

# Escenarios susceptibles a la licuefacción en la ciudad de Manzanillo, provincia de Granma\*

**Yilian de la Caridad Torres Turcás**

**Liuska Fernández Diéguez**

[lfernandez@ismm.edu.cu](mailto:lfernandez@ismm.edu.cu)

**Yexenia Viltres Milán**

Especialidad: Ingeniería geológica

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

**Resumen:** Se analizaron las condiciones ingeniero-geológicas de los suelos de la ciudad de Manzanillo de la provincia de Granma con el objetivo de identificar los escenarios susceptibles a la licuefacción inducidos por terremotos fuertes, específicamente los estratos con mayor susceptibilidad a licuar dentro de las diferentes formaciones geológicas presentes en las áreas de estudio. Se adoptó como metodología la validación del sistema de indicadores propuestos por Fernández (2016) y la obtención de variables correspondientes a las propiedades físico-mecánicas; para ello se revisaron informes de la Empresa Nacional de Investigaciones aplicadas (ENIA) sede Holguín. Se determinó que el área está representada por suelos de tipo GC (Gravas arcillosas), arenas arcillosas (SC), calizas(C) arcillosas o calcáreas, arcillas areno limosas de baja plasticidad (CI). Se obtiene como resultado un mapa donde se muestra que la formación Manzanillo, en correspondencia con sus propiedades físico-mecánicas, no cumple las condiciones necesarias para la ocurrencia de la licuefacción.

**Palabras clave:** Licuefacción; sismo; arena arcillosa; formación geológica.

---

\* Recibido: 2 marzo 2018/ Aceptado: 15 febrero 2019.

## Susceptible soils to liquefaction in the city of Manzanillo, Granma province

**Abstract:** The engineer-geological conditions of soils of the city of Manzanillo, Granma province were analyzed with the aim of identifying the susceptible soils to liquefaction caused by strong earthquakes, specifically the stratum with greater susceptibility to liquefy within the different geological features formations that exist in the areas under study. The validation of the system of indicators proposed by Fernández (2015) and the obtaining of variables corresponding to the physical-mechanical properties were the methodology used. With such purpose, reports from the National Applied Research Company (ENIA), based in Holguín, were reviewed and It was determined that the area is represented by soils of GC type (argillaceous gravels), argillaceous sands (SC), limestone (C) clayey or calcareous, sandy muddy clays of low plasticity (Cl). As a result, a map showing that the Manzanillo formation, in correspondence with its physical-mechanical properties, does not meet the conditions necessary for the occurrence of liquefaction was obtained.

**Keywords:** Liquefaction; earthquake; argillaceous sands; geological formation.

## Introducción

La licuefacción del suelo es uno de los temas más interesantes y polémicos que han sido tratados a lo largo de los años. Dicho fenómeno normalmente se presenta en los suelos granulares finos sueltos, en los que el espacio entre partículas individuales se va rellenando con agua. Como consecuencia de los poros cubiertos totalmente con agua se ejerce una presión sobre las partículas del suelo circundante. Cuando un terremoto afecta al suelo, las partículas de la superficie tienden a agruparse hacia un estado compacto causando que el agua ejerza una fuerza de presión para empujar hacia afuera los espacios vacíos que estaban ocupados. Debido que el promedio de los movimientos se produce de manera rápida, así como el promedio por el cual el agua puede salir o escapar del suelo, la presión del agua en los espacios se incrementa tendiendo a empujar las partículas del suelo unas con otras. Como dichas partículas no se encuentran en contacto unas con otras, la resistencia de los suelos decrece, produciéndose una falla dado el caso de que el suelo no pueda resistir por más tiempo la carga impuesta (González de Vallejo *et al.*, 2002).

Los suelos más susceptibles a la licuefacción son aquellos formados por depósitos jóvenes (producidos durante el Holoceno, depositados durante los últimos 10 000 años) de arenas y sedimentos de tamaños de partículas similares, en capas de por lo menos más de un metro de espesor, y con un alto contenido de agua (saturadas). Tales depósitos, por lo general, se presentan en los lechos de ríos, playas, dunas y áreas donde se han acumulado arenas y sedimentos arrastrados por el viento y/o cursos de agua (Sánchez, 2013).

La licuefacción debe su causa al incremento de los esfuerzos cortantes actuantes en el suelo o a la disminución de su resistencia por la acción de una sollicitación brusca en el suelo, provocada por una sacudida de este, ya sea natural o artificial.

