



REPUBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
FACULTAD DE GEOLOGIA Y MINERIA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Tesis presentada en opción al Título Académico
de Máster en Geología

Maestría en Geología, Mención Geotecnia e Hidrogeología.

9 na Edición

**“Licuefacción de los suelos generada por
sismos de gran magnitud. Caso de
estudio Caimanera y Santiago de Cuba.”**

Elaborado por: Ing. Liuska Fernández Diéguez

Tutor(es): DrC. Rafael Guardado Lacaba

DrC. Fernando Guasch Hechavarría

Consultante. Ricardo Oliva Álvarez

Moa, 2015

DEDICATORIA

Con todo el amor de mi corazón dedico esta tesis a mi familia que tanto me ha apoyado y ha sabido dar fuerzas para continuar superándome como profesional.

A todos Gracias!!!

AGRADECIMIENTOS

Me complace dar las gracias a mis tutores DrC. Rafael Guardado Lacaba, DrC Fernando Guasch Hechevarría y al Ing. Ricardo Oliva Álvarez que tanto me han apoyado y ayudado para desarrollar con éxitos mi investigación.

Gracias a mis amigos del departamento en especial a Yexenia Viltres y a todos los demás que se encuentran lejos pero siempre presentes.

A mis vecinos...

A mi novio.

A todos gracias por soportarme y ayudarme en el desarrollo de la investigación.

A todos Gracias!!!

PENSAMIENTO

“El ingeniero que trabaja en suelos debe proyectar su estructura no sólo para las propiedades del suelo existentes al comienzo de la obra, sino también para toda la vida del proyecto de la estructura. Necesita conocer las propiedades del terreno al comienzo de la obra y la forma en que éstas variarán a lo largo del tiempo. Tanto el tamaño y la forma de un depósito determinado como las propiedades mecánicas del suelo que los componen pueden variar de forma significativa. Muchas de estas variaciones se producen independientemente de la actividad humana, mientras que otras se deben a la propia obra”.

W. Lambe - R. Whitman (1984)

RESUMEN

Se realizó un estudio de la susceptibilidad a la licuefacción como fenómeno geológico inducido a partir del estudio de los suelos y analizar su comportamiento como líquidos ante terremotos fuertes, teniendo en cuenta que la parte sur de Cuba es la zona de mayor sismicidad asociada a la interacción de la Placa norteamericana y micro placa de Gonave. La investigación estuvo dada por la necesidad de evaluar las condiciones ingeniero geológicas de los suelos del municipio Caimanera provincia Guantánamo y del consejo popular Guillermón Moncada del municipio Santiago de Cuba. Se realizó 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. Se llevó a cabo mediante un procedimiento que permite la 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 y los menos licuables. Se elaboró un procedimiento que permitió caracterizar las condiciones ingeniero geológicas de los suelos y zonificar el potencial de licuefacción.

Se concluye que los suelos con mayores condiciones para licuar son los de tipo arena arcillosa, arena limosa, arcilla limosa y arcilla muy plástica con arena.

Palabras claves: Licuefacción, procedimiento, sismos, susceptibilidad, potencial

ABSTRACT

This investigation was realized by study of liquefaction susceptibility as geological phenomenon induced from the study of soils and analyze the soils comportment as liquids before strong earthquakes, watching that South of Cuba is the meyor seismicity zone asociated whit the interaction between North American Plate and the Gonave micro plate. The investigation was taken place by necessity to evaluate the geological engineer conditions of soils of Caimanera city , Guantanamo province and Guillermón Moncada city, Santiago de Cuba province. It's was realiced with the objctive to evaluate the geological engineer conditions of soils to predict effectively if they are liquefiable before a strong earthquake. Was carried out by a procedure that permitted characterize the study area and calculate the security factor for liquefaction. Was obtained as a result a susceptibility scheme to liquefaction of potentially licuefiabes areas and least liquefiabes areas. Was elaborated a procedure that permitted characterize the geological ingeniery condiciones of soils and the potential liquefaction zones.

We can conclude that the soils with the best conditions to liquefy are the soils type clay sand, sand loamy, loamy clay clay and sand whit hight plasticity.

Keywords: Liquefaction, procedure, earthquakes, sensitivity, potential

ÍNDICE

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS	II
PENSAMIENTO	III
RESUMEN	IV
Índice de Figura	VIII
Índice de Tablas	X
INTRODUCCION	11
CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS GENERALES. ESTADO DEL ARTE DEL FENÓMENO GEOLÓGICO INDUCIDO	18
1.1 Características generales del municipio Santiago de Cuba	18
1.1.1 Ubicación Geográfica del municipio Santiago de Cuba.....	18
1.1.2 Geodinámica de la región de estudio.....	19
1.1.3 Condiciones geológicas del municipio Santiago de Cuba.....	21
1.1.4 Características geomorfológicas.....	24
1.1.5 Condiciones geotécnicas.....	25
1.2. Características generales del municipio Caimanera	26
1.2.1 Ubicación Geográfica del municipio Caimanera.....	26
1.2.2 Geología regional.....	26
1.2.3 Geología local.....	28
1.2.4 Geomorfología regional.....	29
1.2.5 Características ingeniero – geológicas de la región.....	29
1.3 Estado del arte del fenómeno natural inducido	30
1.4. Factores que condicionan la ocurrencia de la licuefacción	32
1.4.1 Criterios de susceptibilidad de los suelos licuables.....	34
1.4.2 Condición de un suelo para que sea licuable.....	36
1.5 Evidencias históricas del fenómeno de licuefacción de suelos	37
1.5.1 Reportes históricos de licuefacción de los suelos en Cuba.....	46
1.6 Sismicidad de Cuba como factor catalizador de la licuefacción de los suelos	47
1.7 Investigaciones realizadas en Cuba	49
CAPITULO II: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN DE LOS SUELOS	53

Índice

2.1. Metodología de la investigación.....	54
2.2. Metodologías para el estudio de la licuefacción de los suelos	54
2.3. Métodos utilizados para evaluar la susceptibilidad a la licuefacción	56
2.4. Procedimiento para el estudio de la susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en la región oriental de Cuba.....	58
CAPITULO III: EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES INGENIERO GEOLÓGICAS EN LAS ÁREAS DE ESTUDIO.	70
3.1 Criterios para la selección de escenarios susceptibles a la licuefacción.....	70
3.2. Validación del procedimiento propuesto en el consejo popular Guillermón Moncada, municipio Santiago de Cuba.	71
3.2.1. Condiciones geológicas	72
3.2.2. Sismicidad	72
3.2.3. Características hidrográficas.....	73
3.2.4. Condiciones ingeniero geológicas.....	74
3.2.5. Esquema ingeniero geológico por tipo de suelos	76
3.2.6. Resultados del Cálculo del Factor de Seguridad.....	81
3.2.7. Esquema pronóstico de susceptibilidad a la licuefacción ante terremotos fuertes. 83	
3.3. Validación del procedimiento propuesto en el municipio Caimanera, provincia Guantánamo	84
3.3.1. Condiciones geológicas	84
3.3.2. Sismicidad	84
3.3.3. Características hidrográficas.....	87
3.3.4. Condiciones ingeniero geológicas.....	88
3.3.5. Esquema ingeniero geológico por tipo de suelos en Caimanera	91
3.3.6. Factor de seguridad para la Licuefacción.....	94
3.3.7. Esquema pronóstico de susceptibilidad a la licuefacción ante terremotos fuertes. 96	
3.4. Evaluación integral de los resultados.	97
CONCLUSIONES.....	100
RECOMENDACIONES.....	101
BIBLIOGRAFÍA.....	102
ANEXOS	111

Índice de Figura

- Figura 1.1 Ubicación geográfica del municipio Santiago de Cuba
- Figura 1.2 Esquema de fallas activas en el municipio Santiago de Cuba
- Figura 1.3 Esquema geológico del municipio Santiago de Cuba. Fuente:(I.G.P, 2008).
- Figura 1.4 Modelo digital del terreno del municipio Santiago de Cuba.
- Figura 1.5 Ubicación geográfica del municipio Caimanera
- Figura 1.6 Esquema geológico de la región. Suministrado por INRH de Guantánamo
- Figura 1.7 Perfil de los suelos arenosos arcillosos del valle de la Ciudad de Puerto Príncipe, generador de altas intensidades durante el proceso sísmico.
- Figura 1.8 Grietas, provocadas por licuefacción del terreno, afectando a una casa en Cahuil.L
- Figura 1.9 Imágenes del Terremoto de Nepal
- Figura 1.10 Foto de licuefacción de los suelos en la Alameda, Santiago de Cuba
- Figura 1.11 Sismicidad en el Caribe y Centroamérica en los últimos 10 años
- Figura 1.12 Ocurrencia de los terremotos de magnitud mayor a 5 reportados en la región suroriental de Cuba desde 1900.
- Figura 1.13 Suelos que se caracterizan a licuar en la región de Cuba Oriental.
- Figura 2.1 Mapa de flujo de la metodología de la investigación
- Figura 2.2 Relación entre razones de tensiones causantes de licuefacción y valores corregidos del SPT (para $MW=7.5$ y $\sigma_v=1$ atm) con ajuste de contenido de finos. Fuente: Seed, et al 2003.
- Figura 2.3 Susceptibilidad de licuefacción de un suelo en función de $(N1)_{60}$ y la razón del esfuerzo cortante cíclico CSR (Ho et al., 1986) tomado de (González, 2002)
- Figura 3.1 Zonificación sísmica para la República de Cuba NC 46- 2014
- Figura 3.2 Esquema ingeniero geológico por tipos de suelos.
- Figura 3.3 Perfil Ingeniero Geológicos I-- I' del Área de Estudio.
- Figura 3.4 Perfil Ingeniero Geológicos II-- II' del Área de Estudio.
- Figura 3.5 Columna litoestratigráfica de los perfiles I-I' y II- II'. Consejo popular Guillermón Moncada.
- Figura 3.6 Esquema pronóstico de susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en el consejo popular Guillermón Moncada.
- Figura 3.7 Recorte de la Tabla de principales localidades ubicadas en las

diferentes zonas sísmicas del territorio nacional. NC 46- 2014 Norma sísmica

Figura 3.8 Esquema de profundidad del nivel freático en el municipio Caimanera, provincia Guantánamo.

Figura 3.9 Esquema ingeniero geológico a partir del tipo de suelo

Figura 3.10 Esquema de tipos de suelos y densidad habitacional de la ciudad de Caimanera

Figura 3.11 Esquema de riesgo sísmico a partir de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas y tipo de suelos según la SUCS para la ciudad de Caimanera.

Figura 3.12 Esquema del potencial de licuefacción en el municipio Caimanera, provincia Guantánamo.

Índice de Tablas

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

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) de los cedimentos

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).Unidad Geomorfologica detallada

Tabla 4 Reportes de sismos perceptibles

Tabla 5 Clasificación de algunos métodos para evaluar el potencial de licuefacción, PHRI (1997)

Tabla 6 Correcciones SPT (Skempton ,1986)

Tabla 7 Clasificación geotécnica del suelo del área de estudio

Tabla 8 Resultados del Cálculo del Factor de Seguridad en el Perfil I-Í. Izquierda y perfil II- II´ a la derecha.

Tabla 9 Velocidad de propagación de las ondas elásticas y la rigidez sísmicas de los suelos del territorio de Caimanera.



INTRODUCCION

La licuefacción es uno de los fenómenos geológicos más importantes, interesantes y controversiales de la ingeniería geotécnica. Sus efectos provocaron la atención de los ingenieros geotécnicos desde los terremotos de Alaska (USA) y Niigata (Japón), ambos ocurridos en el 1964 y recientemente en Haití en el 2010, todos con magnitudes superiores a 7.5. 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.

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.

Durante los terremotos el movimiento del terreno puede causar una pérdida de la resistencia del suelo que da como resultados el colapso de edificaciones, deslizamientos de tierra, roturas, etc. Este fenómeno está principalmente asociado con suelos saturados poco cohesivos. El término licuefacción, representa entonces todos los fenómenos donde se dan excesivas deformaciones o movimientos como resultado de transitorias o repetidas perturbaciones de suelos saturados poco cohesivos. (Perucca, 2006).

Las áreas de estudio se encuentran muy cerca de la zona sismogeneradora Bartlett-Caimán capaz de generar sismos fuertes, como hay reportes históricos y aceleraciones mayor de 0,2g. Las investigaciones sismológicas de Cuba sitúan a la



provincia Santiago de Cuba como la de mayor peligro sísmico del territorio nacional. Más del 60% de los sismos fuertes reportados en el país han tenido su epicentro en Santiago de Cuba. Existen reportes en el municipio Santiago de Cuba, específicamente en su ciudad cabecera, el terremoto ocurrido el 3 de febrero de 1932 donde se reportaron serios daños en la ciudad de Santiago de Cuba, fundamentalmente en los alrededores de la bahía. Caimanera se encuentra ubicada en la bahía en la parte que corresponde a tierras bajas donde los suelos son relleno sobre pantano en algunas partes del municipio y en otras ocasiones en tierras bajas y por lo tanto con bajos valores del nivel freático.

Las experiencias derivadas de las catástrofes de Santiago de Cuba 1932, y Haití 2010, nos convoca a no dejar de prestar atención a la sismicidad como una premisa de desastres para Cuba, resaltando por tanto este tema de investigación como imprescindible para la Seguridad Nacional.

La investigación se lleva a cabo dada la necesidad de analizar y evaluar la susceptibilidad a la ocurrencia de la licuefacción como fenómeno geológico inducido y como generador de riesgos.

Problema de la investigación

Necesidad de evaluar las condiciones ingeniero geológicas de los suelos del municipio Caimanera y el consejo popular Guillermón Moncada para predecir si son licuables ante un sismo de gran magnitud.

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

Objeto de Estudio: los suelos del municipio Caimanera y del consejo popular Guillermón Moncada del municipio Santiago de Cuba.



Objetivo General

Evaluar las condiciones ingeniero geológicas de los suelos en el municipio Caimanera y en el consejo popular Guillermón Moncada para saber si son licuables ante un sismo de gran magnitud.

Objetivos Específicos:

- Determinar el potencial de licuefacción mediante un sistema de indicadores propuestos por diversos autores.
- Caracterizar las condiciones ingeniero geológicas que favorecen la ocurrencia de la licuefacción.
- Zonificar el potencial de licuefacción según las condiciones ingeniero geológicas del área de estudio.

Hipótesis: Si se establece un procedimiento y se caracterizan los suelos a partir de las condiciones ingeniero geológicas entonces será posible evaluar el potencial de licuefacción ante un sismo de gran magnitud y zonificar los escenarios susceptibles.

Novedad de la Investigación:

- Se establece por un procedimiento mediante un sistema de indicadores ingeniero sismológicos que permiten la evaluación integral de los escenarios susceptibles a la licuefacción del suelo.
- Por primera vez se hace una caracterización ingeniero geológica de los suelos que permite la evaluación de forma cuantitativa del potencial de licuefacción.



Resultados esperados

- Un sistema de indicadores unificado para evaluar el potencial de licuefacción en las condiciones geológicas típicas de Cuba Sur Oriental.
- Caracterización de los suelos a partir de las condiciones ingeniero geológicas y el efecto de sitio, que favorecen la ocurrencia de la licuefacción.
- Mapa pronóstico de susceptibilidad a la licuefacción a partir del modelo geológico.

Impacto Social

Permite a la población disminuir la incertidumbre ante lo desconocido y alcanzar un mayor conocimiento sobre los fenómenos inducidos a los que están expuestos dada su la ubicación geográfica.

Impacto Económico

Permitirá la racionalización de los recursos al seleccionar las áreas favorables para la construcción de obras ingenieriles, logrando un mejor ordenamiento territorial y gestión integral del riesgo sísmico.

Impacto Científico

Se logra cuantificar el potencial de licuefacción de los suelos teniendo en cuenta las variables geotécnicas y sismo generadora de Cuba.

Permite zonificar el potencial de licuefacción según las condiciones ingeniero geológicas del área de estudio.

Acerca de la investigación

Esta investigación se enmarca en el ámbito de la Geotecnia y los Riesgos Geológicos a partir de datos generales empíricos, pues se tuvo en cuenta los



informes de los terremotos ocurridos en Cuba y en el mundo que hayan propiciado la ocurrencia de licuefacción de los suelos aplicando el método histórico lógico.

Para dar cumplimiento a la investigación se tendrá en cuenta el método de inducción- deducción para analizar los datos de investigaciones e informes ingeniero geológicos realizados por la ENIA y otras empresas que permitan la caracterización ingeniero geológica y geológica del área de estudio.

Se aplicó el método de análisis y síntesis a partir de la revisión de tesis y artículos de otros autores que hablan del tema de estudio aplicando diversas metodologías para caracterizar el potencial de licuefacción. Se puede aplicar una metodología teniendo en cuenta el objeto que se investiga y la finalidad de la obra que se pretende construir o simplemente evitar un desastre.

La investigación está conformada por Introducción donde parte se expone los argumentos que sustentan el planteamiento del problema central de este estudio. Asimismo, se definen los objetivos que guían el desarrollo del trabajo; la justificación, en la que se explica la pertinencia del mismo; los alcances y limitaciones. Se resumen una serie de elementos conceptuales relacionados con el tema de la presente investigación que sirven de base al desarrollo de la misma. En él se describe el fenómeno de licuefacción, los factores que influyen en el mismo y sus efectos. Incluye una revisión sobre las diferentes técnicas experimentales, semi-empíricas y numéricas existentes para analizar el fenómeno de licuefacción.

El Capítulo 1 trata sobre el estado del arte de la investigación donde se brindan aspectos de importancia para el estudio del fenómeno como los lugares donde ha ocurrido con sus características, criterios para la selección de sectores susceptibles y factores que condicionan su ocurrencia del fenómeno.



El Capítulo 2: Métodos para estimar el potencial de licuefacción: Se presentan diferentes metodologías para analizar el fenómeno de licuefacción a partir de diferentes pruebas tales como el ensayo de penetración estándar (SPT), el ensayo del cono eléctrico (CPT), la velocidad de onda de corte (V_s), la prueba de penetración Becker (BPT) y el ensayo del Dilatómetro de Marchetti (DMT). Se desarrolla la metodología a aplicar en el área de estudio partiendo de la información con que se cuenta y las condiciones del área de estudio. Se propone un procedimiento para estimar el potencial de licuefacción a partir de calcular el factor de seguridad para la licuefacción.

En el capítulo 3 se valida el procedimiento propuesto en dos áreas de estudio, en el municipio Caimanera de la provincia de Guantánamo y en el consejo popular Guillermón Moncada del municipio Santiago de Cuba provincia Santiago de Cuba.

Conclusiones: Se presentan de manera sucinta los aspectos derivados del análisis de los resultados en relación al fenómeno de la licuefacción. Recomendaciones y la Bibliografía consultada.

Justificación de la investigación

El resultado de la investigación que se lleva a cabo permitirá evaluar el potencial de licuefacción y analizar todos aquellos fenómenos o procesos que representen un peligro para la vida de los hombres o para sus pertenencias, en un determinado espacio de la superficie terrestre. De modo que, al plantear la peligrosidad de un lugar, debe hacerse con sentido integral, teniendo en cuenta tanto los peligros naturales como los peligros sociales. El no considerarlos juntos, especialmente en el estudio de problemas ambientales, es solo una abstracción metodológica. Dado que el peligro y la vulnerabilidad representan una dupla inseparable en el análisis de riesgos, al investigar estos en un área se impone un paralelismo en la investigación, puesto que tan necesario es conocer los peligros que la acechan como la vulnerabilidad de sus habitantes. Por lo tanto, otro propósito del trabajo ha



sido encontrar variables que permitan medir la vulnerabilidad global de la población. La cuantía de daños que puede provocar un fenómeno peligroso está directamente relacionada con el grado de vulnerabilidad de la población, pero esta no depende de aquel, sino más bien de la situación socioeconómica y cultural previa del grupo humano. La catástrofe pone en evidencia tanto la peligrosidad de un fenómeno como la vulnerabilidad de su población. Por ello, tan importante es identificar los peligros ambientales como la capacidad de los individuos para enfrentarlos. Ambos aspectos se han tenido en cuenta en esta investigación y aplicados al área de estudio.

CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS GENERALES. ESTADO DEL ARTE DEL FENÓMENO GEOLÓGICO INDUCIDO.

Introducción

- 1.1. Características generales del municipio Santiago de Cuba**
- 1.2. Características generales del municipio Caimanera**
- 1.3. Marco teórico conceptual: estado del arte del fenómeno natural inducido.**
- 1.4. Factores que condicionan la ocurrencia de la licuefacción.**
- 1.5. Evidencias históricas del fenómeno de licuefacción de**
- 1.6. Sismicidad en Cuba como catalizador de la licuefacción de los suelos.**
- 1.7. Trabajos precedentes en Cuba.**

Conclusiones parciales

Introducción

El capítulo tiene como objetivo establecer el estado del arte del fenómeno de la licuefacción de suelos ante sismos de gran magnitud, expresando las condiciones ingeniero geológicas y los efectos de sitio. Se brinda un resumen de las condiciones geológicas típicas para su desarrollo. Se tratarán los principales métodos empleados para su estudio, así como las evidencias históricas de la licuefacción en el mundo y en Cuba.

1.1 Características generales del municipio Santiago de Cuba

1.1.1 Ubicación Geográfica del municipio Santiago de Cuba

El municipio Santiago de Cuba se encuentra situado al sur de la provincia de igual nombre y colinda por el norte con los municipios San Luis y Songo La Maya; por el sur con el Mar Caribe; por el este con la provincia Guantánamo y por el oeste con los municipios Guamá y Palma Soriano (figura 1.1) siendo sus Coordenadas Lambert aproximadas



X min: 579319.500 Xmax: 651778.500

Ymin: 137356.000 Ymax: 164642.000

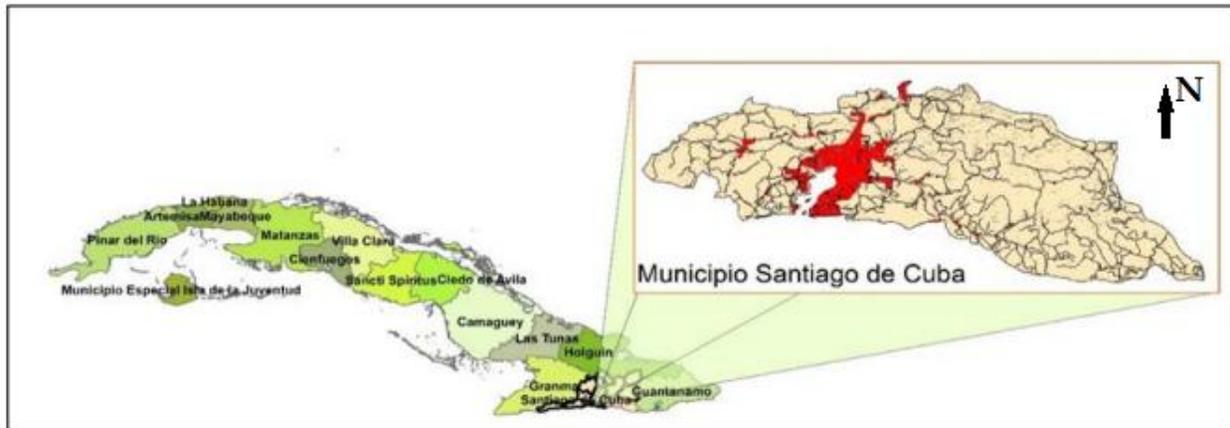


Figura 1.1 Ubicación geográfica del municipio Santiago de Cuba en el contexto provincial y nacional.

