

Susceptibilidad a la ocurrencia de licuefacción de los suelos en Granma inducida por fuertes terremotos*

Raisa Peña Leyva

rpleyva@geologia.ismm.edu.cu

Lilisbet Vásquez Gómez

lvomez@geologia.ismm.edu.cu

Especialidad: Ingeniería Geológica

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

Resumen: Se evaluó la susceptibilidad a la licuefacción de los suelos generada por sismos de gran magnitud en la zona correspondiente a la cuenca del Cauto en la provincia de Granma. Para ello se empleó el método histórico lógico y el de análisis y síntesis. Se realizó un resumen de las principales características de los terremotos donde ha ocurrido la licuefacción y de las condiciones de los suelos. Se determinan las áreas de la provincia de Granma propensas a licuar ante un sismo de gran magnitud.

Palabras clave: Licuefacción; riego sísmico; terremoto.

* Trabajo tutorado por la M. Sc. Liuska Fernández Diéguez.
Recibido: 6 junio 2018/ Aceptado: 25 agosto 2018.

Susceptibility to the occurrence of liquefaction of soils in Granma induced by strong earthquakes

Abstract: The susceptibility to liquefaction of soils generated by large-scale earthquakes was evaluated in the area corresponding to the Cauto basin in the province of Granma. For this, the logical historical method and the analysis and synthesis method were used. A summary was made of the main characteristics of earthquakes where liquefaction and soil conditions have occurred. The areas of the province of Granma prone to liquefying before a large earthquake are determined.

Key words: Liquefaction; seismic irrigation; earthquake.

Introducción

Desde el surgimiento de la humanidad uno de los fenómenos naturales que más ha interesado ha sido la sismicidad. Aunque en la actualidad se ha logrado alcanzar un alto nivel de conocimiento acerca de este tema, no existe un método de predicción temprana que alerte ante la ocurrencia de un terremoto.

Un terremoto, también llamado sismo, es un fenómeno de sacudida brusca y pasajera de la corteza terrestre producida por la liberación de energía acumulada en forma de ondas sísmicas. Estos constituyen uno de los factores de riesgo mayores a los que se enfrenta la sociedad, de ahí la importancia de estudiar sus efectos en aras de disminuirlos.

Unos de los fenómenos más destructivos inducidos por fuertes terremotos es la licuación de los suelos. El término licuación o licuefacción incluye 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).

González de Vallejo y otros investigadores (2002) definen como suelos licuables, aquellos suelos con contenido areno-limoso, en estado saturado, que al experimentar esfuerzos cortantes anómalos y rápidos permiten un aumento de las presiones intersticiales (por falta de drenaje), en que la resistencia al corte desaparece y el material se comporta como líquido. Esto da lugar a movimientos verticales y horizontales de su masa, que se traducen en deslizamientos, o en grandes asientos.

En Cuba se han llevado a cabo una serie de estudios sobre este tema a partir de las experiencias adquiridas luego de lo ocurrido en Santiago de Cuba en 1932 y en Bayamo en 1947.

La región oriental ha sido a lo largo del tiempo objeto de numerosos estudios sobre el tema; por sus condiciones tectónicas es la zona de mayor riesgo sísmico del país. La provincia de Santiago de Cuba es una de las más estudiadas, pero se le debe prestar especial atención a otras provincias, tal es el caso de Granma, pues existen registros de que esta área es tectónicamente activa y, además, hay reportes históricos de que ha ocurrido licuación de los suelos a raíz de fuertes terremotos (Tutaleni, 2013).

En el presente trabajo se evalúan las condiciones ingeniero-geológicas para determinar si los suelos en la provincia de Granma son propensos a licuar ante un sismo de gran magnitud. Por ende se realizan los estudios pertinentes para determinar el potencial de los suelos a licuar ante la ocurrencia de sismos de gran magnitud en esta provincia.

Geología general del área de estudio

La geología de Granma está compuesta principalmente por sedimentos jóvenes, del Neotrópico, muchos, productos de la erosión fluvial. Los mismos aparecen representados en las formaciones que a continuación se describen.