La falla Oriente y la Norte de la Española constituyen las principales fallas activas de primer orden donde pueden ocurrir sismos fuertes que afectan el territorio oriental de Cuba. Por este motivo diversos estudios investigan la licuefacción en el oriente de Cuba (Tutalení, 2013; Fernández-Diéguez, 2016; Villalón, Torres & Contreras, 2018; Peña & Vázquez, 2018) ya que para esta parte del país se ha establecido un ciclo sísmico de terremotos fuertes de entre 80 y 100 años, aproximadamente; esto significa que un sismo fuerte en esta región puede ocurrir en cualquier momento,

debido a la energía acumulada desde los últimos sismos sucedidos en la primera mitad del siglo XX (Guasch & Oliva, 2014).

Se propone evaluar las condiciones ingeniero-geológicas de los suelos de la ciudad de Manzanillo para conocer el potencial de licuefacción ante un sismo de gran magnitud e identificar los escenarios susceptibles.

### **Materiales y métodos**

A partir de metodologías (Seed & Idriss, 1982; Wang, 1979; Youd & Idriss, 2001; González de Vallejo *et al.*, 2002; Stewart & Kramer, 2004) se elaboró una propuesta que permitió cuantificar el fenómeno analizando las condiciones siguientes:

#### **Análisis de las 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 de un metro de espesor; coincidiendo también que el estrato de suelo no licuable encima del licuable debe ser menor de 8 m. Para la selección de los sectores se realizó una búsqueda en el mapa geológico y se seleccionaron las formaciones pertenecientes al cuaternario.

#### **Análisis del comportamiento de la sismicidad en el área de estudio**

Se analizó la cercanía del área de estudio con una zona generadora de sismos fuertes o de magnitud mayor de 5,5 y las aceleraciones de las partículas lleguen a ser iguales o superior  $0,2g/cm^2$ . Para llegar a las conclusiones de este indicador se revisó la norma para construcciones sismorresistentes, requisito básico para el diseño y construcción. Se revisó el capítulo 4 de dicha norma, en el cual se describen las zonas sísmicas del territorio nacional, y se tomó la descripción de los municipios en estudio propuesta por los autores antes mencionados; 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 de Fernández-Diéguez (2016).

### **Análisis del comportamiento del nivel freático en el área de estudio**

Otra de las condiciones necesarias para que tenga lugar este modo de comportamiento del suelo es la posición del nivel freático cerca de superficie. En la mayoría de los casos donde se han observado licuefacciones el nivel freático estaba a poca profundidad, inferior a tres metros; por debajo de cinco metros la susceptibilidad de licuefacción es muy baja. Para que los suelos granulares experimenten el fenómeno de licuación este debe estar ubicado por debajo del nivel freático, lo cual le confiere la condición de ser un sedimento saturado.

### **Análisis de las condiciones ingeniero-geológicas**

Los suelos más susceptibles a la licuefacción son aquellos formados por depósitos jóvenes de arenas y sedimentos de tamaños de partículas similares, en capas de por lo menos más de un metro de espesor, y con un alto contenido de agua. Estos depósitos, por lo general, se presentan en los lechos, ríos, playas, dunas y áreas donde se han acumulado arenas y sedimentos arrastrados por el viento y/o cursos de agua. Entre los datos obtenidos de los informes geológicos facilitados por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (E.N.I.A) Holguín, se trabajó con los parámetros necesarios para que un suelo sea licuable, tales como: límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, humedad natural, densidad húmeda y densidad seca, porcentaje de partículas finas, porcentaje de gravas, saturación y compactación del suelo a partir del número de ensayos de penetración estándar (SPT, por sus siglas en inglés), con lo cual se confeccionó una base de datos usando la herramienta hoja de cálculo Excel, del paquete Office.

Se tuvo en cuenta:

- Porcentaje de partículas finas  $\leq 15$
- Límite líquido  $\leq 35$  %
- 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
- Arena con partículas
- Sedimentos eluviales, llanuras aluviales y zonas de manglar.

### **Cálculo del factor de seguridad para la licuefacción (FSL)**

El FSL se calcula a partir de los datos obtenidos de los informes ingeniero-geológicos. Primero se calcula la relación de esfuerzo cíclico (CSR, *cyclic stress ratio*), luego el coeficiente de resistencia cíclica (CRR, *cyclic resistance ratio*), y el Factor de escala de acuerdo con la magnitud de sismo MSF. Si el valor es menor o igual a 1 se considera que es un estrato licuable. Si los valores dieran relativamente mayor que 1 se puede considerar posible licuefacción, siempre que el estrato inferior sea licuable. Teniendo en cuenta la magnitud del sismo el estrato puede licuar, aunque en menor medida.