1.1.2 Geodinámica de la región de estudio.

El sistema de fallas de Mar Verde a El Cristo, en la línea Boniato - Quintero, ha llegado a tomar valores de 40 mm de separación en el período de 1983-1990, lo cual indica, una secuencia de esfuerzos de distensión en el intervalo de tiempo señalado, observado a lo largo de toda esta estructura. Sin embargo, la estructura que se encuentra al norte de este sistema de fallas, se define en toda su longitud por la presencia de deformaciones de componente compresiva, y una tercera estructura, localizada al norte se comporta de forma distensiva, a lo largo de toda esta zona de fallas, se evidencia la presencia de movimientos horizontales a partir de los desplazamientos del cauce de los diferentes arroyos que la atraviesan, y de las pequeñas colinas que forman el relieve al norte de la bahía de Santiago de Cuba, constituidas por rocas vulcanógenas sedimentarias del grupo El Cobre de edad Eoceno Medio; las cuales están muy deformadas tectónicamente.(Figura 1.2)

Es contradictorio el hecho de que la falla Boniato, no refleje valores anómalos de las deformaciones de los movimientos verticales, que permitan definirla en la actualidad

como una falla activa de importancia en la región. Se trata de una estructura expresada muy bien en el relieve con una dirección E - O, que limita al norte la cuenca de Santiago de Cuba con la meseta monoclinal de Boniato, la cual ha sido señalada por varios autores como una estructura activa, e incluso sismogeneradora.

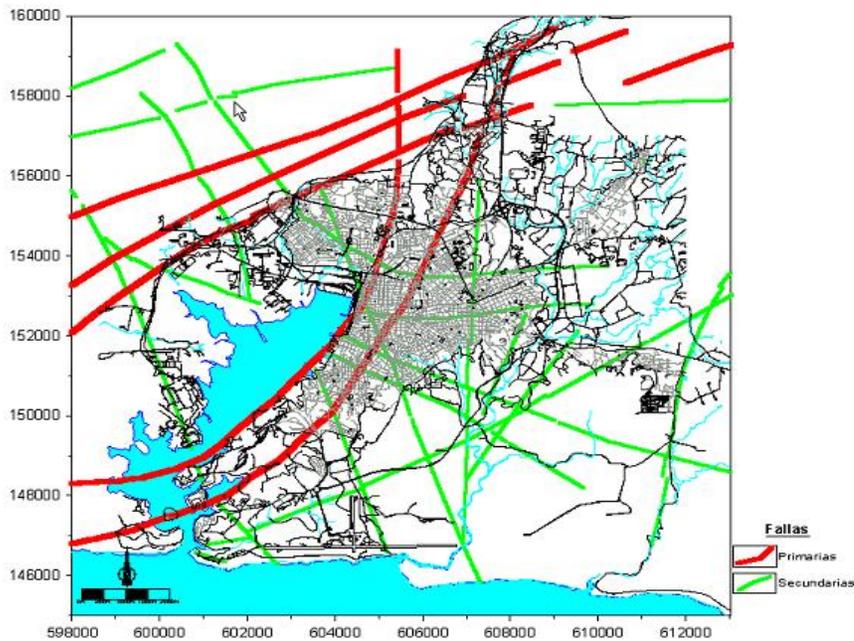


Figura 1.2 Esquema de fallas activas en el municipio Santiago de Cuba. Fuente CENAIS

Por otro lado, la Formación La Cruz y las formaciones calcáreas arrecifales, que forman el litoral costero de la cuenca de Santiago de Cuba (Maya –Plioceno Cuaternario y Jaimanitas-Holoceno), presentan un desarrollo considerable de terrazas marinas que llegan hasta 8 niveles con una altura total de 110 metros sobre el nivel del mar. Si se considera de 1.64 millones de años la edad del límite Plioceno a Pleistoceno, se obtiene una velocidad de ascenso promedio hasta la actualidad de aproximadamente 0.06 mm/año, la cual es muy inferior en comparación con la velocidad promedio del movimiento relativo de ambas placas que es de 17 mm/año. Lo anterior confirma el predominio e importancia de los movimientos horizontales que rigen la dinámica actual en la zona límite de placas, sobre los verticales relacionados con la etapa de desarrollo neotectónico de la plataforma cubana.(Herrera, 2015)



1.1.3 Condiciones geológicas del municipio Santiago de Cuba

En los macizos montañosos del municipio predominan las rocas ígneas del tipo granítico hacia el noreste, rocas máficas alrededor de la cuenca Santiago, del tipo vulcanógenas y vulcanógenas-sedimentarias hacia el suroeste en distintas correlaciones, combinaciones alternantes y muy variables, tanto en sentido vertical como lateral. Las rocas del tipo sedimentarias predominan sobre todo en la Cuenca Santiago (centro sur) y en su parte meridional se observa una alternancia de calizas biodetríticas, calizas limosas y limoso- arcillosas, calcarenitas de matriz margosa, margas, aleurolitas y más subordinadamente arcillas, conglomerados y areniscas polimícticas con cemento calcáreo, formadas principalmente por vulcanitas; aunque también es posible encontrarlas metamorfizadas hacia el sureste principalmente. (Carrillo, 2009).

Estratigráficamente, las formaciones más antiguas provienen del período Cretácico Superior, donde predominan las rocas sedimentarias, vulcanógenas y vulcanógeno sedimentarias, aunque se revelan algunas del tipo metamórficas en los contactos con los macizos de origen vulcanógeno y vulcanógeno sedimentarios hacia la parte suroeste (Mármoles Jurásico: (Kozary, 1970); (Carrillo, 2009).

Se representan además formaciones del Paleógeno representadas abundantemente por formaciones pertenecientes al grupo El Cobre, ampliamente distribuidas a lo largo de la Sierra Maestra; las rocas más abundantes son: tobas, tobas aglomeráticas, lavas y lavas aglomeráticas de composición andesítica, andesidacítica y dacítica, raramente riolítica, riodacítica y basáltica. Con estas rocas se intercalan tufitas y calizas, además, se asocian a este complejo vulcanógeno- sedimentario cuerpos hipoabisales y diques de diversa composición. En su constitución también participan tobas cineríticas, tufitas, tobas calcáreas, calizas tobáceas, areniscas polimícticas, vulcanomícticas y grauvacas.

En el Paleógeno también se desarrollan formaciones sedimentarias de origen terrígeno y de ambientes marinos, entre las que se destacan la Formación Jaimanitas en la faja

costera, Formación Cauto, terrígena ubicada hacia la parte centro oeste, y otras formaciones tales como Punta Imías, Bitirí, etc. (Carrillo, 2009).

Dentro de la evolución geológica del Neógeno se encuentran un grupo de formaciones sedimentarias fundamentalmente carbonatadas representadas por la Formación La Cruz (periferia de la bahía de Santiago de Cuba), Formación San Luis, Formación Camarones y otras predominantemente terrígenas como la Formación Puerto Boniato. Las formaciones más recientes, predominantemente sedimentarias, pertenecen al Cuaternario y se desarrollan en forma discontinua en pequeñas áreas de la cuenca de Santiago de Cuba; representadas en las formaciones Camaroncito y Maya, desarrollándose depósitos arrecifales que alternan con episodios de intenso aporte de materiales clásticos terrígenos (Carrillo, 2009).

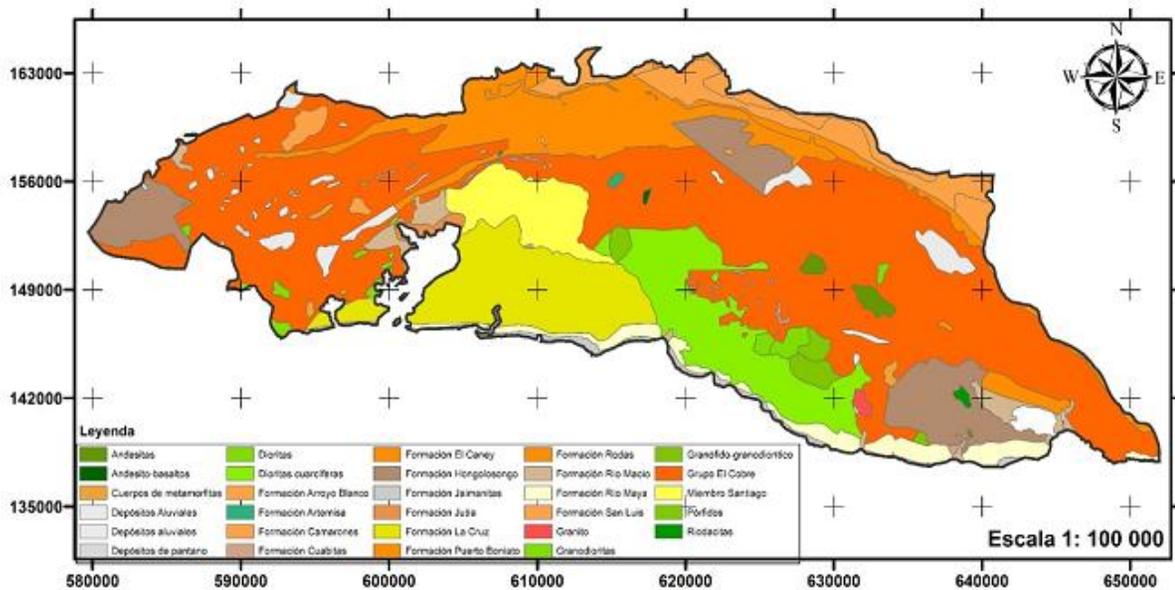


Figura 1.3 Esquema geológico del municipio Santiago de Cuba. Fuente:(I.G.P, 2008).

Las formaciones Cuaternarias presentes en el área son las siguientes:

1. Formación Maya (Rm) N²-Q¹. Sus depósitos corresponden a episodios de desarrollo arrecifal que alternan con episodios de intenso aporte de materiales clásticos



terrígenos, predominando los de desarrollo arrecifal. Está compuesta fundamentalmente por calizas biohémicas algáceas y coralinas muy duras de matriz micrítica, frecuentemente aporcelanadas conteniendo corales en posición de crecimiento y fragmentarios, así como subordinamente moldes y valvas de moluscos, todos muy recristalizados, siendo abundante el coral *Acropora prolifera*.

Las calizas se encuentran frecuentemente dolomitizadas. El contenido de arcilla es muy variable. Contiene intercalaciones de clastos terrígenos de variada granulometría. El color es blanco, amarillento, rosado o grisáceo. Su espesor oscila entre 30 y 80 m. Yace discordantemente sobre la formación La Cruz. Es cubierta discordantemente por la Formación Jaimanitas.

2. Formación Jaimanitas (Js) Q111. La formación bordea todo el territorio insular cubano, constituida por calizas biodetríticas, masivas, cársicas y fosilíferas, calcarenitas y a veces margas. Yace discordantemente sobre la formación Río maya. El espesor medio de esta formación parece ser de 8 a 10 m, aunque es probable que sea mayor. Su posición estratigráfica sobre sedimentos pliocénicos o pleistocénicos y el alto grado de preservación de su fauna equivalente a la actual, apoyan una edad Pleistoceno superior, presenta marcadas formas de carso superficial de tipo lapiés. Sobreyace discordantemente a la formación Maya y la Cruz es sobreyacida discordantemente por la formación Camaroncito en la zona de Aguadores.

3. Formación Camaroncito (Crt) Q111. Se desarrolla en forma discontinua, en pequeñas áreas, en la Santiago de Cuba. Compuesta por calcarenitas laminares de grano medio a grueso, bien cementadas, con diseminaciones de gravas polimícticas predominantemente finas. La coloración es abigarrada. Su subyacente no se ha observado. Es cubierta por la Formación Jaimanitas, aunque no se conoce el carácter del contacto. Su espesor oscila entre 3 y 4 m aunque en ocasiones puede ser mayor. Es posible que esta unidad forme parte de la Formación Río Maya, aunque su definitiva ubicación requiere estudios. Tiene la misma edad que la Formación Jaimanitas.



Por último aparecen en las formaciones más recientes los depósitos marinos, arenas, guijarros de playas y bancos de tormenta (m Q1v) y otros depósitos de tipo aluvial (al Q1v) compuestos por limo gris y pardusco, limos arenosos y arcillas arenosas.

Miembro Tejar (tj) N₁³-N₂^{1a}. Se desarrolla en los alrededores de la bahía de Santiago de Cuba, prolongándose en forma discontinua hacia ella. Se observa una alternancia de calizas biodetríticas, calizas limosas y limoso- arcillosas, calcarenitas de matriz margosa, margas, aleurolitas y más subordinadamente arcillas conglomerados y areniscas polimícticas con cemento calcáreo, formadas principalmente por vulcanitas. Colores crema en los carbonatos, y gris verdoso-parduzco abigarrado en los sedimentos terrígenos. Yace concordantemente sobre el miembro Quintero. Es cubierta concordantemente por el miembro Santiago.

1.1.4 Características geomorfológicas

En el municipio de Santiago de Cuba el relieve es accidentado y variado. Hacia el norte semimontañoso, constituido por elevaciones jóvenes y alargadas, las cuales forman un arco bordeando la cuenca de pendientes medianamente abruptas y cimas en forma de crestas separadas por pequeños valles. Este sistema montañoso forma parte de la Sierra Maestra aunque con menores alturas (la Sierra del Cobre, la Sierra de Boniato y la Sierra de la Gran Piedra), con pendientes que en varios casos sobrepasan el 45%, un factor favorable para la ocurrencia de deslizamientos.

Al sur el relieve es llano a ondulado constituido por escasas elevaciones de pendientes suaves predominando las costeras en forma de mesetas alargadas formando hacia la cercanía de las costas varias terrazas escalonadas. En la bahía la costa es escarpada y se desarrollan elevaciones de aspecto terraciforme.(figura 1.4)

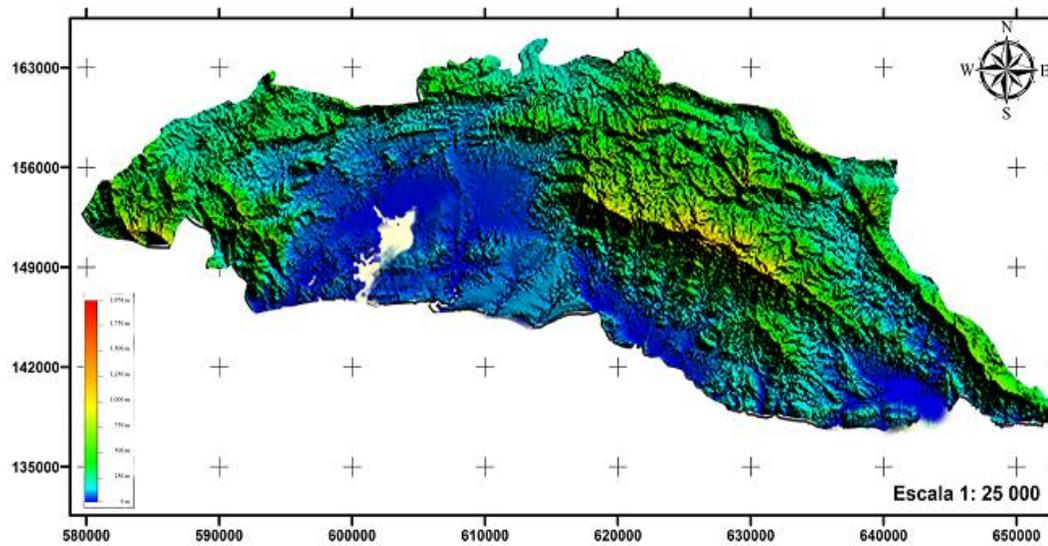


Figura 1. 4 Modelo digital del terreno del municipio Santiago de Cuba. Fuente:(Geocuba, 2010).

1.1.5 Condiciones geotécnicas

La sobresaturación de suelos es un fenómeno común en algunas zonas. En esta situación influyen las corrientes de agua subterránea que existen, por ejemplo, en los alrededores de la bahía de Santiago de Cuba, en las cercanías de los valles aluviales de los ríos del municipio Santiago de Cuba. Este es un factor que junto al tipo de litología que presentan estas áreas (depósitos aluviales, palustres y rocas sedimentarias de baja cohesión) incrementa los efectos de los deslizamientos sobre las infraestructuras ubicadas en estas locaciones.

Por otro lado, muchas construcciones se elevan sobre suelos susceptibles al incremento de la velocidad de las ondas sísmicas, situación exacerbada por la necesidad de vivienda que presenta la población del territorio, la cual realiza una serie de acciones constructivas (autoconstrucción), sin dominio previo de las medidas de reducción ante el peligro (Galbán, 2009).

1.2. Características generales del municipio Caimanera

1.2.1 Ubicación Geográfica del municipio Caimanera

Es uno de los 10 municipios que componen la actual provincia de Guantánamo. Limita al Norte con los municipios Guantánamo y Manuel Tames, al Este con el municipio de San Antonio del Sur, al sur con el Mar Caribe y al oeste con el municipio de Niceto Pérez. Está situada a 17 km de la ciudad de Guantánamo.

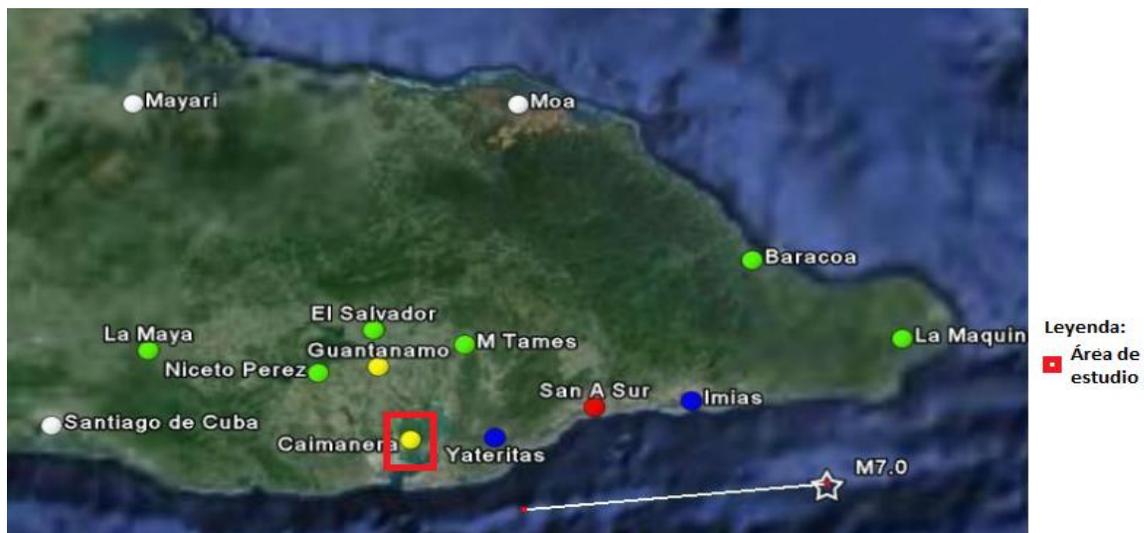


Figura 1.5 Ubicación geográfica del municipio Caimanera

Por su posición meridional, Caimanera forma parte de las regiones de Cuba más próximas al Ecuador donde los rayos del sol inciden con mayor perpendicularidad, variable que unida a la influencia del mar, del relieve y otros factores de carácter local y regional ha devenido en las particularidades de su clima. El municipio se caracteriza por la salinidad de parte de los suelos, la alta evaporación solar y la escasez de lluvia. Se puede considerar que ubicada en las franjas costeras del sur de Cuba, forma parte del llamado semidesierto cubano. (Arencibia,G 2002).

1.2.2 Geología regional

En la región de forma general se encuentran desarrolladas las formaciones geológicas San Luis, Río Macío, Jutía, Maquey, Jamaica y Boquerón.



En la estructura geológica del área, están desarrollados los sedimentos del Pleistoceno Actual, (mQ IV), estos sedimentos se extienden a lo largo de la línea litoral, hasta la cota absoluta actual de 2 m, yacen principalmente sobre los sedimentos antiguos aluviales – marinos, raramente sobre las rocas de la Formación San Luis. Están representados principalmente por arcillas cienosas y cienos azulados oscuros y fuertemente salinizados. Las arcillas tienen gran cantidad de restos orgánicos y conchas marinas actuales. El espesor es de 1.0-1.5 m. En algunos casos los sedimentos están destruidos por la abrasión actual y las rocas que se extienden debajo afloran sobre la superficie. Además de los sedimentos descritos anteriormente hay que mencionar la presencia de una capa de poco espesor (0.2-0.5) m sobre las rocas originarias que afloran sobre la superficie antigua, esta capa está representada por el aluvio transformado en suelo. (Plá, M & Arencibia, G 2005).

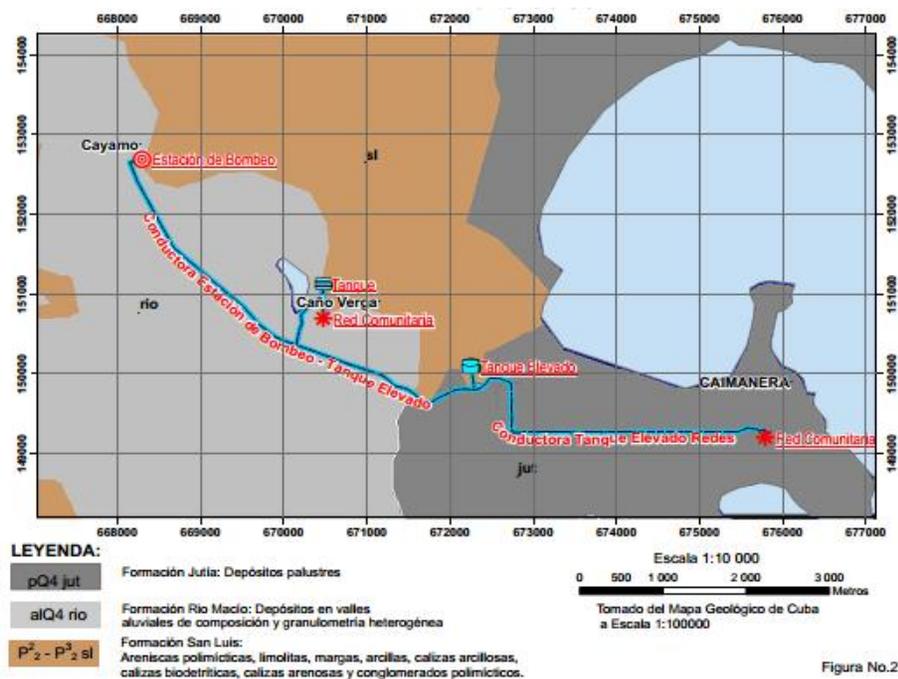
- **Formación Río Macío (alQ₄ río):** Está constituido por bloques, cantos rodados, gravas, arenas, limos y arcillas derivadas de la erosión fluvial y regional. Se caracteriza por distintos tipos de sorteos, yacencia y redondeo de los fragmentos. La estratificación generalmente es cruzada y lenticular, típica de las terrazas y el acarreo fluvial. La potencia de la formación generalmente es de 1 m a 2 m, a veces alcanza de 10 a 20 m.

- **Formación Jutía (pQ₄ jut):** Está constituida por sedimentos no consolidados, friables y fragmentarios, como aleurolitas calcáreas y órgano - detríticas, arena margosa y arcillosa, a veces con gravas pequeñas de color castaño grisáceo. En las partes lagunares, se observan capas y lentes de turba. El espesor probable de los sedimentos es 1 a 5 m.

- **Formación San Luis (P₂²- P₂³sl):** Está representada por una gran variedad de rocas clásticas, terrígenas, carbonatadas, de granulometría variada desde las arcillas hasta los conglomerados; además contiene calizas laminares o de capas gruesas. Esta formación se caracteriza por el predominio de areniscas de grano fino, medio y de aleurolitas carbonatadas, las cuales, en conjunto constituyen más del 90 % de la formación.

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

Las aleurolitas en general son calcáreas y arcillosas, en algunas partes arenosas. El color de la roca fresca es gris y el de las meteorizadas, beige o castaño. Las calizas aparecen en distintos niveles, son laminares, margosas, de color blanco y se hallan por lo general en la parte basal de la formación. La formación está ligeramente plegada, y



su espesor se estima en unos 700 m.

