



Instituto Superior Minero Metalúrgico de
Dr. Antonio Núñez Jiménez



Departamento de Ingeniería Geológica

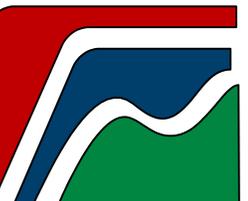
Trabajo de Diploma

En opción al Título de Ingeniero Geólogo

Título: Escenarios susceptibles a la licuefacción inducida por terremotos de gran magnitud en la zona urbana del municipio Guantánamo.

Autor: Leonor Villalón Poulut

Tutor: Ms C. Liuska Fernández Diéguez



Dedicatoria

A la Revolución Cubana y a su líder indiscutible Fidel Castro Ruz, por darme la oportunidad de formarme como una profesional competente.

A los amigos de la universidad por compartir cinco años inolvidables en especial a: Chenia, Loide, Estelvino, Albino, Tomás.

A mis compañeros Lilisbet, Raisa, Yilian, Celia, Sallette, Roilán, Enrique, Misael, José y Javier.

A todos los profesores que contribuyeron en mi formación, en especial a mi tutora Liuska Fernández Diéguez, por su entrega y dedicación a este trabajo.

A mi familia que ha estado presente en todos los momentos de mi vida, los cuales han sido el mayor incentivo para la realización de esta investigación, en especial a mi hermano Luis Villalón y mis padres Yaneydis Poulut y Luis Villalón.

Agradecimientos

Doy gracias de todo corazón a todos aquellos que han formado parte de mi vida: mi familia, amigos, compañeros; a esas personas que un día conocí, a las que conoceré e incluso aquellas que olvidé.

Les doy gracias por quererme, por estar para mí en las buenas, en las malas y sobre todo por ser responsables de una forma u otra de la persona que soy.

A los que de una forma u otra contribuyeron a la realización de esta investigación.

Doy gracias a la vida por permitirme completar esta obra.

Y sobre todo me llena de satisfacción que GRACIAS A DIOS y después de toda una serie de investigaciones se llegue felizmente a la culminación de este trabajo.

Pensamientos

... La mejor ayuda para realizar un Proyecto es la firmeza de quien se lo propone...

Benjamín Franklin

“No des vueltas al pasado, pues no lo puedes cambiar. Que no te agobie el futuro, no sabes si llegará. Disfruta y vive el momento, no lo dejes escapar, porque una vez que se vaya ya nunca más volverá”.

Anónimo

RESUMEN

La licuefacción del suelo, inducida por terremotos, es una de las principales causas del riesgo sísmico urbano provocado principalmente por el tipo de suelo donde se emplazan las construcciones y su respuesta ante un sismo. La investigación se realizó en la zona urbana del municipio Guantánamo por el alto grado de peligrosidad sísmica; dada la cercanía a la zona sismogénica Batalle-Caimán. Esta investigación se llevó a cabo dado el insuficiente conocimiento de las condiciones ingeniero-geológicas de los suelos que propician la ocurrencia de la licuefacción ante un sismo de gran magnitud. Para dar respuesta se empleó un conjunto de métodos como la validación de los resultados de acuerdo al análisis del sistema de indicadores donde incluye el análisis de la geología, sismicidad y calcular el factor de seguridad para la licuefacción. Como resultado se obtuvo un pronóstico de las áreas susceptibles; definiendo que las zonas potencialmente licuables están constituidas por los suelos tipo grava arcillosa con arena (GC), arcilla de baja plasticidad (CL), además, de las áreas cercanas al litoral compuesta por depósitos aluviales y palustres. Este resultado es de gran utilidad para la ubicación y planificación de obras ingenieriles de futuros trabajos en el área.

ABSTRACT

The liquefaction of the soil, induced by earthquakes, is one of the main causes of structural urban risk caused mainly by the type of soil where the buildings are located and their response to an earthquake. The investigation was carried out in the urban area of the Guantanamo municipality due to the high degree of seismic hazard; given the proximity to the seismic zone Batalle-Cayman. This investigation was carried out with the knowledge of the geological conditions of the soils that propitiate the occurrence of the liquefaction before an earthquake of great magnitude. To answer, a set of methods is used, such as the validation of the results of the analysis of the indicator system, which includes the analysis of geology, seismicity and the safety factor for liquefaction. As a result, a prognosis of the susceptible areas was obtained; Define that areas potentially prone to corruption are constituted by clay-gravel with sand (GC), clay of low plasticity (CL) soils, in addition, of the areas near the coast composed of alluvial and marshy deposits. This result is very useful for the location and planning of engineering works for future work in the area.

ÍNDICE

RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VI
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. MARCO TÉORICO CONCEPTUAL Y CONTEXTUAL	5
1.1 Introducción.....	5
1.2 Estado del arte y marco teórico conceptual	5
1.2.1 Factores que influyen en la licuefacción (Seed & Lee, 1966).....	10
1.2.2 Factores que condicionan la ocurrencia de licuefacción (Shadenet, 1990).....	10
1.2.2.1 Criterios de susceptibilidad de los suelos licuables	12
1.2.2.2 Condición de un suelo para que sea licuable	14
1.2.3 Evidencias históricas del fenómeno de licuefacción de suelos en el mundo y en Cuba	17
1.2.4 Sismicidad de Cuba como factor catalizador de la licuefacción de los suelos	26
1.2.5 Investigaciones realizadas en Cuba sobre la licuefacción	30
1.3 Características generales del municipio Guantánamo	34
1.3.1 Ubicación geográfica	34
1.3.2 Relieve.....	35
1.3.3 Clima	36
1.3.4 Geomorfología	36
1.3.5 Características hidrogeológicas	36
1.3.6 Características ingeniero – geológicas.....	37
1.3.7 Condiciones geológicas	38
1.3.8 Sismicidad y régimen sísmico	39

1.3.9 Desarrollo económico social 40

1.4 Conclusiones..... 41

CAPÍTULO II:METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN 42

2.1 Introducción..... 42

2.2 Metodología de la investigación 42

2.3 Métodos utilizados para evaluar la susceptibilidad a la licuefacción 44

2.4. Sistema de indicadores para el estudio de la susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en la región oriental de Cuba (Fernández, 2015) 46

2.4.1 Esquema ingeniero geológico por tipo de suelos 48

2.4.2 Calcular el Cyclic Stress Ratio (CSR) 49

2.4.3 Cálculo del Coeficiente de Resistencia Cíclica CRR 52

2.4.4 Calculo del factor de seguridad para la licuefacción (FSL)..... 55

2.5 Conclusiones..... 56

CAPÍTULO III: EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE INDICADORES PARA DETERMINAR EL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN EN EL MUNICIPIO GUANTÁNAMO 57

3.1 Introducción..... 57

3.2. Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio Guantánamo57

3.2.1 Condiciones geológicas del municipio..... 57

3.2.2 Sismicidad 58

3.2.3 Características hidrogeológicas 58

3.2.4 Condiciones ingeniero-geológicas 59

3.2.5 Análisis de la condiciones ingeniero -geológicas..... 62

3.3 Conclusiones..... 67

CONCLUSIONES..... 68

RECOMENDACIONES..... 69

BIBLIOGRAFÍA 70

ANEXOS 77

INTRODUCCIÓN

El riesgo sísmico, al igual que todos los riesgos de desastres, debe ser minuciosamente estudiado, teniendo en cuenta el comportamiento del terreno ante los efectos destructivos del desastre; en este caso las sacudidas verticales y horizontales que inciden sobre las edificaciones y las obras de infraestructuras en el territorio y que no llegan con igual intensidad a cada sitio de análisis.

La sismicidad es uno de los fenómenos naturales que más ha preocupado a la humanidad a través del tiempo, pues aún no se dispone de un mecanismo predictivo que permita alertarnos ante la inminencia de un terremoto. Se trata de un desastre de difícil pronóstico (al menos con la antelación suficiente para la toma de medidas); entonces el reto a la reducción de las pérdidas está en los criterios de protección desde la correcta microlocalización y la concepción (Arcos & Garzón, 2012).

Durante un terremoto la vibración intensa puede producir que un sedimento saturado en agua cambie rápidamente de estado sólido a líquido. Este efecto (licuefacción), que le confiere momentáneamente al material afectado la capacidad de fluir, se suele producir en materiales sueltos, normalmente arenas y gravas, a poca profundidad y en zonas costeras o cercanas a ríos y lagos.

La licuefacción del suelo inducida por terremotos es uno de los principales contribuyentes al riesgo sísmico urbano. La pérdida de sustentación en pilares, zapatas de construcciones de todo tipo, ascenso a la superficie de depósitos subterráneos y rotura de tuberías por flotabilidad en los materiales licuefactados son algunos de los efectos asociados a este tipo de fenómeno.

El término 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).

Los suelos licuables son aquellos 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 los que la resistencia al corte desaparece y el material se comporta como un líquido, dando lugar a movimientos verticales y horizontales de su masa que se traducen en deslizamientos o en grandes asientos (González de Vallejo, 2002).

Cuando se habla de la licuefacción de los suelos surgen varias dudas, lo que está dado por el escaso conocimiento sobre los mecanismos de rotura y deformación asociados a este fenómeno, lo que limita el uso de ensayos elementales para estudiarlo (Bandera, 2015).

El limitado conocimiento relativo a este fenómeno se debe a:

- Dificultad en observar sus características en condiciones reales.
- Complejidad del fenómeno, pues además de ser el resultado de una acción sísmica de carácter altamente variable, induce en el suelo un comportamiento fuertemente no lineal, con fuerte degradación de las características mecánicas del suelo de cada ciclo determinada por la generación de presiones neutras en la muestra.

La necesidad de evaluación de la vulnerabilidad sísmica en las zonas urbanas aparece como resultado del estudio de la respuesta de los suelos en caso de sismos moderados y fuertes. El estudio de este fenómeno en la actualidad resulta de gran importancia. Las experiencias derivadas de las catástrofes de Santiago de Cuba 1932 y Bayamo 1947 nos convocan a no dejar de prestar atención a la sismicidad como una premisa de desastres para Cuba.

A pesar de que en los últimos años no se ha producido evidencia de casos de licuefacción, existen antecedentes históricos al respecto, por lo que no está exento de volver a ocurrir, ya que existen ambientes propicios para que se manifieste la licuefacción.

Al tener la experiencia histórica de efectos producidos en la ciudad de Guantánamo por sismos fuertes, resulta importante evaluar la potencialidad de ocurrencia de este fenómeno físico-geológico inducido por terremotos moderados y fuertes.

La mayoría de los estudios encaminados a la ocurrencia del fenómeno en nuestro país se han realizado en la provincia de Santiago de Cuba debido al gran riesgo sísmico que presenta, según los reportes históricos más del 60% de los sismos fuertes reportados en el país han tenido su epicentro en esta provincia.

Al tener la experiencia histórica de efectos producidos en la ciudad de Guantánamo por sismos fuertes, dada la cercanía del municipio a la zona sísmo generadora Bartlett-Caimán, capaz de provocar sismos fuertes con aceleraciones mayores de 0,2g, se hace necesaria la evaluación de la ocurrencia del fenómeno licuefacción, inducido por terremotos moderados y fuertes. Este estudio se justifica plenamente en la ciudad de Guantánamo, al estar ésta asentada sobre suelos de una constitución geológica resultante de la evolución de la cuenca del mismo nombre y del arrastre de los ríos que la cruzan.

Partiendo de estas premisas surge la idea de realizar un estudio detallado del fenómeno de licuefacción en la provincia de Guantánamo, específicamente en el municipio cabecera dada la posibilidad de que se desencadene este fenómeno físico-geológico como consecuencia de la coexistencia de estas realidades.

Problema de la investigación: Necesidad de evaluar las condiciones ingeniero-geológicas de los suelos del sector urbano del municipio Guantánamo para determinar su susceptibilidad a la licuefacción, dada su cercanía a la zona sísmo generadora Batlle-Caimán.

Campo de acción: La licuefacción de los suelos como fenómeno geológico inducido por sismos de gran magnitud.

Objeto de estudio: Los suelos del sector urbano del municipio Guantánamo.

Objetivo general: Evaluar las condiciones ingeniero -geológicas de los suelos del sector urbano del municipio Guantánamo para determinar su potencial licuable ante un sismo de gran magnitud.

Objetivos específicos:

- ❖ Identificar los suelos donde las propiedades físico- mecánicas favorecen la ocurrencia de la licuefacción.
- ❖ Caracterizar las condiciones ingeniero-geológicas de las formaciones presentes en el sector urbano del municipio Guantánamo.
- ❖ Zonificar el potencial de licuefacción según las condiciones ingeniero-geológicas del área de estudio.

Hipótesis: Si se caracterizan los suelos a partir de las condiciones ingeniero-geológicas se podrá evaluar la susceptibilidad a la licuefacción ante un sismo de gran magnitud en el municipio Guantánamo y zonificar los escenarios susceptibles.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL Y CONTEXTUAL

1.1 Introducción

En este capítulo se describe el fenómeno de licuefacción de suelos y los principales factores que influyen en su ocurrencia. De igual forma se expone el nivel de conocimiento actual en Cuba y el mundo sobre el tema y se realiza un análisis de las características físico-geográficas y geológicas del área de estudio.

1.2 Estado del arte y marco teórico conceptual

La Ingeniería Geológica es la rama de la ingeniería que aborda la resolución de problemas relacionados con la interacción directa e indirecta del hombre con el medio geológico, entendido éste como el soporte de las actividades humanas. A su vez, la International Association of Engineering Geology (IAEG, 1992) define la ingeniería - geológica como la disciplina dedicada a la investigación, estudio y resolución de problemas de ingeniería y medioambiente que pueden resultar de la interacción entre la geología y los trabajos o actividades humanas, así como a la predicción y desarrollo de medidas de prevención o corrección de riesgos geológicos.

Esta rama de la geología surge con el desarrollo de las grandes obras públicas y el crecimiento urbano, diferenciándose como especialidad de la geología a mediados del siglo xx. La rotura de algunas presas por causas geológicas y sus graves consecuencias, incluyendo la pérdida de cientos de vidas humanas, como la presa de San Francisco (California, 1928), la de Vajont (Italia, 1963) y la de Malpasset (Francia, 1959), los deslizamientos durante la construcción del Canal de Panamá en las primeras décadas del siglo, o las roturas de taludes en los ferrocarriles suecos en 1912, fueron algunos hitos que marcaron la necesidad de llevar a cabo estudios geológicos aplicados a la ingeniería (González de Vallejo, 2002).

Existen diversos trabajos realizados en Cuba en vista a esta rama entre los que se pueden citar:

En la región de Guantánamo, provincia donde está enmarcada la zona de estudio según (Roríguez,1981), las primeras observaciones geológicas provienen de (Darton & Meinizer, 1926). En este informe se describe de forma bastante general las características de las formaciones geológicas presentes.

En 1934, S. Taber publicó algunos datos de interés sobre esta región, pero basados fundamentalmente en los informes de los autores antes mencionados.

Otro trabajo realizado corresponde a (Kosary, 1955) (Reconocimiento geológico de la cuenca de Guantánamo) el mismo recoge la geología del valle de Guantánamo y un área relativamente extensa de sus alrededores. Siguiendo con esta área en 1988, Méndez realiza una generalización de las características estratigráficas de la cuenca de Guantánamo incluyendo el borde centro sur del anticlinal oriental, además de un análisis formacional y bioestratigráfico del área.

Entre los años 1973 y 1974 se realizó el levantamiento geológico a escala 1: 550 000 por parte de la Academia de Ciencias de Cuba en colaboración con la Academia de Ciencias de Holguín. A partir de este se resumen: Estratigrafía de Puriales de Caujerí (Martínez & Marcelo, 1976) y geología parte centro –sur por Recouso (1981), Geología del área Bayate Norte (García, 1977), Levantamiento geológico del valle de Cajobabo y sus alrededores (Thompson,1976) y Geología de la zona de Felicidad de Yateras (Navarro, 1979).

Desde el punto de vista ingeniero - geológico existen algunos informes de complejos Hidráulicos: La Yaya, Jaibo, Clotilde, Sabanalamar, Guaibano y Esquema Guantánamo, siendo las primeras de este tipo realizadas por (Stoev, 1967) en el cual el autor realiza estudios en diferentes zonas con vista a la construcción de obras hidráulica. Así como estudios geológicos e hidrogeológicos de la parte sur de la Sierra Canasta (Carratage, 1974), del Sector I Aguas Mesas (Suarez, 1991) y la Fundamentación Hidrogeológica del mejoramiento de tierras en el área las Lobillas (margen izquierdo de la parte baja del río Jaibo) por Rodríguez, (1990).

Siguiendo con la investigación ingeniero-geológica a través del proceso de mapas creados (Garces, 1992) expone una investigación regional básica para la ubicación del túnel en el trasvase Yateras –Guantánamo.

En la rama del medio ambiente se realizan estudios de impacto ambiental en el Dique Paraguay (Áreas, 2000) con propuestas de medidas para la corrección de sus principales problemas. En el área de la cuenca hidrográfica Guantánamo-Guaso se abordan estudios de identificación y desarrollo de indicadores que advierten sobre la vulnerabilidad del ecosistema en la cuenca por parte del INRH y de la Carga Contaminante en la misma (Serrano, 2000).

Trabajos orientados a la determinación de ocurrencia de fenómenos físico-geológicos inducidos por terremotos moderados y fuertes se han realizado en la ciudad de Guantánamo por (Seisdedos, Oliva, & Pileta, 1984), (Zapata, 1995), Chuy (1999) y Zapata et al (2002) en los que se presentaron los tipos litológicos y resultados de estudios de microzonación sísmica instrumentales.

A través de la historia de los eventos sísmicos, el comportamiento de los suelos ante los efectos de sismos ha sido objeto de estudio. Debido a ello, las condiciones en que los suelos granulares pierden una parte significativa de su resistencia, bajo la acción de un sismo, no han sido completamente comprendidas y en consecuencias, representan un magnífico campo de investigación (Mussio, 2012).

Entre los riesgos geológicos se encuentra la licuefacción del suelo, un fenómeno que consiste en la pérdida de consistencia del terreno y de la fuerza que este tiene para soportar grandes cargas.

Los primeros estudios cuantitativos de estos fenómenos pertenecieron, originalmente, al análisis estático de los taludes naturales de las márgenes del río Mississippi. Estos habían presentado un comportamiento inestable, provocados por la subida gradual del nivel freático y en algunos casos fluctuaciones en el nivel de marea, modificando las redes de filtración del terreno. A causa de estas variaciones se producían deslizamientos, y al mismo tiempo se detenían cuando el ángulo del talud había alcanzado unos escasos grados. Para explicar este fenómeno

(Casagrande en 1916) propuso el concepto de “Relación de vacío crítica”. Posteriormente, se realizó un estudio extensivo de numerosos deslizamientos a lo largo de la ribera del río Mississippi. Precisamente (Casagrande 1936), llamó “movilidad cíclica” al fenómeno de licuefacción muy limitada, provocada por cargas cíclicas. Ocurre en suelos con compacidad relativa alta, con una resistencia residual mayor que la tensión tangencial estática actuante. Las deformaciones debido a la movilidad cíclica se desarrollan de manera incremental debido a que atacan simultáneamente las tensiones estática y dinámicas.