Formaciones presentes en el área de estudio

Formación Bayamo: Se extiende a lo largo de la llanura del río Cauto en las provincias de Granma y Las Tunas. Como holoestratotipo se designó un corte de unos 20 m de altura en la margen occidental del río Cauto, en la localidad El Sombrero, a unos 9 km al W del poblado de Cauto Cristo, provincia de Granma. Las litologías principales son arenas de tonos grises y amarillo-grisáceos, de granos finos, con lentes de areniscas y conglomerados de guijarros finos, así como con intercalaciones de arcillas arenosas de color verde-grisáceo, y arenas arcillosas manchadas de gris. La estratificación se puede observar frecuentemente en las arenas. Las fracciones gravoso-arenoso-limosas son de composición polimícticas. Predominan los granos de volcánitas alteradas, granos de epidota, rocas silíceas, cuarzo, feldespatos, cloritas, zeolitas y granos y peletas bien redondeados, de composición carbonática. Los sedimentos se encuentran débilmente cementados por cemento carbonático. La componente carbonática del cemento está representada por calcita y en la arcillosa predominan las esmectitas; subordinadamente aparecen clorita y, probablemente, clorita-esmectita interestratificada. Esta cubre discordantemente las formaciones Camazán, Charco Redondo y el Gr. Guacanayabo (Manzanillo y Paso Real). La sobreyace discordantemente la formación Cauto. La edad es Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior. Se formó en un ambiente aluvial con influencia marina y, en parte, estuarina. (Instituto de Geología y Paleontología, 2002).

Formación Cauto: se extiende por todo el Valle del río Cauto, provincias de Granma, Holguín y Santiago de Cuba. El holoestratotipo no fue precisado por el autor. Se designó un lectoestratotipo representado por un corte de 20 m en el río Cauto, a unos

10 km al NW del poblado de Babiney, cerca de la localidad de Las Palmitas, provincia de Granma. Las litologías principales son: arcillas, limos, arenas, gravas polimícticas y conglomerados polimícticos, con estratificación horizontal y cruzada, predominando la horizontal. Coloración gris, gris pardusco y amarillo grisáceo. Las arenas son de grano fino hasta grano grueso. Generalmente están mal seleccionadas y casi siempre contienen arcillas. El porcentaje de arcillas es variable y puede alcanzar hasta un 80 %-90 %. Estas arenas forman capas que casi siempre contienen gránulos, cuyo diámetro puede variar entre 0,5 cm hasta 2,3 cm. Su material es vulcanógeno y, menos frecuentemente, de calizas y jasperoides. Yace discordantemente sobre las formaciones Bayamo, Barrancas, Bitirí, Camazán, Dátil, Río Jagüeyes, San Luis y los grupos El Cobre (parte indiferenciada) y Guacanayabo (formaciones Manzanillo y Paso Real). Está cubierta concordantemente por los sedimentos aluviales del Holoceno. La edad de la formación es Pleistoceno Superior, parte baja. Se formó en depósitos aluviales y diluviales, con alguna influencia marina cerca de la desembocadura del río Cauto, que debe haber sido mayor durante las transgresiones del Plioceno y el Cuaternario (Instituto de Geología y Paleontología, 2002).

Formación Manzanillo: Es una faja en la margen oriental del golfo de Guacanayabo, entre la ciudad de Manzanillo, al N, y las cercanías del río Limones, al S; en la región de Niquero. Hacia el S se acuña en el área perimontañosa de la Sierra Maestra, provincia de Granma y penetra en profundidad en el valle del río Cauto. Se caracteriza por la alternación de calizas biodetríticas arcillosas de granulometría variada, a veces gravas, y arenas derivadas de volcanitas, margas, margas limosas y arenáceas, limolitas calcáreas, y más subordinadamente, calcarenitas y calciruditas con distintos tamaños de granos, con predominio de los finos. También aparecen intercalaciones de arcillas esmectíticas, arcillas calcáreas y arcillas limosas a veces yesíferas. Igualmente, subordinadas, se aprecian calizas biohémicas, detríticas, micríticas y dolomíticas. La secuencia es muy fosilífera. La coloración es variable: crema y amarillento, para los horizontes carbonáticos, y gris o gris-verdoso para los terrígenos. Yace concordantemente sobre las formaciones Cabo Cruz y Paso Real y discordantemente sobre las formaciones Charco Redondo, Farallón Grande, San Luis, Sevilla Arriba y el Gr. El Cobre (parte indiferenciada). Está cubierta discordantemente por las formaciones Bayamo, Cauto, Dátil, la unidad informal marga Demajagua y el Cuaternario indiferenciado. Transiciona lateralmente, al menos en parte, a la Fm. Cabo Cruz. De edad Mioceno Superior, parte alta-Plioceno Inferior. Esta formación pertenece al grupo Guacanayabo (Instituto de Geología y Paleontología, 2002).