Figura 1.6 Esquema geológico de la región. Suministrado por INRH de Guantánamo

1.2.3 Geología local

La ciudad de Caimanera, objeto de estudio de la presente investigación, se encuentra enmarcada y bien representada en la Formación Jutía (pQ₄ jut) la cual fue descrita anteriormente.



1.2.4 Geomorfología regional

La zona presenta un relieve bastante llano, con alturas o restos de montañas, que alcanzan cotas de 25 m.s.n.m, en algunos lugares llegan hasta los 40 m. Su relieve suave y ondulado está formado por llanuras marinas cenagosas y algunas zonas premontañosas. El área que ocupa el poblado cabecera y sus alrededores es sumamente baja, con valores hasta 1 metro sobre el nivel del mar.

Presenta suelos aluviales de arcillas sobre calizas y areniscas, muy escabrosos y de uso agrícola bastante limitado. Los elementos geográficos de esta parte de la provincia, le confieren características sui géneris, tanto en la flora, en la fauna y en las actividades del hombre. La fauna que habita la zona son la jutía, la iguana y diferentes tipos de aves, todos endémicos del área, el litoral está rodeado de área cenagosa y manglares que han ido desapareciendo con el paso del tiempo. (Plá, M & Arencibia,G 2005).

1.2.5 Características ingeniero – geológicas de la región

Dentro de los límites del territorio estudiado se distinguen dos capas: la primera capa está representada por los sedimentos actuales marinos (aQIV), están desarrollados a lo largo de la línea litoral, hasta la cota absoluta actual de 2 m, están representados por arcillas cienosas y cienos, presentan gran cantidad de restos orgánicos, su espesor es de 1.0-1.5 m, yacen principalmente sobre los sedimentos aluviales marinos. La segunda capa corresponde a los sedimentos aluviales marinos (am Q III), están extendidos en el área hasta las cotas absolutas actuales de 20-25 m. Se encuentran en el valle llano litoral- marino, en el curso inferior de los ríos. Yacen sobre la superficie accidentada horadada de las rocas de la Formación San Luis. Están representados por arcillas pesadas y limosas, laminares, a veces con intercalaciones de cienos, en la parte baja del perfil a menudo son arenosas, con intercalaciones de gravas, arenas, guijarros en el agregado arcilloso, en los sedimentos se encuentran restos de conchas, la potencia puede llegar en algunos lugares entre 4-6 m. (Plá, M & Arencibia,G 2005).



1.3 Estado del arte del fenómeno natural inducido.

El término de licuefacción fue utilizado por primera vez por Hazen en 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 de Casagrande en 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”. (Mussio, 2012).

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 consecuencia, representan un magnífico campo de investigación. (Mussio, 2012).

Dos de los principales fenómenos que los sismos pueden inducir en los suelos granulares finos son los cambios de volumen y la reducción de la resistencia al esfuerzo cortante (Henríquez, 2007).

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 rivera del río Mississippi. Precisamente Casagrande 1936, llamo “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 acatan simultáneamente las tensiones estática y dinámicas. Las evidencias superficiales más comunes de la ocurrencia de la licuefacción son:

- ✓ Volcanes de arenas.
- ✓ Grietas en el terreno
- ✓ Perdidas de la capacidad portante
- ✓ Movimientos de laderas
- ✓ Fallas de taludes por flujos del terreno.

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. Tomado de (Peruca, 2006)

Los casos históricos de licuefacción comenzaron a hacerse cada vez más notables a partir de las desastrosas consecuencias ocasionadas por un sismo en Niigata, Japón y en Anchorage, Alaska en 1964. En esa oportunidad, se realizaron estudios sobre el comportamiento del suelo debido a cargas causadas por el sismo donde se observó que la aplicación de una serie de esfuerzos cíclicos con magnitudes relativamente pequeñas a arenas saturadas con mediana a alta densidad bajo condiciones no drenadas puede generar una elevada presión de poro e inducir deformaciones



significativas en muestras que presentan comportamientos dilatantes (Seed & Lee, 1966). Desde entonces innumerables metodologías han sido desarrolladas para tratar de definir el riesgo de licuefacción de un depósito de arenas saturadas. Una vez que se determina que existe riesgo de licuefacción en un depósito arenoso, hay dos aspectos fundamentales que deben tratar de controlarse: la pérdida de resistencia al corte y las grandes deformaciones debido a fallas de flujo. (Henríquez, 2007)

1.4. Factores que condicionan la ocurrencia de la licuefacción

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.

1. Profundidad de las aguas subterráneas. Mientras menor sea el nivel de las aguas subterráneas, mayor será la probabilidad de que ocurra licuefacción.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.



6. 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

1.4.1 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 y Stewart, 2004), se presentan 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. (Kramer & Stewart, 2004)

1.4.2 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 and 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); (Kramer y 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, 1998). Por otra 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 también 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 niveles freáticos esté alto, cerca de 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 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, 2002).

1.5 Evidencias históricas del fenómeno de licuefacción de suelos

La licuefacción ha ocurrido en numerosos terremotos como ha quedado en evidencia en los registros históricos y geológicos. Otro ejemplo de esto es el caso de Chile, el terremoto del 3 de marzo de 1985, el cual afectó la zona con mayor densidad de población, donde se encuentran los dos puertos más importantes del país, Valparaíso y San Antonio, y grandes estructuras de suelos o rellenos en forma de muelles,



espigones y sitios de atraque. Los fuertes terremotos ocurridos en California, como Loma Prieta (1989) y Northridge (1994), además de otros como Kobe (1995), Turquía (1999) y Taiwán (1999) han proporcionado pruebas adicionales de los efectos dañinos de la licuefacción.

Algunos de los terremotos con características destructivas en los que se registraron volcanes de arena, grietas y derrames típico efecto durante la ocurrencia de la licuefacción del suelo, se describen a continuación:

El Terremoto del 13 de Diciembre de 1692 (Salta). Se produce un violento sismo de Ms 7,0 con profundidad hipocentral de 30 km ocasionando derrumbes y agrietamientos en el Valle de Lerma donde estaba la ciudad de Salta, en donde de acuerdo con testimonios de habitantes del lugar, "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", o bien, que "Esteco se arruinó enteramente con un terremoto que abriendo la tierra por varias partes arrojó borbotones de agua que inundaron todo el terreno".

El Terremoto de 4 de Julio de 1817 (Santiago del Estero). Se produjo fuerte sismo a una profundidad de 30 km con Ms 7,0 en Santiago del Estero, fenómenos de licuefacción "Informes fidedignos que se han tomado ha causado el terremoto del día 4 del corriente, rige los más espantosos estragos en la jurisdicción, así al norte de la ciudad se desplomaron las Iglesias, se destruyeron los edificios, se abrieron grietas en la tierra y salió agua, en este pueblo ruinoso en lo material según el quebranto que han sufrido los templos y los conventos sin poderse registrar una casa particular que no haya sufrido algo" (Actas Capitulares de Santiago del Estero, 1817). Hubo destrozos en Tucumán y Jujuy y en los alrededores de la ciudad de Salta, la tierra se abrió arrojando cantidad de agua y arenas de distintos colores.

El Terremoto del 18 de Octubre de 1844 (Salta). Se produjo un sismo de Ms 6,5 y 30 km de profundidad. Se produjeron daños en construcciones y se registraron fenómenos



de licuefacción "hubieron varios reventones de tierra: de algunas brotó agua, y de otras la tierra interior apareció en la superficie" (Toscano 1901). Según otro relato, "La tierra se entreabrió en varios lugares, expeliendo grandes cantidades de agua y arena" (Diario El Orden 1884). El sismo fue percibido en Tucumán, Catamarca, La Rioja y Santiago del Estero.

El Terremoto del 20 de Marzo de 1861 (Mendoza). Se produjo un terremoto de Ms 7,2, profundidad de 30 km con epicentro en la ciudad de Mendoza, el que produjo más de 12.000 muertos (Rickard 1863), alrededor a 1.000 heridos y numerosas casas destruidas. La ciudad de Mendoza fue completamente destruida y se registraron fenómenos de licuefacción.

Buena Nueva y Las Ciénagas fueron las zonas más afectadas por la licuefacción, con grandes fisuras y grietas, con eyección de agua y formación de volcanes de arena y derrames. Ponte (1987) describe que durante este terremoto se generó una grieta en la localidad de Borbollón de la que salieron gases y agua con fuerte olor a podrido, conocido como "Los baños del Obispo".

Forbes (1861) describió que después de una violenta detonación y una sacudida general cayeron grandes masas rocosas. A la mañana siguiente observó fisuras y grietas en las colinas montañosas donde enormes masas rocosas rodaron hacia los valles, "algunas laderas han sido fisuradas surgiendo abundante agua".

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. Tomado de (Perucca, 2006)

Niigata (Japón) en el año 1955, edificaciones físicas y obras viales (puentes) son abatidas por terremoto intenso y dilatado, inhabilitando la estabilidad en sus cimientos a causa de la insuficiencia de resistencia física del suelo, cuya caída se dio paulatinamente en varias horas

Zona de la Costa Sur de Alaska, en el año 1964, un gran terremoto de magnitud 9.2° Richter con duración de 3 minutos golpeó Prince William Sound, siendo afectado por la licuefacción del suelo ± 500,000 kilómetros cuadrados de superficie.

Niigata (Japón) en el año 1964 sometido a sismo de considerable magnitud ocasionando daños físicos en puente Showa debido a la expansión lateral del suelo.

Chimbote, Perú, 31 de mayo de 1970 un sismo de magnitud 7.8 grados Richter a una profundidad focal de 45 km a unos 50 km costa a fuera al oeste de Chimbote. Con una intensidad de VI provocó el desplazamiento lateral del terreno en depósitos deltaicos y de playa. Agrietamiento del terreno y compactación diferencial en el centro de Chimbote además de volcanes de arena y eyección de agua.

Loma Prieta, San Francisco (USA) en el año 1989 que bajo influencia de terremoto de magnitud 7.1 ° R ocasionó que los suelos se licuasen, interrumpiendo la funcionalidad del Puerto de Oakland, y daños en numerosas tuberías subterráneas en distintos distritos de San Francisco.



Rioja, el 29 de mayo de 1990 un terremoto de magnitud 6.0 e intensidad VII causó la inestabilidad y erosión de los suelos en los taludes, asentamientos diferenciales y amplificación de suelos y deslizamientos.

Las Filipinas, particularmente, en ciudad Dagupan en el año 1990 sujeto a sismos de magnitud 7,7° R, causó colapsos e inclinaciones de edificaciones físicas, y puentes inhabilitados en sus terraplenes debido a la expansión lateral de los sedimentos.

Valle de la Estrella (Costa Rica), en el año 1991 abatido por terremoto de 7,4 de magnitud Richter, en que obras viales, particularmente, puentes fueron perjudicados por expansión lateral de los sedimentos.

Mayomba, 4 de abril de 1991 un terremoto de magnitud 6.5 grados Richter e intensidad VII causó la inestabilidad y erosión de los suelos en los taludes, asentamientos diferenciales y amplificación de suelos y deslizamientos.

Hanshin, zona portuaria, dentro de la Ciudad de Kobe (Japón), en el año 1994 fue sometida a sismo de 6,9 ° Richter de magnitud, que se tradujo deterioros e interrupción de puertos marítimos, fallas del terreno, y 2000 metros de tubería rotas. Se reportaron más de 5,500 muertos y más de 26,000 heridos. La pérdida económica se ha estimado en unos 200 millones de dólares americanos. La proximidad del epicentro, y la propagación de ruptura directamente debajo de la densamente poblada región contribuyen a la considerable pérdida de vidas humanas y el alto nivel de destrucción.

Río Nisqually (Washington) en el año 2001 fue perturbado por sismos de magnitud 6.8° Richter, en cuya llanura sedimentaria tuvo lugar la licuefacción del terreno en 19. Huecos en suelos Barrosos humedecidos.

En 2001 el 26 de enero, un sismo de magnitud 7.7 destruyó la ciudad de Bhuj causando la muerte de 20,000 personas y destruyendo edificaciones, presas y las instalaciones portuarias. El epicentro del sismo se localizó 70 kilómetros al noreste de la ciudad de Bhuj. Es una cuenca baja, plana caracterizada por pequeñas salinas y zonas de marismas (salt pans and mud flats) la fuerte vibración sísmica causo licuefacción en los limos y arenas localizadas bajo el nivel freático.



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. Se produjo principalmente en depósitos eólicos y aluviales del Holoceno.

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.



Figura 1.7. Izq. Perfil de los suelos arenosos arcillosos del valle de la Ciudad de Puerto Príncipe, generador de altas intensidades durante el proceso sísmico. Estos suelos son muy licuables. Dcha 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. 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. El estudio de los efectos de sitio requiere la integración de múltiples factores que condicionan los procesos de amplificación sísmica, tales como, la morfología y profundidad del basamento rocoso, así como el grado de compactación y la profundidad del nivel de saturación de los suelos.



Figura 1.8 Grietas provocadas por licuefacción del terreno, afectando a una casa en Cahuil.L

Se observó que en los terrenos afectados por ese fenómeno se produjo: a) agrietamiento y deslizamientos de laderas y terrazas que originaron en sectores embancamiento en los cauces de los ríos y esteros, como por ejemplo los ríos Carampangue, Lebu y Raqui. b) deslizamientos y grietas del terreno que generaron asentamiento y/o agrietamiento de edificios, casas e infraestructura vial, con destrucción total o parcial de las mismas, ejemplo de esto es el borde del río Biobío, Camino a Chiguayante, Autopista Concepción-Chiguayante, Población Santo Domingo en Chiguayante, Población Vía Futuro en terrazas del Río Biobío (Chiguayante), viviendas de la localidad Yaquil (Región de O'Higgins), viviendas en Cochoa (Región de Valparaíso), Ruta 5 Sur, Ruta L-30-M (San Javier- Constitución), calle Los Canelos (Constitución), otros. c) Expulsión de agua y sedimentos a través de grietas y orificios, principalmente en rellenos antrópicos sobre humedales (Población Santo Domingo en Chiguayante, calle Los Canelos en Constitución).SERNAGEOMIN, 2010 en (Figueras, et. al., 2012)



El sismo de Lorca el día 11 de mayo de 2011 tuvo $M_w=5.1$. Se observó que el sector más afectado fue el barrio de la Viña (suelo blando), situado al sur de la ciudad, y por tanto más alejado del epicentro.

También se observó que los edificios situados en el llano, construidos sobre suelo blando, habían sufrido más daños que los de la parte alta, construidos sobre terreno firme (roca) independientemente de su edad y de sus características constructivas (IGN, 2011).

Las diferencias en la distribución de daños observadas en Lorca junto con la geología particular de la ciudad, sugieren la presencia de efectos de suelo durante el sismo.

1. Los efectos sísmicos locales

El movimiento del suelo durante un terremoto puede ser amplificado por las condiciones geológicas, geotécnicas y topográficas del terreno por el que se propagan las ondas sísmicas que provienen del sustrato rocoso. La modificación del movimiento del suelo en su amplitud, duración y contenido frecuencial se conoce con el nombre de efecto sísmico local y juega un papel muy importante en el grado de distribución de daños durante un terremoto (Bard, P.Y., 1995); (Aki, K., 1993). Dentro de los efectos sísmicos locales distinguimos los debidos al suelo y a la topografía (Figueras et al., 2009) y los efectos indirectos como la licuefacción y los deslizamientos de ladera (Jiménez et al., 2009). En este artículo analizaremos los efectos de suelo y utilizaremos indistintamente los términos efecto local y efecto de suelo. (Figueras et al., 2012)

El terremoto de Nepal 2014 tuvo lugar a 11 Km de profundidad lo que lo clasifica como un terremoto poco profundo. A menor profundidad del sismo mayor poder destructivo. Ha sido el más grave que ha sufrido el país nepalí desde el acontecido en 1934. El número de víctimas supera las 10 000. En la zona del Himalaya convergen dos placas tectónicas en una línea de falla. Se trata de la placa de la India o Placa Índica, que se mueve hacia el norte, y la placa Euroasiática. Precisamente del choque de estas dos placas surgió en su día el Himalaya



Figura 1.9 Imágenes del terremoto de Nepal

Desde 2010 más de la mitad de la población mundial vive en ciudades, una experiencia para la vida en el planeta. En 2012, en el XV congreso de ingeniería sísmica en Lisboa, un grupo de arquitectos, geólogos, ingenieros, comprometidos con dotar a las ciudades de capacidad resiliente frente a los terremotos, organizaron y fundaron la Red Internacional para el diseño de ciudades resilientes frente a terremotos (INDERC) en la que uno de los firmantes fue la National Society for Earthquake Thecnology de Nepal.

1.5.1 Reportes históricos de licuefacción de los suelos en Cuba

Las investigaciones sismológicas de Cuba sitúan a la provincia Santiago de Cuba como la de mayor peligro sísmico del territorio nacional. Más del 60% de los sismos perceptibles y fuertes reportados en el país han tenido su epicentro en Santiago de Cuba (Chuy et al., 2002), siendo sacudida por más de 1000 sismos perceptibles desde el año 1528 hasta la fecha (Chuy, 2010).

A tales efectos se recuerdan en el municipio Santiago de Cuba y más específicamente en su ciudad cabecera, los grandes terremotos ocurridos el 3 de febrero de 1932, magnitud 6.75 en la escala Richter, intensidad sísmica de VIII MSK provocó la licuefacción de la calle La Alameda (Chuy, 1999) y el 8 de agosto de 1947, donde se reportaron serios daños en la ciudad de Santiago de Cuba, fundamentalmente en los alrededores de la bahía (Chuy et. al., 2002) ver figura 1.8.



Figura 1. 10 Foto. Licuefacción de los suelos en calle La Alameda, en Santiago de Cuba. Terremoto del 3 de Febrero de 1932. Tomado de Chuy, 1999.

Terremoto del 18 de octubre de 1551 ubicado en Bayamo, los reportes históricos argumentan la ocurrencia de la licuefacción (Cotilla & Córdobas, 2010) basados en datos de archivo general de Indias, declaran su aparición en la localidad de Cauto Embarcadero, en las cercanías del río Cauto, identificado como el río de mayor extensión de Cuba, ubicado en la provincia Granma y su desembocadura la realiza en el Golfo del Guacanayabo. Los reportes históricos deben ser considerados como un área potencial de licuefacción para futuros terremotos.

1.6 Sismicidad de Cuba como factor catalizador de la licuefacción de los suelos.

La región oriental es la de mayor peligro sísmico del territorio cubano, se presenta en detalle la sismicidad registrada en esta porción del país. La falla activa Oriente y la falla

Norte de la Española constituyen las principales fallas donde pueden ocurrir sismos fuertes que afecten el territorio oriental de Cuba. A estas estructuras se relaciona la principal actividad sísmica registrada en esta región, tanto en magnitud como en frecuencia. En la figura 1.5 se representa la sismicidad registrada en la región del Caribe.

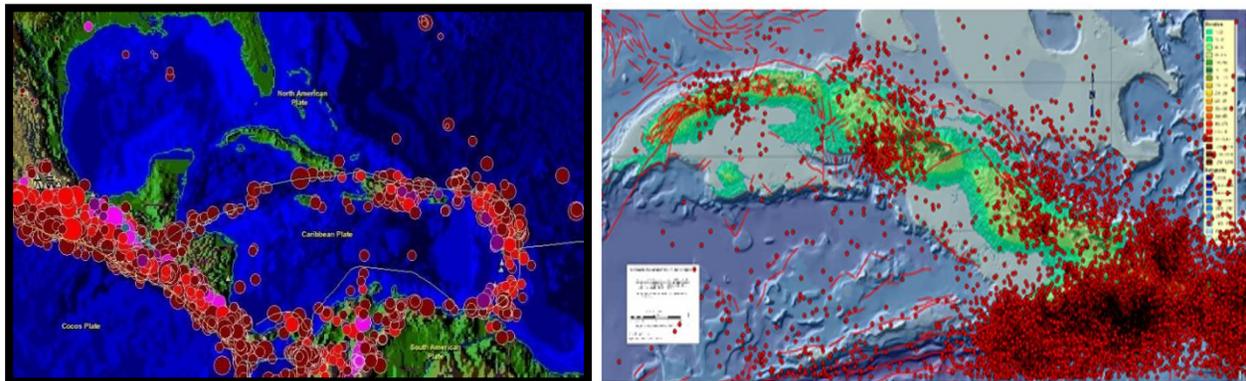


Figura 1.11 Izq. Sismicidad del Caribe y Centroamérica en los últimos 10 años. Dcha. Sismos registrados desde 1998-2014. Fuente Informe del CENAIIS

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 2.2 y 2.3, 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).

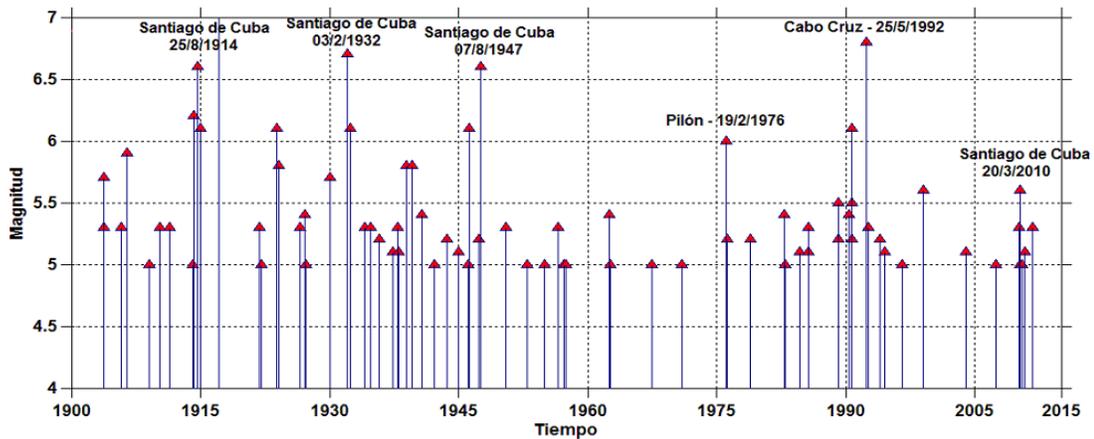
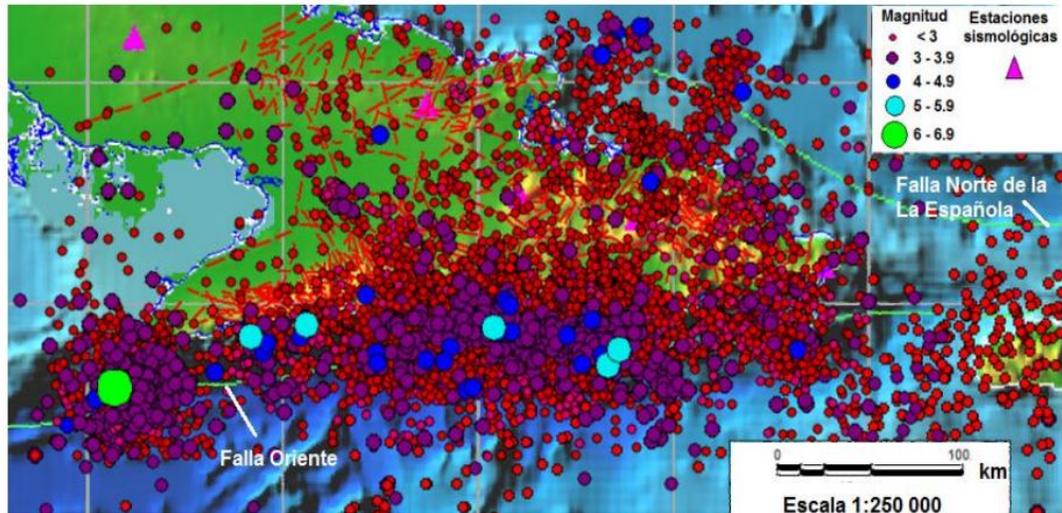


Figura 1.12 Ocurrencia de los terremotos de magnitud mayor a 5 reportados en la región suroriental de Cuba desde 1900. Fuente CENAIIS

1.7 Investigaciones realizadas en Cuba.

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 ubicanciadades de gran importancia. En épocas anteriores el fenómeno de licuefacción causó grandes daños en algunas poblaciones, ejemplo de ello, lo ocurrido en la ciudad de Santiago de Cuba 1932 y en Bayamo 1947.