Existen autores que reconocen que el término de licuación fue utilizado por primera vez por Hazen (1920) para explicar la falla que se originó en la Presa Calaveras en California. Sin embargo, este fenómeno adquirió mayor importancia a partir de los estudios pioneros de Casagrande (1936), quien reconoció que bajo ciertas condiciones de densidad, las arenas saturadas con comportamientos contractivos sujetas a esfuerzos cortantes, pueden desarrollar una presión de poro elevada y una pérdida súbita de resistencia, sin importar la magnitud del movimiento.

El fenómeno de licuefacción (Alfaro, 2013) se manifiesta en la superficie del terreno por la formación de grietas, hundimientos de terreno, asentamientos diferenciales de estructuras, “golpes de agua” (surgimiento de agua) y volcanes de arena. Los dos últimos son producto del súbito aumento de la presión de agua de poros ocasionada por la vibración, forzando a que este fluido fluya rápidamente a la superficie. Si el flujo asciende lo suficientemente rápido se generan “golpes de agua”. Al mismo tiempo, el agua ascendente puede transportar partículas de arena hasta la superficie donde son depositadas formando montículos de arena, a los que por analogía se les denomina “volcanes de arena”.

La pérdida de cohesión del suelo permite que este se pueda movilizar, diferenciándose varios tipos de desplazamientos asociados a la licuefacción:

- **Flujos de tierra:** Los materiales del suelo se desplazan rápidamente cuesta abajo en un estado licuado, a veces causando coladas de barro o avalanchas.

- **Propagación lateral:** Tipo de remoción en masa en que se produce desplazamiento limitado de las capas superficiales del suelo a favor de pendientes suaves o hacia superficies libres, como por ejemplo, en márgenes de ríos y taludes de terrazas fluviales. En este tipo de desplazamientos, a menudo ocurre que las capas superficiales están revestidas de cubiertas antrópicas, como por ejemplo asfaltos. Cuando las capas más profundas se licúan, las capas superficiales antrópicas, generalmente, se mueven lateralmente en bloques, tanto durante como después del sismo, provocando una deformación permanente del suelo y ruptura de las cubiertas.
- **Flotación:** Objetos enterrados en el suelo bajo licuación son desplazados. Es común que tanques, buzones o tuberías de alcantarillado asciendan a través del suelo y floten en la superficie.
- **Pérdida de resistencia de soporte:** Reducción de la capacidad de soporte de los cimientos debido al debilitamiento del material del suelo subyacente o colindante. A menudo provocan que las estructuras se hundan o dañen.

Según (Perucca et al., 2006) autores como Obermeier, (1994) y Moretti *et al.*, (1995) coincidieron en señalar que sismos de magnitud 6 pueden generar estructuras de licuefacción en un radio de 40 km. Audemard y De Santis, (1991) estudiaron estructuras de licuefacción a 25 km del epicentro para sismos de magnitud 5 a 5,7. Para terremotos de magnitud 7 según (Seed, 1968) el radio en el que se pueden dar licuefacciones es de 70 km y para sismos de magnitud 8 o superior, el radio pasaría a ser de 100 km Moretti *et al.*, (1995). Sin embargo, durante el sismo de 1977 ocurrido en la provincia de San Juan, con magnitud 7,4, se registró licuefacción a distancias de hasta 260 km en línea recta al epicentro. Este fenómeno es un punto de análisis donde se involucran varias condiciones, desde la forma de transmisión de ondas sísmicas, los tipos de suelos, hasta la variación de los niveles freáticos en las subcuencas que forman el valle.

1.2.1 Factores que influyen en la licuefacción (Seed & Lee, 1966)

Sobre la licuación de los suelos se ha escrito mucho en el mundo dado que es uno de los fenómenos más dramáticos y destructivos y además, más polémicos y peor explicados que pueden ser inducidos en depósitos por acciones sísmicas. Los estudios de la licuefacción sísmica llevaron a postular las siguientes condiciones:

- Si la presión de poros inducida por la acción dinámica o cíclica del terremoto alcanza el valor de la presión de confinamiento, el suelo alcanzará el estado de licuefacción inicial.
- Si la arena sometida a acción cíclica alcanza el 20% de deformación se alcanzará la licuefacción total.

1.2.2 Factores que condicionan la ocurrencia de licuefacción (Shadenet, 1990)

- 1- **Distribución del tamaño de los granos.** La arena uniformemente graduada, con granos muy gruesos tiene mayor probabilidad de licuarse, mientras que las arenas limosas y gravas lo hacen bajo cargas cíclicas muy severas.
- 2- **Profundidad de las aguas subterráneas.** Mientras menor sea el nivel de las aguas subterráneas, mayor será la probabilidad de que ocurra licuefacción.
- 3- **Densidad.** El suelo puede densificarse cuando está sujeto a una carga cíclica, reduciendo su volumen de suelo- agua e incrementando la presión intersticial si los poros intergranulares se llenan de agua. Cuando esto ocurre habrá menor posibilidad de que se produzca su licuefacción.
- 4- **Peso del recubrimiento y profundidad del suelo.** Las tensiones entre partículas aumentan a medida que aumenta la presión del recubrimiento y mientras mayor sea dicha tensión menor será la probabilidad que ocurra licuefacción. Por lo general, ocurre a profundidades menores de 9 metros; rara vez a mayores de 15 metros.
- 5- **Amplitud y duración de la vibración del terreno.** La licuefacción de suelos bajo condiciones de tensión provocadas por un terremoto puede ocurrir ya sea: cerca del epicentro si son pequeños o moderados, o a cierta distancia si son moderados a severos.

6- Edad del depósito. Los suelos jóvenes (menos de 3.000 años) son débiles y no cohesivos, de modo que tienen mayor probabilidad de licuarse que aquellos más antiguos donde actuaron procesos como compactación y cementación que incrementaron su resistencia.

7- Origen del suelo. El suelo depositado por procesos fluviales se sedimenta fácilmente y sus granos tienen poca probabilidad de compactarse, de modo que se licuarán con facilidad. Los depositados glaciales, generalmente ya son bastante densos y tienen menor probabilidad de licuarse (Ishihara, 1990).

Tabla 1: Unidades geomorfológicas que se tienen en cuenta en la susceptibilidad de licuefacción (Iwasaki et al 1982.) Tomado de (Fernández, 2000)

Categorías	Topografía	Potencial de licuación
A	Cama actual del río, cama vieja del río, pantanos, tierras reclamadas, tierras bajas.	Licuable
B	Abanico, dunas de arenas, deluvio, playas y otras llanuras.	Probablemente licuable
C	Terrazas, colinas, montañas.	No licuable

Tabla 2: Susceptibilidad de licuefacción de los sedimentos de acuerdo a su edad y profundidad de las aguas subterráneas. (Iwasaki et al 1982.) Tomado de (Fernández, 2000)

Unidad de sedimentos	Profundidad a que se encuentran las aguas subterráneas en metros			
	0 - 3 m	3 - 10 m	10 - 15 m	> 5 m
Holoceno:				
Ultimo	Muy alto - alto	Moderado	Bajo	Muy bajo
Primero	Alto	Moderado	Bajo	Muy bajo
Pleistoceno:				
Tardio	Bajo	Bajo	Muy bajo	Muy bajo
Medio-temprano	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo
Terciario y preterciario	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo

Tabla 3: Unidad geomorfológica detallada de susceptibilidad de licuefacción sujeta a un grupo de movimientos de intensidad VIII según la escala de M.M. (Iwasaki et al 1982. Tomado de (Fernández, 2000)

Condiciones geomorfológicas		Potencial de licuación.
Clasificación	Condiciones específicas	
Valle plano	Valle plano compuesto por gravas o cantos rodados	No licuable
	Valle plano compuesto por suelo de arenisca	Probable
Aluvial	Gradiente vertical de más de 0.5 %	No licuable
	Gradiente vertical menor que 0.5 %	Probable
Canal de río abandonado		Licuable
Cause del río seco	Cause seco del río compuesto por gravas	No licuable
	Cause seco del río compuesto por arenas	Licuable
Playa	Playa natural	No licuable
	Playa artificial	Licuable
Interestratificación de tierra bajas		Licuable
Tierra recuperada por drenaje		Probable
Tierra recuperada		Licuable
Muelle		Licuable
Relleno	Relleno limite entre las arenas y las tierras bajas	Licuable
	Relleno colindante al arrecife, pendiente escarpada	Licuable
	Relleno sobre pantano o ciénaga	Licuable
	Relleno de tierra recuperado por drenaje	Licuable

1.2.2.1 Criterios de susceptibilidad de los suelos licuables

No todos los suelos son susceptibles de presentar licuefacción, así que el primer paso en el desarrollo de una evaluación de riesgo de licuefacción es la determinación de la susceptibilidad de licuefacción. La susceptibilidad de licuefacción de un suelo puede ser evaluada usando criterios históricos, geológicos, basados en su composición o según su estado, estos criterios, descritos por (Kramer & Stewart, 2004), descritos a continuación:

- **Criterios históricos:** 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, observada en forma de paleo licuefacción, puede ser utilizada como prueba de susceptibilidad de licuefacción, en un determinado lugar.
- **Criterios geológicos:** Las condiciones geológicas también pueden indicar susceptibilidad de licuefacción, por ejemplo los suelos de depósitos fluviales y eólicos, cuando se encuentran saturados, tienen una alta probabilidad de ser susceptibles de presentar licuefacción. También se ha observado licuefacción en depósitos de abanicos aluviales, playas y estuarios, pero no de manera tan evidente como en los casos anteriores. Otro criterio geológico es la edad del depósito, en general los depósitos de suelo jóvenes son más susceptibles de licuefacción que los depósitos más antiguos.
- **Criterios basados en la composición del suelo:** La composición física de un suelo juega un importante papel en la determinación de su susceptibilidad de licuefacción. Las arenas uniformemente gradadas y limpias, compuestas principalmente de partículas redondeadas son intrínsecamente más susceptibles, mientras que los suelos bien gradados y los suelos con partículas angulares son menos susceptibles. La presencia de finos, particularmente finos plásticos ($IP > 10$), tiende a disminuir la susceptibilidad de licuefacción.
- **Criterios basados en el estado del suelo:** El potencial de licuefacción de un suelo también depende de su estado, como las tensiones efectivas a las que está sometido y su densidad in situ, ya que la tendencia de un terreno a densificarse, bajo condiciones de carga cíclicas, depende de su densidad y de las tensiones efectivas. Los suelos sueltos son bastante más susceptible de licuefacción que los suelos densos y, para una densidad dada, los suelos

bajo tensiones de confinamiento efectivas altas son más susceptible que los suelos bajo tensiones de confinamiento efectivas bajas.

1.2.2.2 Condición de un suelo para que sea licuable

Para la ocurrencia de la licuefacción de los suelos, particularmente, en aquellos suelos de grano fino para que licuen deben cumplir con ciertas condiciones granulométrica propuesta por Wang en el año 1979. Estas son:

- Porcentaje de finos de 0,005 mm <15%
- Límite líquido, LL <35%
- Natural contenido de agua > 0,9 LL
- Índice de liquidez <0,75
- Forma de las partículas redondeadas.

Seed & Idriss, (1982) consideran que un suelo puede licuar si:

- El porcentaje en peso de partículas <0,005 mm es menor del 15%
- LL < 35
- $w/LL > 0,9$

A este criterio se le conoció como criterio chino.

De igual manera, se señalan otros factores influyen que la susceptibilidad del suelo a la licuefacción aumente, entre estos la presión de confinamiento, la densidad relativa, y el esfuerzo cortante inicial, planteamiento corroborados por (Castro, 1969) y (Kramer & Semillas, 1988).

De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (SUCS), arenas clasificadas como CL-ML, SM-SC, o GM-GC son potencialmente licuables, (Youd & Idriss, 1998). Por otro lado, (Wang, 1979) considera que si un material granular tiene menos del 15 % de finos (arcillosos) y el límite líquido (LL) es mayor que 35 % y el contenido natural de agua es menor de 90 %, estos materiales se consideran no licuables.

En muchos de los terremotos ocurridos, por ejemplo en países como Argentina, se registraron fenómenos de licuefacción, principalmente en planicies fluviales de los valles en los que se ubica la mayor parte de la población y donde las condiciones son ideales para sufrir tales fenómenos.

Otras de las condiciones necesarias para que tenga lugar este modo de comportamiento del suelo son que el nivel freático esté alto, cerca de la superficie, que el grado de compactación sea bajo, equivalentes a valores N de SPT inferior a 20 golpes. De acuerdo con la observación de zonas afectadas por licuefacción, ésta tiene lugar en las siguientes circunstancias:

- Sismos con magnitud igual o superior a 5.5 con aceleraciones superiores o iguales a 0.2g.
- Por debajo de 15 metros de profundidad no se han dado licuefacciones.
- En la mayoría de los casos donde se han observado licuefacciones el nivel freático estaba a poca profundidad, inferior a 3 metros; por debajo de 5 metros la susceptibilidad de licuefacción es muy baja.

Algunos expertos consideran que una de las propiedades más importante que caracterizan los suelos licuefactibles es el bajo grado de compactación, es decir $N < 10$ para profundidades < 10 m y $N < 20$ para profundidades > 10 metros (González de Vallejo, 2002).

Es interesante lo expuesto por Charles Darwin en su libro “Viaje de un Naturalista Alrededor del Mundo”, donde relata su experiencia del terremoto de Concepción en 1835, que lo sorprendió en Chile. Su compañero de viaje, el capitán Fitz-Roy, le indicó que fue testigo de dos erupciones marinas: una semejantes a una columna de humo y otra parecida al chorro de agua lanzado por una inmensa ballena. Según el capitán, por todas partes el agua parecía en ebullición, se puso negra y dejó escapar vapores sulfurosos muy desagradables. De acuerdo al naturalista, estos fenómenos también se observaron en el terremoto de 1822 en la bahía de Valparaíso y los asocia a la “agitación del lodo que forma el fondo del mar, lodo que contiene materias orgánicas en descomposición” (González & Verdugo , 2014)

Es interesante recordar también que el fenómeno de licuefacción fue identificado y conceptualizado por la ingeniería -geotécnica a partir del año 1964, a raíz de los catastróficos efectos de éste en los terremotos de Niigata, Japón y de Alaska.



Figura 1. Izq. Efecto de la licuefacción en edificios post terremoto de Niigata 1964. Drch. cráteres de arena en el área de Milpitas luego del terremoto de San Francisco en 1906.

No hay duda que el terremoto de Valdivia de 1960, como otros eventos sísmicos anteriores, produjeron licuefacción de muchos sitios, pero la ingeniería nacional no logró entenderlos como tal.



Figura 2. Costanera de Valdivia después del terremoto de 1960.

1.2.3 Evidencias históricas del fenómeno de licuefacción de suelos en el mundo y en Cuba

La licuefacción ha ocurrido en numerosos terremotos como ha quedado en evidencia en los registros históricos y geológicos.

En diciembre de 1692 se produjo en la población de Talavera del Esteco (provincia de Salta), un violento sismo de Ms 7,0, que por dos días posteriores se repitió con mayor o menor intensidad, desapareciendo Talavera y produciendo derrumbes y agrietamientos en el Valle de Lerma donde estaba la ciudad de Salta (Lozano 1873). Según antiguos relatos, "la tierra se abrió en varias partes y lanzó una manga de agua, que inundó todo, no dejando tras sí, sino un montón de ruinas". Otros relatos mencionan que "Esteco se arruinó enteramente con un terremoto que abriendo la tierra por varias partes arrojó borbotones de agua que inundaron todo el terreno" (Alcedo 1789).

El 27 de octubre de 1894 se produjo un sismo con epicentro en el noroeste de la provincia de San Juan, considerado por sus efectos a grandes distancias del foco, como el de mayor magnitud ocurrido en territorio argentino. (Bodenbender, 1894) denomina este sismo "*Terremoto Argentino*" y le asigna una magnitud 8.2, ubicando su epicentro al noroeste de San Juan y La Rioja. Una de sus particularidades fue la gran alteración del terreno aún en áreas muy alejadas al epicentro, a más de 200 km de distancia. Se produjeron deslizamientos y fenómenos de licuefacción, agrietamiento del terreno, volcanes de arena y salida de agua en forma de chorros en los terrenos saturados de agua y sin cohesión. Bodenbender le asigna una importancia fundamental a la presencia de agua subterránea en la formación de estas estructuras y establece que estos efectos se producirían en los suelos de los valles y llanuras formados por depósitos blandos de arenas, arcillas y rodados con el agua subterránea a poca profundidad. La licuefacción fue uno de los efectos principales de todos los terremotos ocurridos en la región. Las grietas, volcanes de arena, derrames, han sido muy abundantes en áreas distantes hasta 260 km del epicentro, y afectaron áreas de hasta 4000 km².

El terremoto de Valparaíso de 1906 tuvo varios hechos que llamaron la atención de la población y que se pueden atribuir directamente licuación de suelos (Rodríguez & Gajardo, 1960) señalan los siguientes acontecimientos en las ciudades de Viña del Mar y Talca, respectivamente: “...en los momentos mismos en que se sucedían los temblores más fuertes, en la calle de Limache, frente a la Refinería de Azúcar, se abrió una profunda grieta por donde salía el agua a borbotones e igual cosa sucedió en varias partes de la población Vergara, donde se formaron verdaderas lagunas, sobre el nivel de las calles...”. “En distintos puntos se formaron hoyos circulares por donde salía agua y arena, formándose montículos de la última. Por uno de esos agujeros el agua saltó con fuerza, elevándose hasta 10 metros”. Tomado de (Perucca, Pérez, & Navarro, 2006)

Tambo de Mora, Perú, 15 de agosto de 2007 un terremoto de magnitud 8 y aceleración de 0,5 g durante 100 segundos provocó la licuefacción de arenas sueltas en múltiples lugares. Hubo desplazamiento lateral en dirección al mar, hundimiento y falla en cimentaciones debido a que no se tomaron en cuenta el comportamiento mecánico del suelo en el diseño de la cimentación de las estructura. De la evaluación efectuada en las construcciones antiguas de adobón, adobe y quincha se observa que el 80% han colapsado o han sufrido daños severos, en la zona de desastre (Carrillo & Alcayhuaman , 2008).