Para evaluar la resistencia por licuación de suelo es necesario calcular dos variables:

1. La demanda sísmica que se espera en las capas de suelo durante un sismo de diseño, expresada en términos de resistencia CSR.
2. La resistencia de suelo para oponerse a la licuación, expresado con CRR (Fernández-Diéguez 2016).

### **Coficiente de esfuerzo cíclico (CSR)**

Es un principio generalmente aceptado que el potencial de licuefacción de estratos arenosos puede evaluarse utilizando correlaciones entre datos de resistencia a la penetración, tales como ensayos de penetración estándar (SPT) y ensayos de penetración con cono (CPT) y la resistencia cíclica del material movilizado durante una fuerte excitación vibratoria. En este enfoque, la resistencia cíclica es caracterizada por la relación de esfuerzo cíclico. Básicamente, la CSR se define como el esfuerzo cortante promedio ( $\zeta_{avg}$ ) actuante en un estrato, normalizado por el esfuerzo efectivo de sobrecarga ( $\sigma'_{vo}$ ). En la mayoría de las técnicas empíricas, el valor promedio de la

relación de esfuerzos cortantes cíclicos inducidos por el sismo se obtiene de los análisis de la respuesta dinámica del subsuelo.

### **Coefficiente de resistencia cíclica (CRR)**

Algunos investigadores (Seed & Idriss, 1971; Tokimatsu & Yoshimi, 1983; Liao & Whitman, 1986) han elaborado, a partir de datos obtenidos en campo mediante ensayos de penetración estándar, gráficas sobre la relación entre dos parámetros físicos que participan en la licuefacción de los suelos; estos son el coeficiente resistencia cíclica y  $(N1)_{60}$ , es decir, el número de golpes suministrado al terreno, representado también por la letra N en las fórmulas.

### **Evaluación de CSR**

Seed e Idriss (1971) formulan la ecuación para el cálculo de la relación de esfuerzos cíclicos:

$$CSR = 0,65 (a_{max}/g)(\sigma_{vo}/\sigma'_{vo})r_d$$

Donde:

$a_{max}$  = máxima aceleración de la superficie de suelo generada por un sismo de diseño

$g$  = aceleración de la gravedad

$\sigma_{vo}$  = esfuerzo normal vertical total, referido a la superficie de suelo

$\sigma'_{vo}$  = esfuerzo normal vertical efectivo, referido a la superficie de suelo

$r_d$  = coeficiente de reducción de esfuerzos que toma en cuenta la deformabilidad del perfil de subsuelo.

Liao y Witman (1986), para la práctica de ingeniería rutinaria en proyectos no críticos, proponen las siguientes ecuaciones para estimar el radio:

Para  $z \leq 9,15 \text{ m}$

$$r_d = 1,0 - 0,00765 z$$

Para  $9,15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m}$

$$r_d = 1,174 - 0,0265 z$$

Donde:  $z$  = profundidad por debajo de la superficie de suelo, m.

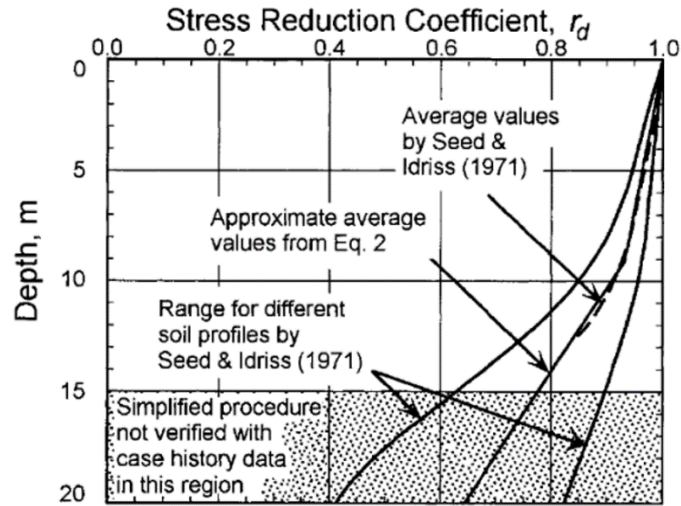


Figura 1. Curvas de relación de radio y profundidad (Seed & Idriss, 1971).