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 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 variable un espesor promedio de 10 m. (García et. all, 2000)

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 como se evidencia en la figura 1.13. 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.

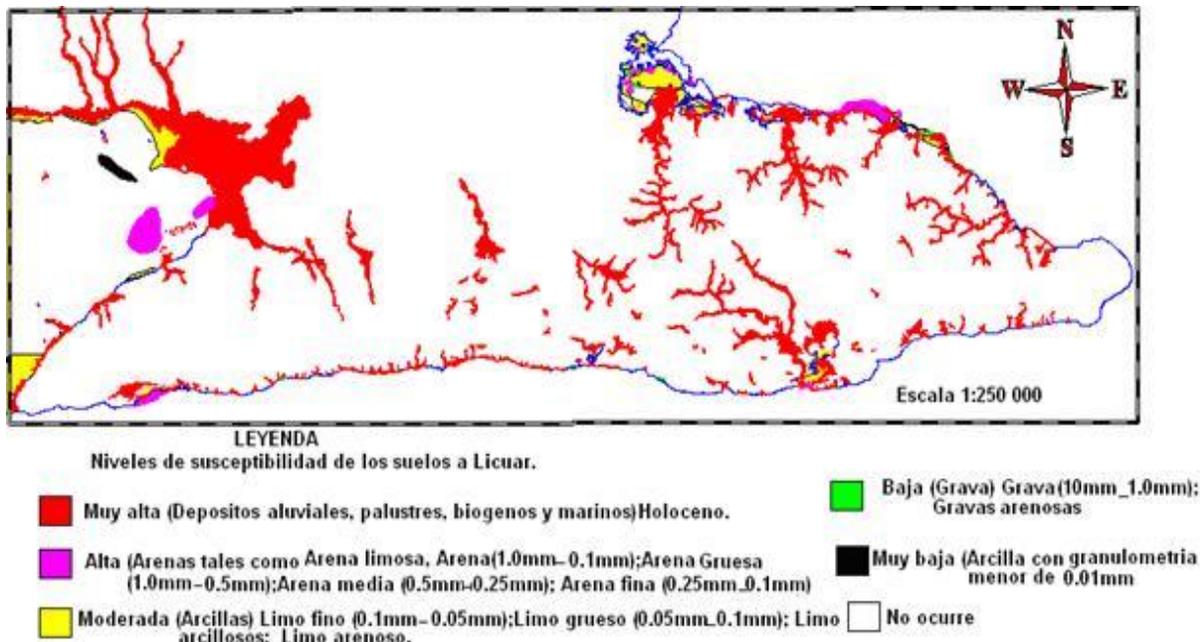


Figura 1.13 Suelos que se caracterizan a licuar en la región de Cuba Oriental. Coordenadas geográficas (Long W:-77,738°-74,134° Lat N:19.841°-20.730°).(Rosabal, 2011).

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 Guillermón 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 kN/m³, con pesos específicos que oscilan en el rango de (26,60 a 27,00) kN/m³ 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.

Conclusiones parciales

La licuefacción de los suelos es provocada por terremotos fuertes en suelos con condiciones ingeniero geológicas favorables. Los casos reportados ha ocurrido en materiales de edad Neógeno- Cuaternario específicamente del Holoceno en sedimentos aluviales no consolidados y escasamente cementados, sedimentos de origen fluvial, zonas de manglar, arenas de bajo contenido de finos o arcillas, arenas intercaladas con limos y arcillas, arenas limosas, arenas arcillosas y en limos. Los sismos son fuertes a partir de magnitud de 7,5 y aceleraciones sísmicas mayores de 0,16 g/cm². Materiales cuya densidad relativa sea menor del 60% y el N₁ (60) menor de 20 y el nivel freático esté cerca de la superficie y por ende los suelos están saturados. En el área de estudio propuesta existen condiciones favorables para la licuefacción de los suelos.



CAPITULO II: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN DE LOS SUELOS.

Introducción

- 2.1. Metodología de la Investigación**
- 2.2. Métodos utilizados para evaluar la susceptibilidad a la licuefacción en suelos granulares finos**
- 2.3. Metodología para el estudio de la susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en la región oriental de Cuba.**
- 2.4. Procedimiento propuesto para el estudio de la susceptibilidad a la licuefacción.**

Conclusiones parciales.

INTRODUCCIÓN.

El capítulo tiene el propósito de dar a conocer las principales evidencias de la licuefacción de los suelos en Cuba tras un terremoto fuerte, así como las características de los escenarios potenciales en correspondencia con el análisis de las condiciones ingeniero geológicas del terreno. Se brinda un resumen de los procedimientos metodológicos para el estudio del potencial de licuefacción teniendo en cuenta las condiciones ingeniero geológicas y sismológicas del medio.

2.1. Metodología de la investigación

Figura 2.1 Mapa de flujo de la Metodología de la Investigación

La primera fase del trabajo consistió en la búsqueda intensiva de fuentes de documentación antigua y reciente que mencionen rasgos sobre los efectos producidos en la naturaleza o en infraestructura edificada cuyo origen ha sido la licuefacción como fenómeno inducido por terremotos fuertes. El método seguido fue el Método Histórico lógico. Se revisaron informes ingeniero geológicos de obras ingenieriles ubicados en los archivos de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) en Santiago de Cuba, además de revisar artículos de internet, tesis de diploma de maestría y doctorado, libros y todo tipo de documento sobre el tema a desarrollar. Para ello se aplicó el método de Análisis y síntesis.

En una segunda fase se analizaron las evidencias de licuación provenientes de la documentación revisada, clasificándola en tres niveles de certidumbre: segura, posible o dudosa. Ello permitió generar un banco de datos, el cual constituye la base para la elaboración de los mapas pronósticos, la evaluación de los posibles escenarios expuestos a la licuefacción y por último y tercera etapa validar el procedimiento propuesto e interpretar los mapas pronóstico de susceptibilidad a la ocurrencia de licuefacción a partir de las propiedades ingeniero geológicas de los suelos, se aplicó el método de inducción deducción.

2.2. Metodologías para el estudio de la licuefacción de los suelos

Muchos investigadores han desarrollado metodologías para evaluar el riesgo de licuefacción de suelos basado en distintos ensayos de suelos, siendo las más



utilizadas inicialmente el criterio chino modificado de (Wang, 1979) y el método de (Seed & Idriss, 1982), y más recientemente (Youd et al. 2001), que recopila la información de las reuniones de NCEER ocurridas en 1996 y 1998. Luego de los terremotos de Kocaeli (Turquía) y Chi-Chi (Taiwán) en 1999, donde ocurrieron severos daños debidos a licuefacción en lugares donde los métodos disponibles no la predecían, se vio la necesidad de desarrollar nuevos criterios con especial énfasis en la influencia del contenido de finos en el suelo. En 2003 Raymond B. Seed y un grupo de investigadores de la Universidad de California en Berkeley publicaron un documento que unificaba los resultados de investigaciones recientes acerca del fenómeno de licuefacción de suelos. A pesar de que existen nuevas investigaciones, algunas de ellas controversiales, se utiliza la metodología propuesta por (Seed et al. 2003), complementada con los estudios de (Cetin et al. 2004). Esta metodología utiliza un valor N del ensayo SPT normalizado por profundidad y ajustado por la cantidad de finos para cuantificar la susceptibilidad del suelo a la licuefacción.

Alarcón, (1989) opina que la aproximación práctica de Seed consiste en comparar las curvas de tensión cíclica provocadas por N ciclos del terremoto de cálculo con la curva, determinada en laboratorio, de la tensión cíclica capaz de producir la licuefacción en N ciclos en el terreno en cuestión. De esta comparación es posible extraer la zona peligrosa, aunque para ello ha sido preciso desarrollar criterios que permiten pasar de un movimiento sísmico real a otro equivalente y uniforme. (Obando, 2009)

En Estados Unidos, (Seed et al., 1983) y (Seed & De Alba 1986) han presentado el método simplificado, en base a ensayos de penetración estándar y el cono holandés. En Japón, (Tokimatsu & Yoshimi, 1981, 1983); (Iwasaki et al., 1978) e (Iwasaki, 1986) han presentado también el método simplificado en base a la experiencia japonesa. Estas metodologías simplificadas fueron programadas en lenguaje Basic para realizar un análisis sistemático de los datos. La conversión del



ensayo de penetración estándar al de cono holandés se realizó según (Robertson & Campanella 1983, 1985). La corrección de sobrecarga se realizó de acuerdo a (Liao & Whitman, 1986).

En la actualidad los métodos han llegado a ser rutinarios para la investigación del potencial de licuefacción en campo, podemos mencionar las pruebas de penetración estándar (SPT), la de penetración de cono (CPT), el penetrómetro Becker (BPT), el dilatómetro de Marchetti (DMT) y métodos en los que el potencial de licuefacción se relaciona con la velocidad de onda de corte (V_s).

2.3 Métodos utilizados para evaluar la susceptibilidad a la licuefacción

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 simplificados 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 poro, de 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 5: 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
	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
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
Gradación/Valor de N-SPT	Modelo de esfuerzos totales	Técnicas estándar para puertos (facilidades y comentarios) por Japan Ports and Harbours
Prueba Triaxial Cíclica	Modelo de esfuerzos totales	Seed e Idriss (1967) Ishihara
Prueba Triaxial Cíclica	Modelo de esfuerzos efectivos	Finn <i>et al.</i> (1977) lai <i>et</i>

2.4 Procedimiento para el estudio de la susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en la región oriental de Cuba.

Para evaluar el potencial de licuefacción se llevó a cabo mediante un sistema de indicadores en el cual se unifican los parámetros propuestos por diversos autores (Seed & Idriss, 1971, 1982); (Wang, 1979) y requisitos obtenidos de la revisión de análisis de casos, donde se propuso con un orden lógico los parámetros que deben cumplirse para que un suelo sea potencialmente licuable. Se hizo difícil determinar los parámetros debido a los diferentes criterios y 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. A partir de todo lo antes expuesto se propone analizar las condiciones siguientes:

Condiciones geológicas:

La primera condición que debe cumplir un suelo para que sea licuable es que corresponda a depósitos jóvenes (menos de 10.000 años) a las que pertenecen las formaciones del Cuaternario (Holoceno). Debe cumplir además que la relación entre el estrato licuable y el no licuable sea menor que 1. Coincidiendo también



que el estrato de suelo no licuable encima del licuable debe ser menor de 8m. Para la selección de los sectores se hace una búsqueda en el mapa geológico y se seleccionan las formaciones pertenecientes al cuaternario que están representadas por el color amarillo en sus diferentes variantes.

Sismicidad

Otro factor importantes para que pueda licuar un suelo es la sismicidad, para ello se analiza la cercanía con una zona sismogeneradora capaz de generer sismos fuertes o magnitud mayor de 5,5 y las aceleraciones de las partículas lleguen a ser iguales o superior $0,2g/cm^2$. Para la selección se revisó la norma: **Construcciones Sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción de Cuba de 2014** en la que aparece un mapa con la zonación de las aceleraciones esperadas para cada municipio de nuestro país, además de la tabla de peligro sísmico en las diferentes zonas del territorio nacional donde se muestra el periodo de recurrencia esperado, la aceleración sísmica y la zona sísmica a la que pertenece cada región. Esta información puede ser obtenida además, de los informes de especialistas del CENAIS.

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 obtiene a partir de las calas perforadas en el área de estudio. Finalmente se confecciona el mapa de profundidad del nivel freático para el área de estudio.



Condiciones ingeniero geológicas:

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

Se propusieron varios parámetros, al cumplirlos todos tienen mayores posibilidades de ser un suelo potencialmente licuable.

Se tuvo en cuenta:

- ✚ Por ciento de partículas finas ≤ 15
- ✚ Límite Líquido $\leq 35 \%$
- ✚ Contenido Natural de agua $> 0,9 \text{ LL}$
- ✚ 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.

Esquema Ingeniero Geológico por tipo de suelos

Una vez recopilada las principales propiedades físicas y mecánicas se procedió 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

Se utilizó la base de datos con los parámetros antes mencionado para cada capa identificada. Con la información obtenida se confeccionó el esquema ingeniero geológico donde se tuvo 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. Se ubicaron espacialmente los valores para cada punto, este coincide en este caso con una obra estudiada por la ENIA. Por último se confeccionó el perfil ingeniero geológico haciendo énfasis en el estrato licuable y el no licuable, se dejó claro la relación y posición espacial entre ellos. Se confecciona con ayuda del programa ArcGis 10.

Una vez determinados todos los parámetros antes mencionados se tiene una idea de los lugares que pueden licuar. Para estas más seguros y dar un resultado cuantitativo se realizó el calculo de la relación de esfuerzos cíclicos para cada punto.

Calcular el Ciclic 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 2.3 se muestran las curvas recomendadas por (Seed, et al.2003).

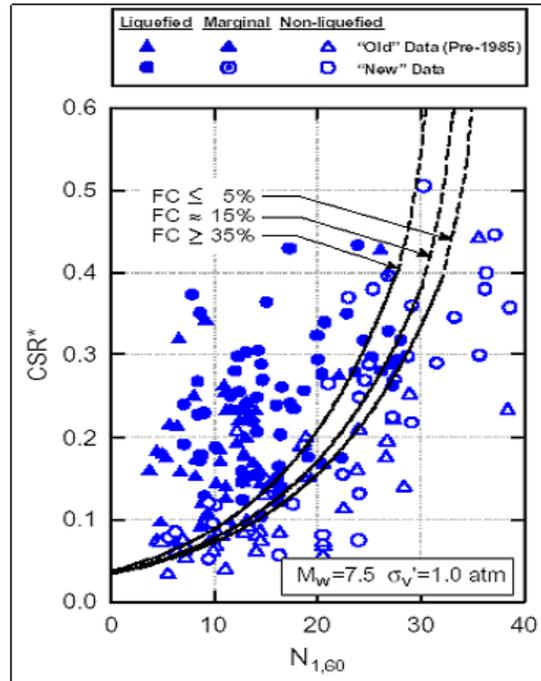


Figura 2.2 Relación entre razones de tensiones causantes de licuefacción y valores corregidos del SPT (para $M_w=7.5$ y $\sigma_v=1$ atm) con ajuste de contenido de finos. Fuente: Seed, et al 2003.

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



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}).

$$CSR = 0.65 (a_{max} / g) (\sigma_{vo} / \sigma'_{vo}) r_d$$

Dónde:

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

a_{max} : aceleraciones máximas generadas por un sismo de diseño.

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

σ'_{vo} : esfuerzo normal vertical efectivo, referido a la superficie del suelo.

r_d : coeficiente de reducción del suelo, que toma en cuenta la deformabilidad del perfil de subsuelo. (Liao y Witman, 1986), para la práctica de ingeniería rutinaria, en proyectos no críticos, proponen las siguientes ecuaciones para estimar el r_d :

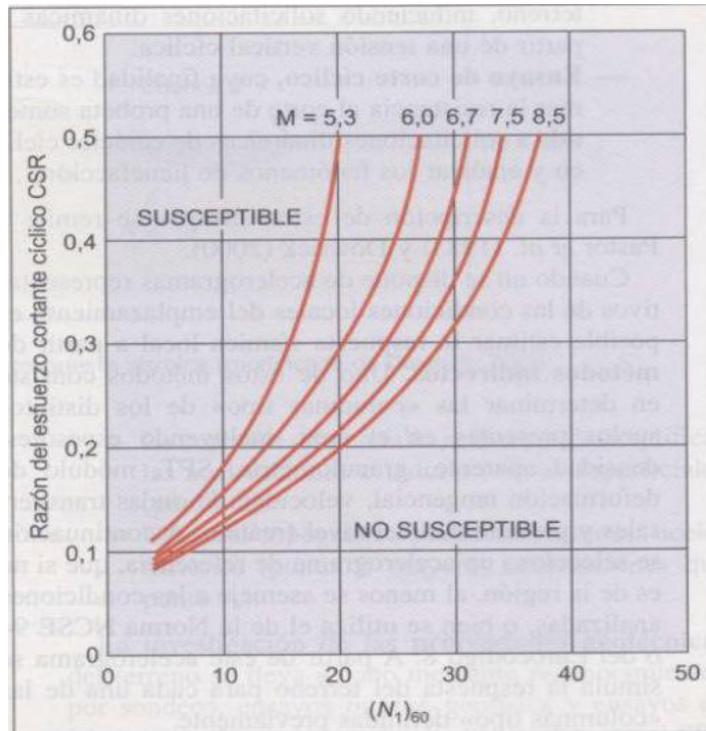
$$\text{Para } z \leq 9.15\text{m} \quad r_d = 1.0 - 0.00765z$$

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

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

A partir de los valores obtenidos con anterioridad de los informes provenientes de la ENIA se calculó el CSR y se plotearon los valores obtenidos en la curva de CSR vs SPT. Figura 2.4

Una vez obtenido el resultado de CSR se compara con los valores de la figura 2.4



y se comprueba si es un estrato licuable o no.

Figura 2.3 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)

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 utilizaron 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.



Cálculo del Coeficiente de Resistencia Cíclica CRR

De los datos obtenidos de los informes se calcula CRR y se construye la curva CRR vs SPT. Si los valores son menores que 1 entonces se considera que es un estrato licuable

Enfoque de resistencia cíclica (CRR)

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.

N160 = (N1)60 = El número de golpes de la prueba SPT normalizada a un esfuerzo geostático de 100 kPa y a la energía del martillo de 60%.

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

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

Esta ecuación es válida para los (N1) 60 < 30. Para (N1) 60 ≥ 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 (Llao y Whitman, 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 fueron los de la norma utilizada en Cuba conocida como la cuchara cubana. Se obtuvieron a partir de la revisión de los informes de las obras ejecutados por la ENIA.

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 Shelby (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: Shelby, Obsterberg, Dennison



Muestras de cuchara, porta testigos doble tubo rígido y porta testigo simple

Calculo del factor de seguridad para la licuefacción (FSL)

El FSL se calculó a partir de las formulas explicadas anteriormente y con los datos obtenidos de los informes ingeniero geológicos. Primero se calculó 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 siguió 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 definieron los estratos que son potencialmente licuables y se confeccionaron los perfiles geotécnicos en los que se mostró los espesores máximos esperados de estratos en los cuales puede ocurrir licuefacción.

El factor de Seguridad corregido se calculó 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 calculó para sismos de magnitud 6; 6,5; 7; 7,5; 7,75 y 8. A continuación se muestran los resultados

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

Confección del mapa pronóstico de susceptibilidad a la licuefacción

A partir de los valores obtenidos de FSL para cada estrato, el mapa de tipo de suelo (SUCS), nivel piezométrico, magnitud del sismo y aceleración sísmica, se confeccionó el esquema pronóstico de susceptibilidad a la licuefacción. Para ello se colocaron los valores obtenidos anteriormente en los puntos que corresponden a cada cala (perforaciones) realizadas para el propio estudio. Se realizó haciendo uso del programa ArcGis10. Una vez insertados todos los datos que corresponden a cada punto se hizo una regionalización de la información para toda el área de estudio.

Conclusiones parciales.

En este capítulo se mencionan las diferentes metodologías para saber si un suelo es licuable ante un sismo fuerte. Se describieron los indicadores que se tuvieron en cuenta para determinar si las áreas de estudios son licuables o potencialmente licuables antes terremotos de gran magnitud.



CAPITULO III: EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES INGENIERO GEOLÓGICAS EN LAS ÁREAS DE ESTUDIO.

Introducción

3.1. Criterios para la selección de escenarios susceptibles a la licuefacción

3.2. Validación del sistema de indicadores propuestos en el consejo popular Guillermón Moncada, municipio Santiago de Cuba.

3.3. Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio Caimanera provincia Guantánamo.

Conclusiones parciales

Introducción

En este capítulo se validarán los indicadores propuestos para determinar si los escenarios propuestos son licuables o no ante un sismo fuerte. Se llevará a cabo en los dos escenarios con condiciones favorables las que se explican a continuación.

3.1 Criterios para la selección de escenarios susceptibles a la licuefacción

Los escenarios propuestos coinciden con varios criterios (Kramer & Stewart, 2004) para determinar si un suelo es licuable o no. El primero que se analizó fue el criterio histórico. Hay reportes que en 1932 tras el sismo hubo manifestaciones de licuefacción en la avenida La Alameda del municipio Santiago de Cuba, ubicada en gran parte de la bahía. 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 en un determinado lugar.

Otro criterio que se tuvo en cuenta fue la cercanía a una zona sismogeneradora, la probabilidad de ocurrencia y período de recurrencia de un sismo fuerte. La



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

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

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

Por todas las razones antes explicadas, se decidió estudiar el consejo popular Guillermón Moncada, el cual recoge parte de la bahía de Santiago de Cuba y abarca parte de la Alameda donde existen reportes del fenómeno. El otro escenario estudiado es el municipio de Caimanera, provincia Guantánamo el cual se ubica en la bahía de Guantánamo. Se tuvieron en cuenta estos lugares porque cumplen con los criterios para ser un suelo licuable.

3.2. Validación del sistema de indicadores propuestos en el consejo popular Guillermón Moncada, municipio Santiago de Cuba.

El nivel de estudio alcanzado en la cuenca de Santiago de Cuba hace posible realizar evaluaciones sobre la licuefacción como fenómeno geológico secundario.



Casi toda la zona baja de los alrededores de la bahía de Santiago de Cuba se encuentra altamente expuesta a las afectaciones por este fenómeno.

Esta área está compuesta por sedimentos aluviales poco consolidados donde además, el nivel freático se encuentra a pocos centímetros de profundidad (García, 2002); esto significa que las construcciones y obras de infraestructura situadas en el entorno tienen un alto grado de vulnerabilidad ante la ocurrencia de la licuefacción del terreno.

3.2.1. Condiciones geológicas

En la cuenca de Santiago de Cuba aparecen en las formaciones más recientes los depósitos marinos, arenas, guijarros de playas y bancos de tormenta (m Q1v) y otros depósitos de tipo aluvial (al Q1v) compuestos por lino gris y pardusco, linos arenosos y arcillas arenosas. Tomado de (Herrera, 2015).

3.2.2. Sismicidad

La región de estudio presenta alto riesgo sísmico, con probabilidad de que ocurran daños en las edificaciones ante eventos de media a alta intensidad. Se debe destacar que las obras se emplazan sobre una zona de falla, las aguas subterráneas afectan los niveles de cimentación propuestos con niveles freáticos poco profundos, lo cual favorece el incremento del grado sísmico.

En particular, para la provincia de Santiago de Cuba se destaca el tipo de Sismicidad conocida como de Entre Placas, vinculada a la estructura de Bartlett - Caimán (Zona Sismogénica Oriente), por la frecuencia de los terremotos que ocurren y los valores altos de magnitud e intensidad alcanzados históricamente. Más del 60 % de los sismos perceptibles y fuertes reportados en el territorio nacional han tenido su epicentro en esta provincia. Por estas razones, este territorio es considerado el de mayor Peligrosidad Sísmica del país; señalándose en él 20 reportes de terremotos fuertes (Intensidad $I \geq 7.0$ MSK) en el sector comprendido entre las localidades de Chivirico a Baconao.