Formación Pilón: Se desarrolla en la parte occidental de la Sierra Maestra, provincias de Granma y Santiago de Cuba. La parte más baja de la unidad presenta predominantemente una intercalación en capas fias, de alrededor de 10 cm de espesor, de areniscas polimícticas a volcanomícticas, de cemento calcáreo, con diferente granulometría de color gris-pardusco, intercaladas con limolitas de color beige, intercalaciones de tobas y tufias que aumentan su proporción hacia arriba en el corte. Se presentan paquetes de rocas carbonatadas en forma de lentes, cuya potencia varía lateralmente. Estas calizas presentan cierta silicificación producto de la presencia de radiolarios, en raras ocasiones fracción clástica formada por fragmentos < 0,1mm de cuarzo, plagioclasa y rocas volcánicas. En la parte más alta de la unidad predominan las intercalaciones de tobas, tufias, areniscas, limolitas y calizas. Su subyacente se desconoce. Está cubierta concordantemente por la Fm. El Caney y discordantemente por las formaciones Farallón Grande, Río Maya y la Fm. Cabo Cruz (Gr. Guacanayabo). Transiciona lateralmente a la parte no diferenciada del Gr. El Cobre. Se depositó en una cuenca marina de profundidades medias, en zonas alejadas de los focos magmáticos, pero con un considerable aporte de material piroclástico y terrígeno. Puede alcanzar hasta 2 000 m; de edad Paleoceno–Eoceno Inferior.

Sismicidad regional y del área de estudio

El territorio está caracterizado por una compleja constitución geólogo-tectónica, debido a diferentes etapas evolutivas, pudiéndose diferenciar en la actualidad distintas regiones con características propias, litología, edad y tectonismo. En la provincia de Granma se pueden citar las siguientes estructuras regionales de norte a sur, que afectan en gran medida la ciudad:

- Cuenca del Cauto
- Falla Cauto-Nipe
- Sistema de fallas Bartlett-Caimán

Las fallas Cauto-Nipe y Bartlett-Caimán son estructuras tectónicas de gran importancia debido a que son estructuras activas y las de máxima responsabilidad de la actividad sísmica en esta región, junto a otras como Bayamo, Santiago Bayamo y Baconao.

La falla Cauto-Nipe se encuentra atravesando la región oriental con una dirección noroeste-suroeste, desde la Bahía Nipe hasta las inmediaciones de Niquero-Cabo Cruz; con una longitud de más de 260 km, con un movimiento lateral vertical.

El sistema de fallas transformantes Bartlett-Caimán se extiende en dirección sublatitudinal al sur de la región oriental con una longitud de más de 1 800 km, con una profundidad aproximada de 50 km y un ancho entre 10 km y 15 km. Se caracteriza por una actividad sísmica significativa, concentrada en tres sectores fundamentalmente, de los cuales el sector central (75°-77°) y el occidental son los que representan el mayor peligro para el área de estudio.

La frontera entre la Placa Norteamericana y la del Caribe se localiza en las acuatorias de la parte sur oriental de Cuba y, a su vez, de la provincia de Granma. Este contacto entre ambas placas tectónicas constituye la principal zona sismogeneradora del área del Caribe, en la cual se han producido sismos de gran magnitud que han provocado a su vez los mayores daños en esta región. El peligro sísmico en Cuba presenta una particularidad interesante y que al mismo tiempo hace que su estudio sea para algunas áreas de carácter complejo. Esta consiste en el hecho de que en el archipiélago cubano se presentan dos génesis de sismos dadas por la ubicación espacial y origen de los terremotos: de entre placas y de interior de placas.