Figura 3. Evidencia de licuación de suelos, tipo de suelo y posición del nivel de agua en las zonas críticas de licuación.

El 12 de enero de 2010 en Haití, un terremoto de magnitud 7,0 en la escala de Richter, con epicentro a unos 15 kilómetros al suroeste del centro de Puerto Príncipe y con hipocentro a unos 10 kilómetros de profundidad, sacudió la capital de Haití, destruyendo una parte importante de las zonas sur y suroeste de la capital haitiana, incluyendo a Leogane y Jacmel, y provocando cerca de 250,000 muertos, unos 300,000 heridos, 250,000 viviendas destruidas, 30,000 comercios colapsados y más de un millón de damnificados, siendo esta la mayor sacudida sísmica desde el año 1770. El terremoto de Puerto Príncipe, localizado en el extremo suroeste fue devastador. La razón fundamental es que la ciudad de Puerto Príncipe ha sido levantada sobre los suelos arcillosos flexibles, de muy mala calidad y bajas velocidades de ondas de corte, depositados en la llanura occidental remanente del antiguo canal marino de Enriquillo, y sobre sedimentos margosos y gravas gruesas y sueltas del pie de monte existente en la franja sur de la ciudad capital, lo que provocó un incremento extraordinario de la aceleración del suelo, haciendo que casi todas las columnas fallaran por esfuerzos cortantes y que las edificaciones se desplomaran verticalmente matando a cientos de miles de haitianos que no tuvieron tiempo para salir, ni para protegerse (Fernández, 2015).



Figura 4. Drch. Perfil de los suelos arenosos arcillosos del valle de la Ciudad de Puerto Príncipe, generador de altas intensidades durante el proceso sísmico. Izq. Se muestra una vista aérea, en planta del terreno, donde todas las viviendas sufrieron grandes daños provocados por su asentamiento en suelos licuables de la ciudad.

El 27 de febrero del 2010, un sismo de magnitud 8,8 grados en la escala de momento sísmico sacudió la zona centro sur de Chile. En la ciudad de San Pedro

de la Paz, localizada 80 km al suroeste del epicentro, la intensidad estimada para el sismo alcanzó de VIII a X grados en la escala de Mercalli modificada. El mismo dejó en evidencia un gran número de sitios donde ocurrió el fenómeno de licuefacción de suelos. La diversidad en la intensidad y distribución de daños es una manifestación de los efectos de sitio, esto se debe a las características físicas del terreno (González & Verdugo , 2014).



Figura 5. Áreas afectadas por la licuación: conjuntos de viviendas Brisa del Sol, Condominio Los Presidentes y Condominio Portal del Centro respectivamente.

Tras los terremotos del 2010 y 2011 que afectaron a Christchurch, Nueva Zelanda se registraron fenómenos de licuación severos. El terremoto de Christchurch de 2010 (también conocido como terremoto de Canterbury y terremoto de Darfield) fue un terremoto de 6,6 grados de magnitud que azotó la Isla Sur de Nueva Zelanda a las 4:35 de la mañana del 4 de septiembre de 2010, hora local (16:35 UTC 3 de septiembre). Los daños generalizados inducidos por licuefacción dentro del distrito central de negocios de la ciudad requieren 1.000 edificios que serán demolidos. Una pérdida económica total de 40 billones de dólares NZ; 20% del PBI de Nueva Zelanda.



Figura 6. Licuefacción en Christchurch (Nueva Zelanda).

El sismo de Japón fue un terremoto de magnitud 9,0 M_w que creó olas de maremoto de hasta 40,5 metros. El terremoto ocurrió a las 2:46:23 pm hora local (05:46:23 UTC) del viernes 11 de marzo de 2011. El epicentro del terremoto se ubicó en el mar, frente a la costa de Honshu, 130 km al este de Sendai, en la prefectura de Miyagi, Japón, a una profundidad de 32 kilómetros. El terremoto duró aproximadamente 6 minutos según los sismólogos. El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) explicó que el terremoto ocurrió a causa de un desplazamiento en proximidades de la zona de la interface entre placas de subducción entre la placa del Pacífico y la placa Norteamericana tomado de (<https://es.wikipedia.org/wiki/>).

Este causó un significativo nivel de "licuefacción" del suelo según un informe preliminar sobre algunos de los daños sufridos en Japón ha sido presentado por el Equipo de Reconocimiento Geotécnico de Eventos Extremos, o GEER por sus siglas en inglés: "Hemos visto ejemplos de licuefacción del suelo tan extremos como éste con anterioridad, pero la distancia abarcada y la magnitud de los daños en Japón han sido inusualmente severas", explica Scott Ashford, profesor de ingeniería - geotécnica en la Universidad Estatal de Oregón y miembro de este equipo de investigación.



Figura 7. Estructuras hundidas por la licuefacción. (Foto: Scott Ashford, Oregon State University).

El terremoto de Nepal de abril de 2015 fue un sismo de magnitud 7,8 u 8,1 M_w que se registró a las 6:11 GMT (11:57 hora local) del sábado 25 de abril de 2015 y que afectó a ese país del Asia del Sur. Tuvo su hipocentro a una profundidad de 15 km y su epicentro se localizó a 81 km al noroeste de la capital Katmandú, concretamente en el distrito de Lamjung. Ha sido el más grave que ha sufrido el país nepalí desde el acontecido en 1934, destruyó unas 2000.000 casas y dejó 186.000 heridos. La ubicación preliminar, el tamaño y el mecanismo focal del terremoto del 25 de abril, son consistentes con su ocurrencia en el plano de deslizamiento asociado con el empuje principal del Himalaya, que define la interfaz de empuje de subducción entre las placas de la India y Eurasia. En el lugar que ahora se ubica Katmandú, existía antes un lago, por lo que la ciudad se encuentra sobre sedimentos muy propensos a la licuefacción, de ahí que muchos edificios bien construidos, se derrumbaran como castillos de naipes. ([https:// es. wikipedia. org/wiki/](https://es.wikipedia.org/wiki/)).



Figura 8. Desastre tras el terremoto de Nepal 2015.

El terremoto de Ecuador de 2016 fue un movimiento sísmico ocurrido a las 18:58 ECT del 16 de abril de 2016, con epicentro entre las parroquias Pedernales y Cojimíes del cantón Pedernales, en la provincia ecuatoriana de Manabí. Con una magnitud de 7,8 M_w , el más destructivo desde los terremotos de Ecuador de 1987 y el cuarto más grande (en magnitud) del año 2016. Las ondas sísmicas llegaron al suroccidente de Colombia, sintiéndose en ciudades de ese país como Cali, Pasto, Popayán y Neiva; y a la frontera norte de Perú, en lugares como Tumbes, Piura, Cajamarca, Lambayeque y Amazonas. Un equipo conformado por personal del Instituto Geofísico (IGEPN), de la Facultad de Geología de la Escuela Politécnica Nacional y del Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD, por sus siglas en francés) recorrieron la zona de afectación por el sismo producido el 16 de abril del 2016 entre las semanas del 19 al 23 de abril y del 1 al 5 de mayo del 2016. Con el objetivo del trabajo fue realizar un levantamiento geológico para comparar las observaciones en el campo con los modelos geofísicos de la deformación superficial.



Figura 9. Personal del IGEPN e IRD realizando levantamiento geológico en el campo en las zonas entre Esmeraldas y Manta semana (19 al 23 de abril del 2016). En las fotos se observan grietas y “volcanes de arena” producto de licuefacción.

El 19 de septiembre de 2017 un terremoto magnitud 7,1 golpeó el centro de México, la cifra de muertos varía en diferentes medios pero se cree que son alrededor de 305 personas fallecidas. De acuerdo con la experta del Ilustre Colegio de Geólogos, Nieves Sánchez Guitián, la capital mexicana está bajo una constante amenaza de catástrofe. Recordó la tragedia de 1985, donde se produjo el fenómeno de licuefacción por las condiciones del terreno, centro de la Ciudad de México es notoriamente vulnerable debido al terreno suave y húmedo que hay debajo lo que deriva en el colapso de múltiples estructuras.



Figura 10. Imágenes del terremoto de México de 1985 y 2017 respectivamente.

Las investigaciones sismológicas de Cuba sitúan a la provincia Santiago de Cuba como la de mayor peligro sísmico del territorio nacional, siendo sacudida por más de 1000 sismos perceptibles desde el año 1528 hasta la fecha (Chuy 2010).

A tales efectos se recuerdan el terremoto del 18 de octubre de 1551 este se conoce como el terremoto de Bayamo pues fue la villa más importante donde se reportaron las afectaciones. Varias personas fueron heridas, hubo daños en barracas de soldados españoles, en un hospital y en la iglesia parroquial, así como 16 casas colapsadas. El daño se extendió hacia asentamientos costeros como Niquero, Manzanillo y Cabo Cruz, como también hacia las zonas montañosas como Las Mercedes donde ocurrieron grandes caídas de rocas. También ocurrió la licuación del suelo debido a las condiciones del sitio en Bayamo, localizada en las llanuras fluviales del río Cauto. La intensidad máxima en la Escala MSK fue de IX grados en Cabo Cruz, zona epicentral, donde se reportó el volcamiento de pesados cañones. Según (Actas Capitulares y Archivo de Indias), Chuy, (1999) y Cotilla y Córdoba, (2010).

Asociados a los eventos sísmicos del 20 de agosto de 1852 se describieron deslizamientos y derrumbes en zonas aledañas a Santiago de Cuba, en las estribaciones de El Caney (Chuy, Alvarez, & Zapata, 1992). Durante el sismo del 3 de febrero de 1932 se reportaron grietas moderadas en el pavimento y la pérdida de sustentación de algunas viviendas en la zona del puerto de Santiago de Cuba, lo cual podría ser un reflejo del fenómeno de licuefacción por ser los suelos potencialmente licuables y existen referencias de pequeños deslizamientos en la zona de la Loma del Cake durante el terremoto de 1947.



Figura 11. Licuefacción de los suelos en calle La Alameda, en Santiago de Cuba. Terremoto del 3 de Febrero de 1932. Tomado de Chuy, 1999.

El terremoto del 23 de enero de 1880 en Pinar del Río causó 3 muertes y tuvo una intensidad máxima de VIII grados en la Escala MSK. Se sintió en las provincias de Pinar del Río, La Habana, Matanzas y parte de Cienfuegos, y tan lejanos como los Cayos de la Florida. Aunque el área perceptible fue bastante grande, el daño más significativo se concentró en las zonas llanas de Pinar del Río. La infraestructura de la industria azucarera fue severamente dañada, causando la ruina económica a los habitantes locales. Todas las casas de mampostería sufrieron colapso de techos y paredes y una iglesia fue destruida. Se observaron efectos de sitio consistentes con la licuación del terreno. Este evento es el terremoto más fuerte en la región noroccidental de Cuba (Alvarez, Villalón, & Lindholm, 2015).

1.2.4 Sismicidad de Cuba como factor catalizador de la licuefacción de los suelos

El territorio de Cuba forma parte de la región del Caribe, una de las más controvertidas regiones del mundo, dada su compleja situación geodinámica.

La zona Sismogénica Oriente está asociada a la falla transcurrente Battle – Caimán que se encuentra al Sur de Cuba oriental, presentando una dirección predominante de este a oeste. La misma constituye el límite entre las placas de Norteamérica a la que pertenece Cuba y del Caribe a la que pertenecen las islas de Jamaica, La

Española y Puerto Rico, entre otras. Se considera una falla transcortical con una extensión de más de 1000 Km y un ancho de 100 -150 Km aproximadamente, con una profundidad de más de 50 km (Arango, 1966).

La posición del territorio de Cuba con respecto a las placas de Norteamérica y el Caribe, determina la presencia de dos provincias sismotectónicas bien definidas, la que comprende a la zona de entre placas, en Cuba sur oriental, caracterizada por una mayor frecuencia de ocurrencia de sismos de magnitudes grandes ($M > 7,5$) y la que comprende a la zona de interior de placas en el territorio insular.

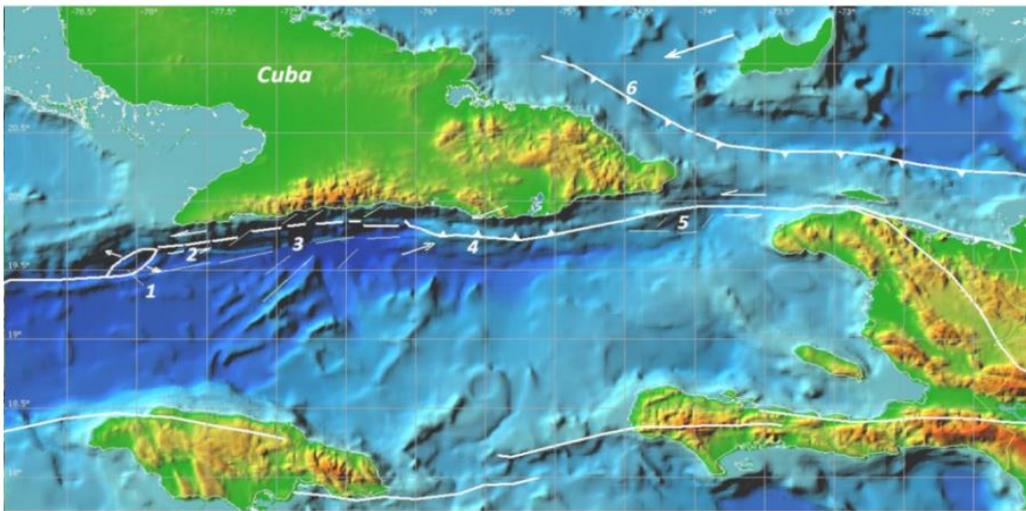


Figura 12. Contexto sismotectónico de Cuba suroriental, La Española y Jamaica: 1 cuenca de *pull-apart* de Cabo Cruz, 2 corrimiento por el rumbo puro, fosa de Oriente, Cinturón Deformado de Santiago (transpresión), 5 Cuenca de San Nicolás (transtensión). Según Arango (1996). Fuente CENAIIS.

De acuerdo a las características geodinámicas de la región norte del Caribe, la falla transcurrente Oriente y la falla norte de la Española constituyen las principales fallas activas de primer orden donde pueden ocurrir sismos fuertes de magnitudes superiores a 6 que afecten a las poblaciones situadas en el territorio oriental de Cuba (Arango et al, 2009). A estas estructuras se relaciona la principal actividad sísmica registrada en esta región, tanto en magnitud como en frecuencia, como se observa en la figura 13 donde se representan los epicentros de los terremotos registrados de 1967 a 1995 y de 1998 al 2012 (Arango , 2008).

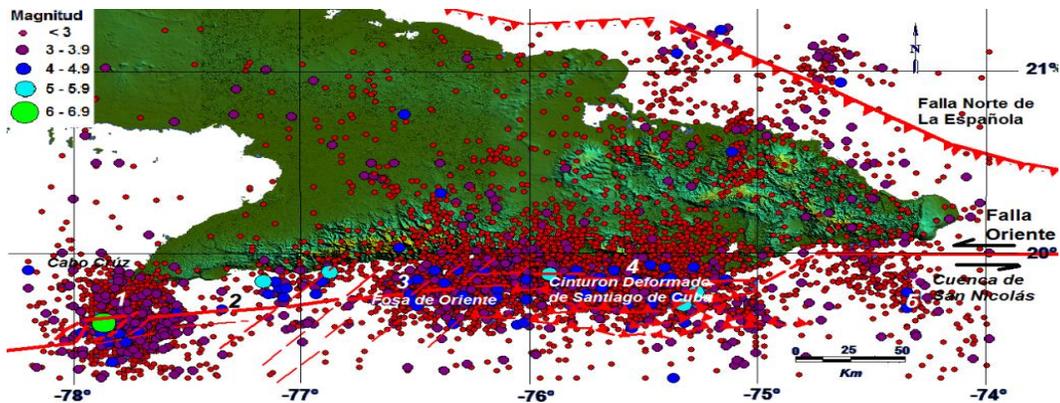


Figura 13. Ubicación de la falla Oriente y la falla Norte de La Española en las inmediaciones de la región orientalde Cuba. Se señalan con números los principales elementos geodinámicos que caracterizan a la falla Oriente: 1.

Resulta necesario señalar, que ninguna región del país, ha estado exenta de la ocurrencia de estos fenómenos telúricos. Sin embargo, en el territorio de la actual provincia de Santiago de Cuba es donde se ha reportado el mayor número de sismos (22), con intensidades iguales o mayores que VII grados en la escala MSK y aceleraciones iguales o mayores que 0,3gde ellos 20 en el sector Chivirico-Baconao de la provincia de Santiago de Cuba y 2 en el sector Pílon - Cabo Cruz, provincia Granma (Chuy,1999).