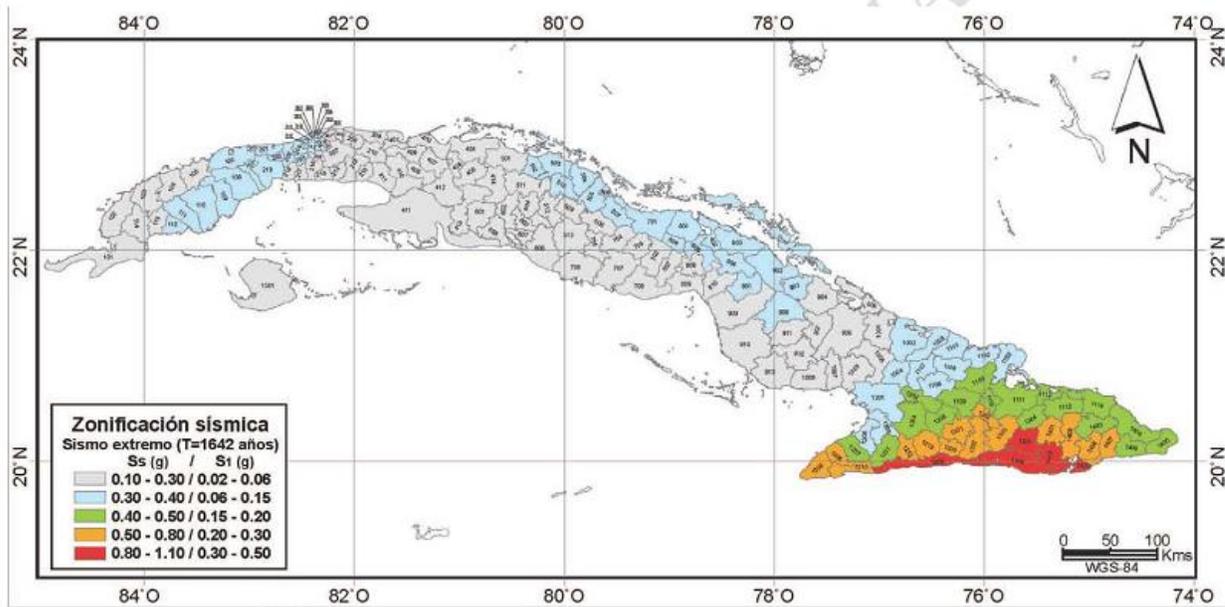


Figura 3.1 Zonificación sísmica para la República de Cuba NC 46- 2014

3.2.3. Características hidrográficas

En el área no existe una red hidrográfica desarrollada, existen escasas corrientes fluviales que la atraviesan y por lo general son de carácter intermitente, las que desaparecen casi totalmente durante los periodos secos. Se puede apreciar que los complejos acuíferos están relacionados con las formaciones anterior al Neógeno, en el Neogéno y en el Cuaternario. Las aguas subterráneas en el área de estudio se aprecian en diferentes complejos y horizontes acuíferos.

En la formación El Cobre el agua presente en las rocas es producto a las fisuras o grietas, filoneanas a partir de su corteza de intemperismo; la profundidad de estas aguas es variable depende de la morfología que presenta en el área esta formación, pudiendo presentarse como caso general mayor que 10 m, estas aguas se alimentan a través de las precipitaciones y por las aguas fluviales a través de las grietas principalmente.

Las aguas de las formaciones pertenecientes al Neógeno ocupan la mayor parte del territorio estudiado, prácticamente todo el borde sur al este de la bahía. Por sus características ingeniero geológicas se puede considerar de permeabilidad

baja, siendo algo mayor la permeabilidad en algunos puntos donde se localizan las calizas organógenas y cavernosas que subyacen a los sedimentos impermeables margosos o arcillosos. Estas aguas se pueden clasificar como estrato-fisurales, es decir de fisura o grietas o también cársicas. La profundidad de las aguas en esta formación es variable, pero directamente en las rocas margosas y calcáreas de la formación La Cruz supera los 10m.

Las aguas subterráneas de los sedimentos de edad Cuaternario resultan las más distribuidas en el área de estudio. A ellas están asociadas todas las rocas subterráneas dentro del espesor del material terrígeno con diferentes propiedades, en la totalidad del área los niveles son menores a los 10m. Estos sedimentos están representados por depósitos aluviales, eluviales, marinos, artificiales y transiciones fundamentalmente con granulometría variada.

3.2.4. Condiciones ingeniero geológicas

Para el estudio de las condiciones ingeniero geológicas se confeccionó la tabla resumen con algunas propiedades entre las que se encuentran: Por ciento de grava (Gr), por ciento de Arena (Ar), por ciento de finos (Fi), límite líquido (LL), límite plástico (LP), índice de plasticidad, humedad natural (W), densidad húmeda (γ_f), densidad seca (γ_d), por ciento de saturación (S), peso específico y prueba estándar de penetración. A continuación en la tabla 7 se muestran los valores de estos parámetros para las obras estudiadas.

Tabla 7: Clasificación geotécnica del suelo del área de estudio. Fuente: Elaboración propia

No	Obras	Granul %			LA %			W	(γ_f)	(γ_d)	S	(γ_s)	N	Clasificación
		Gr	Ar	Fi	LL	LP	IP	%	KN/m ³	KN/m ³	%	KN/m ³	SPT	
1	Mini fábrica Cerveza	0	15	85	77	33	44	33.9	17,90	13,40	0.98	26,60	5	CH



2	Mesón del Puerto	13	31	56	44	21	23	31.0	18,05	13,78	0.93	26,60	4	OL/OH
3	Salón Tecnológico WIFE	40	42	18	37	24	13	33.1	18,11	13,60	0.98	27,00	5	SC
4	Pte. Ferroviario	2	5	93	69	31	38	35.0	17,72	13,10	1.08	27,26	6	CH
5	Pro Avenida Jesús Menéndez	6	19	75	53	22	31	32.4	18,51	13,97	0.91	26,73	6	CH
6	Báscula centro de carga FFCC	0	15	85	55	21	34	45.0	17,60	12,14	100	27,00	3	CH
7	Urbanización La Playita	1	16	83	68	24	44	37.0	17,56	12,81	89	27,00	5	OL/OH
8	Edificio Vivienda peralejo	22	44	34	37	24	13	33.1	17,76	13,34	88	27,00	6	SC
9	Urbanización Martí y Gallo	4	31	65	71	26	45	33.7	17,85	13,34	89	26,97	7	CH
10	Salón operaciones de urgencia	-	-	-	37	19	18	27.8	17,00	13,20	75	26,80	3	OL
11	Báscula patio terminal portuaria	0	15	85	55	21	34	45.0	17,60	12,14	100	27,00	3	CH
12	Viviendas experimentales de tierra	26	29	45	41	19	22	35,0	18,20	13,80	92	27,00	3	SC
13	Viviendas lauro Fuentes	22	42	36	37	24	13	31,1	17,76	13,34	88	27,00	3	SC
14	Centro Video	27	28	45	37	18	15	37,4	17,60	13,30	98	27,00	4	SC



Club Juvenil

De esta clasificación se puede concluir que los suelos existentes en el área son sedimentos recientes del Cuaternario, clasificados por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) como **SC** que es arena arcillosa con gravas, **CH** Arcilla muy plástica, **OH** Limo orgánico, **OL** Arcilla orgánica, estos suelos presentan con alto grado de saturación, humedad natural elevada, alto % de finos, y Límites de Attenberg bastante acordes para que ocurra licuefacción, los niveles freáticos oscilan entre 1m y 1,50m sin tomar en cuenta las fluctuaciones de las mareas.

3.2.5. Esquema ingeniero geológico por tipo de suelos

El plano del área de estudio se confeccionó a una escala 1: 2000 donde se ubicaron las obras de interés para el trabajo, brindando éste mayor exactitud de los lugares donde se realizó el estudio del fenómeno de licuefacción. Dichas obras en el orden que se estudiaron son las siguientes:

- 1 Mini Fábrica de Cerveza,
- 2 Mesón del Puerto,
- 3 Salón Tecnológico WIFE,
- 4 Puente Ferroviario,
- 5 Prolongación de la Avenida Jesús Menéndez,
- 6 Báscula centro de carga FFCC,
- 7 Urbanización La Playita,
- 8 Edificio Vivienda peralejo,
- 9 Urbanización Martí y Gallo,
- 10 Salón operaciones de urgencia,
- 11 Báscula del patio de la terminal portuaria,
- 12 Viviendas experimentales de tierra,
- 13 Viviendas lauro Fuentes,

14 Centro

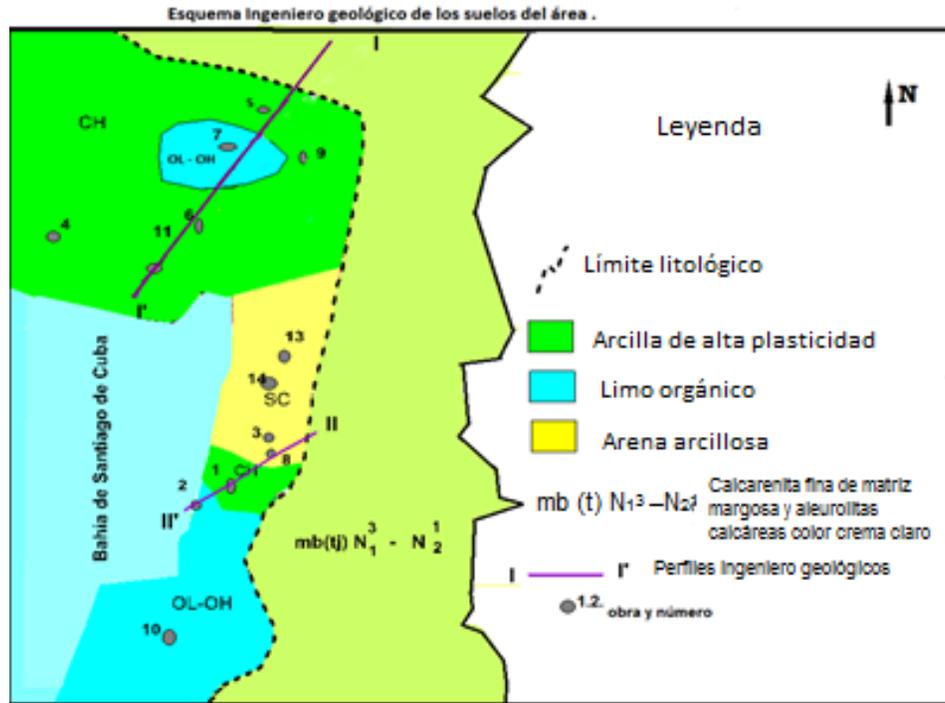


Figura 3.2 Esquema ingeniero geológico por tipos de suelos.

En este esquema se realizó una zonación de los suelos en el área de estudio. Los suelos blandos representados por un material tipo cieno presentan 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 $27,00 \text{ kN/m}^3$) y resistencia a la penetración dinámica de 4 a 6 golpes por cada 30 cm de penetración (SPT). Los 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 en el sur los de tipo arcilla orgánica (OL) y limo orgánico (OH).

Dada las características descritas anteriormente la capacidad resistente de estos suelos es baja ante determinadas cargas impuestas, siendo necesario para su mejora el uso de terraplenes tecnificados sobre los cuales se diseñan las

soluciones de cimentación directa generalmente en la variante de balsa o cimentaciones profundas utilizando pilotes por lo regular en punta.

Perfiles Ingeniero Geológicos del Área de Estudio.

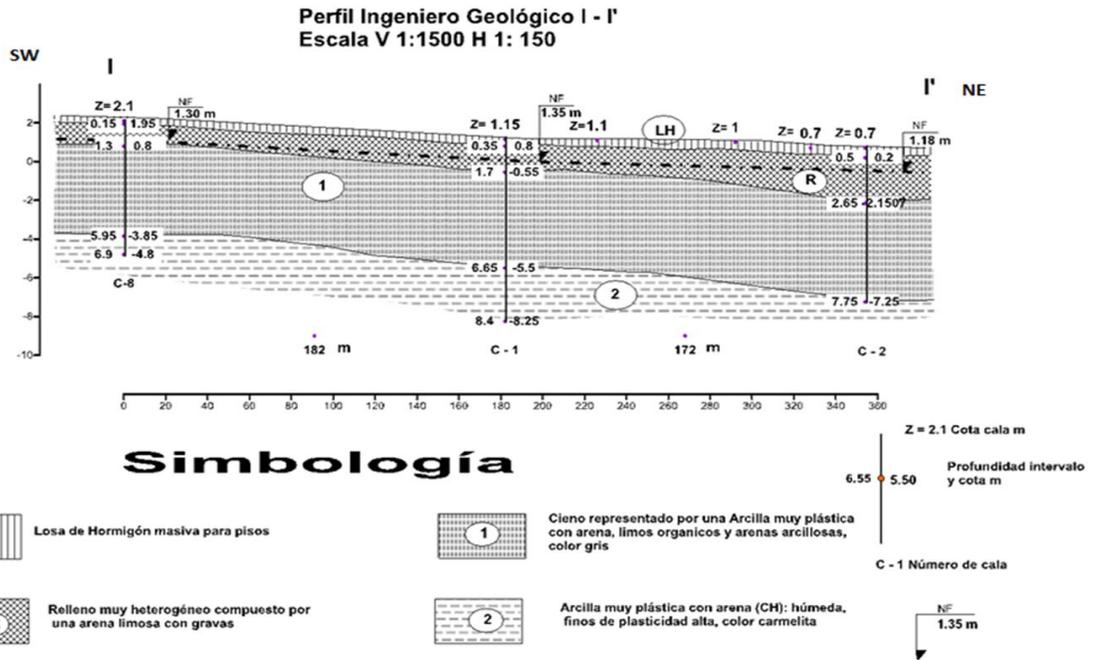


Figura 3.3 Perfil Ingeniero Geológicos I-- Í del Área de Estudio. Fuente: Elaboración propia



Losa de hormigón hidráulico: Masiva, de alta resistencia, no distribuida uniformemente en toda el área, su espesor varía desde 0.15 m a 0,20m en las calas de las obras 1, 2 y 8 y en la obra 6 las calas muestran un espesor de 0,15m.

Relleno (R): Relleno muy heterogéneo compuesto por una arena limosa con gravas: 34 % de arena de grano medio; 28 % de gravas de diámetro predominante entre 2 y 4 mm, duras, subredondeadas, con restos de ladrillos, algo húmedo, compacidad baja, color carmelita. Espesor de 2.25, 1.80 y 1.10 m en las calas de todas las obras respectivamente.

Capa 1 Cieno Compuesta por una Arena arcillosa con grava (SC) de grano medio, 58 % de finos, LL = 67 %, IP = 41 %; 34 % de arena de granos medios a finos; 8 % de gravas finas, subredondeadas; húmeda, color carmelita, de origen aluvial. Su espesor total varía de (5,95 a 7,75m) en el perfil I—Í y de (5 a 10,35m) en el perfil II—ÍÍ.

Capa 2: Compuesta por una Arcilla muy plástica gravosa con arena (CH), 52 % de arena de granos finos a medios; 32 % de finos, LL = 45 %, IP = 23 %; 16 % de gravas de granos finos a medios subredondeadas; compacidad alta, poco húmeda, color carmelita, de origen aluvial. Su espesor total es mayor a la profundidad de investigación realizada. Espesor no determinado.

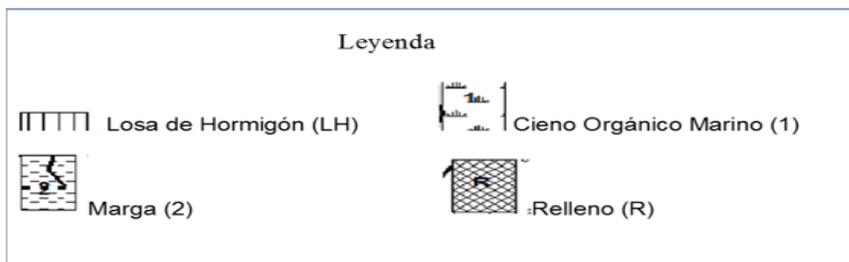
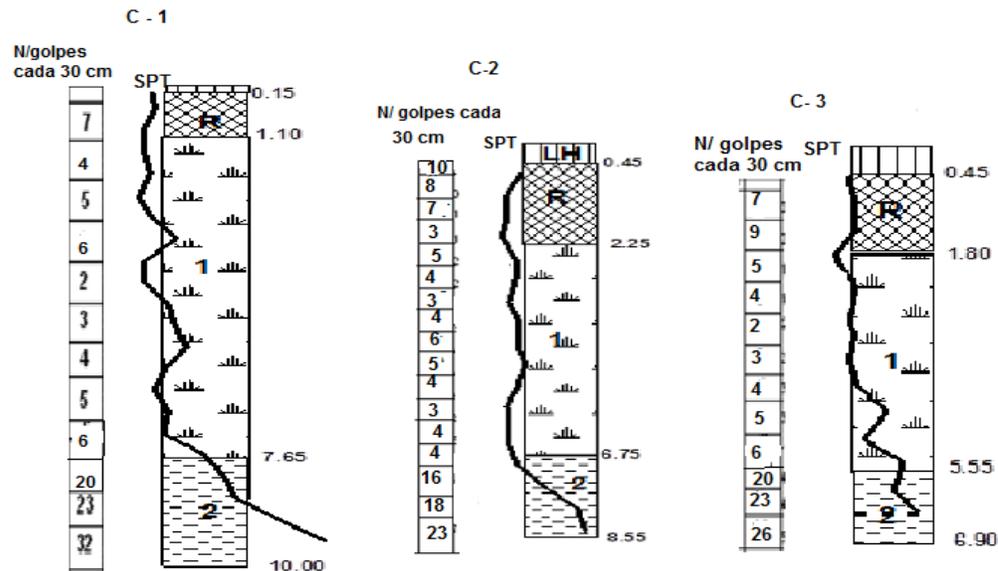


Figura 3.5 Columna litoestratigráfica esquemática de los perfiles I-I' y II- II'. Consejo popular Guillermon Moncada.

3.2.6. Resultados del Cálculo del Factor de Seguridad.

El cálculo del Factor de Seguridad realizado para los perfiles de estudio y habiendo utilizado magnitudes tales como $M=6.5$; 7 ; 7.5 ; 7.75 ; 8 arrojaron los resultados siguientes:



Tabla 8: Resultados del Cálculo del Factor de Seguridad en el Perfil I-Í. Izquierda y perfil II- II´ a la derecha. Fuente: Elaboración propia

Magnitudes (Richter)	Factor de Seguridad (FS)
6.5	2.56
7	1.81
7.5	1.34
7.75	1
8	0.73

Magnitudes (Richter)	Factor de Seguridad (FS)
6.5	2.49
7	1.90
7.5	1.37
7.75	1.03
8	0.75

Se puede concluir que para el Perfil I-Í entre las magnitudes 6.5 hasta 7.5 no ocurre licuefacción en el área de estudio, con una magnitud de 7.75 comienza el proceso de licuefacción, a partir de magnitudes mayores o igual a 8 es seguro que ocurre la licuefacción de los suelos. En caso que ocurriera un evento con magnitud 7.75 o mayor se verían afectadas las obras: Puente Ferroviario, Prolongación de la Avenida Jesús Menéndez, Báscula del centro de carga FFCC, Urbanización La Playita, Urbanización Martí y Gallo, Báscula del patio de la terminal portuaria, por lo que se hace necesario un estudio más profundo de esta parte del área y las obras presentes.

El comportamiento de los resultados para el perfil II-Í es similar al anterior perfil pues con magnitudes que oscilan entre 6.5 hasta 7.7 no ocurre licuefacción y con magnitudes mayores o igual a 8 los cálculos expresan que ocurre la licuefacción de los suelos. Ante la manifestación de un sismo de magnitud 8 o mayor se verán directamente afectadas construcciones como: La Mini Fábrica de Cerveza, Mesón

del Puerto, Salón Tecnológico WIFE, Edificio de Vivienda Peralejo, Urbanización Martí y Gallo, Salón de operaciones de urgencia, Viviendas Lauro Fuentes, Centro Video Club Juvenil, por lo que se recomienda una mayor inspección de las condiciones del área y las obras que se encuentran en ellas.

3.2.7. Esquema pronóstico de susceptibilidad a la licuefacción ante terremotos fuertes.

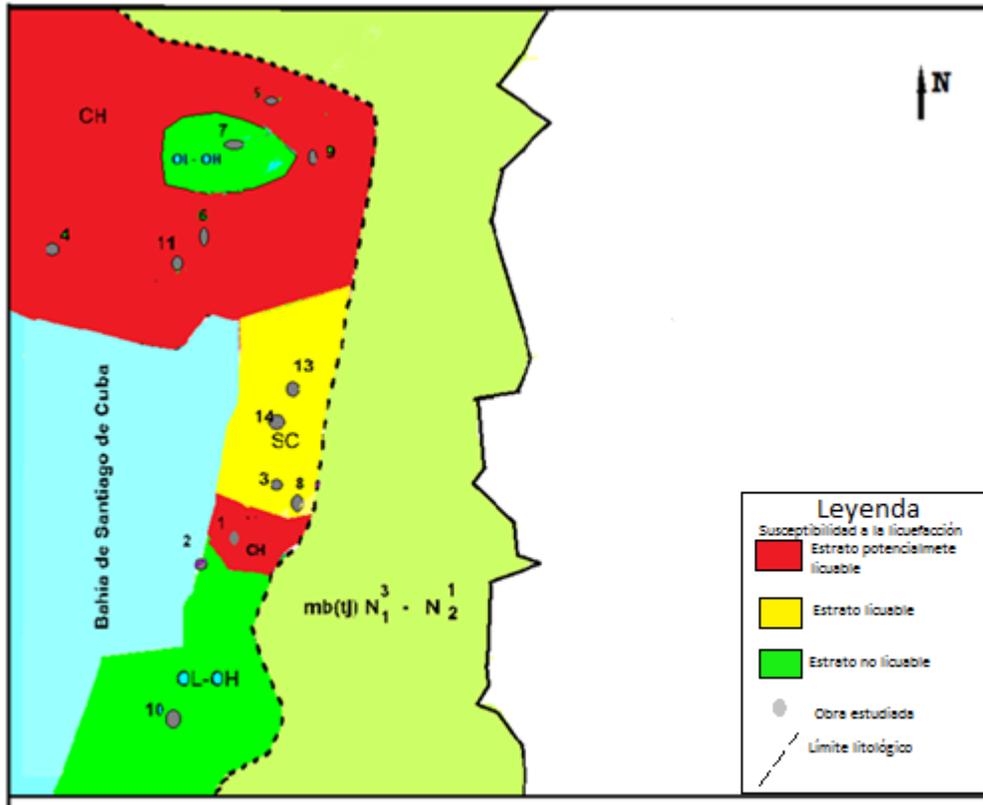


Figura 3.6 Esquema pronóstico de susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en el consejo popular Guillermón Moncada.

A partir de los resultados obtenidos se confeccionó el esquema pronóstico de susceptibilidad a la licuefacción de los suelos para el Consejo popular Guillermón Moncada del municipio Santiago de Cuba. Las áreas se han clasificado en función de las características geotécnicas del suelo, el análisis del nivel freático y los resultados del cálculo del factor de seguridad. El esquema se confeccionó para



una profundidad aproximada de 4 metros donde predomina la capa licuable. Los resultados muestran que se clasifican: como muy susceptible a la licuefacción el sector NW y parte del SE del área donde se encuentran los suelos tipo CH. El sector NE del área está caracterizada por ser susceptible, pues las características geotécnicas y el nivel freático se comportan de forma favorable a la disminución del fenómeno, está representado por los suelos tipo SC. El sector S del área de estudio presenta suelos tipo OL – OH y se caracteriza por presentar propiedades físico mecánicas que garantizan la no ocurrencia del fenómeno siendo el sector más seguro o de menor probabilidad de ocurrencia.

El resto del área de estudio, con los datos disponibles puede considerarse como no licuable.

3.3. Validación de los indicadores propuestos en el municipio Caimanera, provincia Guantánamo

3.3.1. Condiciones geológicas

El área de estudio se encuentra en el delta del río Guantánamo, está representada por sedimentos cuaternarios de la Fm. Jutía donde se destacan suelos cohesivos, friables y órgano detríticos con alto grado de saturación. Son suelos arcillosos de granulometría fina los que se ven influenciados por sismos de 8 grados de intensidad en la escala MSK y aceleraciones de 0,261g.