A partir de las propiedades físico-mecánicas de los suelos y rocas se calcula el CSR y se plotean los valores obtenidos en la curva de CSR vs SPT. Una vez obtenido el resultado de CSR se comprueba si es un estrato licuable o no.

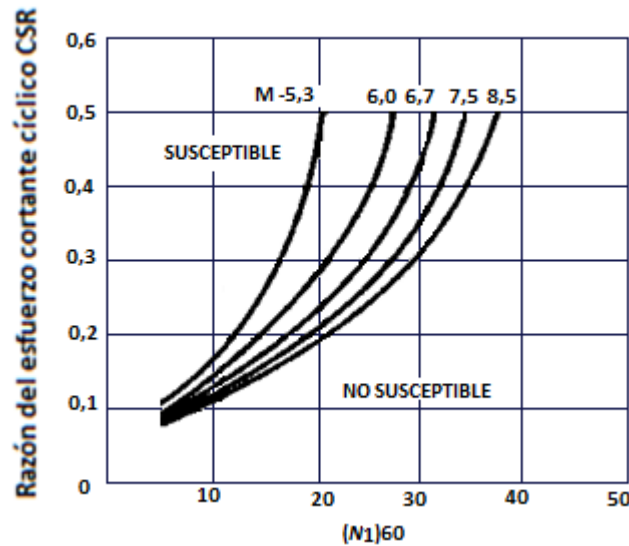


Figura 2. Susceptibilidad de licuefacción de un suelo en función de  $(N1)_{60}$  y la razón del esfuerzo cortante cíclico CSR (González de Vallejo *et al.*, 2002).

**Evaluación de CRR**

De los datos obtenidos de los informes se calcula CRR y se construye la curva CRR vs SPT. Si los valores son menores que uno entonces se considera que es un estrato licuable. Esta ecuación es válida para los  $(N1)_{60} < 30$ . Para  $(N1)_{60} \geq 30$  los suelos



granulares limpios tienen el grado de compacidad demasiado alto para sufrir la licuefacción. La resistencia a la penetración utilizada en las correlaciones corresponde al número de golpes medido en terreno ( $N$ ) al cual se le aplica una corrección por tensión efectiva (Liao & Whitman, 1986):

$$N_1 = N \cdot C_N$$

$$C_N = \left( \frac{1}{\sigma_v} \right)^{0.5}$$

Donde:  $C_N$  = factor de corrección para una tensión efectiva de sobrecarga de 1 t/pie  $2\sigma_v$ ,

$\sigma_v$  = tensión efectiva vertical en atmósferas.

La resistencia del suelo queda representada por  $N_{1,60}$ , la cual es la cantidad de golpes del SPT corregido para una presión de sobrecarga efectiva de 1 t/pie 2 ( $\approx 1 \text{ kg/cm}^2$ ), y para una razón de energía del 60 % de la máxima teórica.

Corrección por energía aplicada, equipamiento y efectos de procedimientos para obtener un valor estandarizado de:

$$N_{1,60} = N_1 \cdot C_R \cdot C_S \cdot C_B \cdot C_E$$

Prueba de SPT: El criterio de evaluación de la resistencia por licuación basada en SPT es confiable, ya que se lleva aplicando durante varios decenios. Estos criterios involucran la gráfica de la relación de CSR con  $(N_1)_{60}$ . El  $(N_1)_{60}$  representa el número de golpes normalizado al esfuerzo vertical de 100 kPa y a la energía del martillo con eficiencia de 60 %.

### **Influencia del contenido de finos**

Seed y otros investigadores (1985) observan el incremento en CRR en función del acrecentamiento de finos. No es claro si esto se debe al aumento de la resistencia a licuación o al decremento de la resistencia a la penetración. Basados en los datos empíricos disponibles Seed y demás colaboradores (1985) desarrollaron curvas de CRR para varios contenidos de finos. La plasticidad de suelo todavía no se había investigado. Por lo tanto, las correcciones basadas en la cantidad de finos deben usarse con precaución.