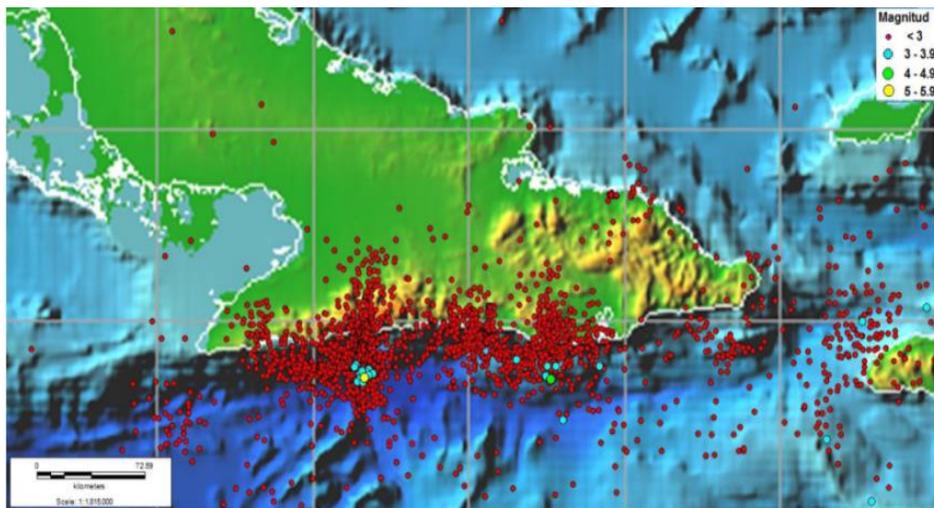


Figura14. Mapa de la sismicidad registrada durante el 2017 en la región oriental hasta el 15 de mayo. La mayor sismicidad ha estado relacionada a la zona de Pílon - Chivirico, posterior al sismo de 5.8 de magnitud registrado el 17 de enero al sur de la localidad de Uvero, en el municipio de Guamá. Fuente CENAIIS

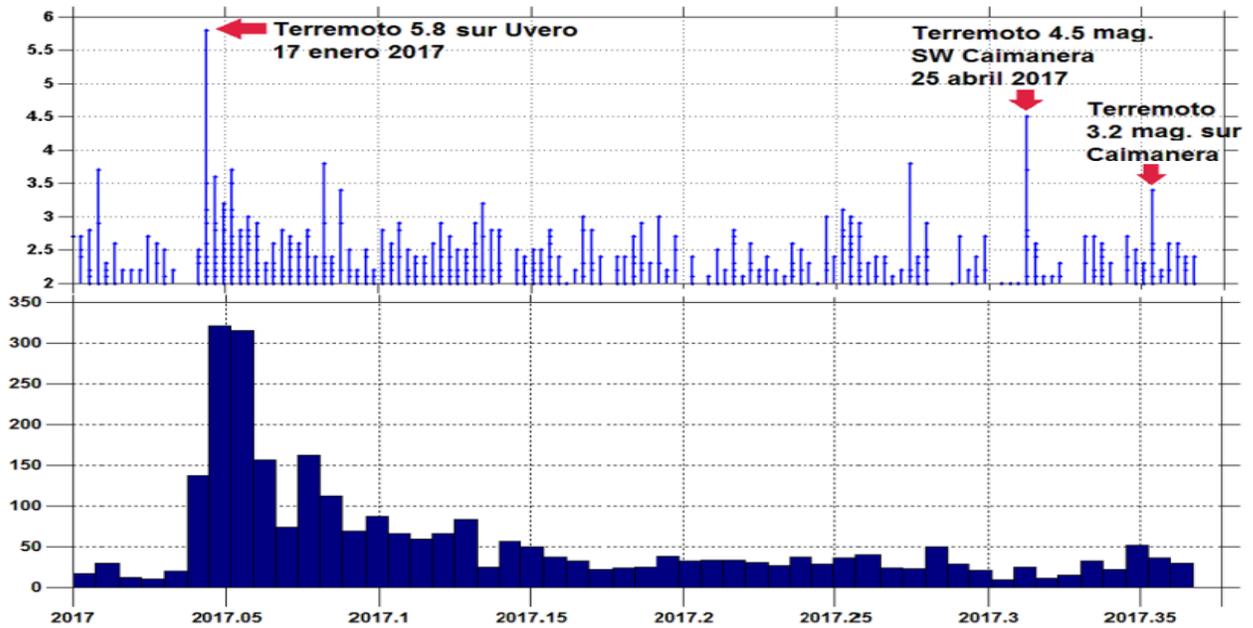


Figura 15. Comportamiento de la sismicidad durante el año 2017. Fuente CENAIS.

El comportamiento de la ocurrencia de terremotos de magnitud mayor a 5 en la escala Richter desde el año 1900 hasta la fecha en función del tiempo se puede observar en la figura 16, donde se aprecian los sismos más significativos. En el mismo se aprecia que desde los años 1932 y 1947 no ocurre en Santiago de Cuba un sismo de magnitud superior a 6. Para los sismos que ocurren en 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 que afecte a esta parte del país puede ocurrir en cualquier momento, debido a la energía acumulada desde los últimos sismos ocurridos en la primera mitad del siglo pasado (Guasch & Oliva, 2014).

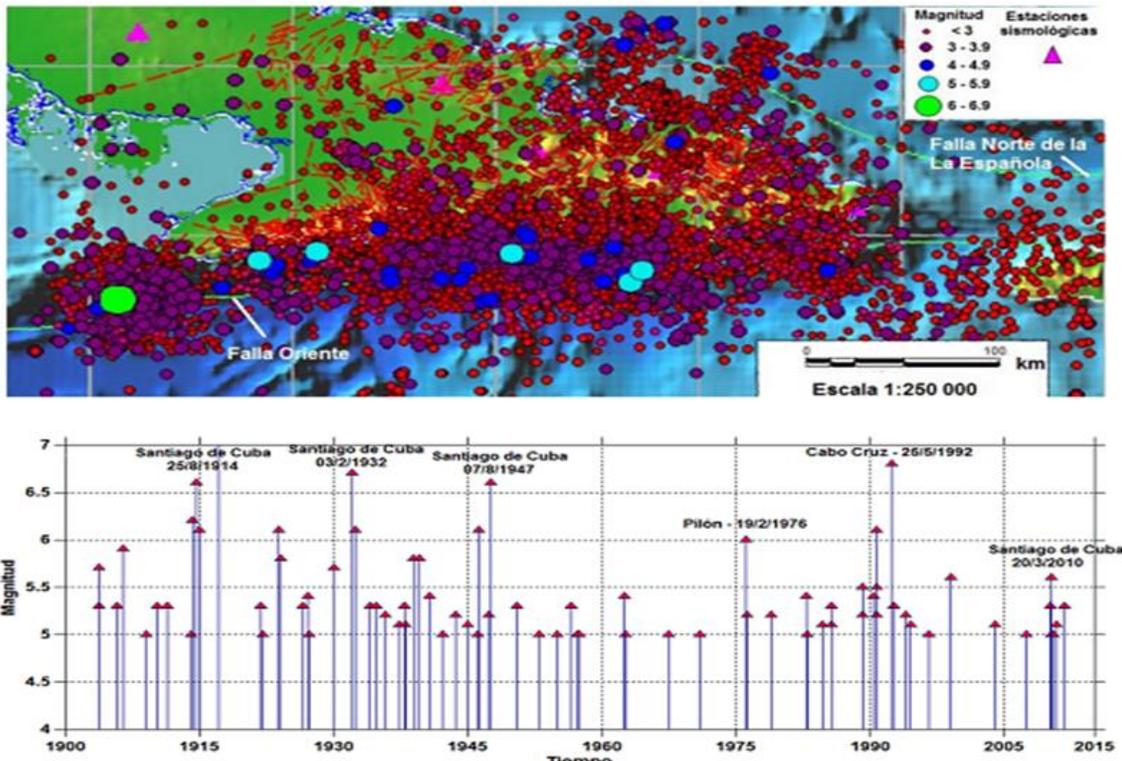


Figura16. Ocurrencia de los terremotos de magnitud mayor a 5 reportados en la región suroriental de Cuba desde 1900. Fuente CENAIIS.

1.2.5 Investigaciones realizadas en Cuba sobre la licuefacción

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 la licuefacción 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 como la ciudad de Guantánamo. En la región de Cuba Oriental, existen dos reportes históricos, asociados a la ocurrencia de terremotos Santiago de Cuba 1932 y Bayamo 1947.

En el informe para proyecto titulado “Mapa de riesgo sísmico de la ciudad de Santiago de Cuba” realizado por investigadores del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS) utilizan para esta evaluación aspectos importantes como:

- Tipología y propiedades de los suelos

- Profundidad del nivel freático
- Topografía del terreno
- Magnitud y distancia de los terremotos. La cuenca de Santiago de Cuba es considerada como licuable en el sector que corresponde a los sedimentos cuaternarios los que poseen un espesor promedio de 10 m. (García et.all, 2000).

En la tesis de maestría de (Fernández, 2000) titulada “Posibilidad de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en la cuenca de Santiago de Cuba por terremotos fuertes” la autora hace un mapa esquemático pronóstico de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en Santiago de Cuba por terremotos fuertes sobre la base cualitativa utilizando los métodos tradicionales en Cuba en la que da tres categorías de (Alta, Media y Baja) susceptibilidad a la licuefacción. En la investigación utiliza por primera vez la combinación de factores importantes como la geología, geomorfología, sísmica y la información ingeniero- geológica de forma automatizada. Aunque trabajó con toda esta información para la interpretación del fenómeno da una propuesta totalmente cualitativa basándose solo en la magnitud e intensidad del sismo. No da valores a partir de calcular el factor de seguridad ni tiene en cuenta dentro de las condiciones ingeniero- geológicas aspectos importantes como el límite líquido, porcentaje de finos o la densidad del suelo en el área de estudio. En esta investigación se hace una suposición conjugando factores como la geología, geomorfología y el nivel freático.

En el trabajo “Zonación preliminar de la licuefacción de los suelos en la región de Cuba Oriental” (Rosabal, 2011) se expone una zonación de la licuefacción de los suelos, basada en el estudio de diferentes factores que inciden en la ocurrencia de la licuefacción: suelos susceptibles, intensidad sísmica, aceleración horizontal efectiva, topografía, reportes históricos de licuefacción, entre otros, se identifican las zonas que se caracterizan a licuar y zonas donde es baja o no existe la licuefacción de los suelos. Estos estudios constituyen una primera representación de la licuefacción a escala regional en Cuba, principal aporte de la investigación. La investigación se ubica en el Nivel o Grado I de Zonación (TC-4, 1999). Estos

estudios regionales identifican zonas susceptibles a licuar. Es necesario evaluar la potencialidad de la licuefacción empleando información ingeniero-geológica ya que la misma no se hizo en esta investigación y no se puede hablar de licuefacción teniendo en cuenta solo la información geológica, desembocaduras de ríos, antiguos cauces o actual llanura fluvial, principal deficiencia encontrada en el trabajo.

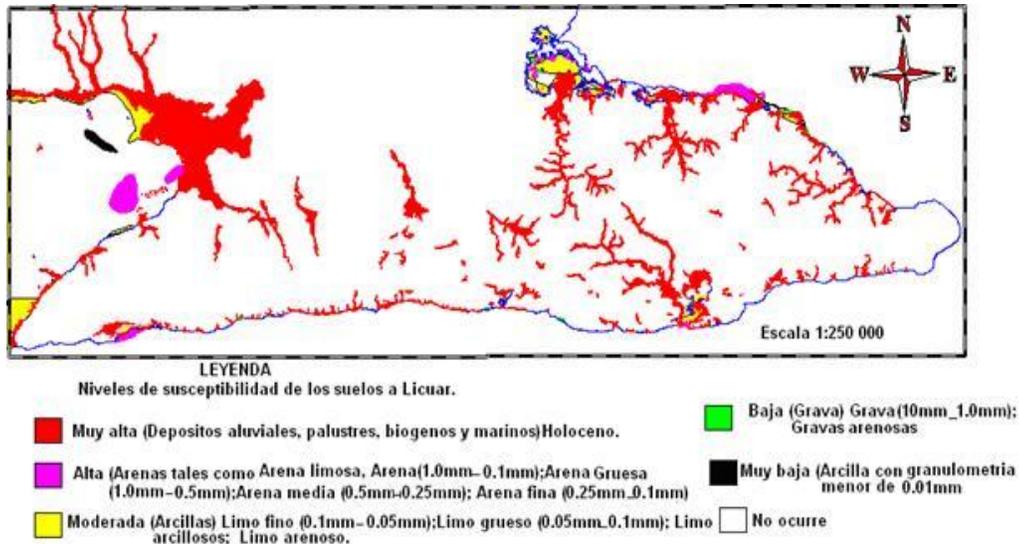


Figura 17. Suelos que se caracterizan a licuar en la región de Cuba Oriental. Coordenadas geográficas (Long W: -77,738°-74,134° Lat. N: 19.841°-20.730°). (Rosabal, 2011).

Las investigaciones realizada por (Ordaz, 2013) están enfocada 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. Los resultados fueron 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 %. 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.

Los estudios realizados hasta el momento hacían una evaluación de grandes áreas y la evaluación era totalmente cualitativa. En el trabajo de diploma titulado “Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el Consejo popular Guillermon Moncada del municipio Santiago de Cuba por (Herrera, 2015) da como resultado un mapa de susceptibilidad a la licuefacción a partir de interpretar factores como geología, nivel freático y las propiedades físicas y mecánicas lo que le permitió calcular el Factor de seguridad para la licuefacción (FSL) dando sectores entre Alto, medio y bajo lo cual dependen del tipo de suelo. Los resultados con FSL menores de 1 se caracterizan por ser suelos blandos representados por un material tipo cieno con un comportamiento común en cuanto al contenido de humedad $>$ al 30 %, densidades secas $<$ $13,50 \text{ kN/m}^3$, con pesos específicos que oscilan en el rango de (26,60 a 27,00) kN/m^3 y resistencia a la penetración dinámica de 4 a 6 golpes por cada 30 cm de penetración (SPT), desde el punto de vista de clasificación de suelos varían entre una arcilla muy plástica con arena (CH) a una arena arcillosa con gravas (SC), predominando los suelos tipo (CH) en dirección norte, hacia el centro este los suelos tipo SC y hacia el sur los de tipo OL - OH. Esta investigación es de gran importancia ya que es actual y demuestra con datos la probabilidad de ocurrencia del fenómeno ante sismos de magnitud 7,5 y superiores. Se demostró que para magnitudes menores es muy poco probable la manifestación de la licuefacción de los suelos.

En la tesis de maestría de (Fernández, 2015), realiza un estudio del municipio de Caimanera, con el objetivo evaluar las condiciones ingeniero-- geológicas de los suelos para predecir de forma efectiva si son licuables ante un sismo de gran intensidad. Mediante la implementación de un sistema de indicadores que permiten caracterizar el área de estudio y calcular el factor de seguridad para la licuefacción. Se obtuvo como resultado un esquema pronóstico de susceptibilidad a la licuefacción de cada sector de estudio definiendo las zonas potencialmente licuables.

En el trabajo de diploma titulado “Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en la zona sur de la Provincia Guantánamo” (Parellada, 2016) y “Determinación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en los municipios Baracoa, Yateras, El Salvador y Niceto Pérez de la provincia de Guantánamo” (Reino, 2016), en estos se da a conocer las condiciones ingeniero- geológicas de los suelos de del territorio, por lo que se persigue determinar, delimitar y evaluar dichas condiciones. Se utilizaron un conjunto de métodos que resolvieran la necesidad de la investigación, como la validación de los resultados de acuerdo al análisis del sistema de indicadores propuestos por (Fernández, 2015), el cálculo del factor de seguridad corregido y la determinación de intensidades máximas que se pueden obtener a partir de magnitudes sísmicas que provoquen licuefacción en el área de estudio. Como resultado se delimitaron escenarios susceptibles a la licuefacción en los municipios Guantánamo, San Antonio del Sur, Imías y Yateras para magnitudes sísmicas iguales y mayores a 6 grado.

1.3 Características generales del municipio Guantánamo

1.3.1 Ubicación geográfica

El municipio Guantánamo es uno de los 10 municipios que componen la actual provincia de Guantánamo, queda conformado cuando se produce la división política administrativa de la antigua provincia de oriente, donde la región con este nombre se convierte en provincia y se conforma el municipio. Ubicado en el sudoeste de Cuba, siendo la capital de la provincia Guantánamo, ocupa un área de 268 km², con una población de 216862 habitantes. Limita (Ver figura 18) al norte con la provincia Holguín, al este con los municipios Yateras y Manuel Tames, al Sur con la Bahía Guantánamo y el municipio Caimanera y al Oeste con los municipios El Salvador y Niceto Pérez tomado de (<http://www.ecured.cu>).

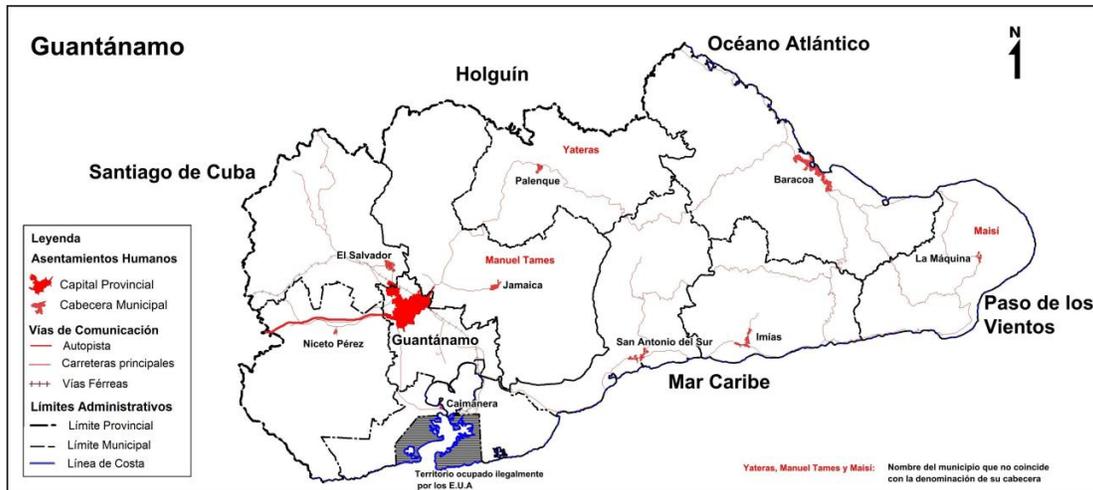


Figura18: Ubicación geográfica del municipio Guantánamo.

1.3.2 Relieve

Una de las características físico - geográficas más significativas es el relieve, predominantemente llano en la cuenca tectónica (valle) de Guantánamo y una extensa Bahía de Bolsa catalogada como la tercera en superficie a nivel mundial, elevándose gradualmente hacia el centro y el norte. Limita al norte con una montaña baja en forma de mesta, donde nace el río principal del municipio: el Guaso y más al norte hay un gran complejo de alturas profundamente diseccionadas de la cuenca superior del río Sagua de Tánamo. (<http://www.ecured.cu>) (Ver figura 19).

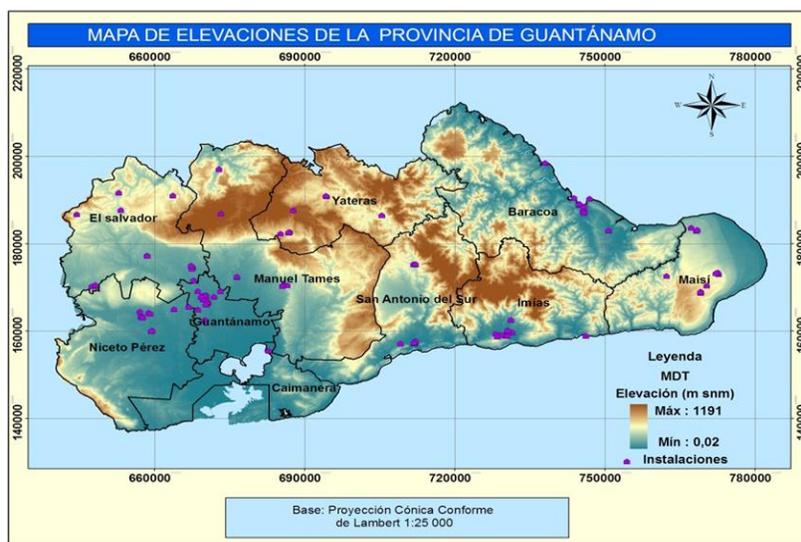


Figura 19: Mapa de elevaciones de la provincia Guantánamo.