3.3.2. Sismicidad

Los fenómenos sísmicos registrados en el territorio indican diferencias en los valores de velocidades de ondas longitudinales y transversales. Estos valores se representan en la tabla 9 y como se aprecia los mismos están en dependencia del tipo de suelo influyendo en ello su densidad. Mientras más densos son los suelos la velocidad de propagación de las ondas sísmicas será mayor. La multiplicación de la velocidad de propagación y la densidad da como resultado la rigidez sísmica la que varía en dependencia del tipo de suelo. En las gravas hay valores altos de rigidez sísmica sin embargo en suelos arcillosos los valores son pequeños lo que

quiere decir que el movimiento del suelo en estos casos será mayor. De ahí que estos suelos sean más peligrosos para la construcción de viviendas y edificaciones. A ello se le suma la profundidad del nivel freático, donde alcance valores de 0,5 y más. Esto puede provocar incrementos de un grado de magnitud.

No.	Provincia	Municipio	c_mun	S ₀ (g)	S _s (g)	S ₁ (g)	TL(s)	Zona
150	Santiago de Cuba	Contramaestre	1301	0.280	0.538	0.214	8.0	4
151	Santiago de Cuba	Mella	1302	0.277	0.514	0.203	8.0	4
152	Santiago de Cuba	San Luis	1303	0.316	0.619	0.257	7.0	4
153	Santiago de Cuba	II Frente	1304	0.241	0.472	0.200	8.0	3
154	Santiago de Cuba	Songo-La Maya	1305	0.352	0.806	0.321	7.0	5
155	Santiago de Cuba	Santiago de Cuba	1306	0.513	1.035	0.428	6.0	5
156	Santiago de Cuba	Palma	1307	0.335	0.662	0.267	7.0	4
157	Santiago de Cuba	III Frente	1308	0.324	0.634	0.248	7.0	4
158	Santiago de Cuba	Guamá	1309	0.376	0.867	0.328	7.0	5
159	Guantánamo	El Salvador	1401	0.273	0.533	0.228	8.0	4
160	Guantánamo	Guantánamo	1402	0.267	0.529	0.213	8.0	4
161	Guantánamo	Yateras	1403	0.228	0.408	0.176	9.0	3
162	Guantánamo	Baracoa	1404	0.207	0.406	0.151	10.0	3
163	Guantánamo	Maisí	1405	0.234	0.450	0.187	10.0	3
164	Guantánamo	Imías	1406	0.244	0.453	0.189	10.0	3
165	Guantánamo	San Antonio del Sur	1407	0.243	0.590	0.210	9.0	4
166	Guantánamo	Manuel Tames	1408	0.257	0.551	0.218	9.0	4
167	Guantánamo	Caimanera	1409	0.396	0.801	0.326	8.0	5
168	Guantánamo	Niceto Pérez	1410	0.433	0.875	0.359	7.0	5
170	Isla de la Juventud	Isla de la Juventud (Mun. Esp.)	1501	0.044	0.096	0.023	3.0	1

Figura 3.7 Recorte de la Tabla de principales localidades ubicadas en las diferentes zonas sísmicas del territorio nacional. NC 46- 2014 Norma sísmica.

En Caimanera pueden ocurrir aceleraciones de 0,261g para una probabilidad del 10%, en un período de retorno de 475 años según los datos de la Norma de Construcciones Sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción. Cuba de 2014.

Tabla 9: Velocidad de propagación de las ondas elásticas y la rigidez sísmicas de los suelos del territorio de Caimanera. Correlación a partir del libro Geología Aplicada a la ingeniería geodinámica aplicada a ingeniería de V. D. Lomtadze.

Tipo de suelos	Densidad, g/cm ³ γ	Velocidad de las ondas sísmicas, Km/s		Rigidez sísmica:	
		Longitudinales,	Transversales	V _p γ	V _s γ



		Vp	Vs		
SC. Deposito areno arcillosos con gravas y humedad natural	1.8 - 2.3	0.12 – 0.75	0.36 – 0.5	0.23 - 0.7	0.1 - 1.1
SM: Arena limosa Suelo no con solidado con algo de material orgánico	1.4 - 1.6	0.2 -1.0	0.1 - 0.7	0.3 - 1.6	0.2 – 1.1
CL. Arcilla limosa, con bolsones de CaCO ₃ y pequeñas gravas, húmeda baja plasticidad	1.45 - 1.9	0.3 - 0.7	0.1- 0.35	0.44-1.3	0.1 – 0.7
CH: Arcilla de alta plasticidad	1.3-2.0	0.85-1.4	0.2-0.7	1.4-2.8	0.3-1.4
OL: Cieno Marino. Orgánico de baja plasticidad	1.16-1.75	0.3-1.0	0.1-0.7	0.5-1.7	0.2-1.2
GC: Grava arcillosa	1.8 - 2.3	0.12-0.75	0.36-0.5	0.23-1.7	0.3-0.8
GP: Grava limpia, mal graduada	1.8-2.2	0.8-1.0	0.3-0.6	1.4-1.6	0.5-1.3

En la tabla 8 se muestran los valores de rigidez sísmica a partir del producto de la densidad y la velocidad de propagación de las ondas sísmicas para los diferentes tipos de suelos.

3.3.3. Características hidrográficas

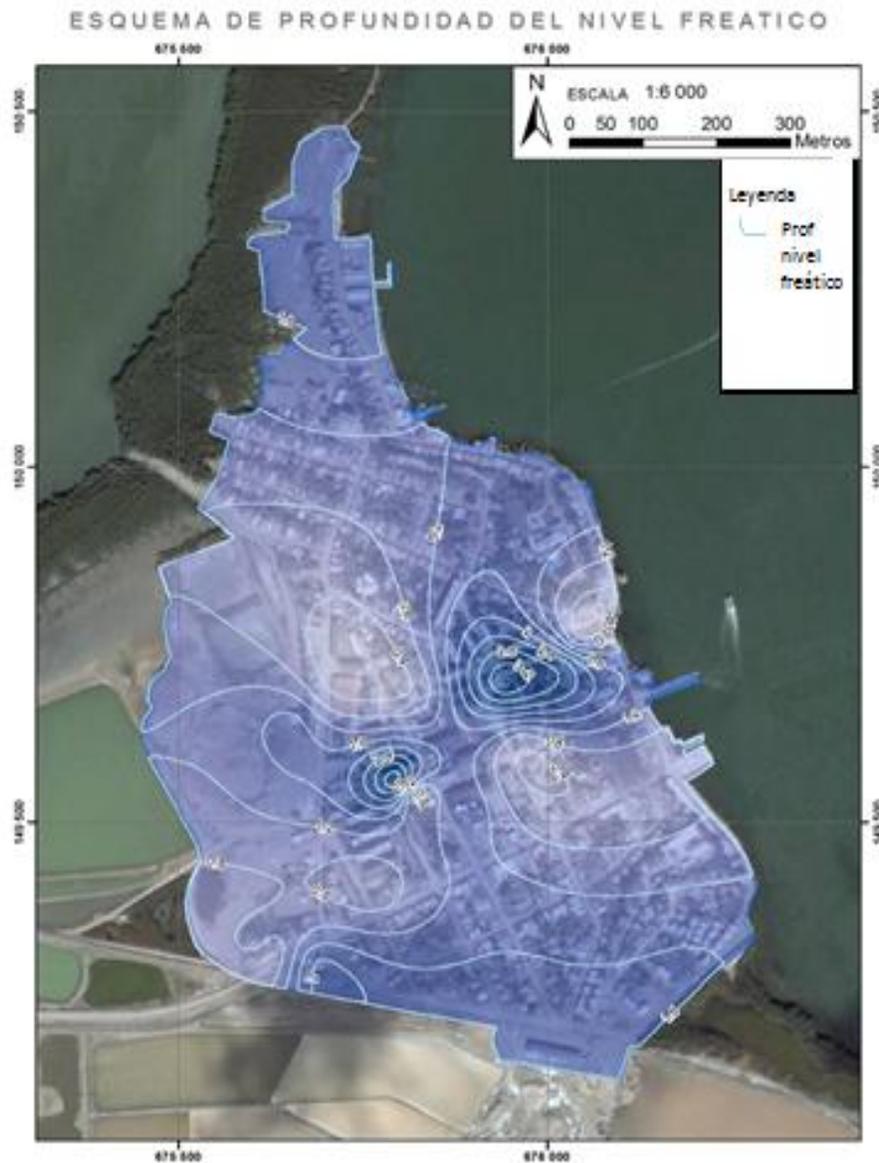


Figura 3.8 Esquema de profundidad del nivel freático en el municipio Caimanera, provincia Guantánamo.



Los valores del nivel freático fluctúan desde 0,5 metros de profundidad hasta 3 metros en casos aislados, lo que nos indica que hay poca variación.

En la figura 3.8 se muestra la distribución de la profundidad del nivel freático de las aguas en la zona de estudio. La profundidad de yacencia de las aguas dentro de los límites de la región varía desde 0.5- 3.2m. Al encontrarse muy superficial debe someterse a serios estudios hidrogeológico. Nos encontramos en presencia de rocas saturadas y semisaturadas lo que provoca un incremento de la amplificación de las ondas sísmicas y una disminución en la velocidad de propagación de las ondas sísmicas así como los daños a las obras.

3.3.4. Condiciones ingeniero geológicas

Consideramos que la ciudad se localiza dentro de una sola zona ingeniero geológica. Geológicamente está ubicada en una sola litología: la Fm. Jutía de edad Cuaternario. Las rocas presentes son sedimentos de pantano, representados por arcilla arenosa plástica y arenas finas arcillosas, con poca materia orgánica. Las cotas son muy estables entre los primeros metros y el relieve es casi llano por lo que se considera otro factor para decir que es una misma zona ingeniero geológica.

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

SC: Arena arcillosa

CL: Arcilla de baja plasticidad

SM: Arena limosa

OL: Orgánico de baja plasticidad

GC: Grava arcillosa

GP: Grava limpia, mal graduada

CH: Arcilla de alta plasticidad



3.3.4.1 Distribución de los diferentes tipos de suelo en las calas

La superficie de Caimanera es muy heterogénea, está representada por la capa o estrato número 1 distribuida en toda el área por cuatro tipos de suelos principalmente: CL, GC, SC y SM.

Tipo de Suelo en la capa 1	% de distribución en el área	Espesor medio (mts)
CL	59.25	0.46-3.3
SC	18.51	1.21-1.6
SM	7.4	1.4
GC	3.70	0.4

En la capa 2 se puede encontrar hasta ocho tipos de suelos distribuidos por toda el área, entre los que se encuentran: CH, CL, CL/ML, GP, OL, SM, GC, SC.

Tipo de Suelo en la capa 2	% de distribución	Espesor medio (mts)
CL	40.74	0.6- 10.5
OL	37.03	0.8-19.2
CH	3.70	1.9
CL/ML	3.70	0.6-2.45
GP	3.70	0.6-2.45
SM	3.70	0.6-2.45
GC	3.70	0.6-2.45
SC	3.70	0.6-2.45

La capa 3 está conformada por diez tipos de suelos, estos son: CH, CL, Margas, MH/CH, OL, PT, SC, SC/CL, SM y SM/SC.

Tipo de suelo en la capa 3	Por ciento de distribución	Espesor medio (mts)
SM	40.74	1.8-14.6



CH	3.70	1.6-9
CL	3.70	1.6-9
MARGAS	3.70	1.6-9
MH/CH	3.70	1.6-9
OL	3.70	1.6-9
PT	3.70	1.6-9
SC	3.70	1.6-9
SC/CL	3.70	1.6-9
SM/SC	3.70	1.6-9

La capa 4 está compuesta por cuatro tipos de suelos, estos son GC, Margas, SM y SM/SC.

Tipo de suelo en la capa 4	Por ciento de distribución	Espesor medio (mts)
GC	14.81	2.5-11.5
Margas	3.70	5-15
SM	3.70	5-15
SM/SC	3.70	5-15

El estrato o capa 5 está representado en un 3.70% de GC.

Al analizar las columnas litoestratigráficas a partir de las calas se pudo determinar que predomina el corte formado por CL, como estrato 1; CL, OL, SM, SC en el estrato 2 y en un estrato número 3 encontramos CH, CL/ML, SM, GC y SC distribuidas de forma irregular en todas las calas.

Por lo tanto podemos afirmar que el tipo de suelo que predomina en la capa 1 y 2 es la arcilla limosa o limo arenoso lo que propicia que se amplifiquen las ondas sísmicas teniendo en cuenta el efecto de sitio en el cual se presenta una amplificación dinámica debido al contraste de la velocidad del suelo superficial con respecto a los depósitos más profundos. Entre mayor sea el contraste, mayor será la amplificación.

3.3.5. Esquema ingeniero geológico por tipo de suelos en Caimanera

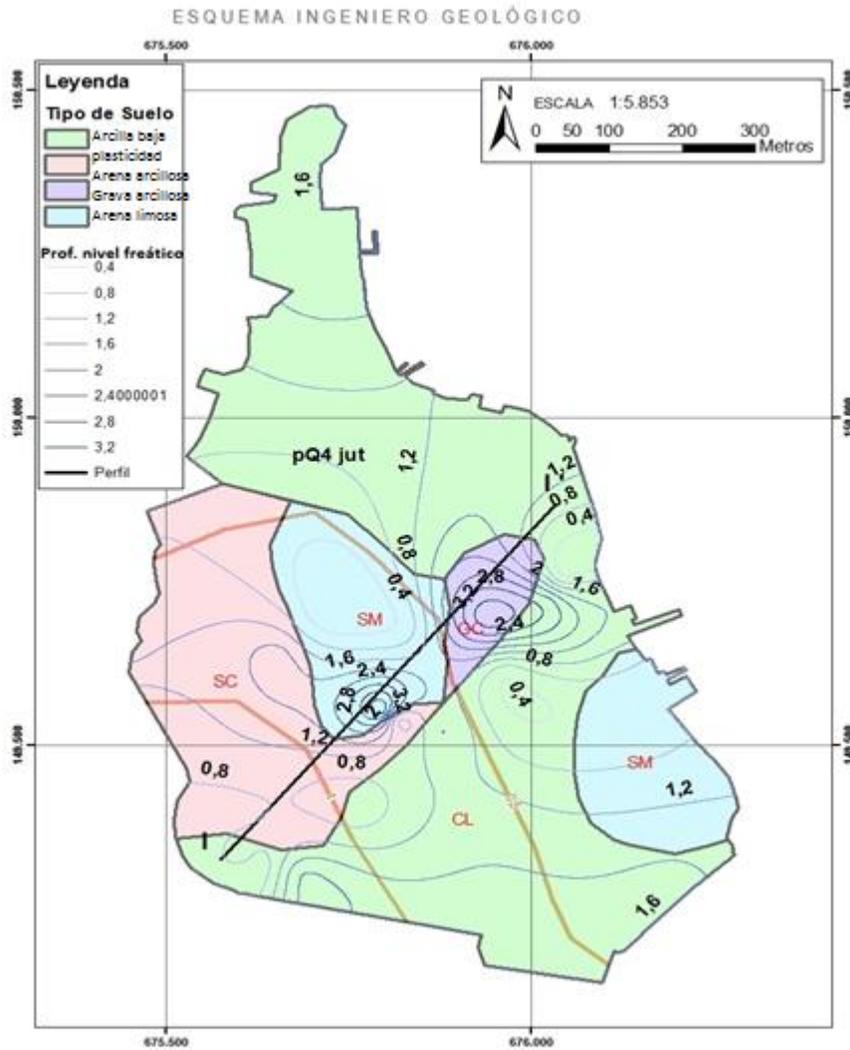


Figura 3. 9 Esquema ingeniero geológico a partir del tipo de suelo

Este esquema muestra los tipos de suelos existentes en la zona de estudio evidenciándose así cuatro tipos de suelos los cuales son: SC (arcillosa arenosa), SM (arena limosa), CL (arcilla limosa de baja plasticidad) y GC (grava arcillosa) de acuerdo a la clasificación dada por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Como se puede observar la mayor área ocupada es el suelo tipo CL.

3.3.5.1. Esquema ingeniero geológico por tipo de suelos y densidad habitacional

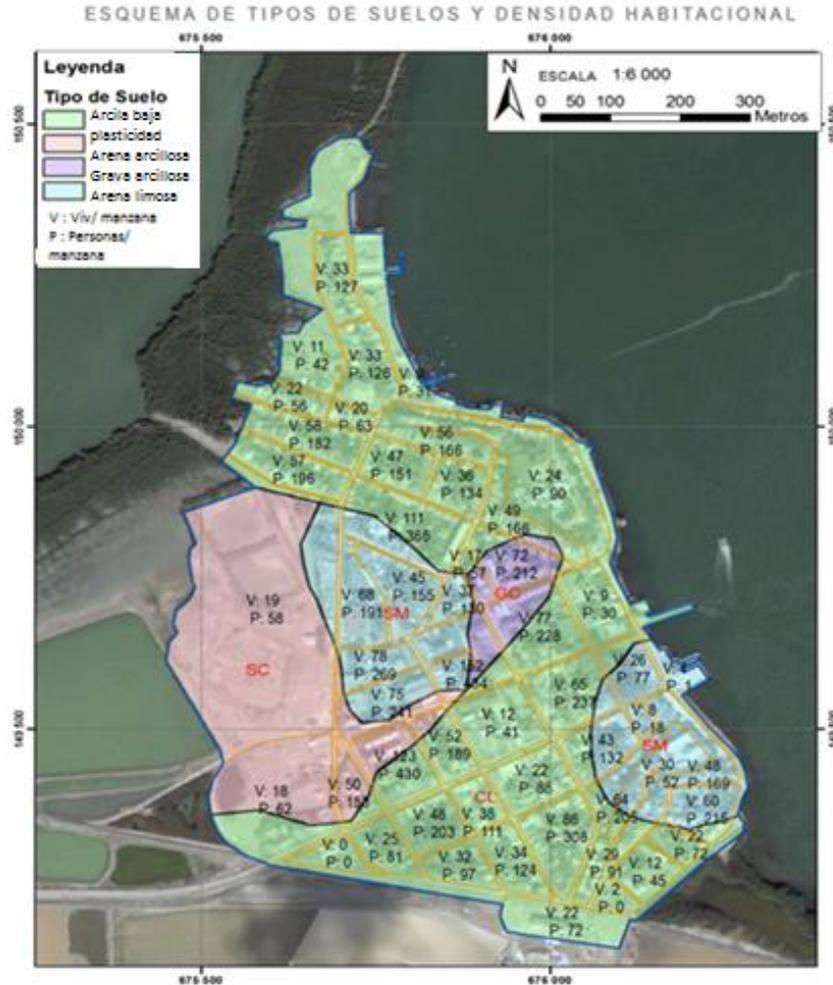


Figura 3.10 Esquema de tipos de suelos y densidad habitacional de la ciudad de Caimanera

Este esquema muestra la densidad habitacional por manzana y la distribución de acuerdo al tipo de suelo presente en la zona de estudio. En el suelo constituido por arena limosa (SC) existen 148 viviendas con un total de 493 habitantes. El suelo formado por arena limosa (SM) presenta 633 viviendas con un total de 2038 habitantes, el suelo formado por arcilla de baja plasticidad (CL) tiene 1175

viviendas con un total de 4008 habitantes y el suelo representado por grava arcillosa (GC) tiene 160 viviendas con un total de 476 habitantes.

Como el suelo CL es el que más área ocupa (Fig.3.11), es donde más asentamiento habitacional existe por lo que están más propensos a la amplificación de las ondas sísmicas y con ello afectaciones a las obras construidas ante un sismo fuerte. Este tipo de suelo ocupa toda la parte del litoral.

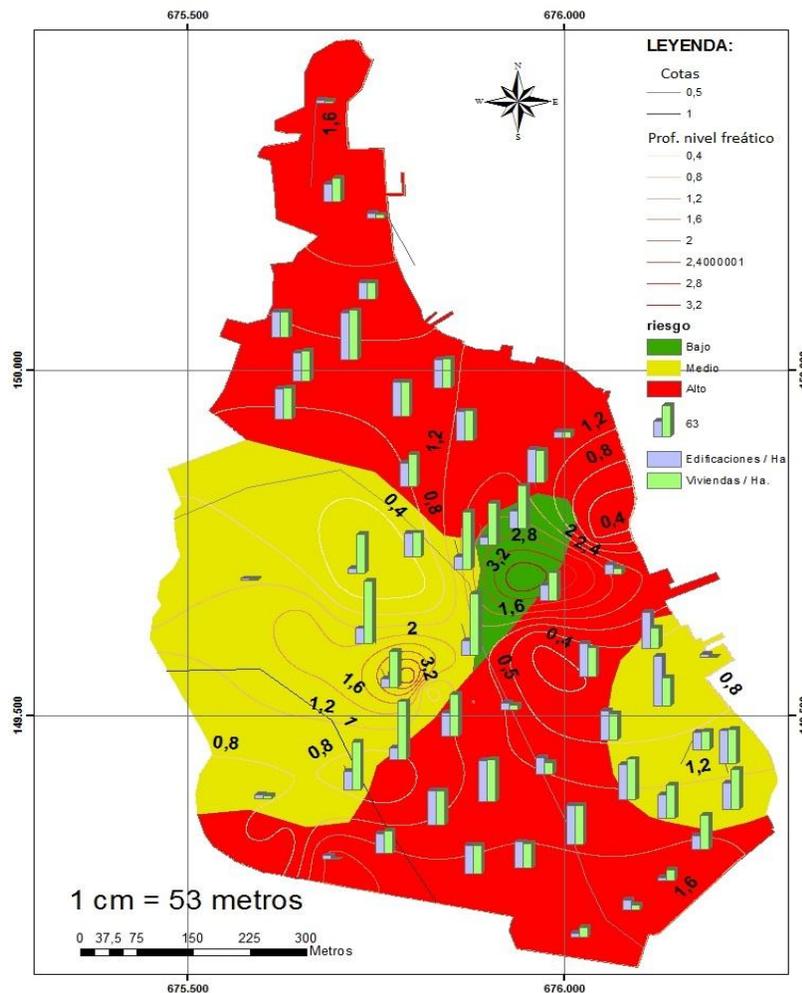


Figura 3.11 Esquema de riesgo sísmico a partir de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas y tipo de suelos según la SUCS para la ciudad de Caimanera.



A mayor contenido de arcilla y saturación de poros será mayor la peligrosidad sísmica dado que se incrementa el efecto de sitio en la zona según los tipos de suelo. En la figura 3. 11 el mapa de riesgo sísmico a partir de la correlación de los datos de la tabla 9. y la información de los informes de la ENIA se puede apreciar la peligrosidad de la ciudad de Caimanera ante un sismo. Los suelos clasificados como CL (Arcilla limosa) tienen los menores valores de densidad, la velocidad de propagación de las ondas sísmicas y la rigidez sísmica. Los suelos tipo SM y SC (Arcilla Arenosa y Arena Limosa) se clasifican como peligrosidad media dado al contenido de arcilla. Por último, la menor peligrosidad está dada por el suelo tipo GC (Grava Arcillosa).

En este esquema se muestra además la densidad habitacional de la zona de estudio. Para reconocer como están distribuidas las edificaciones y viviendas en el área se dividió por manzanas llegando a la conclusión que hay más viviendas que edificaciones distribuidas en el área de mayor riesgo, lo que es gratificante dada las condiciones de los edificios y el asentamiento diferencial que están sufriendo el cual se puede aumentar frente un sismo fuerte.