Esto significa que en nuestro territorio no existe el mismo nivel de potencialidad sísmica en todas sus partes, destacándose como el primer tipo de sismicidad la región sur oriental por la frecuencia con que históricamente ocurren en ella terremotos de alta magnitud e intensidad. Esto implica que sea considerada como la de mayor peligrosidad sísmica del país y se corresponde con la Zona Sismogénica de Bartlett-Caimán, donde se han reportado 22 terremotos fuertes, de ellos 20 en la provincia de Santiago de Cuba y dos, los más recientes, en la provincia de Granma (Chuy, 2010).

Durante los años 1968-1995 se han registrado por la Red de Estaciones Sismológicas de la región 72 terremotos con epicentro en la ciudad de Bayamo y dos que fueron sacados de los datos de sismicidad histórica.

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, 2016)

Para evaluar el potencial de licuefacción se llevó a cabo un sistema de indicadores en el cual se unifican los parámetros propuestos por diversos autores (Seed & Idress, 1971, 1982); (Wang, 1979) 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 diversos factores que se proponían. Después de una revisión de las metodologías propuestas 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 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 sismo-generadora 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/cm². 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 nuestro país; 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, también, 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. Finalmente se confecciona el mapa de profundidad del nivel freático para 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 Ensayos de Penetración Estándar (SPT), entre otras.

Se tiene en cuenta:

- Porcentaje de partículas finas ≤ 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) $< 75 \%$
- Uniformidad de la arena, Cu < 5 .

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

Para determinar la resistencia a la licuefacción de los suelos arenosos y con contenidos de finos la relación de tensiones cíclicas (CSR) se compara con la relación de resistencia cíclica (CRR); esta última se obtiene de correlaciones empíricas entre la relación de esfuerzos cíclicos requeridos para causar licuefacción y los valores de N

(SPT) normalizados por profundidad y energía de los golpes del martillo (valores de $(N_1)_{60}$). En la Figura 1 se muestran las curvas recomendadas por Seed y demás colaboradores (2003).

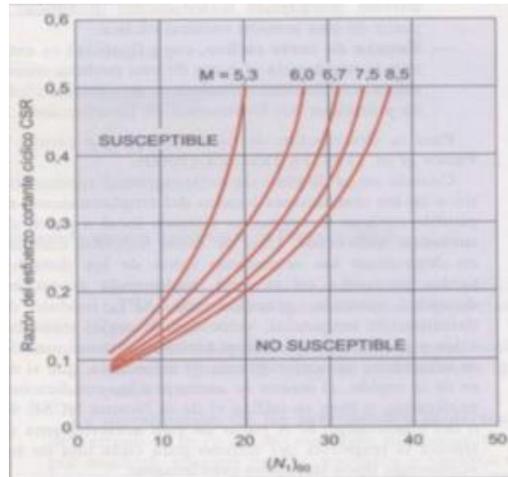


Figura 1. Susceptibilidad de licuefacción de un suelo en función de $(N_1)_{60}$ y la razón del esfuerzo cortante cíclico CSR (Ho *et al.*, 1986, citado por González de Vallejo *et al.*, 2002).

El análisis del potencial de licuefacción en este trabajo sigue procedimientos basados en la determinación de la razón de esfuerzos cíclicos (CSR). Esta razón CSR depende directamente de la máxima aceleración horizontal en el sitio; a fin de obtener un mejor estimado de este parámetro.

El procedimiento requiere calcular dos variables sísmicas que son:

- a) La excitación sísmica del estrato de suelo, expresada en términos de la relación de tensiones cíclicas promedio ($CSR = T_{pro} / \sigma_{vo}$)
- b) La capacidad del estrato de suelo para resistir la licuefacción, en términos de la relación de resistencia cíclica (CRR).

En la mayoría de los procedimientos empíricos, el valor promedio de la relación de tensiones cíclicas (CSR) inducidos por el sismo se estima de los análisis de la respuesta dinámica del suelo, o mediante la expresión recomendada por Seed & Idriss (1971).