1.3.3 Clima

El clima está bajo la acción de los vientos alisios y las corrientes templadas que bañan las costas de Cuba. La temperatura es la típica de un clima tropical, con un promedio de 25,3 ° C. Enero es el mes más frío, con promedio de 18,6 ° C, y el más caluroso es agosto, con 37 ° C. La radiación solar oscila entre 160 y 170 Kcal por año promedio, con una distribución de las precipitaciones irregular, con periodos secos de noviembre a abril y húmedos de mayo a octubre. El 20 % de las precipitaciones se producen en el periodo seco, aumentando sus valores de sur a norte, entre 600 y 1 000 mm, mayores hacia la parte septentrional, debido a la influencia de las lluvias geográficas o gravitacionales, unidas a otros factores.

Los meses más secos son marzo, abril y junio (74 – 75 %) y los más húmedos, septiembre y noviembre (80 – 84 %), con vientos predominantes del nordeste, con velocidades variadas debido a las características del relieve y al paso de los organismos meteorológicos por el territorio (<http://www.ecured.cu>).

1.3.4 Geomorfología

La ciudad descansa sobre la Cuenca de Guantánamo y se encuentra enmarcada por varias cordilleras y sierras. Al norte, por ejemplo, aparece la sierra del Guaso; al este, la sierra de Maquey; y, finalmente, al oeste, las estribaciones de Sierra Maestra. La cuenca donde se encuentra el municipio mide 40 km de norte a sur y 24 km de este a oeste (<http://www.lahistoriaconmapas.com/historia>).

1.3.5 Características hidrogeológicas

Se destacan importantes cuencas hidrográficas superficiales, como la del Guaso, entre cuyos afluentes principales están el río 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).

Otra cuenca representativa es la del Jaibo, demarcada entre los municipios Guantánamo y Niceto Pérez, y afluente del río Guantánamo con una longitud de 125 km el cual nace en el alto de Camarones (380 msnm). Entre sus tributarios se destacan los ríos: El Caró, Quemado de Cuneira, Corojal y Guayacán. El Jaibo de alimentación fluvial, tiene numerosos meandros que indican su relativa madurez y está regulada por la presa Jaibo, con capacidad de embalse de 120 000 000m³ empleados fundamentalmente en regadíos. Al norte del municipio, formando una gran cuenca que ha fraccionado el complejo relieve, está el río Santa Catalina, afluente principal del río Sagua de Tánamo. Nace al norte del complejo Alturas Bajas, en forma de mesa (Meseta del Guaso) próximo al poblado La Tagua. Tiene entre sus principales afluentes arroyos como El Negrito, Paso de Caña, Valentín, Maqueisito, etc. Esta cuenca corre hacia el norte hasta verterse en el Sagua (municipio Holguín).

Existen otras cuencas de menor tamaño. Al suroeste, en el límite con el municipio Niceto Pérez, está el río Guantánamo, que aunque lleva su nombre no está situado dentro del municipio (<http://www.ecured.cu>).

1.3.6 Características ingeniero – geológicas

En el municipio en ocasiones se presenta en los suelos el fenómeno de saturación, en esto influyen las corrientes de aguas subterráneas que existen, hay otras zonas donde los suelos no están saturados. Según (Parellada , 2016) el municipio Guantánamo se caracteriza por presentar sedimentos del Eoceno, estos suelos están clasificados como GM3 que son areniscas y aleurolitas con cemento calcáreo medianamente meteorizadas, CL arcilla de baja plasticidad, GC grava arcillosa con arena, ML que es limo y CH que es una arcilla con grava, todos enmarcados en la formación San Luis.

1.3.7 Condiciones geológicas

El municipio está compuesto por llanuras de origen marino, abrasivo denudativas y fluvio marinas, deltaicas, ligeramente onduladas en parte cenagosas. El subsuelo está integrado por calizas, calcarenitas y margas del Mioceno. Los suelos predominantes son los pardos carbonatados típicos, de evolución sialítica, generalmente en un medio rico de carbonato de calcio, cuyo dinamismo influye en su génesis. El material sobre el que se sustentan (roca madre) es generalmente roca sedimentaria de la formación

- **San Luis** (Eoceno medio parte alta y Eoceno superior): compuesta sobre todo areniscas, argilitas y aleurolitas calcáreas, margas y subordinadamente calizas y conglomerados polimétricos. 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.
- **Camarones** (Eoceno superior): está 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.
- **Charco Redondo** (Eoceno medio): tiene calizas compactas organodetríticas, fosilíferas, de color variable, predominando los tonos blancos a grises verdosos.
- **Jamaica** (Pleistoceno, parte baja): representada conglomerados polimícticos de matriz arcilloso-carbonática, con clastos más o menos redondeados y de selección mediana, que corresponden a calizas, meta volcanitas, 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.

- **Maquey** (Oligoceno Superior-Medio parte baja): 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.

En las zonas cercanas al litoral existen depósitos aluviales y palustres. (Colectivo de Autores, 2013)(Ver Figura 21).

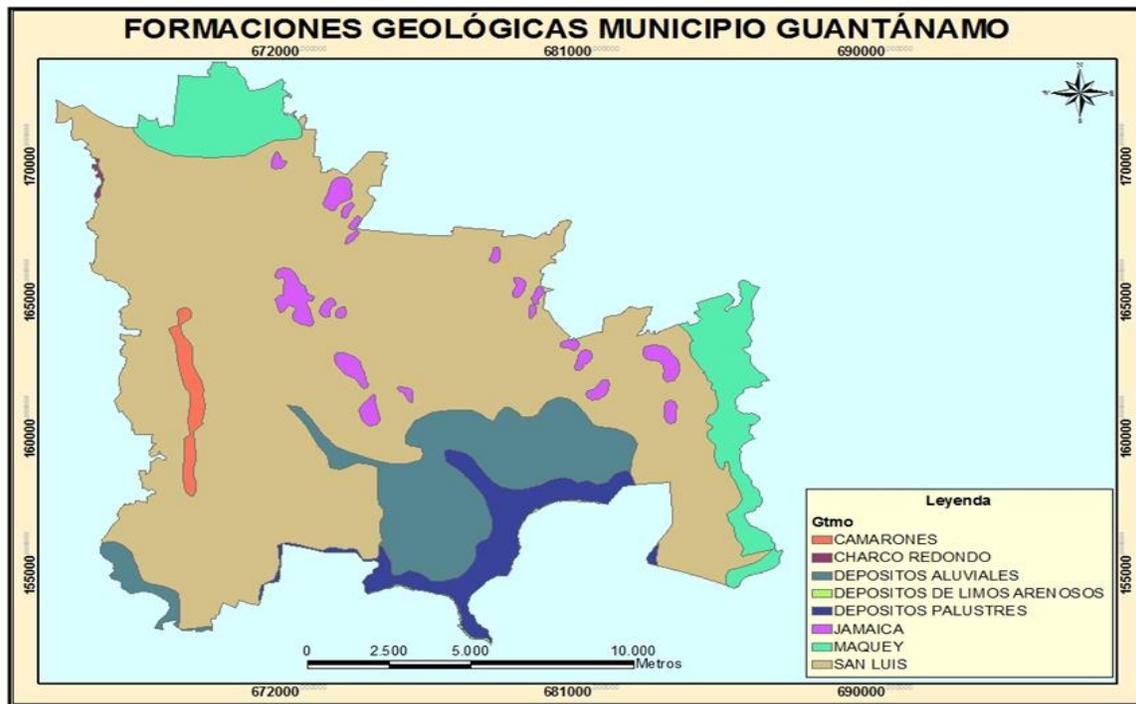


Figura 20: Mapa geológico del municipio Guantánamo.

1.3.8 Sismicidad y régimen sísmico

El municipio Guantánamo, pertenecen a la zona sísmica 4 de riesgo sísmico alto (Ver Figura 22) que puede ocasionar daños significativos en las construcciones debiéndose 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 0,50-0,80 g para

periodos cortos (S_s) y entre 0,20-0,30 g para periodos largos (S_l) (NC 46-2013 propuesta 0 proyecto de norma).

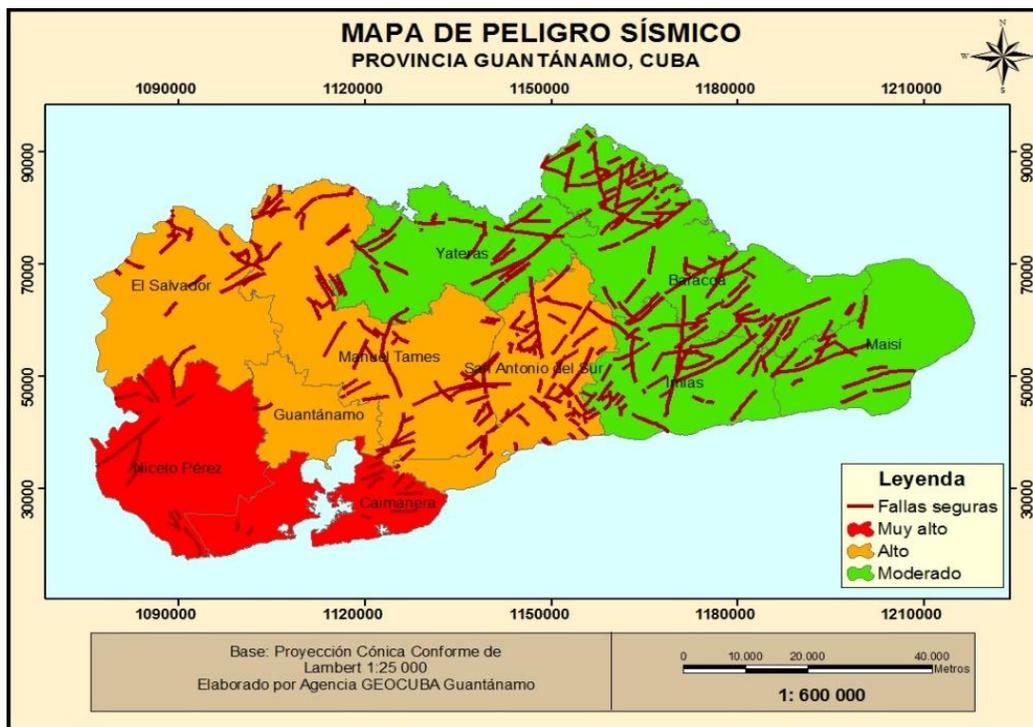


Figura 21. Mapa de peligro sísmico de la provincia Guantánamo. Fuente GEOCUBA Guantánamo.

1.3.9 Desarrollo económico social

La base económica fundamental del municipio es agropecuaria e industrial, tiene tres zonas productivas bien definidas, la del nordeste con producciones mayoritariamente sidero – mecánica, al Sur vinculada a la Industria Alimentaria y la de Confluentes dedicada a la producción de materiales de construcción. Guantánamo es uno de los territorios con mayor área sembrada de caña, al igual que de café. Es igualmente, uno de los principales en el cultivo de hortalizas, así como en el desarrollo de la ganadería. El municipio posee los recursos humanos, con nivel de calificación suficiente para el desempeño de las actividades socio-económicas del territorio y existe voluntad política en el gobierno del territorio para enfrentar los ejes prioritarios del desarrollo socio-económico (<http://www.ecured.cu>).

1.4 Conclusiones

- ❖ La licuefacción de los suelos es provocada por terremotos fuertes en suelos sueltos, arenos arcillosos y con el nivel freático cercano a la superficie.
- ❖ Existe evidencia de ocurrencia del fenómeno en Cuba en Santiago de Cuba y en Cauto Embarcadero.
- ❖ El área de estudio presenta un relieve bastante llano, enmarcada y bien representada en la Formación San Luis constituida por areniscas, la cual fue descrita anteriormente.
- ❖ La red hidrográfica está bien desarrollada con presencia de importantes cuencas.
- ❖ Según la Norma Sísmica NC 46- 2013 esta área se encuentra en la zona 4 de alto riesgo sísmico.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 Introducción

El presente capítulo tiene como fin exponer la metodología utilizada para realizar el estudio del área de interés a partir de las etapas de investigación propuestas.

2.2 Metodología de la investigación

Primera etapa: Revisión bibliográfica

La primera fase del trabajo consistió en la búsqueda intensiva de fuentes de documentación antigua y reciente (artículos, publicados en Internet u otros sitios Web de interés, en revistas, tesis y libros) que mencionen rasgos sobre los efectos producidos en la naturaleza o en infraestructuras edificadas cuyo origen ha sido la licuefacción como fenómeno inducido por terremotos fuertes. Se analizaron informes ingeniero geológicos de obras ingenieriles ubicados en los archivos de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) en Santiago de Cuba, el cual estuvo constituido por un total de 51 informes de obras realizadas en el área de trabajo para una mejor comprensión de las condiciones ingeniero-geológicas del área. Algunos de estos contienen análisis geofísicos mediante la técnica de resistividad del terreno para ello se emplean: Telurómetros Chauvin - Anaux, Teracontrol V' y Accesorios, Ecuación de Vaumer – Holt, los esquemas de mediciones de Vaumer y Cager, Normas cubanas y reglamento electrónico de baja tensión, dando como resultado valores bajos de resistividad que en todos los casos corroboran la homogeneidad del terreno.

Segunda etapa: Procesamiento de la información

Haciendo un estudio detallado de toda la información recopilada, en esta etapa se realizó el procesamiento de los datos de las perforaciones de obras en el municipio Guantánamo realizada por la ENIA e INVESCONS Santiago. Es necesario destacar que algunos suelos estudiados en los informes antes mencionados, adolecen de dificultades; ya que los mismos son netamente geotécnicos, entre estas dificultades podemos señalar que:

- En algunas obras no se realizaron ensayos de importancia tales como: ensayo de humedad, peso específico, límite líquido, límite plástico etc.
- Poco estudio sobre la sismicidad del área; solo se menciona de forma regional.

Tercera etapa: Interpretación de la información

Todos los datos primarios obtenidos en los trabajos (perforaciones, reconocimiento geológico del área, descripción, muestreo, pruebas hidrogeológicas, observaciones sistemáticas, de laboratorios, ensayos de granulometría y límites de atterberg,) son expresados mediante el análisis del nivel freático, elaboración del esquema ingeniero geológico a partir de las propiedades físico- mecánicas del suelo, que permitió validar el procedimiento propuesto e interpretar los mapas pronóstico de susceptibilidad a la ocurrencia de licuefacción a partir de las condiciones ingeniero geológicas de los suelos.

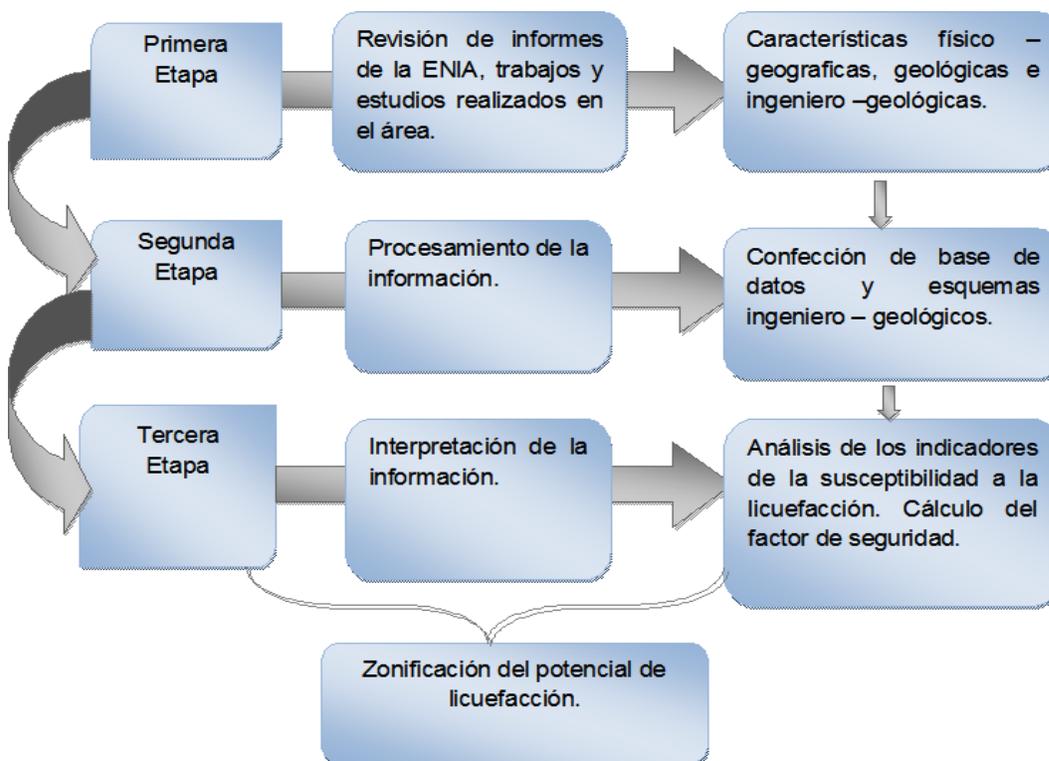


Figura 22. Diagrama de flujo de la Metodología de la Investigación

2.3 Métodos utilizados para evaluar la susceptibilidad a la licuefacción

En la actualidad se presentan en publicaciones científicas diversas metodologías internacionales (Seed & Idriss, 1971), (Alcocer, 1994), (Youd & Idriss, 2001), (Yegian & Whitman, 1978), (Tokimatsu & Yoshimi, 1983), (Taiping & otros, 1984); para cuantificar la licuación de los suelos resultantes de acciones dinámicas (sísmicas), entre estos se destacan:

- ❖ Métodos de (Kishida y Ohsaki , 1969 y 1970)
- ❖ Método de(Seed, 1983)

Los métodos existentes para evaluar el potencial de licuefacción de los suelos pueden dividirse en tres grupos

A- Métodos basados en el comportamiento observado en terremotos anteriores: Se apoyan en correlaciones empíricas de algunas características de los suelos, obtenidas mediante pruebas de campo y/o ensayos simples de laboratorio, con el comportamiento de los mismos observado en sismos previos.

B- Métodos simplificado, se basan en la comparación de la resistencia obtenida en ensayos cíclicos de laboratorio con los esfuerzos que provocará el sismo, calculados en forma simplificada.

C- Métodos basados en modelos matemáticos, comprenden a un número creciente de modelos acoplados o desacoplados, para el análisis de la respuesta dinámica y la generación de presión de porode suelos granulares sujetos a fuerzas sísmicas.

Los métodos del tipo A se basan en el hecho de que la resistencia a la licuefacción y ciertas propiedades determinadas mediante ensayos “in situ” (resistencia a la penetración, velocidad de propagación de ondas de corte, etc), varían de la misma forma en función de las características principales de los suelos.

Sin embargo, a la fecha sólo se cuenta con una gran cantidad de datos provenientes de pruebas de resistencia a la penetración, especialmente de SPT, mientras que la

cantidad de datos que se tiene de las otras propiedades resulta, en algunos casos, insuficiente como para obtener buenas correlaciones a partir de ellos.