$FC = \text{contenidos de finos}$

Para  $FC \leq 5\%$

$$\alpha = 0$$

Para  $5\% < FC < 35\%$

$$\alpha = e^{\left(1,76 - \left(\frac{190}{FC^2}\right)\right)}$$

Para  $FC \geq 35\%$

$$\alpha = 5,0$$

Para  $FC \leq 5\%$

$$\beta = 1,0$$

Para  $5\% < FC < 35\%$

$$\beta = e^{\left(0,99 - \left(\frac{FC^2}{1000}\right)\right)}$$

Para  $FC \geq 35\%$

### **Cálculo del factor de seguridad corregido:**

$$FS = \frac{CRR}{CSR} MSF$$

Donde: MSF: Factor de escala de acuerdo con la magnitud de sismo y se calcula por la ecuación:

$$SF = \frac{10^{2,24}}{M_w^{2,56}}$$

Donde  $M_w$ : Magnitud del sismo de diseño.

El factor de escala de acuerdo con la magnitud de sismo se calculó para sismos de magnitud 6, 7 y 8. Los resultados son 1,76, 1,19 y 0,84 respectivamente.

### **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. 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. Aunque no existen reportes de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en el municipio de Manzanillo, sí aparecen reportes de daños a las construcciones tras el sismo de Bayamo en 1551.

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

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

Se analizó, además, la edad del depósito. El área de estudio pertenece casi en su totalidad a la formación Manzanillo del Mioceno, lo que no favorece la ocurrencia de la licuefacción.

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. El área de estudio no cuenta con estas características lo cual indica que hay poca probabilidad para la ocurrencia del fenómeno de licuefacción.

Los valores utilizados para la corrección del SPT del campo fueron los de la norma empleada en Cuba, conocida como la cuchara cubana. Se obtuvieron a partir de la revisión de los informes de las obras ejecutadas por la ENIA.

Se utilizaron los parámetros: perforación a percusión para la hincada de muestreador cuchara SPT (penetración dinámica) y penetración estática del muestreado Shelby (presión hidráulica). Los diámetros utilizados fueron: 73 mm, 89 mm y 108 mm, con martillo de 300 lb. Caída del martillo 18" in con varillas 0,40 m, 1,50 m y 3,00 m. Muestreadores: Shelby, Obsterberg, Denison. Se empleó, además, muestras de cuchara, porta testigos doble tubo rígido y porta testigo simple.

## Valoración general de los sistemas de indicadores aplicados

**Condiciones geológicas:** Se tomaron en consideración las formaciones presentes en el territorio con sus respectivas litologías y sus características, las cuales brindaron información de cómo se manifiestan localmente; se hizo énfasis en aspectos como: edad de la formación, grado de intemperismo, así como el origen de los suelos. La formación Manzanillo, de forma general, es la que predomina en la región, es de edad Mioceno Superior-Plioceno parte baja. Aflora en la zona y en el Sector de Cuentas Claras. Se distribuye en forma de faja, bordeando el golfo de Guacanayabo, entre la ciudad de Manzanillo al norte y río Limones al sur.

Se acumula hacia el sur en la zona de premontaña de la Sierra Maestra y penetra en profundidad en el valle del río Cauto, formando un braquisinclinal con eje asimétrico, de pendientes abruptas hacia el norte, donde esta estructura tiene su continuidad con el braquianticlinal de Manzanillo-Campechuela, limitado por la falla Jibacoa.

Está compuesta fundamentalmente por una alternancia de calizas biodetríticas arcillosas de granulometría variada, a veces gravas y arenas derivadas de vulcanitas, margas, margas limosas y arenáceas, lutitas calcáreas y más subordinadamente calcarenitas y calciruditas; con distintos tamaños de granos, predominando los finos e intercalaciones de arcillas esmectíticas, arcillas calcáreas y arcillas limosas a veces yesíferas. Igualmente subordinadas aparecen calizas biohémicas, calizas detríticas, calizas micríticas y calizas dolomíticas. La secuencia es muy fosilífera. La coloración es variable: crema y amarillento con localidades rosácea y anaranjada para los horizontes carbonáticos y gris o gris verdoso para los terrígenos. Las condiciones geológicas de esta formación no son favorables para la ocurrencia de la licuefacción, los suelos estudiados son compactos y densos.

**Sismicidad:** Se trabajó con la norma NC 46 del 2013, plasmando en la investigación la zona sísmica a la que pertenece el área de estudio y la descripción de acuerdo al riesgo sísmico que esta presenta. Se mencionan algunas particularidades en la tectónica regional y de dicho territorio.

Según la norma el municipio de Manzanillo se encuentra dentro de la zona sísmica dos, la cual se describe como riesgo sísmico bajo que puede ocasionar daños en las construcciones, por lo que 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.