En este enfoque, la resistencia cíclica es caracterizada por la relación de esfuerzo cíclico (CSR). Básicamente, la CSR se define como el esfuerzo cortante promedio (avg) actuante en un estrato, normalizado por el esfuerzo efectivo de sobrecarga (σ_{vo}).

$$CSR = 0.658(a_{\max} / g)(\sigma_{vo} / \sigma_{vo'})rd \quad (1)$$

Donde:

CSR : Esfuerzos cíclicos y depende directamente de la máxima aceleración horizontal en el sitio

a_{\max} : Aceleraciones máximas generadas por un sismo de diseño

σ_{vo} : Esfuerzo normal vertical total, referido a la superficie del suelo

$\sigma_{vo'}$: Esfuerzo normal vertical efectivo, referido a la superficie del suelo

rd : Coeficiente de reducción del suelo, 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 rd :

Para $z \leq 9.15m$,

$$rd = 1.0 - 0.00765z \quad (2)$$

Para $9.15m < z \leq 23m$,

$$rd = 1.174 - 0.0267z \quad (3)$$

z : Profundidad por debajo de la superficie del suelo en m.

A partir de los valores extraídos con anterioridad de los informes provenientes de la ENIA se calculó el CSR y se plotearon los valores obtenidos en la curva de CSR vs SPT.

Una vez alcanzado el resultado de CSR se compara con los valores expuestos en la figura 1 y se comprueba si es un estrato licuable o no.

Cálculo del Coeficiente de Resistencia Cíclica (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 1 entonces se considera que es un estrato licuable.

Enfoque de resistencia cíclica (CRR)

Youd & Idriss (2001) han elaborado, a partir de datos obtenidos en campo a través de ensayos SPT, gráficas sobre la relación entre dos parámetros físicos que participan en la licuefacción de los suelos; estos son el Coeficiente Resistencia Cíclica (CRR, siglas en inglés) y $(N1)_{60}$, es decir el número de golpes suministrado al terreno, representado también por la letra N.

$N1_{60} = (N1)_{60}$ = El número de golpes de la prueba SPT normalizada a un esfuerzo geostático de 100 kPa y a la energía del martillo de 60 %.

CRR = La relación de resistencia cíclica para un sismo de diseño.

$$CRR = \frac{1}{34 - N} + \frac{N}{13.5} + \frac{50}{[10N + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (4)$$

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 y Whitman, 1986):

$$N1 = N * C \quad (5)$$

$$C_N = \left[\frac{1}{\sigma'_V} \right]^{0.5} \quad (6)$$

Donde:

C_N : Factor de corrección para una tensión efectiva de sobrecarga de 1 ton/pie²

σ'_V : Tensión efectiva vertical en atmósferas.

La resistencia del suelo queda representada por $(N1, 60)$, la cual es la cantidad de golpes del SPT corregido para una presión de sobrecarga efectiva

de 1 Ton/pie² ($\approx 1 \text{ kg/cm}^2$), 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:

$$N_{1.60} = N_1 * C_R * C_S * C_B * C_E \quad (7)$$

En la Tabla 1 se recogen los factores que intervienen en la estimación del número de golpe normalizado ($N_1, 60$).

Tabla 1. Correcciones a SPT (Skempton, 1986)

Factor	Variable de Equipo	Término	Corrección
Presión vertical normal efectiva	N/A	CN	$(P_a / \sigma'_{vo})^{0.5}$
Presión vertical normal efectiva	N/A	CN	$CN \leq 1,7$
Relación de energía	Martillo tipo dona	CZ	0,5 – 1,0
Relación de energía	Martillo de seguridad	CZ	0,7 – 1,2
Relación de energía	Martillo automático tipo dona	CZ	0,8 – 1,3
Diámetro de la perforación	65-115 mm	CB	CB
Diámetro de la perforación	150 mm	CB	1,05
Diámetro de la perforación	200 mm	CB	1,15
Longitud de la barra	< 3 m	CR	0,75
Longitud de la barra	3 – 4 m	CR	0,80
Longitud de la barra	4 – 6 m	CR	0,85
Longitud de la barra	6 – 10 m	CR	0,95
Longitud de la barra	10 – 30 m	CR	1,0
Muestreo	Muestreador estándar	CS	1,0
Muestreo	Muestreador sin ademe	CS	1,1 1,3

Metodología aplicada para el análisis de los indicadores para el estudio de la susceptibilidad a la licuefacción en el área de estudio

Análisis de las condiciones geológicas del área de estudio

Con la revisión de los mapas y esquemas geológicos del área de estudio realizados por especialistas de GEOCUBA se pudo realizar la evaluación de las condiciones geológicas. Se determinaron así las formaciones presentes en el área y, de acuerdo a las edades y

sedimentos de cada una de ellas, se delimito cuáles eran las más expuestas a la ocurrencia del fenómeno de licuefacción.