A su vez, los métodos B y C requieren para su aplicación, la realización de ensayos de laboratorio sobre muestras "inalteradas". Los procedimientos usados normalmente para extraer este tipo de muestras, producen invariablemente, cambios en su compacidad relativa, en su estructura y en su grado de saturación. Además, los equipos de laboratorio, por lo general, no permiten reproducir adecuadamente las condiciones de esfuerzo y de frontera que tiene el suelo "in-situ". Todos estos factores influyen de manera fundamental sobre la ocurrencia o no del fenómeno de licuefacción.

A causa de lo anterior, parece aconsejable, al menos desde el punto de vista de una aplicación práctica usual, la utilización de los métodos del tipo A prestando especial atención a aquellos basados en resultados de ensayos de penetración (SPT y CPT).

Dentro de estos métodos, los que son aplicables a obras nuevas están bastante estudiados, y con ellos se han obtenidos resultados satisfactorios. No existiendo el mismo nivel de conocimiento en el caso de las aplicaciones a obras ya ejecutadas (Obando, 2009).

Tabla 4: Clasificación de algunos métodos para evaluar el potencial de licuefacción, PHRI (1997).

Evaluación de la resistencia a la licuefacción	Evaluación de los efectos sísmicos	Ejemplos de métodos de predicción
	Magnitud Richter y distancia epicentral	Kuribayashi y Tatsuoka (1975) y Wakamatsu (1991)
Geomorfología		Kotoda <i>et al.</i> (1988)
Gradación/Valor de N-SPT		"Standard for regulation of hazardous materials por Fire Defense Agency" (1978)

Gradación/Valor de N-SPT	Máxima aceleración en la superficie del suelo	Especificaciones para puentes altos por Japan Road Association(1990)
Gradación/Valor de N-SPT	Máxima aceleración en la superficie del suelo y magnitud Richter	Recomendaciones para el diseño de cimentaciones de edificaciones por Architectural Institute of Japan (1988)
Gradación/Valor de N-SPT	Modelo de esfuerzos totales	Técnicas estándar para puertos (facilidades y comentarios) por Japan Ports and Harbours Association(1989)
Prueba Triaxial Cíclica	Modelo de esfuerzos totales	Seed e Idriss(1967) Ishihara (1976)
Prueba Triaxial Cíclica	Modelo de esfuerzos efectivos	Finn <i>et al.</i> (1977), <i>et al.</i> (1992)

2.4. Sistema de indicadores para el estudio de la susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en la región oriental de Cuba (Fernández, 2015)

Para evaluar el potencial de licuefacción se evaluó mediante un sistema de indicadores en el cual se unifican los parámetros propuestos por diversos autores (Seed & Idriss, 1971, 1982), (Wang, 1979), (Alcocer, 1994), (Youd & Idriss, 2001), (Yegian & Whitman, 1978), (Tokimatsu & Yoshimi, 1983) 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 propuestas por los autores antes mencionados, se elaboró una propuesta que brindó un orden lógico y permite cuantificar el fenómeno.

1. 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. Conociendo también que el estrato de suelo no licuable encima del licuable debe ser menor de 8.0 m. 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.

2. Sismicidad

Otro factor importante para que pueda licuar un suelo es la sismicidad, para ello se analiza la cercanía con una zona sísmica generadora capaz de generar sismos fuertes o magnitud mayor de 5,5 y las aceleraciones de las partículas lleguen a ser iguales o superior $0,2g/cm^2$. La selección se tiene en cuenta la norma: Construcciones Sísmo 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 período 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.

3. 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 metros, por lo general, ocurre a profundidades menores de 9 metros; a profundidades mayores de 15 metros 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.

4. Condiciones ingeniero geológicas

Lo primero que debe cumplirse 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 físico- mecánicas y 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, por ciento de partículas finas, cortante, saturación, compactación del suelo a partir del N de spt entre otras).

Se tiene en cuenta:

- ❖ Por ciento 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. $C_u < 5$

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

- ❖ Arena fina,
- ❖ Arena Media,
- ❖ Arena Limosa,
- ❖ Arena con bajo por ciento de arcilla
- ❖ Arena con bajo por ciento de materia orgánica o
- ❖ Arena con partículas.

Sedimentos eluviales, llanuras aluviales y zonas de manglar

2.4.1 Esquema ingeniero geológico por tipo de suelos

Una vez recopilada las principales propiedades físico-mecánicas se procede a la confección del esquema ingeniero geológico, para ello se tuvo en cuenta la norma cubana de Investigaciones Ingeniero Geológicas para la confección de mapas ingeniero geológicos (NC-51-24-1984).

La base de datos con los parámetros antes mencionados para cada capa identificada. Con la información obtenida se confecciona el esquema ingeniero geológico donde se tiene en cuenta los tipos de suelos dada la clasificación del (SUCS) Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos haciendo especial énfasis en la granulometría y la plasticidad. Especialmente los valores para cada punto, coincidiendo con una obra estudiada por la ENIA. Por último, se confecciona el perfil ingeniero geológico haciendo énfasis en el estrato licuable y el no licuable, dejando claro la relación y posición espacial entre ellos. Una vez determinados todos los parámetros antes mencionados se tiene una idea de los lugares que pueden licuar, para estar más seguros y dar un resultado cuantitativo se realizan los cálculos de la relación de esfuerzos cíclicos para cada punto.

2.4.2 Calcular el Cyclic Stress Ratio (CSR)

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 23 se muestran las curvas recomendadas por (Seed, et al 2003).

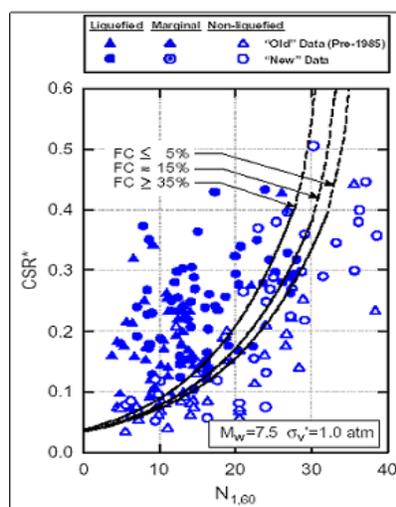


Figura 23: Relación entre razones de tensiones causantes de licuefacción y valores corregidos del SPT (para $M_w=7.5$ y $\sigma_v=1$ atm) con ajuste de contenido de finos. (Fuente: Seed, et al 2003).

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 tensiones cíclicas promedio ($CSR = \frac{\tau_{pro}}{\sigma'_{vo}}$)

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 (τ_{avg}) actuante en un estrato, normalizado por el esfuerzo efectivo de sobrecarga (σ'_{vo}).

$$CSR = 0.65 \frac{(amax/g)}{(\sigma_{vo}/\sigma'_{vo})} rd$$

Dónde:

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

amax: aceleraciones máximas generadas por un sismo de diseño.

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

σ'_{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 & Whitman, 1986), para la práctica de ingeniería rutinaria, en proyectos no críticos, proponen las siguientes ecuaciones para estimar el rd:

Para $z \leq 9.15\text{m}$ $rd = 1.0 - 0.00765z$

Para $9.15\text{m} < z \leq 23\text{m}$ $rd = 1.174 - 0.0267z$

z: profundidad por debajo de la superficie del suelo en metros.

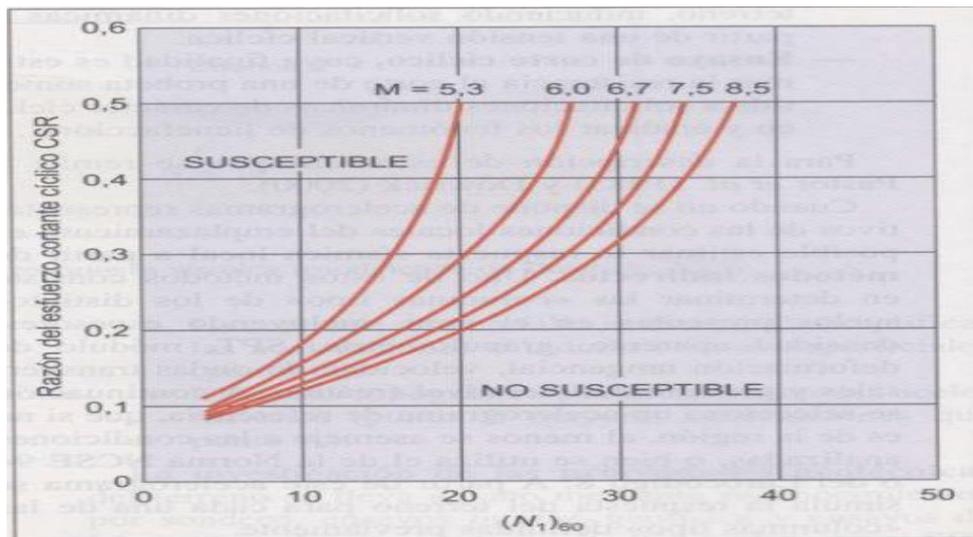


Figura 24. Susceptibilidad de licuefacción de un suelo en función de $(N_1)_{60}$ y la razón del esfuerzo cortante cíclico CSR (Ho et al., 1986) tomado de (González, 2002).

A partir de los valores obtenidos con anterioridad de los informes (provenientes de la ENIA) se calcula el CSR y se plotean los valores obtenidos en la curva de CSR vs SPT. Figura 24

Es un principio generalmente aceptado que el potencial de licuefacción de estratos arenosos puede evaluarse utilizando correlaciones entre datos de resistencia a la penetración (SPT) y la resistencia cíclica del material movilizado durante una fuerte excitación vibratoria. En este estudio se utilizan datos de los ensayos SPT efectuado y la resistencia cíclica caracterizada por la relación de esfuerzo cíclico (CSR) definiéndolo como el esfuerzo cortante promedio actuante en un estrato normalizado por el esfuerzo efectivo de sobrecarga.

2.4.3 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.

Algunos especialistas como Seed and Idriss (1971) indican la siguiente expresión numérica, y gráfica (Figura 25).

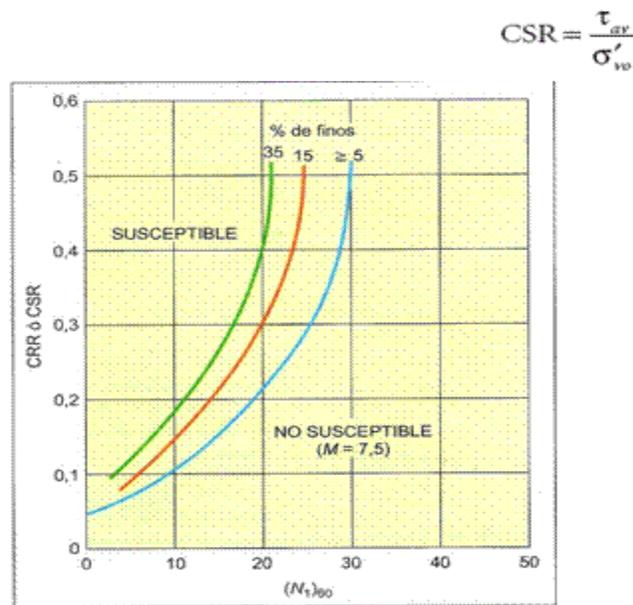


Figura 25. Suceptibilidad de licuefacción en función del SPT, (N1)60 para un terremoto de magnitud 7,5.

Enfoque de resistencia cíclica (CRR)

Para ello, científicos destacados como (Youd et. al 2001), (Semillas et al.1985) y otros, 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.

$N_{160} = (N_1)_{60}$ = 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.

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

Esta ecuación es válida para los $(N_1)_{60} < 30$. Para $(N_1)_{60} \geq 30$, 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):

$$C_N = \left(\frac{1}{\sigma'_v} \right)^{0.5}$$

$N_1 = N \times C_N$ 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 $(N_{1,60})$, 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:

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

Donde:

Tabla 5: Correcciones a SPT (Skempton, 1986).

FACTOR	VARIABLE DE EQUIPO	TERMINO	CORRECCION
presión vertical normal efectiva	N/A	C_N	$(Pa/\sigma'_{vo})^{0.5}$
presión vertical normal efectiva	N/A	C_N	$CN \leq 1.7$
relación de energía	martillo tipo dona	C_Z	0.5 - 1.0
relación de energía	martillo de seguridad	C_Z	0.7-1.2
relación de energía	martillo automático tipo dona	C_Z	0.8-1.3
diámetro de la perforación	65-115 mm	C_B	1
diámetro de la perforación	150 mm	C_B	1.05
diámetro de la perforación	200 mm	C_B	1.15
longitud de la barra	< 3 m	C_R	0.75
longitud de la barra	3-4 m	C_R	0.8
longitud de la barra	4-6 m	C_R	0.85
longitud de la barra	6-10 m	C_R	0.95
longitud de la barra	10-30 m	C_R	1.0
muestreo	muestreador estándar	C_S	1.0
muestreo	muestreador sin ademe	C_S	1.1-1.3

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

Respondiendo a los parámetros que se muestran en la tabla anterior utilizamos Perforación a percusión para la hincada de muestreador cuchara SPT (Penetración dinámica)

Penetración estática del muestreado Shelbys (Presión hidráulica)

Los diámetros utilizados son: 73, 89 y 108 mm

Martillo 300 libras

Caída del martillo 18 pulgadas con Varillas 0.40, 1.50 y 3.00 m

Muestreadores: Shelbys, Obsterberg, Dennison

Muestras de cuchara, portatestigos doble tubo rígido y portatestigo simple

2.4.4 Calculo del factor de seguridad para la licuefacción (FSL)

El FSL se calcula a partir de las formulas explicadas anteriormente y con los datos obtenidos de los informes ingeniero geológicos. Primero se calcula el CSR, luego CRR, para ello se programaron las fórmulas en el programa Excel.

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.

El análisis del potencial de licuefacción en este estudio sigue los 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. Como resultado de este análisis se definen los estratos que son potencialmente licuables y se confeccionaron los perfiles geotécnicos en los que se muestra los espesores máximos esperados de estratos en los cuales puede ocurrir licuefacción.

El factor de Seguridad corregido se calcula por la ecuación siguiente:

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

Dónde:

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

siguiente ecuación $MSF = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}}$.

Mw: Magnitud del sismo de diseño.

El factor de escala de acuerdo con la magnitud de sismo se calcula para sismos de magnitud 6; 6,5; 7; 7,5; 7,75 y 8. A continuación se muestran los resultados:

Magnitud del sismo	MSF
6	1,76
6,5	1,44
7	1,19
7,5	0,99
7,75	0,91
8	0,84

2.5 Conclusiones

- ❖ En el capítulo se mencionan las diferentes metodologías para saber si un suelo es licuable ante un sismo fuerte
- ❖ Describen los indicadores que se tuvieron en cuenta para determinar si el área de estudio presenta sectores licuables.

CAPÍTULO III: EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE INDICADORES PARA DETERMINAR EL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN EN EL MUNICIPIO GUANTÁNAMO

3.1 Introducción

En este capítulo se validarán los indicadores propuestos para determinar si los suelos del sector urbano del municipio Guantánamo son licuables ante un sismo de gran magnitud. Delimitaremos las zonas con condiciones para que ocurra el fenómeno de licuefacción a partir de la evaluación de los resultados obtenidos.

3.2. Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio Guantánamo

En el área se aplicó el sistema de indicadores propuesto por (Fernández, 2015), teniendo en cuenta que el área cuenta con un alto nivel de estudio sobre todo en la cuenca de Guantánamo.

3.2.1 Condiciones geológicas del municipio

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 siendo estas de grano fino vulnerables a que ocurra el fenómeno de licuefacción. Las zonas cercanas al litoral cuentan con depósitos aluviales y palustres todos estos vulnerables, además son favorables las zonas de la formación Maquey donde predominen las areniscas. Las áreas pertenecientes a las formaciones Camarones, Charco Redondo y Jamaica compuestas por rocas duras son poco favorables a la ocurrencia de este fenómeno. El sector urbano se ubica específicamente sobre la Formación San Luis, Maquey y los depósitos palustres; siendo la formación San Luis y los depósitos palustres los que presentan mayores condiciones para licuar.

3.2.2 Sismicidad

En el estudio de Microzonación Sísmica de la ciudad de Guantánamo y sus alrededores (Zapata, et al 2005), el mayor sector de la ciudad para esta componente tiene períodos entre 0 y 0,2 segundos, existe un sector al sureste de la ciudad presenta períodos entre 0,4 y 0,8 y existe un sector noroeste de la ciudad presenta períodos entre 0,2 y 0,6 y así como otro con idénticos valores al Oeste el reparto Los Coquitos. Hacia la zona central de la ciudad los valores máximos (mayor de 0,8 segundos) para la componente este – oeste se concentran hacia:

- La parte noroeste de la ciudad que incluye el reparto Caribe y el comienzo de la Autopista hacia Santiago de Cuba.
- El sector centro oeste cercano al reparto Pastorita y en el entorno del Hospital Pediátrico “Pedro Agustín Pérez”.
- En el sector este hacia la parte más extrema del reparto San Justo.
- En la zona central el área que ocupa el Puente de San Justo, el Policlínico Comunitario Docente “4 de Abril”, y la calle Moncada.

La parte central del sector urbano es la de mayores valores de aceleración y es de esperar los mayores efectos negativos, así como, un sismo fuerte que cause la licuación de los suelos.

3.2.3 Características hidrogeológicas

Dentro del municipio se destacan importantes cuencas hidrográficas superficiales, como la del Guaso, la Tagua y el Jaibo. La profundidad de yacencia de las aguas dentro de los límites de la región varía desde 0.5 y 1-3 m en la parte sur (hacia la bahía), y hasta 3-5 m y más al avanzar hacia el Norte, predominando las aguas subterráneas freáticas. La zona urbanizada se encuentra sobre un área llana entre los ríos Jaibo y Guaso los cuales con sus afluentes forman meandros, valles simétricos y asimétricos, también destaca el río Bano, y convergen hacia el sector centro oeste el Bano y el Guaso. En la misma, la profundidad del nivel freático oscila entre 0,10 y 10 m. Los valores del nivel freático menores de 3 m hacen favorables los suelos a licuar, en el área de estudio son muy frecuente encontrar estos valores hacia la parte central.

3.2.4 Condiciones ingeniero-geológicas

Para establecer las principales propiedades físico- mecánicas de los suelos en el área de estudio se revisaron un total de 51 informes ingenieros- geológicos, de los cuales solos se pudieron utilizar 45 los cuales contenían las coordenadas y la mayoría de las propiedades :por ciento de arena, por ciento de finos, límite líquido (LL), índice de plasticidad, humedad natural (Wn), densidad húmeda (γ_f), densidad seca (γ_d), y prueba estándar de penetración (NSPT) y cohesión (C).