Se debe prestar atención a la sismicidad de la zona de estudio, al analizar las evidencias históricas existen reportes de daños considerables en Manzanillo tras el conocido sismo de Bayamo en 1551. En estos momentos el fondo habitacional es mayor y las construcciones son antiguas o no responden del todo a las normas sismorresistentes lo que las convierte en vulnerables ante sismos fuertes. Además, en estos años se cierra un ciclo de sismos de gran magnitud.

**Características hidrogeológicas:** Se tuvieron en cuenta los promedios entre los que oscila la estabilización del nivel freático en todo territorio, así como los suelos en los que se encuentran; además se hace referencia en algunos casos a variables tales como coeficiente de permeabilidad del suelo, capacidad acuífera e hinchamiento del suelo. De la realización de las distintas pruebas hidrogeológicas se obtuvieron arcillas muy plásticas (CH) de color parduzco que actúan como un acuitardo superior, aunque pueden contener pequeños lentes areno-limosos y algunas gravas.

Hidrogeológicamente las conductividades hidráulicas son muy bajas, con valores de coeficiente de permeabilidad entre  $1 \times 10^{-5}$  cm/s a  $1 \times 10^{-7}$  cm/s y menores, sin embargo, por su extensión considerable y potencia pueden ceder un volumen considerable de agua al acuífero, teniendo en cuenta que encima de ella se encuentran canales de riego y parcelas anegadas todo el año. La parte superior (1 m - 2,5 m) se ha alterado por la actividad humana agrícola, con alto contenido de materia orgánica.

Debe tenerse en cuenta que, aunque constituye un excelente filtro natural para la contaminación química y bacteriológica, una sobreexplotación excesiva del acuífero sin que se modele matemáticamente este proceso puede acelerar la migración hacia el acuífero de los elementos químicos aplicados a los cultivos del arroz. En la provincia existen dos grandes cuencas hidrogeológicas: Manzanillo-Cabo Cruz (GM) y Cauto (GC) que, a su vez, están divididas en subcuencas y tramos hidrogeológicos. El área de estudio pertenece a la cuenca hidrogeológica GM-3. En general, los valores promedios del nivel freático obtenidos mediante el empleo del mapa hidrogeológico de Cuba y en las investigaciones consultadas fluctúan entre 0,40 m y 8 m, dicha profundidad está enmarcada entre las probables para que ocurra licuefacción.

**Condiciones ingeniero-geológicas:** Se confeccionó una base de datos en formato Libro Excel donde se recogen los valores correspondientes a propiedades físico-mecánica de los suelos tales como: límite líquido (LL), límite plástico (LP), índice de plasticidad (IP), porcentaje de humedad natural (W<sub>n</sub>), densidad húmeda (γ<sub>f</sub>), densidad seca (γ<sub>d</sub>), porcentaje de saturación (S), compresibilidad (C), número de golpes (N<sub>spt</sub>), porcentaje de finos, grava y arena. De un total de 146 informes consultados, provenientes de las investigaciones llevadas a cabo por la ENIA Holguín, se escogieron 24 para realizar la interpretación y procesamiento de la información contable; los restantes se encontraban deteriorados y carecían de variables correspondientes a varias propiedades físico-mecánicas de los suelos.

De acuerdo con la investigación realizada se puede concluir que a pesar de que en la región también están presentes formaciones como: Cauto, Dáctil, Charco Redondo, Jutía y Manzanillo, los suelos del área de estudio corresponden a la formación Manzanillo del Mioceno Superior Plioceno (parte baja).

Se pueden encontrar arcillas de baja plasticidad (CL), gravas arcillosas (GC), las arenas limosas (SM) y arenas arcillosas (SC), calizas arcillosas y calcáreas (C). Aunque estos suelos presentan valores en su mayoría de límite líquido (LL entre 37 y 66) y porcentaje de granos finos (30-96) algo elevados, según las condiciones de Wang (1979) y Seed e Idriss (1982); donde se encontró el nivel freático, este oscila entre 0,40 m y 8 m.

En casi todas las obras las muestras que se tomaron presentaron 100 % de recuperación lo que refuerza la idea de que en la región hay predominio de material arcilloso que es mucho más compacto, además las arcillas presentes son saturadas y la cohesión casi en su totalidad posee valores que van de 240 hasta valores muy bajos. Se trata de una zona sísmica #2 con un riesgo sísmico bajo, por lo que estas condiciones no son propias para la ocurrencia de licuefacción, aunque hay que considerar el hecho de que en otras zonas pertenecientes a la misma región sí pudiera existir este fenómeno y esto se debe tomar en cuenta en la realización de otros estudios.