Análisis del comportamiento de la sismicidad en el área de estudio

Para realizar el análisis del comportamiento de la sismicidad en el área de estudio se revisó la norma para construcciones sismo resistente, requisitos básicos para el diseño y construcción.

Análisis del comportamiento del nivel freático en el área de estudio

El análisis del comportamiento del nivel freático en el área de estudio se realizó a través de la revisión de los informes técnicos de las obras realizadas por parte de la ENIA Holguín, en los diferentes municipios analizados.

Análisis de las condiciones ingeniero-geológicas

Se revisaron los informes ingeniero-geológicos efectuados por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) y se seleccionaron las propiedades físicas y mecánicas por cada obra presentes en el área de estudio. Se confeccionó 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.

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. En la región existen reportes de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en el poblado de Cauto Embarcadero a orillas del río Cauto, municipio de Río Cauto, a raíz del terremoto del año 1951. Por eso se considera un área propensa a que ocurra el fenómeno, pues se ha observado que la licuefacción ocurre frecuentemente en los mismos lugares cuando las condiciones del sitio se mantienen constantes.

Otro de los criterios que se tuvo en cuenta fue la cercanía a una zona sismo generadora, la probabilidad de ocurrencia y período de recurrencia de un sismo fuerte,

la sismicidad del área y las posibles amplificaciones de las aceleraciones sísmicas dado el efecto de sitio.

Se analizaron, asimismo, las condiciones geológicas como otro criterio de gran importancia. Casi todos los escenarios propuestos están cerca de depósitos fluviales y deltaicos; igualmente, 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. Estos suelos se encuentran semisaturados y saturados en su mayoría pues el nivel freático se encuentra en ocasiones a muy poca profundidad y, además, el clima y el relieve de la región así lo propicia.

Se analizó, también, la edad del depósito. Las áreas que se estudiaron pertenecen a formaciones del Cuaternario, 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 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.

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

Validación del sistema de indicadores propuestos en la provincia de Granma

Condiciones geológicas

En la provincia de Granma predominan los suelos compuestos principalmente por arenas, arcillas, sedimentos jóvenes producto de la erosión fluvial; representados fundamentalmente en la formación Cauto, de edad Pleistoceno Superior, parte baja; la formación Bayamo de edad Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior, las cuales se desarrollan a lo largo de la llanura del Cauto, en los municipios de Bayamo, Río Cauto, Cauto Cristo, y también afloran en algunas zonas de Pílon, Niquero, entre otras.

Estos materiales, principalmente las arenas con bajo contenido de arcillas, las arcillas de baja plasticidad y los sedimentos muy jóvenes, son los más propensos a licuar ante sismos de gran magnitud.

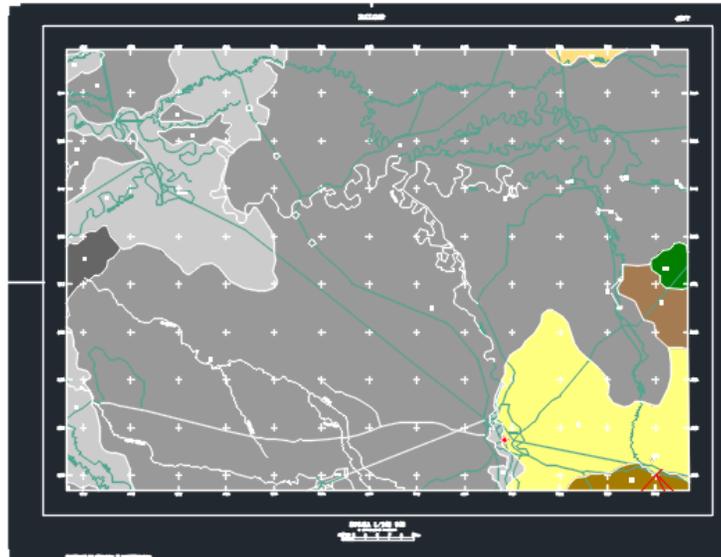


Figura 2. Mapa geológico de la región de estudio. Mapa de Cuba Oriental 1: 100 000. Bayamo, Granma.