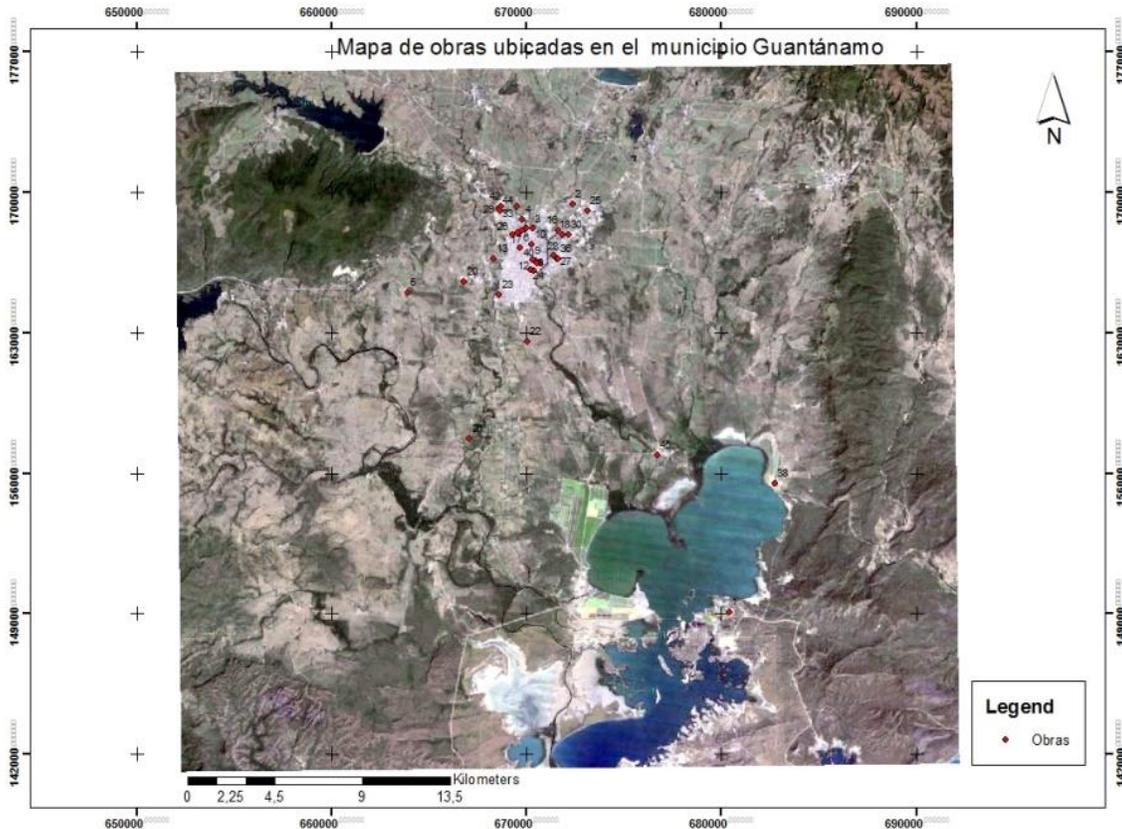


Figura 26. Mapa de ubicación de las obras analizadas en el área de estudio.

A continuación, se exponen (Tabla 6) los parámetros y condiciones físico-mecánicas más relevantes de cada una de las obras.

Tabla 6: Clasificación geotécnica del suelo.

No	Obra	N de SPT(golpes/30 cm)	LL (%)	% finos	% arena	Wn (%)	Yf (kN/m3)	Yd (kN/m3)	C (kPa)	Descripción
1	Parque Solar Fotovoltaico Santa Teresa					16,59			15	GM3
2	Sala penal del hospital Pediátrico Luis Ramírez, zona Sur Oeste									Relleno OH
3	Viviendas Ho Chi Minh	17	49	84	11	20,25	18,92	15,73	22	CL
4	Parque Fotovoltaico de 2.5 MW en S/E 110-34. Kv	17	77	85	10	20,45	18,87	15,75	12	OH
5	Informe de los resultados de la vivienda. San Gregorio y El 13 Norte	25				15,58			88	GM4
6	Informe de los resultados de la escuela de música Guantánamo	15	42	80	20	11,90	18,08	16,16	29	CL
7	Edificio GPFB-3 Tribunal (6 norte)	25				15,58			88	GH y restos de materiales de construcción y mezclas de OH
8	Vivienda Far Micro 1 Caribe					18,9			11	GM
9	Oficina comercial OBE Reparto Obrero		29	31	29	8,78	20	18,39	12	GC
10	ONIT. Filial Provincial Guantánamo	39				21,7			14	GM4
11	Escuela Especial Félix Varela					21,7			60	GM4
12	Cine Teatro América									CH
13	4 edificios de viviendas calle 13 norte y Martí	17	51	84	11	20,25	18,92	15,73	74	OH
14	Fiscalía Provincial Guantánamo	14	68	90	8	18,30	18,80	15,89	50	GM3
15	Fiscalía Municipal Guantánamo					21,70	20	16,43	18	GM3

16	Centro provincial de higiene y epidemiología					21,70	20	16,43	60	GM4
17	Bascula electrónica de 60 t UEBE. Fábrica de pienso Burene					10,84	22,32	20,14	40	GM4
18	Taller automotriz provincial OEBE Guantánamo	15	50	80	16	18,04	18,44	15,62	44	Relleno compacto y CH
19	Sede Danza Libre	39				21,70	20	16,43	14	GM4
20	Tribunal Provincial					11,34	20,60	18,50	100	GM3
21	Vivienda Carretera Jamaica	6	68		20	25,9	15,9	26,6	60	CH
22	Vivienda Especiales Guantánamo	11	68	90	8	18,30	18,80	15,89	50	CH
23	Villa Ferroviaria		51	80	18	14,03	18,26	16,01	30	CH con arena
24	Puente sobre río Arroyo Hondo	19	47			17	1808	1508	20	CL
25	Unidad Básica 660	8	54	88	12	36,43	18,72	14,07	18	OH
26	Parque Fotovoltaico San Pedro	22	37	95	5	8,60	16,62	15,29		CL
27	Vivienda Carretera Santa María Avenida la Formadora									SC de origen aluvial
28	Informe Joven Club de Computación y Electrónica (Boquerón)									CL
29	Viviendas Micro I Caribe Zona I									Relleno con escombros, basura y mezcla de CH y OH
30	Viviendas Micro I Caribe Zona II									Relleno con escombros, basura y mezcla de CH y OH
31	8 Viviendas para trabajadores del MICONS									Mezcla de CL y CH con arena
32	Remodelación y Ampliación	9	44		18	14,03	18,26	16,01	18	CL

	del Policlínico 4 de Abril									
33	Centro Provincial de Meteorología									OH
34	1000 Viviendas Marsellesa	20	72		14	21,83	19,79	16,24	87	CH
36	EIDE Guantánamo	16	44		18	25,06	18,69	14,94	20	CL con arena de origen eluvial
38	Escuela Primaria 1 de Mayo									CH mezclada con fragmentos de rocas sedimentarias (lutita y arenisca)
39	Dos Vivienda en Martí entre Prado									Relleno con escombros y CH
40	Línea de secado. Salina Glorieta		28	80	20	36,43	18,72	13,72	20	CL con ML
42	Oficina Provincial de ENSUME	7	38	24	30	12,30	19,80	17,63	10	GC con arena
43	Viviendas Micro I Caribe Zona III									Relleno con escombros, basura y mezcla de CH y CL
44	Viviendas Micro I Caribe Zona IV									Relleno con escombros, basura y mezcla de CH y OH
45	Remodelación y Ampliación del Policlínico Paraguay	19	46	52	17	25,2	19,3	15,42	20	Mezcla de CI con arena, cenizas y arcilla orgánica de origen antropogénico

3.2.5 Análisis de la condiciones ingeniero -geológicas

De las obras estudiadas solo 13 tienen valores promedios de las propiedades físicas y mecánicas que hacen los suelos susceptibles a licuar entre las que se encuentran: compactación baja a media, los valores de N de spt varían de 5-13, el límite líquido de 36-45, el por ciento de finos es mayor de 70 y la saturación es de media a alta.

El resto de las obras estudiadas presentan valores muy superiores a los establecidos para que un suelo pueda licuar.

Los datos obtenidos en la tabla 6 a partir de los trabajos de perforación para la construcción de las obras en el área, permitió conocer la disposición en profundidad de las litologías presentes y los espesores de cada capa. Por lo general las primeras capas están compuestas por suelos blandos que contienen materia orgánica y alto grado de saturación. Estas se pueden clasificar como arcilla de baja plasticidad (CL) y grava arcillosa con arena (GC). (Véase en la tabla 7 y figura 27).

Tabla 7. Valores de las propiedades de las capas identificados en los primeros metros de las calas

sucs	Rasgos	espesor (m)	N SPT(golpes/30cm)	de LL(%)	IP(%)	% finos	Wn (%)	S (%)	C (kPa)
CL	Aluvial Eluvial (arena)	9,6- 4,80	5-50	36-47	12- 23	-	>20	40- 100	20- 25
GC	(arena)	0,78- 1,65	7-39	38-40	14- 16	18- 24	12,30- 20,27	63- 60	10

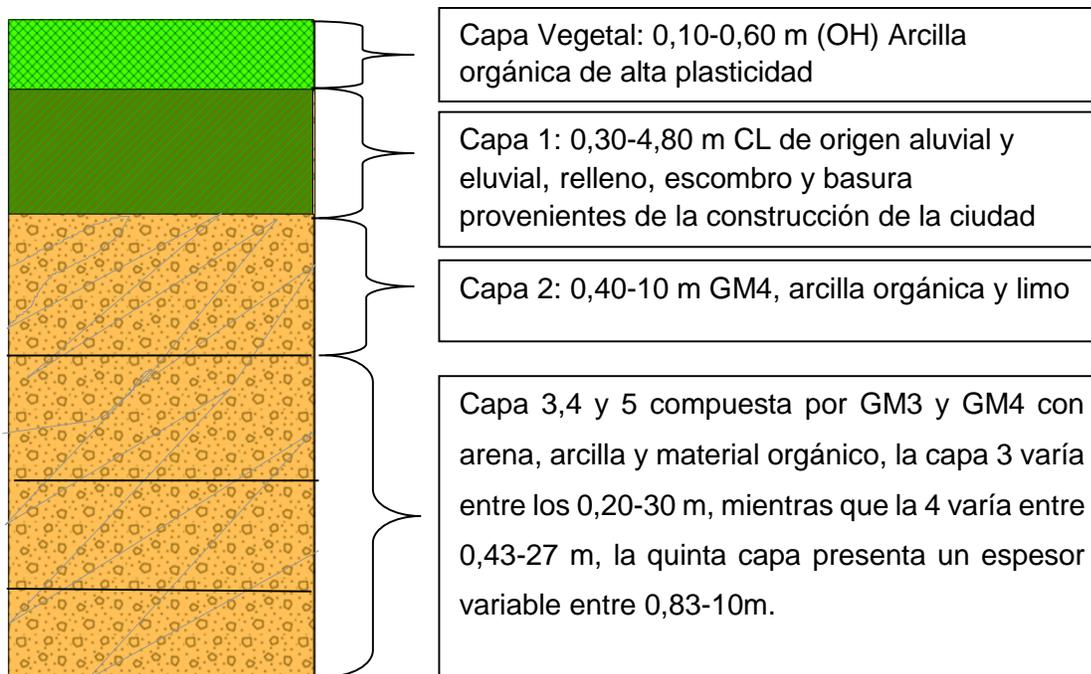


Figura 27. Columna litoestratigráfica esquemática de la ciudad de Guantánamo.

3.2.6 Cálculo de CRR

De los datos obtenidos se calcula el CRR para las litologías potencialmente licuables (CL-ML, SM-SC, o GM-GC) según el SUCS, y se construye la curva CRR vs SPT (Anexo 1). Si los valores son menores que 1 entonces se considera que es un estrato licuable (Ver Tabla 7).

Tabla 8: Resultado del cálculo de CRR.

Obra	Capa	N de SPT(golpes/30 cm)	Valor de N1.60	CRR
3. Viviendas Ho Chi Minh.	capa 1	17	15,3	1,183084649
6. Informe de los resultados de la escuela de música Guantánamo.	capa1	15	13,5	1,045323698
40. Línea de secado. Salina Glorieta.	capa 1	18	16,2	1,252346664
	capa 2	3	2,7	0,236593944
	capa 3	16	14,4	1,114086812
	capa 1	19	17,1	1,321909938

24.Puente sobre río Arroyo Hondo	capa 3	5	4,5	0,368404478
	capa 4	50	45	3,237628303
45.Remodelación y Ampliación del Policlínico Paraguay	capa 1	19	17,1	1,321909938
	capa 2	4	3,6	0,302182193
	capa 3	5	4,5	0,368404478
29.Viviendas Micro I Caribe Zona II	capa 4	17	15,3	1,183084649
43.Viviendas Micro I Caribe Zona III	capa 4	8	7,2	0,569299334
44.Viviendas Micro I Caribe Zona IV	capa 4	6	5,4	0,435066555
34.1000 Viviendas Marselleza	capa 4	39	35,1	1,686227936
36.EIDE Guantánamo	capa 2	32	28,8	2,321091927
38.Escuela Primaria 1 de Mayo	capa 2	13	11,7	0,908414913
	capa 3	26	23,4	1,823315291
42.Oficina Provincial de ENSUME	capa 1	7	6,3	0,502054444
32.Remodelación y Ampliación del Policlínico 4 de Abril	capa 1	9	8,1	0,636759447

Del cálculo de CRR se concluye que de 13 puntos analizadas con suelos favorables a licuar (CL-GC), 7 obras pudieran verse afectadas por la licuefacción ante sismos de magnitudes mayores o iguales a 6 (ver figura 27), y aunque se obtuvieron valores de CRR menores que 1 en la Escuela Primaria “1 de mayo” ubicada sobre (CL) con arena de origen aluvial, durante los trabajos de perforación hasta una profundidad de 8.10 m no se cortó el nivel freático.

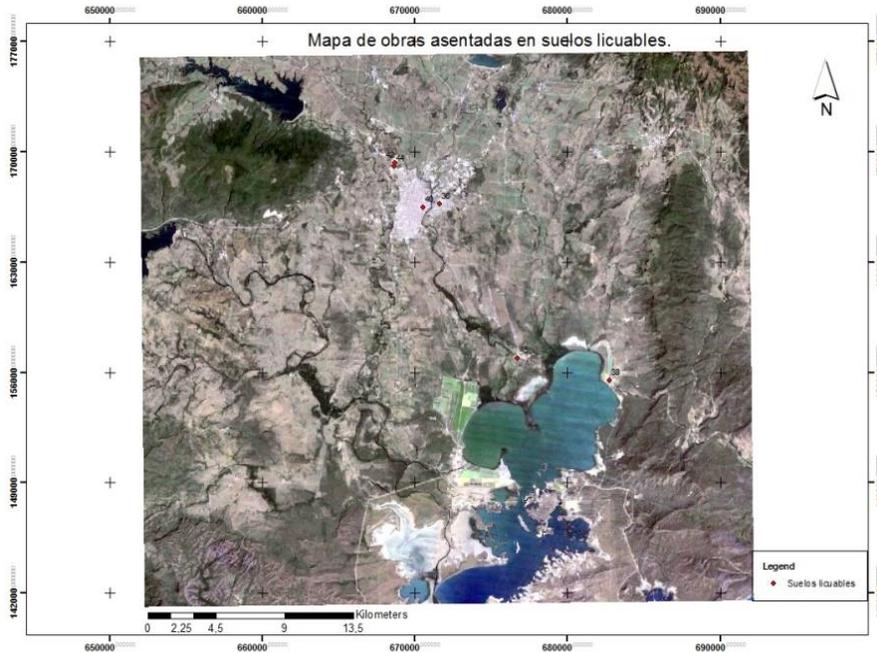


Figura 28. Ubicación de las obras asentadas sobre suelos licuables en el municipio

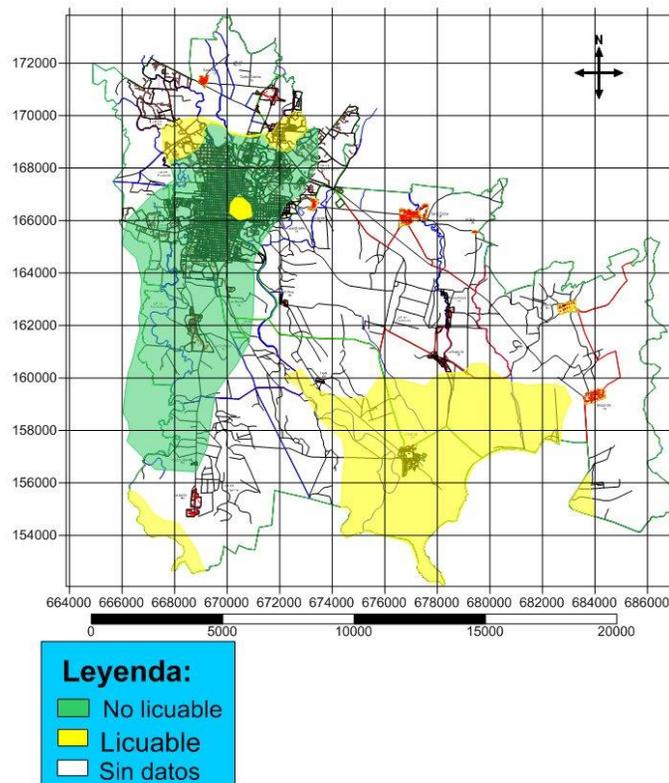


Figura 29. Esquema de susceptibilidad a la licuefacción del sector urbano del municipio Guantánamo.

3.3 Conclusiones

Según la metodología aplicada, en el área de estudio existen suelos con condiciones favorables para licuar. Las áreas más propensas son aquellas que se encuentran fundamentalmente en la llanura de inundación de los ríos Jaibo, Banao y Guaso o cercanas a estas, donde se encuentran los sedimentos más recientes, suelos con alto grado de saturación y baja compactación, no se descarta que ante la ocurrencia de un terremoto que exceda los 7.5 grados ocurra el fenómeno en algunas áreas no identificadas en este estudio dada que los datos son puntuales y en estos sectores no se han realizado calas. Estos suelos se enmarcan sobre la formación Maquey que está compuesta por alternancia de areniscas, limolitas y arcillas calcáreas de color gris.