3.3.6. Factor de seguridad para la Licuefacción

Resultados de calcular el Relación de Esfuerzo Cíclico (CSR)

Se calculó la Relación de Esfuerzo Cíclico para cada estrato cortado por las calas perforadas de las obras que se encuentran en el área de estudio. Los resultados varían entre 0.18 y 1,08 aunque el rango para que una capa sea licuable comprende los valores entre 0,1 y 0.5 dependiendo además, del número de golpes corregido. A partir de estos resultados preliminares se puede decir que el estrato 2 es el de mayor probabilidad para licuar, dado que 12 de las 14 obras estudiadas dieron resultados en el rango establecido. Los resultados se pueden consultar en el Anexo 1. Los cálculos se realizaron de forma aleatoria pues las obras que corresponden al perfil I- I' algunos carecen de información importante como el número de golpes en el campo N de SPT y no se podía calcular el FSL.



Los valores del Radio de Resistencia Cíclica concuerdan en gran medida con los valores de CSR para las diferentes capas de las obras estudiadas, lo que nos da una idea sobre la probabilidad de licuar o no los suelos. Los resultados se pueden ver en Anexo 1.

De un total de 27 obras investigadas solo se pudo trabajar con un total de 20, dado que estas son las que contaban con la mayoría de la información que se necesita para realizar el cálculo del CSR, CRR y finalmente del FSL. En la tabla se muestran los resultados de las obras que se encuentran situadas en una zona que puede licuar dependiendo de la magnitud del sismo.

Capa	Mw6		Mw6,5		Mw7		Mw7,5		Mw7,75		Mw8	
	Obras	Licuales	Obras	Licuales	Obras	Licuales	Obras	Licuales	Obras	Licuales	Obras	Licuales
1	11	3	11	3	11	4	11	6	11	6	11	9
2	14	12	14	12	14	14	14	14	14	14	14	14
3	11	9	11	10	11	10	11	10	11	10	11	10

Ante un sismo de magnitud 6 la capa 2 es la de mayor probabilidad de licuar. Si esto ocurre se verían afectadas las obras siguientes: Circulo Infantil, Consultorio con Viviendas para Médicos, Escuela Especial, Lavatín, Minimercado No 2, Panadería y Dulcería, Sede universitaria, Servicentro, Sucursal BANDEC, Terreno de Beisbol, Viviendas en la Zona deportiva y Viviendas de la entrada de Caimanera.

Para sismos de magnitud 7 o mayor, el estrato 2 es el de mayores probabilidades de licuar y se verían afectadas las 14 obras que fueron estudiadas, además de licuar la capa 3 en un 90 por ciento.

Si licuara se verían afectadas las obras: Policlínico General, Círculo Infantil, Consultorio con viviendas (Biplanta), Escuela Especial, Lavatín, Minimercado No 2, Panadería y Dulcería, Sede Universitaria, Servicentro, Sucursal Bandec, Terreno de Beisbol, Viviendas de la Zona Deportiva, Viviendas para médicos en el Cañito, Viviendas en la entrada de Caimanera.

El estrato licuable está formada por los suelos tipo arena arcillosa (SC), arena limosa (SM), arcilla limosa con arena CI/MI, arcilla arenosa compresible CL.

3.3.7. Esquema pronóstico de susceptibilidad a la licuefacción ante terremotos fuertes.

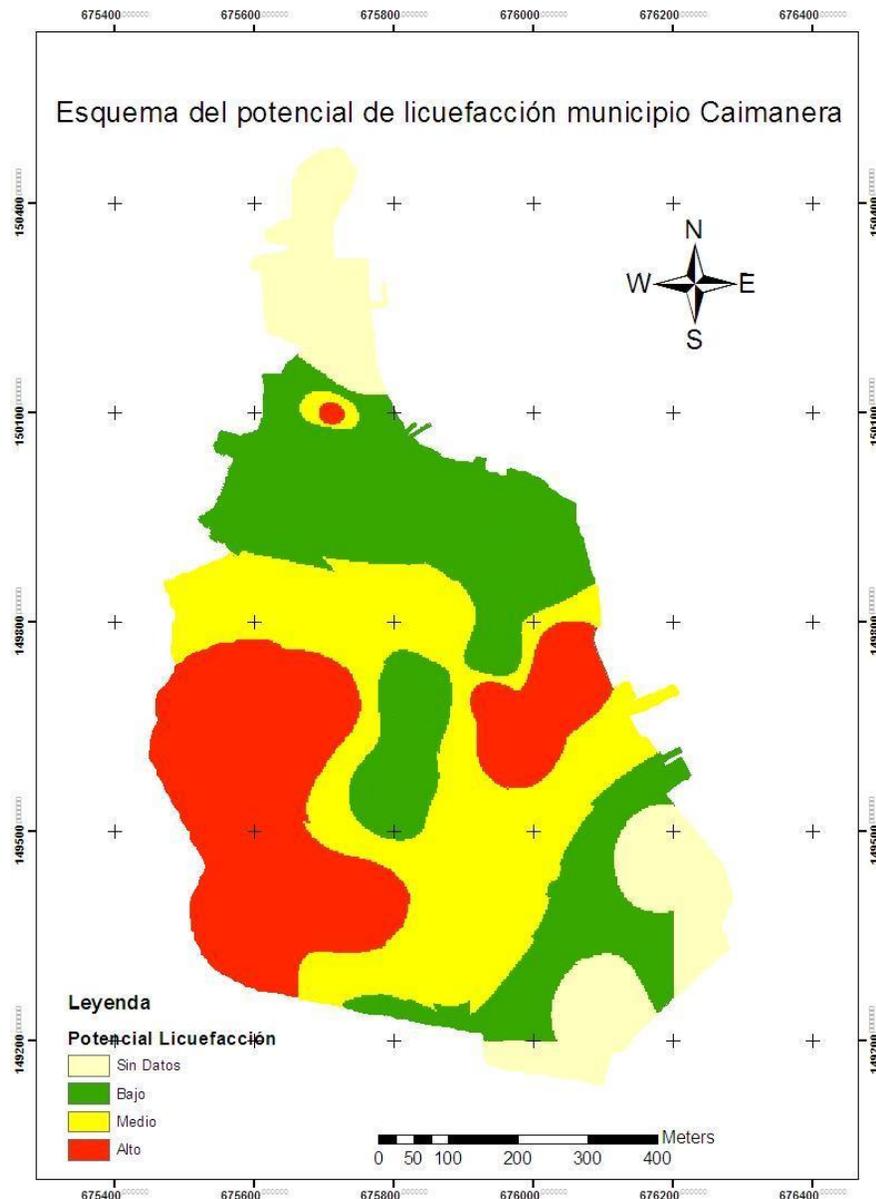


Figura 3.12 Esquema del potencial de licuefacción en el municipio Caimanera, provincia Guantánamo.



Los sectores de alta susceptibilidad a la licuefacción están dado por la probabilidad de licuar dos de los tres estratos identificados mediante la realización de las calas, estos estratos deben ser el segundo y tercero cortado en la cala.

Se considera licuefacción media cuando solo uno de los tres estratos estudiados dio licuable.

La susceptibilidad baja se le asigna a las áreas donde el FSL dio mayor que 1. El resto del área no se le pudo calcular el FSL por falta de datos importantes pero los valores de los ensayos de laboratorio de los estratos coinciden con los reportados en otra zona de media y alta susceptibilidad y las propiedades físicas y mecánicas están en el rango que proponen los autores (Seed & Idress, 1971) y (Wang, 1979).

Del mapa de susceptibilidad a la licuefacción podemos concluir que el área está distribuida entre alto, medio y bajo. El mapa se confeccionó para un sismo de magnitud 7.5 que es el sismo de diseño.

Las principales obras y viviendas que se verán afectadas por estar en una zona de alto potencial de licuefacción son las siguientes:

Potencialmente licuable: Policlínico tipo G, Circulo Infantil, Lavatín, Minimercado No 2, Panadería y Dulcería, Sede Universitaria, Servicentro, Terreno de Beisbol, Viviendas zona deportiva.

Licuable: Consultorio con Viviendas, Escuela Especial, Seminternado, Supermercado.

Poco licuable: Sede de la UJC, Viviendas para médicos en el Cañito.

Sin información: Escuela primaria Wilfredo Gonce, Funeraria, Hotel, Hotel Caimanera, Muro Malecón, Secundaria Básica Guantánamo # 7, Terraplén 19 de diciembre, Viviendas Playa Tokyo, Terminal Maítima.

3.4. Evaluación integral de los resultados.

Las condiciones geológicas de las áreas de estudio son favorables para que ocurra la licuefacción de los suelos ante sismos de magnitud 6,5 y más. Las



formaciones presentes son depósitos jóvenes de edad Cuaternario. Se encuentran cerca de una zona sismogeneradora dada la cercanía con la falla Bartlet- Caiman que pasa al sur del oriente de nuestro país. Los suelos de estudio se encuentran en acuíferos libres con bajos valores del nivel freático. Las condiciones ingeniero geológicas son favorables si se tienen en cuenta que los suelos varían entre una arcilla muy plástica con arena (CH) a una arena arcillosa con gravas (SC) y abundante manifestación de arcilla de baja plasticidad (CL). Se caracterizan por ser suelos blandos con alto contenido de finos, los niveles freáticos se encuentran a profundidades menores a 3.00 m, contienen un alto grado de saturación, presentan baja resistencia a la penetración dinámica (< 10 golpes del SPT), posibilidad de ocurrencia de terremotos de magnitud mayor a 5.5 y aceleraciones de hasta 0.3g.

En áreas de alto riesgo, el desarrollo sustentable sólo es posible en la medida en que las decisiones sobre planificación de desarrollo, tanto en el sector público como en el privado, tengan en cuenta el potencial destructivo de las amenazas naturales. Este enfoque es importante en situaciones post-desastre cuando los organismos locales, nacionales se ven presionados a reemplazar, con frecuencia en el mismo sitio, las instalaciones que han sido destruidas. Es en estos momentos que se torna más evidente la necesidad de contar con información sobre amenazas naturales e incorporarla al proceso de planificación del desarrollo.

Para tratar el manejo de amenazas deben incorporarse acciones específicas dentro de varias etapas del estudio de planificación del desarrollo integrado: primero, evaluar la presencia de los eventos naturales y su efecto en los bienes y servicios brindados por los recursos naturales en el área a desarrollar; segundo, obtener un estimativo del impacto potencial de los eventos naturales en las actividades de desarrollo; y tercero, incluir medidas para reducir la vulnerabilidad de las actividades de desarrollo propuestas. Dentro de este contexto se deben identificar los elementos de la infraestructura vital: aquellos componentes o



segmentos críticos de los medios productivos, infraestructura y sistemas de apoyo que deben tener la menor vulnerabilidad posible y ser considerados como prioritarios en las actividades de respuesta a un desastre. Si los dirigentes de los diferentes escalones de mando conocen el fenómeno y sus consecuencias es mucho más fácil tomar decisiones correctas. El principal problema que se puede apreciar es que la población en general no conoce los fenómenos geológicos inducidos y sus consecuencias.

Conclusiones parciales

Los suelos tipo arcilla de alta plasticidad (CH), arena arcillosa(SC), arena limosa(SM)y arcilla de baja plasticidad(CL) presentes en el municipio Caimanera y en el consejo popular Guillermón Moncada del municipio Santiago de Cuba presentan condiciones que hacen sea favorable la licuefacción de los suelos a partir de sismos de gran magnitud (6,5 y más).

El sistema de indicadores aplicado responde a las necesidades de la investigación y permitió definir el potencial de licuefacción en los diferentes sectores.

Teniendo en cuenta lo propuesto por los investigadores (Seed & Idress, 1971); (Wang, 1979) e (Idress, 2001,) y después de interpretar la información con que se contó se puede afirmar que los suelos licuables son los tipo CL, CI/MI, SM y SC, los que cumplen con las condiciones para que se amplifiquen las ondas sísmicas y ocurra la licuefacción de los suelos.



CONCLUSIONES

Se aplicó un sistema de indicadores a partir de conjugar factores como: geología, sismicidad, características hidrográficas, condiciones ingeniero geológicas y el Factor de Seguridad para la licuefacción que permitió evaluar el potencial de licuefacción en los escenarios propuestos.

Las condiciones ingeniero geológicas en los escenarios analizados están representados por sedimentos Cuaternarios donde se destacan suelos cohesivos, friables y órgano detríticos con alto grado de saturación. Los valores del límite líquido varían entre 33 -69 por ciento en una arcilla de baja plasticidad (CL) hasta una arcilla de alta plasticidad (CH), el por ciento de finos varía entre 13-93 por ciento en una arena limosa a una arcilla de baja plasticidad, la humedad varía entre 7.53-43.39 por ciento desde una arena arcillosa a una arena limosa y el valor de la prueba de penetración estándar varía entre 2,5 y 13 golpes por cada 30cm de perforación.

Los suelos tipo arena arcillosa, arena limosa, arcilla limosa, arcilla muy plástica con arena, identificados en el área de estudio son favorables para que ocurra la licuefacción.



Recomendaciones

RECOMENDACIONES

Realizar la localización de las obras antiguas existentes y de las actuales con GPS para poder utilizar la información de los informes y calas en futuros trabajos de investigación como este.

Realizar el estudio de vulnerabilidad en la ciudad de Caimanera.

Ampliar el estudio para toda la cuenca de Santiago de Cuba.

Incluir en los informes de la ENIA parámetros que permitan calcular el Factor de seguridad para la Licuefacción, un análisis integral de los suelos y propuestas de medida de mejoras del terreno

Al Organismo del Estado aplicar los resultados para planificar, decidir y proyectar un mejor ordenamiento territorial.

Socializar la información mediante visitas a los diferentes centro de Gestión para la Reducción del Riesgo y Consejo Asamblea Municipal y Provincial.

BIBLIOGRAFÍA

- ALFARO, R. Esquema ingeniero-geológico de la ciudad de Bayamo. Tesis de Maestría. ISMM, Moa, 1987.
- ALFARO. “Comparación entre la metodología para evaluar el potencial de riesgo de licuefacción y los catastros realizados luego del terremoto de 2010 en Concepción. Trabajo de diploma. UNIVERSIDAD DEL Bío Bío. 2013.
- ARENCIVIA, E.” Ingeniería de detalle Abasto Caimanera”. UEBPI. Guantánamo. Informe Ingeniero Geológico. ENIA. Santiago de Cuba. 2002
- ARIAS, M., & VEGA, R.”Construcción de viviendas para médicos El Cañito”. Informe Ingeniero Geológico. ENIA. Santiago de Cuba. 2006
- ALVA H.; & PARRA D.; (2011) Evaluación del potencial de licuefacción de suelos. Chimbote, Perú.
- ALVA, J.E. “Breve Historia del Fenómeno de Licuefacción de Suelos en el Perú”, IV Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Lima, Perú. 1983
- ALVA, J.E. & ORIHUELA P. “Estudio de Licuefacción y Amplificación Sísmica en Chimbote, Perú”, IV Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Chiclayo, Perú. 1982.
- ALCOCER, S. Comportamiento ante cargas laterales de sistemas de muros de mampostería con diferente tipo de refuerzo horizontal. México: CENAPRED. 1994
- ÁLVAREZ, CHUY & COTILLA. “Peligrosidad sísmica en Cuba. Una aproximación a la regionalización sísmica del Territorio Nacional”. Revista Geofísica. Instituto Panamericano de Geografía e Historia 1991. No 35, 125-150.
- ALONSO, B. Informe USB Dpto. Ciencias de la Tierra Material del Curso de Fundaciones PIE UCAB Noviembre. Mecánica de Suelos. Foundations Design. 2007
- ARANGO, D; FERNÁNDEZ, B & REYES. “Peligro Geológico de la Ciudad de Santiago de Cuba y sus alrededores”. CENAI. (2000).

- ARANGO, D; REYES, & FERNÁNDEZ, B. “Evaluación cualitativa del Peligro geológico de la red vial en la provincia Santiago de Cuba para casos de sismos de gran intensidad” CENAIS.1997
- ARANGO, E “Geodinámica de la región de Santiago de Cuba en límite de las Placas de Norteamérica y el Caribe”. México.1996.
- CACERES & RAMÍREZ: Microzonificación sísmica y los fenómenos de licuefacción por efectos del sismo del 27 de febrero en la comuna de San Pedro de la Paz. SERNAGEOMIN, Santiago, Chile pág. 880-882
- CARRILLO, D. Léxico Estratigráfico de Cuba. Instituto de Geología y Paleontología. 2009
- CARRILLO. “Licuefacción de suelos durante el sismo Pisco-Perú” Sixth Laccei International Latin American and Caribbean conference for Engineering and Technology (laccei’2008) “Partnering to success: engineering, education, research and development” june 4 – june 6 2008, Tegucigalpa, Honduras. 2008
- CEES VAN WESTEN. “Zonificación de amenaza por licuefacción, caso de estudio Bhuj, India”. P.K.Champati ray. Indian Institute of Remote Sensing. Kalidas Road, Dehradun, Uttaranchal, India.
- CHANDRA, PIMPRIKAR, “Evaluation of liquefaction potential studies at jabalpur: some illustrations”. Geological Survey of India.P S Mishra (Retd Director,GSI). EREC, IMD. New Delhi
- CHUY, R. “Modelo del peligro sísmico de la provincia de Santiago de Cuba”. CENAIS. 2010.
- DARTON, & MEINZER.: “Geology of the Guantanamo Basin Cuban”. Guantánamo. 1926
- DE LA ROSA, S.: “Estudio de las propiedades físico mecánicas de las rocas y suelos de la provincia de Holguín”. Holguín. Tesis de Diploma.ISMM. 1983
- DUQUE. Manual de geología para ingenieros. Capítulo 16. Movimientos masales. Flujo de lodo de 1985 en Armero, Tolima. Vulcan.wr.usgs.gov

- DURÁN , E.: “Construcción de la laguna de oxidación de la pasteurizadora”. Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 1982.
- FALCÓN & RAMÍREZ. Generación de mapas de licuefacción a partir del sismo de febrero de 2010. SERNAGEOMIN. Santiago de Chile, Chile. 2011
- FERNÁNDEZ, B. “Posibilidad de ocurrencia del fenómeno de licuación en la cuenca de Santiago de Cuba catalizado por terremotos fuertes. Tesis de maestría. ISMM. Moa. 2000
- FERNÁNDEZ & CRUMLEY. Estudio del riesgo de licuación para la represa de río blanco. Comparación entre metodologías existentes. Geoconsult, Inc. – Geotechnical Engineers. P.O. Box 362040, San Juan, Puerto Rico.
- FIGUERAS, C. “Caracterización de efectos sísmicos locales en la ciudad de Lorca”, Física de la Tierra Vol. 24 (2012) 235-254
- GONZÁLEZ. L. *Ingeniería Geológica*. PEARSON EDUCACION. (2002 Madrid.744p
- GONZÁLEZ, C “Comparación entre la metodología para evaluar el potencial de riesgo de licuefacción y los catastros realizados luego del terremoto de 2010 en concepción. Tesis de diploma. Universidad del Bio Bio. Argentina. 2011.
- GONZALEZ. “Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT. X Jornadas geotécnicas de la ingeniería colombiana - SCI -SCG –Colombia. 1999
- GUASCH, F. “Apreciación de la amenaza sísmica de Cuba”. CENAI, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. 2014
- GUASCH, F & OLIVA, R. Análisis de la vulnerabilidad habitacional y los riesgos inducidos en los edificios altos de la ciudad de Santiago de Cuba. CENAI. Santiago de Cuba. 2014
- HENRÍQUEZ, C. “Mejora de terrenos potencialmente licuables con inyecciones de compactación”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 691p. 2007
- INCIARTE, E: “Construcción del dormitorio UM 2431”. Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 2009
- INCIARTE, E. “Estudio cantera material arcillosa (MINFAR)”. Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 2009

- ISHIHARA, K “Evaluation of liquefaction potential and consequent deformations in sand fills” proceedings of the workshop on seismic issues. Port of Los Angeles, ca. 1990
- IWASAKI T., TATSUOKA F., TOKIDA K. Y YASUDA S. “A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in japan”, 5 th japan symposium on earthquake engineering, november.1978
- KOSARY, M. “Geological Reconnaissance of the Guantanamo Basin Area”. Guantánamo. 1955
- KRAMER, S., & STEWART, J. Geotechnical Aspects of Seismic Hazards. En Y.Bozorgnia, & V. Bertero, Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering. London. Taylor and Francis Group. 2004.
- LEYTON. “Geología Superficial, frecuencias predominante de suelos y observaciones de licuefacción en Curicó tras el terremoto de Maule 2010. Tesis de diploma.Chile.2011
- LEONI. “Procesos de licuefacción de suelo área geotecnia”. Facultad de ingeniería Universidad nacional Federico Villarreal escuela universitaria de post-grado. U.N.L.P.
- LIAO S. Y WHITMAN R.V. “Overburden Correction Factors for SPT in Sand”, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, March, pp 373-377. 1986.
- MALAGA & KUROIWA. Mapa de peligros de la ciudad de Lambayeque Instituto nacional de defensa civil. INDECI – PNUD – PER/02/051. Diciembre 2003.
- MANCEVO, V. “Construcción del edificio Socio – Administrativo del puerto de Boquerón”. Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 2009
- MONTOYA, J. “Construcción de la oficina Sede de los Trabajadores Sociales”. Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 2005
- MUSSIO, V. “Potencial de licuefacción mediante el método de microtremores en la colonia solidaridad social”, Mexicali. Dr. Efraín Ovando Shelley. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.111p. 2012
- NAVARRO, N., & MARÍN, E.”Evaluación de los edificios 12, 15 y 28”. Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 2004

- OBANDO, T. "Antología de los Efectos de la licuefacción en suelos sujetos a solicitaciones sísmicas. Ejemplos de Casos". Universidad Internacional de Andalucía UNÍA (Huelva, España).
- OBANDO, T. 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. 900pág. 2009.
- OBANDO, T. Estado actual del Conocimiento del proceso cíclico de licuefacción en suelos sujetos a solicitaciones sísmicas. Ejemplos de Casos. Universidad Internacional de Andalucía UNÍA (Huelva, España).
- OBANDO, T. "Metodología y técnicas para la Cuantificación del potencial de licuación en suelos sujetos a solicitaciones dinámicas. Ejemplos de casos. Universidad. Internacional de Andalucía UNÍA (Huelva, España)
- OLIVA, R. "Vulnerabilidad Sísmica de la ciudad de Santiago de Cuba". CENAI.Santiago de Cuba.1989.
- OLIVA, MÁRQUEZ & MOREJÓN. Metodología integral para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las construcciones en Cuba. Ejemplos de casos. CENAI.Santiago de Cuba. Cuba.
- PASCUAL, W. "Construcción del policlínico tipo G modificado". Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 1984
- PASCUAL, W. "Evaluación ingeniero geológica del área donde se proyecta la construcción del edificio G.P. IV". Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 1985
- PASCUAL, W. "Construcción de la funeraria del municipio de Caimanera". Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 1982
- PASCUAL, W. "Construcción del consultorio con vivienda en Boquerón". Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 1985
- PASCUAL, W. "Construcción del seminternado 300 alumnos". Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 1985

- PASCUAL, W. "Construcción de la escuela especial en Caimanera". Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 1986
- PASCUAL, W. "Construcción de los edificios multifamiliares". Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 1986
- PASCUAL, W. "Construcción del Servicentro de Caimanera". Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 1986
- PASCUAL, W. "Construcción de la ferretería de Caimanera". Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 1986
- PASCUAL, W. Construcción de las viviendas económicas en Caimanera. Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 1986
- PLÁ DUPERTÉ, M., & ARENCIVIA , E. "Drenaje pluvial Caimanera". Investigación ingeniero geológica. Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 2005
- PERUCCA, L.; PÉREZ, A. & NAVARRO, C. "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. 2006
- REINALDO, E. "Condiciones ingeniero geologicas preliminares de la cuenca de Santiago de Cuba". Santiago de Cuba. Tesis de Diploma.ISMM.1975.
- RILL, F. "Ampliación de la escuela primaria "Wilfredo Gonze" en Caimanera". Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba.
- Riesgo Sísmico disponible en:
http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Riesgo_sísmico&oldid=82160505». (s.f.).
 Recuperado el 5 de mayo de 2015, de wikipedia.
- ROBIRA, M. "Construcción de la Sucursal de Bandec en Caimanera". Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba.2008
- ROBIRA, M. "Estudio del suelo al área seleccionada para el cambio de los tanques metálicos de combustibles del Servicentro de Caimanera". Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 2008
- ROBERTSON, K., & WRIDE, E. "Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test", Canadian Geotechnical Journal, 1998.Vol. 35, N° 3, 442- 459.