A continuación, se brinda una serie de columnas litoestratigráficas con la correlación existente entre los sedimentos más representativos del área de estudio.

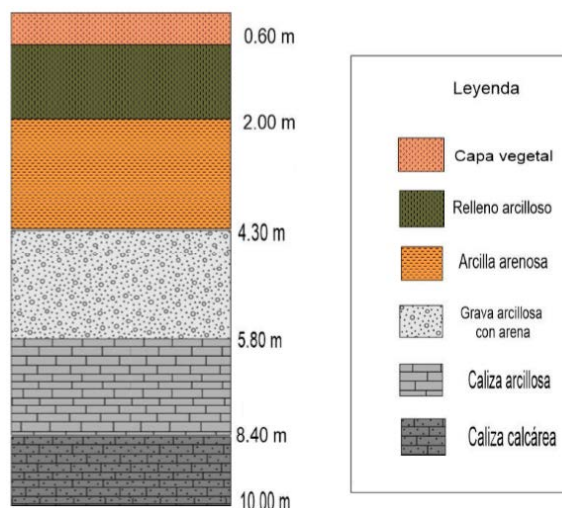


Figura 3. Columna litoestratigráfica ciudad de Manzanillo.

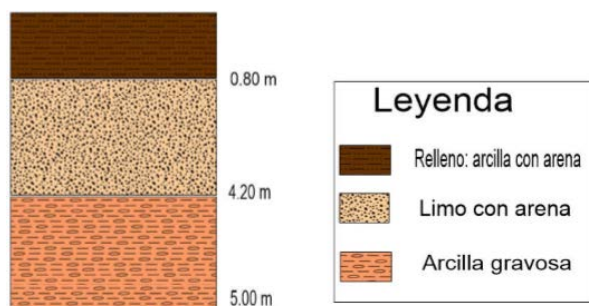


Figura 4. Columna litoestratigráfica de la formación Manzanillo.

No se realizó el cálculo del factor de seguridad ya que las propiedades físico-mecánicas de cada una de las obras brindaron la información necesaria para determinar el potencial de licuefacción. No se obtuvieron estratos licuables en la ciudad de Manzanillo.

### Análisis global de los resultados

El municipio de Manzanillo, desde el punto de vista geológico se encuentra ubicado dentro de la Cuenca del Cauto. Las principales formaciones que se encuentran en la región son: Fm. Cauto, Fm. Dáctil, Fm. Manzanillo y Fm. Charco Redondo; también cuenta con la presencia de depósitos palustres y aluviales, aunque la zona urbana está emplazada sobre calizas biodetríticas de la formación Manzanillo. El nivel freático es muy variable, dependiendo en gran medida de la época del año en que se encuentre, siendo menor en los periodos de sequía y mayor en épocas de lluvia; además de la influencia del relieve y del coeficiente de infiltración.

Según los informes ingeniero-geológicos revisados este alcanza en ocasiones niveles de 0,4 m a 8,00 m. Este municipio se encuentra próximo a la zona activa Cauto-Nipe donde han ocurrido sismos con epicentros en el área de la propia ciudad o cercanas a ellas. Según el mapa de zonificación sísmica propuesto para Cuba en la norma cubana para la construcción de obras sismorresistentes, este municipio se encuentra en la zona 2, de riesgo sísmico bajo, que puede ocasionar daños a las construcciones, por lo que se deben tomar medidas sismorresistentes en todas 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.

Las áreas más propensas a licuar son aquellas que se encuentran en la llanura de inundación de los ríos o cercanas a estas, donde se localizan los sedimentos más recientes, en suelos con alto grado de saturación y baja compactación, localizados al noroeste. No se descarta que ante la ocurrencia de un terremoto que exceda los 7,5° ocurra el fenómeno en algunas áreas no identificadas en este estudio dado que los datos son puntuales para la zona urbana y todos se ubican en calizas biodetríticas de la formación Manzanillo o sobre arenas calcáreas de gran consistencia.