Sismicidad

Según la zonificación sísmica propuesta en la norma cubana 46:2013 en la provincia de Granma se encuentran zonas de riesgo sísmico bajo (zona 2) a zonas de riesgo sísmico alto (zona 4), que pudieran ocasionar serios daños a las estructuras.

Tabla 2. Peligro sísmico en las diferentes zonas por municipios en la provincia de Granma.

Municipios	Zona
Río Cauto	2
Cauto Cristo	3
Bayamo	3
Manzanillo	3
Niquero	4
Pilón	4

Características hidrográficas

Los Recursos Hídricos Potenciales en Granma alcanzan los 4 499 hm³, de los cuales 3 895 corresponden a las aguas superficiales y 604 a las aguas subterráneas. Su red

hidrográfica está compuesta principalmente por el río Cauto, el de mayor significación, pero se destacan también el Cautillo, el Bayamo, el Salado y otros.

Según informes de las investigaciones ingeniero-geológicas realizadas por la ENIA Holguín las profundidades del nivel freático son muy variables; se pueden encontrar valores entre 0,60 m hasta 15 m, principalmente en los municipios de Río Cauto, Bayamo, Cauto Cristo, alcanzando en ocasiones niveles de hasta 15 m. Esta variabilidad depende mucho de la época del año, con tendencia al aumento en época de lluvia.

Condiciones ingeniero-geológicas

Para el estudio de las condiciones ingeniero-geológicas se tuvieron en cuenta algunas propiedades, entre las que se encuentran: porcentaje de arena (Ar) y de finos (Fi), límite líquido (LL), humedad natural (W), densidad húmeda (γ_f), densidad seca (γ_d), peso específico y prueba estándar de penetración, las cuales permitieron clasificar los suelos del área de estudio.

Entre las principales clasificaciones para los suelos de Granma se encuentran: (CL) arcilla de baja plasticidad; (CH) arcilla muy plástica; (SC) arena arcillosa; (SM) arena limosa; (SM-SP) arena mal graduada con limo; (GP-GM) grava mal graduada con limo; (GC) Grava arcillosa, según la NC 59:2000.

Conclusiones

La provincia de Granma, desde el punto de vista ingeniero-geológico, posee sectores de condiciones favorables para que ocurra el fenómeno de licuefacción de los suelos.

Los suelos de la provincia de Granma están representados en algunos sectores por sedimentos jóvenes producto de la erosión fluvial, principalmente, y se clasifican en (CL), (CH), (SC), (SM), (SM-SP), (GP-GM), (GC), tal como se explica anteriormente.

Las áreas dentro de la provincia de Granma que son propensas a licuar dado el caso de un sismo de gran magnitud son: Río Cauto, Cauto Cristo, Bayamo, Niquero, Manzanillo y Pilón, donde afloran las formaciones Cauto y Bayamo y depósitos palustres y aluviales y los sedimentos del Cuaternario.

Referencias bibliográficas

- CHUY, T. 2010. Modelo del peligro sísmico de la provincia de Santiago de Cuba. Archivos CENAIIS.
- 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.
- INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y PALEONTOLOGÍA. 2002. *Léxico Estratigráfico de Cuba*. Centro Nacional de Información Geológica. La Habana. Consultado: 10 nov 2012. Disponible en: catalogo.bnjm.cu/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=107625
- LIAO, S. S. & WHITMAN, R. V. 1986. Overburden correction factors for SPT in sand. *Journal of geotechnical engineering* 112(3): 373-377.
- 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.
- SEED, R. B.; CETIN, K. O.; MOSS, R. E.; KAMMERER, A. M.; WU, J.; PESTANA, J. M., ... & FARIS, A. 2003. Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework. In: 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar. Long Beach, CA.
- SKEMPTON, A. W. 1986. Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation. *Geotechnique* 36(3): 425-447.

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.

WANG, W. 1979. *Some findings in soil liquefaction*. Earthquake Engineering Department, Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute.

YOUNG, 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.