakes: engineering monographs on earthquake criteria, structural design, and strong motion records*. MNO-5. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, Calif. 134 p.
- STEWART, J. P. & KRAMER, S. L. 2004. Geotechnical aspects of seismic hazards. In: *Earthquake Engineering*. CRC Press, p. 123-230.
- TUTALENI, M. 2013. Evolución tectono-estratigráfica de la cuenca Cauto. *Ciencia & Futuro* 3(3): 1-10.
- WEN-SHAO, W. 1980. Some findings in soil liquefaction. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* 3: 007.