



ISMMM

Instituto Superior Minero
Metalúrgico de Moa

Dr. Antonio Núñez
Jiménez



GEOMIN
Facultad de Geología y Minas

Departamento de
Ingeniería
Geológica

TRABAJO DE DIPLOMA

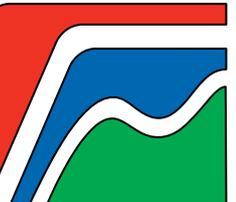
**EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO
GEÓLOGO**

TÍTULO: Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en la zona sur de la Provincia Guantánamo.

AUTOR: ORLANDO PARELLADA REYES

TUTOR: MS C. LIUSKA FERNÁNDEZ DIÉGUEZ

**MOA, 2016
“AÑO 58 DE LA REVOLUCIÓN”**



DEDICATORIA

- A mi madre Zoila Del Pilar Reyes Peraza.
- A mi padre Orlando Parellada Joa.
- A toda mi familia.
- A mis amigos.
- A mis compañeros.
- A mis profesores.

AGRADECIMIENTOS

- A mis padres, por su apoyo, amor, entrega y confianza que me han brindado por toda la vida, para alcanzar mis metas y ser la persona que soy.
- A toda mi familia, que siempre se ha mantenido a mi lado dándome tanto amor y confianza.
- A mis amigos, que tanto me han apoyado y me han dado fuerza para siempre salir adelante.
- A mis compañeros, por el aliento que me han dado en toda esta aventura universitaria.
- A mi tutora Liuska Fernández Diéguez, por su entrega y dedicación a este trabajo.
- A todos los profesores que contribuyeron en la formación de mi persona.

A todos ustedes, GRACIAS.

No se es hombre, se
es fuerza se es
naturaleza

José Martí

Resumen

El presente trabajo está encaminado a delimitar los escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en la zona sur de la provincia Guantánamo, principalmente en los municipios, Imías, Maisí, San Antonio del Sur, Manuel Tames y Guantánamo. El mismo responde a la necesidad de conocer las condiciones ingeniero geológicas de los suelos de del territorio, por lo que se persigue delimitar y evaluar dichas condiciones. Se utilizaron un conjunto de métodos que resolvieran la necesidad de la investigación, como la validación de los resultados de acuerdo al análisis del sistema de indicadores propuestos por Fernández-Diéguez. 2015, el cálculo del factor de seguridad corregido y la determinación de intensidades máximas que se pueden obtener a partir de magnitudes sísmicas que provoquen licuefacción en el área de estudio. Como resultado se delimitaron escenarios susceptibles a la licuefacción en los municipios Guantánamo, San Antonio del Sur e Imías para magnitudes sísmicas iguales y mayores a 6 grados.

Abstract

This work is aimed at defining susceptible to liquefaction-induced large earthquakes in the southern part of the province Guantánamo, mainly in the municipalities, Imías, Maisi, San Antonio del Sur, Manuel Tames Guantanamo and scenarios. It responds to the need to know the geological engineer soil conditions of land, so it pursues identify and evaluate these conditions. A set of methods to solve the need for research, such as validation of the results according to the analysis of the system proposed by Fernández-Dieguez indicators were used 2015, the calculation of the safety factor corrected and determination of maximum intensities that can be obtained from seismic magnitudes that cause liquefaction in the study area. As a result susceptible to liquefaction in Guantanamo, San Antonio del Sur and Imías municipalities to equal magnitudes and seismic greater than 6 degrees scenarios they were defined.