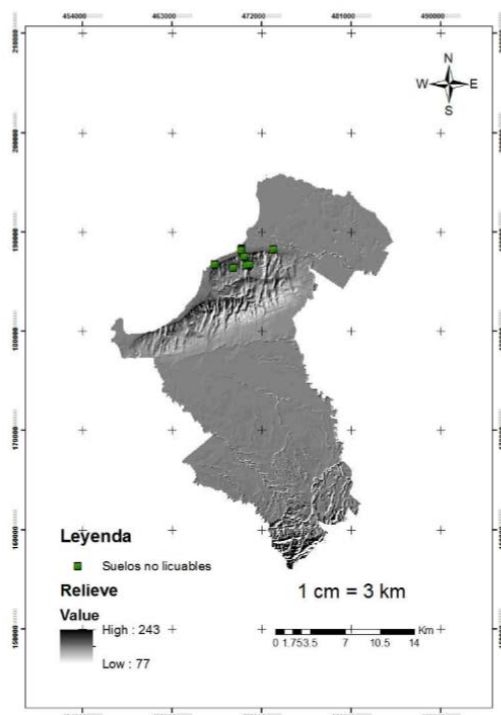


Figura 5. Esquema de ubicación de los puntos de muestreo de suelos no licuables en la zona urbana del municipio de Manzanillo.



## Conclusiones

Las condiciones ingeniero-geológicas de los suelos estudiados de la ciudad del municipio de Manzanillo no son favorables para que ocurra la licuefacción dado que los valores son diferentes a los establecidos para la ocurrencia de este fenómeno; el nivel freático es alto, poca saturación, alto grado de compactación, alta concentración de partículas finas y el límite líquido es mayor de 35.

El sistema de indicadores aplicado, mediante el cual se analizaron la geología, sismicidad, profundidad del nivel freático y las condiciones ingeniero-geológicas, arroja como resultado que los estratos en el área son arcillas de baja plasticidad (CL), gravas arcillosas (GC), las arenas limosas (SM) y arenas arcillosas (SC), calizas arcillosas y calcáreas(C) de la formación Manzanillo, de edad Mioceno Superior-Plioceno (parte baja).

La susceptibilidad a la licuefacción de los suelos de la ciudad de Manzanillo es baja; no presenta sectores susceptibles a la ocurrencia del fenómeno inducido por sismos fuertes dado que se enmarcan sobre la formación Manzanillo.

## Referencias bibliográficas

- FERNÁNDEZ-DIÉGUEZ, L. 2016. Escenarios susceptibles a la licuefacción inducida por sismos de gran magnitud en Santiago de Cuba. *Minería & Geología* 32(2): 53-69.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.; FERRER, M.; ORTUÑO, L. & OTEO, C. 2002. *Ingeniería geológica*. Pearson Educación, Madrid, 715 p.
- GUASCH, F. & OLIVA, A. 2014. Análisis de la vulnerabilidad habitacional y los riesgos inducidos en los edificios altos de la ciudad de Santiago de Cuba. Archivos CENAI.
- LIAO, S. S. & WHITMAN, R. V. 1986. Overburden correction factors for SPT in sand. *Journal of geotechnical engineering* 112(3): 373-377.
- PEÑA, R. & VÁSQUEZ, L. 2018. Susceptibilidad a la ocurrencia de licuefacción de los suelos en Granma inducida por fuertes terremotos. *Ciencia & Futuro* 8(3): 1-19.

- SÁNCHEZ, N. L. 2013. Licuefacción de suelos. Consultado: 24 mar 2018. Disponible en: <https://civilgeeks.com/wp-content/uploads/2013/01/LICUEFACCI%C3%93N-DE-SUELOS21.pdf>
- SEED, H. B. & 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.
- SEED, H. B. & IDRIS, I. 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.* 97(SM9): 1249-1273.
- SEED, H. B.; TOKIMATSU, K.; HARDER, L. F. & CHUNG, R. M. 1985. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *Journal of Geotechnical Engineering* 111(12): 1425-1445.
- STEWART, J. P. & KRAMER, S. L. 2004. Geotechnical aspects of seismic hazards. In: *Earthquake Engineering*, CRC Press, p. 123-230.
- TOKIMATSU, K. & YOSHIMI, Y. 1983. Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content. *Soilsand Foundations* 23(4): 56-74.
- TUTALENI, M. 2013. Evolución tectono-estratigráfica de la cuenca Cauto. *Ciencia & Futuro* 3(3): 1-10.
- VILLALÓN, L. TORRES, Y. & CONTRERAS, O. 2018. Escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el municipio de Guantánamo. *Ciencia & Futuro* 8(4) 1:11.
- WANG, W. 1979. *Some findings in soil liquefaction*. Earthquake Engineering Department, Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute.
- YOD, T. L. & IDRIS, I. M. 2001. Liquefaction Resistance of Soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE* 127(4): 297-313.