CONCLUSIONES

- ❖ Se identificó que los suelos con condiciones favorables para licuar son los de tipo: grava arcillosa con arena (GC) y arcilla de baja plasticidad (CL).
- ❖ Las principales formaciones geológicas presentes en el sector urbano del municipio Guantánamo son: Fm. San Luis, Maquey y los depósitos aluviales y palustres de las áreas cercanas al litoral, están constituidos por areniscas y aleurolitas con cemento calcáreo mediana y fuertemente meteorizadas, arcilla de baja plasticidad, grava arcillosa con arena, arcilla orgánica de alta plasticidad, arena arcillosa con grava, limo, arenisca y aleurolitas polimícticas con cemento calcáreo.
- ❖ Los suelos se caracterizan por: un aumento de la compactación en profundidad, alto grado de saturación, el nivel freático se encuentra a profundidades menores a 3 m, alta resistencia a la penetración dinámica y alto contenido de finos.
- ❖ Las áreas con potencial para licuar se ubican en pequeños sectores en la parte noreste, noroeste y central del sector urbano donde se encuentra la Oficina Provincial de ENSUME, el Puente sobre el río Arroyo Hondo, Policlínico 4 de abril, Policlínico Paraguay y Viviendas Micro I Caribe Zona III y IV. y en mayor medida hacia sur donde se localiza la Línea de Secado Salina Glorieta.

RECOMENDACIONES

- ❖ Socializar la información mediante visitas a los diferentes centro de Gestión para la Reducción del Riesgo y Consejo Asamblea Municipal y Provincial.
- ❖ Realizar el estudio de vulnerabilidad en la ciudad de Guantánamo.
- ❖ Implementar medidas que mitiguen los posibles efectos el fenómeno de licuefacción.

BIBLIOGRAFÍA

Alcocer, S. (1994). Comportamiento ante cargas laterales de sistemas de muros de mampostería con diferente tipo de refuerzo horizontal. México: CENAPRED.

Alfaro Villagran, F. A. (2013). Comparación entre la metodología para la evaluación del potencial de riesgo de licuefacción y los catastros realizados luego del terremoto de 2010 en Concepción. *Trabajo de Diploma. Universidad del Bio Bio. 120 p.*

Alfaro Villagran, F. A. (2013). Comparación entre la metodología para la evaluación del potencial de riesgo de licuefacción y los catastros realizados luego del terremoto de 2010 en Concepción. *Trabajo de Diploma. Universidad del Bio Bio. 120p.*

Alvarez, L., Villalón, M., & Lindholm, C. (2015). *Proyecto Peligrosidad y riesgo sísmicos en Cuba y las regiones circundantes*. Noruega y Cuba: CENAIIS.

Alvarez, L., Villalón, M., & Lindholm, C. (2015). *Proyecto Peligrosidad y Riesgo sísmicos en Cuba y las regiones circundantes*. Noruega y Cuba: CENAIIS.

Arango Pilas, E. A. (2008). *Nueva Valoración Sismotectónica de la Región Oriental de Cuba en contexto Geodinámico del Norte del Caribe*. XI Cubano Congreso de Geología.

Arango Pilas, E. A. (2008). *Nueva Valoración Sismotectónica de la Región Oriental de Cuba en contexto Geodinámico del Norte del Caribe*. XI Cubano Congreso de Geología.

Arango, E. (1966). *Geodinámica de la región de Santiago de Cuba en límite de las Placas de Norteamérica y el Caribe*. México.

Arcos Méndez, J., & Fors Garzón, E. (2012). *La Evaluación del Riesgo Sísmico en el Planteamiento Territorial Urbano*. Grupo de Estudio de Desastres GREDES. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.

- Arcos Méndez, J., & Fors Garzón, E. (2012). *La Evaluación del Riesgo Sísmico en el Planteamiento Territorial Urbano*. Grupo de Estudio de Desastres GREDES. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.
- Áreas Méndez, M. (2000). Estudio del impacto ambiental. Dique Paraguay. *Trabajo de Diploma. ISMM. 17p* .
- Bandera Cuñat, I. (2015). *Evaluación ingeniero – geológica de la ciudad de Caimaneras*. Trabajo de Diploma. ISMM. 69p.
- Carratage, R. (1974). Geología e Hidrogeología de la parte Sur de la Sierra de Canasta Guantánamo. *Trabajo de Diploma. Universidad de Oriente. 106p* .
- Carrillo Gil, A., & Alcayhuaman A, L. (2008). Licuación de suelos durante el sismo Pisco-Perú-2007. *Sixth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2008)*, (pág. 10). Tegucigalpa, Honduras.
- Chuy. (199). *Sismos Perceptibles en la Provincia de Santiago de Cuba*.
- Chuy. (1999). *Sismos Perceptibles en la Provincia de Santiago de Cuba*.
- Chuy, R. (2010). *Modelo del peligro sísmico de la provincia de Santiago de Cuba*.
- Chuy, T. J., Alvarez, J. L., & Zapata, J. A. (1992). *Estudios Sismológicos Complejos para el Complejo Energético Toa-Duaba. Reporte de Investigación*.
- Colectivo de Autores. (2013). Léxico Estratigráfico de Cuba. *Instituto de Geología y Paleontología* .
- Darton, & Meinizer. (1926). *Geology of the Guantánamo Basin Cuban*. Guantánamo.
- Fernández, D. (2015). Licuefacción de los suelos generada por sismos de gran magnitud. Caso de estudio Caimanera y Santiago de Cuba. *Tesis de Maestría. ISMM* . Moa.
- Garces Santos, A. (1992). Investigación ingeniero -geológica regional básica para la ubicación del tunel en el trasvase Yateras- Guantánamo. *Trabajo de Diploma. ISMM. 42p* .

- Garces Santos, A. (1992). Investigación ingeniero -geológica regional básica para la ubicación del tunel en el trasvase Yateras- Guantánamo. *Trabajo de Diploma.ISMM.42p* .
- García Méndez, L. M. (1977). Geología del área Bayate Norte,provincia Guantánamo,Cuba. *Trabajo de Diploma.Universidad de Oriente.138p* .
- Gonzáles de Vallejo, L. I. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearsos Educación.
- González Fuentealba, J., & Verdugo Alvarado, R. (2014). Sitos afectados por la licuación a causa del terremoto del 27-F. *VIII Congreso Chileno de Ingeniería Geotectónica*, (pág. 10).
- Guasch, F., & Oliva, R. (2014). *Análisis de la vulnerabilidad habitacional y los riesgos inducidos en los edificios altos de la ciudad de Santiago de Cuba*. Santiago de Cuba: CENAIIS.
- Herrera, D. (2015). Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el consejo popular Guillermon Moncada del municipio de Santiago de Cuba Tesis de Diploma. ISMMM. 2015. *Tesis de Diploma. ISMMM*. Holguín.
- Herrera, D. (2015). Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el consejo popular Guillermon Moncada del municipio de Santiago de Cuba Tesis de Diploma. ISMMM. 2015. *Tesis de Diploma. ISMMM*. Holguín.
- <http://www.ecured.cu>. (s.f.). Recuperado el 30 de 11 de 2018, de Provincia Guantánamo disponible en/[Guant%C3%A1namo_%28municipio%29](http://www.ecured.cu)
- <http://www.lahistoriaconmapas.com/historia>. (s.f.). Recuperado el 12 de 22 de 2017, de Provincia Guantánamo: Medio físico/historia2/geografia-e-historia-de-guantanamo-provincia-cuba/)
- [https:// es. wikipedia. org/wiki/](https://es.wikipedia.org/wiki/Terremoto_de_Nepal_de_abril_de_2015). (s.f.). Recuperado el 12 de 03 de 2018, de Terremoto_de_Nepal_de_abril_de_2015 3:05pm

<https://es.scribd.com/>. (s.f.). Obtenido de ERA-Corto.Licuacion-Nueva-Zelanda - 2016-02-12-document/317463091/8

<https://es.wikipedia.org/wiki/>. (s.f.). Recuperado el 1 de 02 de 2018, de Terremoto%20de%20Christchurch%20de%202011.htm.11:24 am.

<https://es.wikipedia.org/wiki/>. (s.f.). Recuperado el 28 de 02 de 2018, de Terremoto_y_tsunami_de_Jap%C3%B3n_de_2011,11:04 am

Ishihara, K. (1990). Evaluation of liquefaction potential and consequent deformations in sand fills proceedings of the workshop on seismic issues Port of Los Angeles, ca.

Kosary, M. (1955). Geological Reconnaissance of the Guantanamo Basin Área. Guantánamo.

Kramer, S., & Stewart, J. S. (2004). Geotechnical Aspects of Seismic Hazards. En Y. Bozorgnia, & V. Bertero, Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering . London Taylor and Francis Group .

Liao, S., & Whitman, R. (1986). Overburden Correction Factors for SPT in Sand . *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, March, pp 373-377* .

Lora Borrero, B. (s.f.). Estudios de indicadores de la cuenca hidrográfica Guantánamo-Guaso. *Instituto nacional de recursos hidráulicos. Dirección de protección de cuenca y calidad de las aguas Ciudad de La Habana. Cuba. lora@hidro.cu* .

Martínez, M., & Marcelo, H. (1976). Estratigrafía de Puriales de Caujerí. *Trabajo de Diploma. Universidad de Oriente. 95p* .

Mussio, V. (2012). Potencial de licuefacción mediante el método de microtemores en la colonia solidaridad social, Mexicali. *Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. 111p* .

Navarro Labañino, L. L. (1979). Geología de la zona de Felicidad de Yateras en la provincia Guantánamo. *Trabajo de Diploma.ISMM.59p* .

NC 46-2013 propuesta 0 proyecto de norma. Contrucciones sismo resistentes.Requisito Basicos.

NC 46-2013 propuesta 0 proyecto denorma. Contrucciones sismo resistentes.Requisito Basicos.

NC-51-24-1984. *Norma Cubana.Mapa Ingeniero- Geológicos.*

Obando, T. (2009). Modelación geomecánica y temporal de la licuefacción en suelos de minas no metálicas. Estudio Caso: Ciudad de Managua (Nicaragua). *Tesis Doctoral. Editorial Universidad Internacional de Andalucía UNÍA (Huelva, España). Huelva. 900 p* .

Ordaz, H. (2013). La susceptibilidad a la licuefacción en el emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal, Cuba Occidental. *Minería y Geología / v.29 n.2 / abril-junio* , 1-15.

Parellada Reyes, O. (2016). Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción. *Trabajo de Doploma.ISMM* .

Perruca, L., Pérez, A., & Navarro, C. (oct./dic de 2006). Fenómenos de licuefacción asociados a terremotos históricos. Su análisis en la evaluación del peligro sísmico en la Argentina. *Rev.Asoc. Geol. Argent. v.61 n.4* . Buenos Aires.

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. *Rev. Asoc. Geol. Argent. v.61 n.4 Buenos Aires oct./dic, ISSN 1851-8249* .

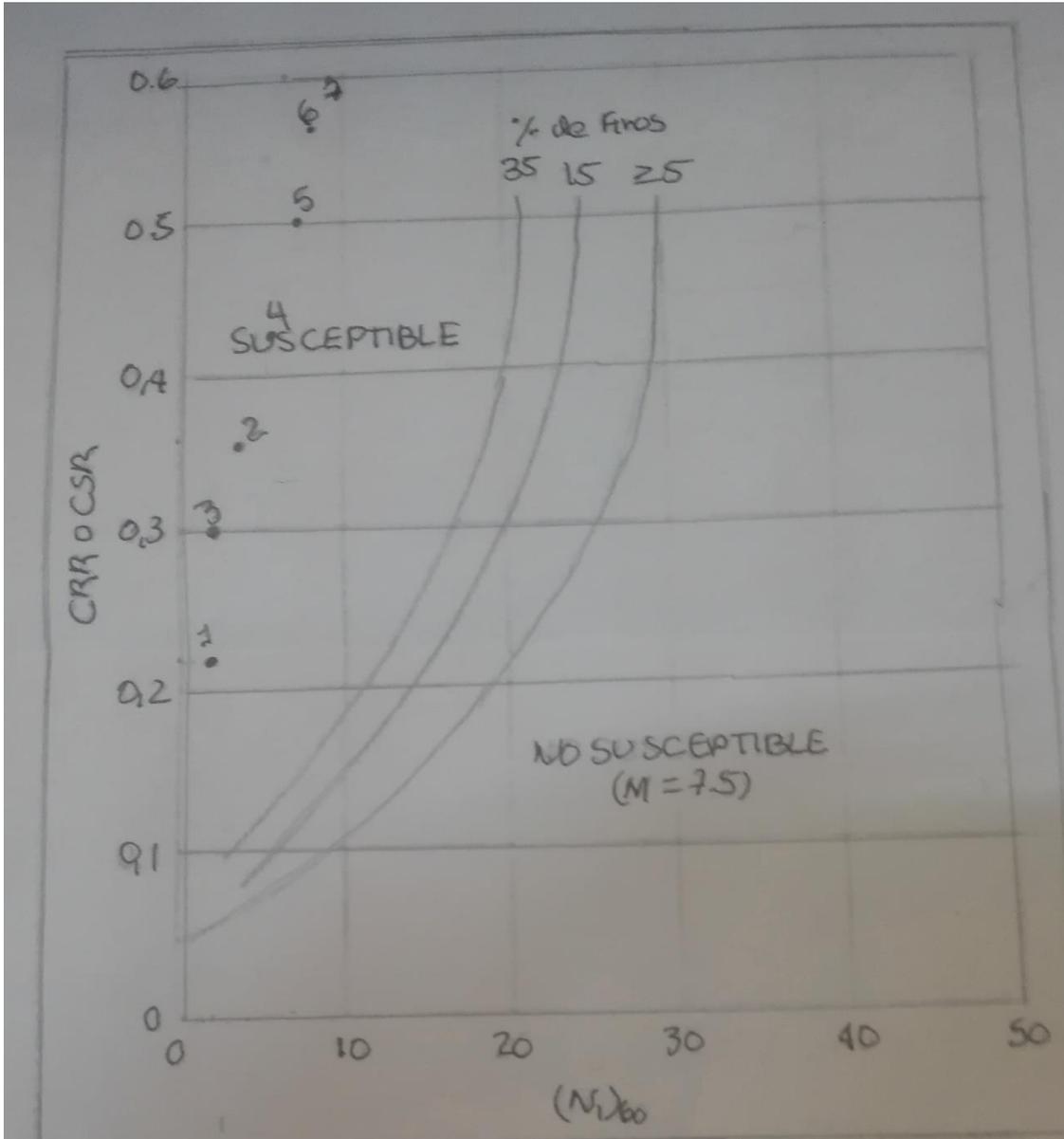
Recouso C, Y. (1981). Geología del Valle de Puriales de Caujerí (parte centro-sur). *Trabajo de Diploma ,ISMM,57 p* .

Reinoso Mercantety, D. (2016). Determinación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en los municipios

- Baracoa, Yateras, El Salvador y Niceto Pérez de la provincia de Guantánamo. *Trabajo de Diploma.ISMM* .
- Rodríguez Fernández, R. M. (1990). Fundamentación hidrogeológica del proyecto de mejoramiento de las tierras del áreas la Lobilla (margen izquierdo de la parte baja del río Jaibo). *Trabajo de Diploma.ISMM.37p* .
- Rodríguez Prado, S. (1981). Esquema ingeniero -geológico del valle de Guantánamo. Guantánamo. *Tesis de Diploma.ISMM.65p* .
- Rosabal. (2011). *Zonación preliminar de la licuefacción de los suelos en la región de Cuba Orienta*.
- Seed, B., & Idriss, M. (1971). A Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of soil Mechanics and Foundation Engineering Division,ASCE, 97, SM9, 1249- 1273 p* .
- Seed, B., & Lee, L. (1966). Liquefaction on saturated sands during cyclic loading . *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE,92 (SM6), 105-134*.
- Seed, Cetin, Moss, & Kammerer. (2003). Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework. California.
- Seisdedos, G., Oliva, R., & Pileta, J. (1984). Evaluación de la factibilidad de realización de trabajos de microzonación sísmica en la ciudad de Guantánamo.
- Serrano Menchavaría, S. (2000). Impacto de la carga contaminante en la cuenca hidrográfica Guantánamo-Guaso y un sistema de medidas para su corrección. *Trabajo de Diploma.ISMM.36p* .
- Stoev, S. (1967). Esquema de Guantánamo. Guantánamo. *Tesis de Diploma.ISMM. 60p* .
- Suarez Cala, S. (1991). Evaluación geólogo hidrogeológica del Sector Aguas de Mesa Guantánamo. *Trabajo de Diploma.ISMM.49p* .

- Thompson R, O. (1976). Levantamiento Geológico del valle de Cajobabo y sus alrededores. *Trabajo de Diploma. Universidad de Oriente. 48p* .
- Tokimatsu, K., & Yoshimi, Y. (1983). Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content. *Soils and Foundations, , Vol 23, N°4, pp. 56-74. 56-74.*
- Youd, T., & Idriss, I. (1998). Liquefaction resistance of soils: Summary Report from the 1996 and 1998 NCEER/NSF Workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 127, N° AI* .
- Youd, T., & Idriss, I. (2001). Liquefaction resistance of soils: Summary Report from the 1996 and 1998 NCEER/NSF Workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 127, N° AISS* .
- Zapata, J. A., Diez Zaldivar, E. R., & Rodríguez Chuy, T. J. (2005). *Microzonación Sísmica de la ciudad de Guantánamo y sus alrededores.*

ANEXOS



Anexo 1: Obras susceptibles a la licuefacción Seed and Idriss (1971), en función del SPT, (N₁)₆₀ para un terremoto de magnitud 7,5: 1.Línea de Secado Salina Glorieta, 2. Puente sobre el río Arroyo Hondo, 3.Policlínico Paraguay, 4.Viviendas Micro I Caribe Zona III, 5. Oficina Provincial de ENSUME, Viviendas Micro I Caribe Zona IV y 7.Policlínico 4 de abril.

Tabla de clasificación de los suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (SUCS).

Clasificación de los suelos (SUCS)	Descripción
CH	Arcilla de alta plasticidad
CL	Arcilla de baja plasticidad
GC	Grava arcillosa con arena
GC	Grava arcillosa
GM	Arenisca y aleurolitas polimícticas con cemento calcáreo.
GM2	Arenisca y aleurolitas polimícticas con cemento calcáreo débilmente meteorizada meteorizado
GM3	Arenisca y aleurolitas polimícticas con cemento calcáreo medianamente meteorizadas
GM4	Arenisca y aleurolitas polimícticas con cemento calcáreo fuertemente meteorizado
GP	Grava mal graduada
GW	Grava bien graduada
MH	Limo plástico con arena
ML	Limo
OH	Arcilla orgánica de alta plasticidad
OL	Arcilla limosa orgánica
PT	Turba
SC	Arena arcillosa con grava
SM	Arena limosa con grava
SP	Arena mal graduada
SW	Arena bien graduada