- RODRIGUEZ, M. I. "Propiedades físico – mecánicas de los suelos de la provincia de Holguín". Holguín.Tesis de Diploma.ISMM. 1983. 71p
- RODRIGUEZ, S. "Esquema ingeniero geológico del valle de Guantánamo". Guantánamo.Tesis de Diploma.ISMM. 1981.65p
- RUBIO, F., & FRÓMETA, R, "Reconstrucción de la cerca perimetral del Hotel Caimanera". Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 2011
- RUBIO, F., & INCIARTE, E. "Estudio de cantera BON del Este". Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 2009:
- SAYOUX, R. "Investigación técnico ejecutiva del área seleccionada para la construcción de 16 viviendas por el Sistema Constructivo Sandino de uno y dos niveles". Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 2001
- SEED, B. & DE ALBA, P. "Use of SPT and CPT Test for Evaluating the Liquefaction Resistance of Sands", Use of Insitu Test in Geotechnical Engineering, ASCE, 1986, pp 281-302.
- SEED, B., IDRIS, M. & ARANGO I. "Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1983. Vol 109, N°3, pp 481-485.
- SEED, B. & LEE, L. "Liquefaction on saturated sands during cyclic loading", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1966. 92 (SM6), 105-134.
- SEED, B., AND IDRIS, M. "A Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential", Journal of soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1971. 97, SM9, 1249- 1273.
- SEED, B., AND IDRIS, M. "Ground motions and soils liquefaction during Earthquakes",Technical report, Earthquake Engineering Research Institute. 1982
- SOSA , J, & VEGA, R. "Análisis del terraplén para la construcción de 52 viviendas en el reparto 19 de diciembre El Cañito". Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 2001.

- SOTO & PARRA. Evaluación del potencial de licuación basado en el ensayo triaxial cíclico. Dinámica de Suelos. Universidad nacional de ingeniería. Facultad de ingeniería civil.
- STOEV, S. "Esquema de Guantánamo. Guantánamo". Tesis de Diploma. ISMM. 1967. 60p
- TOKIMATSU, K. & YOSHIMI Y. "Field Correlation of Soil Liquefaction with SPT and Grain Size", International Conference of Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, University of Missouri-Rolla, 1981. pp 203-208.
- TOKIMATSU, K. & YOSHIMI Y. "Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content", Soils and Foundations, 1983, Vol 23, N°4, pp. 56-74.
- THOMPSON, O. "Ampliación de policlínico de Caimanera". Informe Ingeniero Geológico. ENIA. Santiago de Cuba. 2004
- THOMPSON, O. "Estudio del suelo correspondiente al área seleccionada para la construcción de la Sede Universitaria en Caimanera. Informe Ingeniero Geológico. ENIA. Santiago de Cuba. 2005.
- TSIGE & GARCÍA. "Propuesta de clasificación geotécnica del "Efecto Sitio" (Amplificación Sísmica) de las formaciones geológicas de la Región de Murcia" Geogaceta, 40, 2006
- VALVERDE, CHACÓN, VIDAL & IRIGARAY. "Susceptibilidad a licuefacción en la vega de Granada (España). 4 CNIS. GRANADA. 18-20 MAYO 2011.
- WANG, W. "Some finding in soil liquefaction". Water conservancy and hydroelectric power scientific research institute, Beijing, China. 1979
- YOU, T. & IDRIS, I. "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, 2001. Vol. 127, N° AISSN 1090-0241.

ZELAYA. “Estudio sobre Diseño Sísmico en Construcciones de Adobe y su Incidencia en la Reducción de Desastres”. Tesis de maestría. Lima Perú. 2007.

Anexo 1: Resultado del cálculo de CSR y CRR para cada capa de las obras estudiadas

	Obra	PNF	EspCap1	EspCap2	EspCap3	CSR 1	CSR 2	CSR 3	CRR 1	CRR 2	CRR 3
1.	Ampliación policlínico	0,40	0,20	1,91	2,91		0,29	1,03		0,05	0,05
2.	Círculo Infantil	0,60	2,80	7,70	8,70		0,58	0,35		0,05	0,05
3.	Consultorio con viviendas	0,50	1,90	1,50	2,50		0,29			0,05	0,05
4.	Escuela Especial	1,40	1,10	13,00	10,00		0,38	0,26		0,05	0,05
5.	Fisioterapia y Rehabilitación con fango	1,41	0,80		2,40		0,19				0,05
6.	Lavatín	0,50	1,80	4,20	5,20		0,56	1,04		0,05	0,05
7.	Minimercado No 2	1,40	1,50	13,80	14,80		0,87	0,33		0,05	0,05
8.	Panadería y Dulcería	3,50	1,80	4,30	5,30		0,18	0,25		0,05	0,05
9.	Policlínico Tipo G Modificado	2,50	1,70	4,30	5,30	0,20	0,23		0,05	0,05	
10.	Sede UJC	1,03	1,38	0,46	3,50	0,19	0,27		0,05		0,05
11.	Sede universitaria	0,47	1,22	1,90	2,90	0,24	0,76	0,28	0,05	0,05	0,05
12.	Seminternado	1,60	1,80	8,00	9,00	0,18			0,05		
13.	Servicentro de Caimanera	0,50	1,70	0,80	10,00	0,28	0,35	0,33	0,05	0,05	0,05
14.	Sucursal BANDEC	0,90	1,13	0,93	10,00	0,19	0,35	0,31	0,05	0,05	0,05
15.	Supermercado	2,00	3,30	19,20	20,20	0,22			0,05		
16.	terreno de beisbol	1,30	1,60	1,50	3,00	0,18	0,25	0,25	0,05	0,05	0,05
17.	Vivienda Zona Deportiva	1,65	3,07	1,40	2,22	0,22	0,25	0,27	0,05	0,05	0,05
18.	Viviendas para médicos el Cañito	1,70	1,20	0,60	5,50	0,24			0,05	0,05	0,05
19.	Viviendas entrada	0,85	1,21	3,75	4,75	0,18	0,40		0,05	0,05	0,05

Obra	FSL 6 Capa1	FSL 6 Capa2	FSL 6 Capa3	FSL 6,5 Capa1	FSL 6,5 Capa2	FSL 6,5 Capa3
Ampliación Policlínico		1,32	0,10		1,08	0,08
Círculo Infantil		0,19	0,73		0,16	0,59
Consultorio con viviendas		0,43			0,35	
Escuela Especial		0,30	-3,98		0,24	-3,24
Lavatín		0,20	0,24		0,16	0,20
Minimercado No 2		0,13	0,77		0,11	0,63
Panadería y Dulcería		0,68	1,05		0,55	0,85
Policlínico Tipo G Modificado	0,43	1,10		0,35	0,90	
Sede UJC	1,99	0,00		1,62	0,00	
Sede Universitaria	5,66	0,22	0,37	4,61	0,18	0,30
Seminternado	0,69			0,56		
Servicentro de Caimanera	1,35	0,54	0,32	1,10	0,44	0,26
Sucursal Bandec	29,68	0,35	0,34	24,18	0,28	0,27
Supermercado	0,51			0,42		
terreno de beisbol	2,77	0,42	0,85	2,26	0,34	0,69
Vivienda Zona Deportiva	1,58	0,57	0,53	1,28	0,47	0,43
Viviendas para médicos el Cañito	2,08			1,69		
Viviendas entrada	1,76	0,47		1,43	0,38	

Anexo 2: Resultados del cálculo del factor de seguridad para la licuefacción para cada capa por obra frente sismos de Mw 6 y 6,5

Anexo 2: Resultados del cálculo del factor de seguridad para la licuefacción para cada capa por obra frente sismos de Mw 7 y 7,5

Obra	FSL 7 Capa1	FSL 7 Capa2	FSL 7 Capa3	FSL 7,5 Capa1	FSL 7,5 Capa2	FSL 7,5 Capa3
Ampliación Policlínico		0,89	0,07		0,75	0,06
Círculo Infantil		0,13	0,49		0,11	0,41
Consultorio con viviendas		0,29			0,24	
Escuela Especial		0,20	-2,68		0,17	-2,25
Lavatín		0,14	0,16		0,11	0,14
Minimercado No 2		0,09	0,52		0,07	0,43
Panadería y Dulcería		0,46	0,71		0,38	0,59
Policlínico Tipo G Modificado	0,29	0,74		0,24	0,62	
Sede UJC	1,34	0,00		1,13	0,00	
Sede Universitaria	3,82	0,15	0,25	3,20	0,12	0,21
Seminternado	0,46			0,39		
Servicentro de Caimanera	0,91	0,36	0,21	0,76	0,30	0,18
Sucursal Bandec	20,00	0,24	0,23	16,76	0,20	0,19
Supermercado	0,35			0,29		
terreno de beisbol	1,87	0,28	0,57	1,57	0,23	0,48
Vivienda Zona Deportiva	1,06	0,38	0,36	0,89	0,32	0,30
Viviendas para médicos el Cañito	1,40			1,17		
Viviendas entrada	1,19	0,32		0,99	0,26	

Anexo 2: Resultados del cálculo del factor de seguridad para la licuefacción para cada capa por obra frente sismos de Mw 7.75 y 8

Obra	FSL 7,75 Capa1	FSL 7,75 Capa2	FSL 7,75 Capa3	FSL 8 Capa1	FSL 8 Capa2	FSL 8 Capa3
Ampliación Policlínico						
Círculo Infantil						
Consultorio con viviendas						
Escuela Especial			-2,07			-1,90
Lavatín						
Minimercado No 2						
Panadería y Dulcería						0,50
Policlínico Tipo G Modificado	0,22	0,57			0,53	
Sede UJC	1,04			0,95		
Sede Universitaria	2,94					
Seminternado						
Servicentro de Caimanera						
Sucursal Bandec	15,41			15,41		
Supermercado						
terreno de beisbol	1,44			1,44		
Vivienda Zona Deportiva	0,82			0,82		
Viviendas para médicos el Cañito	1,08			1,08		
Viviendas entrada						

Anexo 3: SISTEMA DE INDICADORES PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN DE LOS SUELOS EN LA REGIÓN ORIENTAL DE CUBA.

Ing. Liuska Fernández Diéguez	Septiembre, 2015
DrC. Rafael Guardado Lacaba	

Moa, Septiembre de 2015

1. OBJETO

Delimitar los escenarios susceptibles para que ocurra la licuefacción de los suelos inducidos por sismos de gran magnitud a partir de la geología y cercanía a una zona sismogeneradora.

Determinar las condiciones ingeniero geológicas de los escenarios propuestos.

Calcular el Factor de Seguridad de la Licuefacción (FSL)

Confeccionar un mapa pronóstico del potencial de licuefacción para el área de estudio.

2. ALCANCE

El procedimiento es aplicable a los organismos del estado que tienen que ver con la proyección, planificación y ordenamiento territorial.

A la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA)

A los centros de Gestión para la Reducción del Riesgo

A los estudiantes de Ingeniería Geológica, Ingenieros Civil, geotecnistas y demás investigadores de la construcción.

3. REFERENCIAS

Capítulo 15 del libro Ingeniería Geológica de Luis González de Vallejo de 2002.

Norma de Construcciones Sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción. Cuba de 2014.

Norma cubana de Investigaciones Ingeniero Geológicas para la confección de mapas ingeniero geológico. NC 51-24-1984

4. DEFINICIONES

Riesgo (R): es la probabilidad de consecuencias dañinas o pérdidas esperadas (muertes, lesiones, propiedades, infraestructuras, interrupción actividad económica, o daño ambiental) resultante de las interacciones de las amenazas (naturales o inducidas o hechas por el hombre) y condiciones de vulnerabilidad. Matemáticamente el $R=H*V$ (Cees van Westen, 2009).

Elemento en riesgo: pueden ser objetos, personas, animales, actividades que pueden ser afectados negativamente por las amenazas, directa o indirectamente en una zona determinada. Esto incluye a la población, propiedades, edificios, obras de infraestructura, actividades

económicas, servicios públicos y medio ambiente, en el área potencialmente en riesgo. (Cees Van Westen, 2009).

Vulnerabilidad (V): es el conjunto de características comunes o básicas que le impiden a dicha población evitar los daños ocasionados por cualquier peligro, es decir, es el grado de pérdida de un elemento en riesgo, como resultado de la ocurrencia de un fenómeno natural de una magnitud dada en la escala de 0 (no daño) a 1 (daño total). (UNDRO 1991)

Amenaza naturales: "aquellos elementos del medio ambiente que son peligrosos al hombre y que están causados por fuerzas extrañas a él". En este documento el término "amenazas naturales" se refiere específicamente, a todos los fenómenos atmosféricos, hidrológicos, geológicos (especialmente sísmicos y volcánicos). Dentro de los fenómenos naturales potencialmente peligrosos se encuentra la licuación de los suelos.

Peligro: es todo fenómeno o acontecimiento de cierta magnitud que afecte, con valoración social negativa, a un gran número de población. La magnitud del acontecimiento estaría dada por la cuantía de daños provocados, ya sea sobre las propiedades, las personas, o sobre ambas a la vez.

Dado que el peligro y la vulnerabilidad representan una dupla inseparable en el análisis de riesgos, al investigar estos en un área se impone un paralelismo en la investigación, puesto que tan necesario es conocer los peligros que la acechan como la vulnerabilidad de sus habitantes, por lo tanto:

Licuefacción de suelos: ocurre cuando un material no consolidado (generalmente arenas) pierde su resistencia al esfuerzo cortante a causa de una vibración intensa y rápida (sismos), que rompe su estructura granular al reducir su presión inter-granular. Al iniciarse la vibración, por efecto de un sismo, el material se expande y las partículas sólidas adoptan un estado muy suelto (por pérdida del soporte mutuo entre los granos); cuando el movimiento cesa, el material tiende a compactarse bruscamente, produciendo las presiones intersticiales que causan la licuación.

5. RESPONSABLE

“Es responsabilidad de los proyectistas tener en cuenta los parámetros que se miden en el procedimiento y además, difundirlo entre todo el personal encargado, es responsabilidad del Jefe de la investigaciones en el área realizar los cálculos propuestos en el procedimiento y es responsabilidad de los decisores en ejecutar obras de interés, conocer los parámetros que mide el procedimiento y las medidas que se pueden tomar, continuar con el proyecto o eliminarlo por encontrarse en una zona de riesgo y encontrarse muchos elementos expuestos.”

6. DESARROLLO

Para evaluar el potencial de licuefacción se llevó a cabo mediante un procedimiento que tuvo en cuenta una serie de requisitos. A medida que se cumplen los parámetros, el suelo se puede clasificar en potencialmente licuable, moderadamente licuable o poco licuable. Se obtuvo a partir de un análisis de casos, donde autores proponen los parámetros que deben cumplirse para un suelo potencialmente licuable o parámetros que influyeron en la licuefacción de los suelos. Se hizo difícil determinar los parámetros durante el fenómeno pero no fue un impedimento para su análisis. Partiendo de todo lo antes expuesto proponemos analizar las condiciones siguientes:

6.1 Condiciones geológicas:

Deben ser depósitos jóvenes (menos de 10.000 años) a las que pertenecen las formaciones del Cuaternario (Holoceno). Debe cumplir además que la relación entre el estrato licuable y el no licuable sea menor que 1. Coincidiendo también que el estrato de suelo no licuable encima del licuable debe ser menor de 8m. Para la selección de los sectores se hace una búsqueda en el mapa geológico y se seleccionan las formaciones pertenecientes al cuaternario que están representadas por el color amarillo en sus diferentes variantes.

6.2. Sismicidad

Se considera que puede ser licuable ante un sismo fuerte o magnitud mayor de 5,5 y las aceleraciones de las partículas llegan a ser iguales o superior $0,2g/cm^2$. Para la selección partimos de revisar la norma: **Construcciones Sismorresistentes. Requisitos básicos para el**

diseño y construcción de Cuba de 2014 en la que aparece un mapa con la zonación de las aceleraciones esperadas para nuestro país, además de la tabla de peligro sísmico en las diferentes zonas del territorio nacional donde se muestra el periodo de recurrencia esperado, la aceleración sísmica y la zona sísmica a la que pertenece cada región. Esta información puede ser brindada obtenida además, por los informes de especialistas del CENAIIS.

6.3. Profundidad del Nivel Freático

Se debe tener los valores del nivel freático por cala perforada. Este debe estar cerca de la superficie, 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. Finalmente se confecciona el mapa de profundidad del nivel freático para el área de estudio

6.4 Condiciones ingeniero geológicas

Se seleccionarán de los informes ingeniero geológicos que realiza la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) para la ejecución de una obra. Del informe de confecciona una base de dato con una serie de parámetros entre los que se encuentran algunas propiedades físicas y mecánicas (Límite Líquido, Índice de Plasticidad, humedad natural, densidad húmeda y densidad seca, por ciento de partículas finas, cortante, entre otras.

Se propusieron varios parámetros, si los cumplen todos tienen mayores posibilidades de ser un suelo potencialmente licuable.

Se debe tener 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 podemos agruparlos 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.

6.5. Esquema Ingeniero Geológico por tipo de suelos

Para la confección del esquema ingeniero geológico se tuvo en cuenta la norma cubana de Investigaciones Ingeniero Geológicas para la confección de mapas ingeniero geológicos. NC 51-24-1984. Se confecciona una base de datos que contenga los parámetros antes mencionado para cada capa identificada. Con la información obtenida se confeccionará el esquema ingeniero geológico donde se tenga 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. Se ubican los valores para cada punto que coincide en este caso 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 explícita la relación y posición espacial entre ellos. Se confecciona con ayuda del programa ArcGis 10.2.

6.6. Calcular el Cyclic Stress Ratio (CSR)

Interés ha despertado en la Ingeniería práctica la aplicación de correlaciones entre la resistencia in-situ del suelo, generalmente medida por ensayos de penetración estándar (SPT), y la resistencia a la licuación que representa el suelo frente a un sismo. Estudios realizados por Seed et al, Tokimatsu y Yoshim acerca del comportamiento de arenas limpias y limosas frente asismos, demuestran la existencia de dichas correlaciones.

El procedimiento requiere calcular dos variables sísmicas que son:

- a) La excitación sísmica del estrato de suelo, expresada en términos de la relación de tensiones cíclicas promedio ($CSR = \tau_{avg} / \sigma'_{vo}$).
- b) La capacidad del estrato de suelo para resistir la licuación, 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).

A partir de los valores obtenidos con anterioridad de los informes provenientes de la ENIA se debe calcular el CSR y plotear los valores en la curva de CSR vs SPT.

Enfoque de esfuerzo cíclico (CSR)

Es un principio generalmente aceptado que el potencial de licuefacción de estratos arenosos puede evaluarse utilizando correlaciones entre datos de resistencia a la penetración (tales como SPT) y la resistencia cíclica del material movilizado durante una fuerte excitación vibratoria.

En este enfoque, la resistencia cíclica es caracterizada por la relación de esfuerzo cíclico (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}).

El estudio de licuefacción aplicado en el área de investigación se basa en la correlación de esfuerzos desarrollada originalmente por (Seed & Idris 1971, 1987) y modificada por (Robertson & White, 1997). De acuerdo con estos autores, la CSR es una función de la duración del terremoto (representada por la magnitud del momento M_w), la aceleración horizontal máxima (representada por la aceleración pico del suelo normalizada por la aceleración de la gravedad, a_{max}/g), la profundidad del depósito granular (representada por el coeficiente de reducción del esfuerzo, r_d) y el esfuerzo vertical total normalizado (la

relación entre el esfuerzo efectivo total actuando sobre el estrato, σ_{vo}/σ'_{vo}). El CSR se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$CSR = 0.65 (a_{max} / g) (\sigma_{vo} / \sigma'_{vo})^{rd}$$

Dónde:

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

a_{max} : aceleraciones máximas generadas por un sismo de diseño.

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

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

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

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

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

Una vez obtenido el resultado de CSR se compara con los valores de la

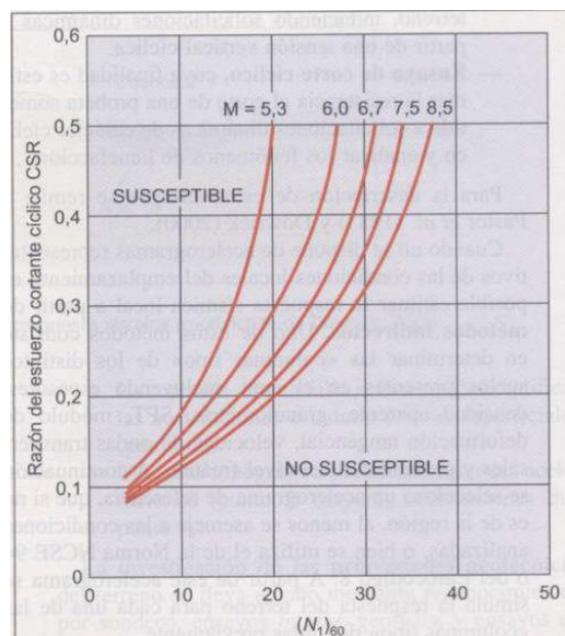


figura 1 y se comprueba si es un estrato licuable o no.

Figura 1: Susceptibilidad de licuefacción de un suelo en función de $(N1)_{60}$ y la razón del esfuerzo cortante cíclico CSR (Ho et al., 1986) tomado de (González, 2002)

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

6.7. 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.

$N_{160} = (N1)_{60}$ = El número de golpes de la prueba SPT normalizada a un esfuerzo geostático de 100 kPa y a la energía del martillo de 60%.

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

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

Esta ecuación es válida para los $(N1)_{60} < 30$. Para $(N1)_{60} \geq 30$, los suelos granulares limpios tienen el grado de compacidad demasiado alto para sufrir la licuefacción.

La resistencia a la penetración utilizada en las correlaciones corresponde al número de golpes medido en terreno (N) al cual se le aplica una corrección por tensión efectiva (Llao y Whitman, 1986):

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

$$N_1 = N \times C_N$$

donde:

donde:

C_N = factor de corrección para una tensión efectiva de sobrecarga de 1 ton/pie²

σ_v , 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 1: Correcciones a SPT (Skempton, 1986)

FACTOR	VARIABLE DE EQUIPO	TERMINO	CORRECCION
presión vertical normal efectiva	N/A	C_N	$(\text{Pa}/\sigma'_{vo})^{0.5}$
presión vertical normal efectiva	N/A	C_N	$C_N \leq 1.7$
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

6.8. Cálculo del factor de seguridad para la licuefacción (FSL)

El FSL se puede calcular a partir de las fórmulas explicadas anteriormente y con los datos obtenidos de los informes ingenieros geológicos. Primero se calcula el CSR y 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 fueran relativamente mayor que 1 se puede considerar posible licuación 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 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 espera definir los estratos que son potencialmente licuables y se presentan perfiles geotécnicos mostrando 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 calculó para sismos de magnitud 6; 6,5; 7; 7,5; 7,75 y 8. A continuación se muestran los resultados

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

6.9. Confección del mapa pronóstico de susceptibilidad a la licuefacción

Teniendo en cuenta los valores de FSL para cada estrato, el mapa de tipo de suelo (SUCS), nivel piezométrico, magnitud del sismo y aceleración sísmica, se lleva a cabo la confección del mapa de susceptibilidad a la licuefacción colocando los valores obtenidos anteriormente en los puntos que corresponden a cada calas (perforaciones) realizadas para el propio estudio. Se realiza haciendo uso del programa ArcGis10.2. Una vez insertados todos los datos que corresponden a cada punto se hace una regionalización de la información para toda el área de estudio.

Anexo 1: Diagrama de flujo para determinar si un área es licuable o no