Índice

Resumen	IV
Índice	VI
INTRODUCCIÓN	1
ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEORICO CONCEPTUAL	3
Conceptos de licuefacción.....	3
Factores que influyen en la licuefacción	4
Factores que condicionan la ocurrencia de licuefacción. (Shadenet, 1990).....	4
Condición de un suelo para que sea licuable.	5
Metodologías para el estudio de la licuefacción de los suelos.	7
Métodos utilizados para evaluar la susceptibilidad a la licuefacción.	9
Evidencias históricas del fenómeno de licuefacción de suelos.....	10
Reportes históricos de licuefacción de los suelos en Cuba.....	13
Investigaciones realizadas en Cuba.....	14
Los sismos en Cuba como el elemento disparador de la licuefacción de suelos.	17
Conceptos de efecto de sitio.....	19
CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS DE LA REGIÓN DE ESTUDIO.	21
Características generales de la Zona Sur de la Provincia Guantánamo.	21
1.1 Ubicación geográfica del municipio Guantánamo.	21
1.1. Ubicación geográfica del municipio Guantánamo.	21
1.2. Relieve	22
1.3. Clima.....	23
1.4. Geomorfología	23
1.5. Características Hidrogeológicas.	24
1.6. Condiciones ingeniero – geológicas.	24
1.7. Geología regional.	25
1.8 Sismicidad y régimen sísmico.....	27
1.9 Desarrollo económico-social.....	28
CAPITULO II: METODOLOGÍA PARA ESTUDIAR EL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN	30
Introducción	30
2.1 Metodología de la investigación	30
2.2. Sistema de indicadores aplicados para el estudio de la susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en la región oriental de Cuba (propuesto por Fernández-Diéguez, 2015)	32

2.3. Metodología aplicada para el análisis de los indicadores para el estudio de la susceptibilidad a la licuefacción en el área de estudio.	39
CAPITULO III: EVALUACION DEL SISTEMA DE INDICADORES PARA DETERMINAR EL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO.	42
Introducción	42
3.1. Criterios para la selección de escenarios susceptibles a la licuefacción.	42
3.2 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio Imías.	43
3.2.1 Condiciones geológicas	43
3.2.2 Sismicidad.....	44
3.2.3 Características hidrográficas	44
3.2.4 Condiciones ingeniero-geológicas (Tabla 3).....	45
3.2.5 Cálculo de Factor de seguridad para la licuefacción.	46
Conclusiones parciales para Imías.....	48
3.3 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio Maisí.....	49
3.3.1 Condiciones geológicas	49
3.3.2 Sismicidad.....	50
3.3.3 Características hidrográficas	50
3.3.4 Condiciones ingeniero-geológicas (Tabla 5).....	51
3.3.5 Cálculo de Factor de seguridad para la licuefacción.	52
Conclusiones parciales para Maisí.	53
3.4 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio Manuel Támes.	54
3.4.1 Condiciones geológicas	54
3.4.2 Sismicidad.....	55
3.4.3 Características hidrográficas.	55
3.4.4 Condiciones ingeniero-geológicas (Tabla 7).....	56
3.4.5 Cálculo de Factor de seguridad para la licuefacción.	56
Conclusiones parciales Manuel Tames.	57
3.5 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio San Antonio del Sur. 58	
3.5.1 Condiciones geológicas	58
3.5.2 Sismicidad.....	59
3.5.3 Características hidrográficas	60
3.5.4 Condiciones ingeniero-geológicas (Tabla 9).....	60
3.5.5 Cálculo de Factor de seguridad para la licuefacción.	61
Conclusiones parciales para San Antonio del Sur.	62
3.6 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio Guantánamo.	62

3.6.1 Condiciones geológicas	62
3.6.2 Sismicidad.....	64
3.6.3 Características hidrográficas	64
3.6.4 Condiciones ingeniero-geológicas (Tabla 11).....	65
3.6.5 Cálculo de Factor de seguridad para la licuefacción.	66
Conclusiones parciales para Guantánamo	68
Conclusiones	69
Recomendaciones	70
Bibliografía	71
Anexo 1	76

INTRODUCCIÓN

En determinados suelos de naturaleza contractiva, es decir, con tendencia a la disminución de volumen durante el corte, la ocurrencia de un terremoto severo puede producir el incremento gradual de las presiones de poros, reduciendo la resistencia del suelo y su rigidez. A este fenómeno se le conoce como licuefacción y sus efectos asociados han sido responsables de una gran cantidad de daños. El estudio de este fenómeno en la actualidad resulta de gran importancia, y nuestro país no está libre a esto. Para el diseño o revisión del planeamiento territorial y urbano se precisa de la realización de estudios de riesgo de desastres o de peligro, vulnerabilidad y riesgo; que permitan proyectar las acciones de construcción o intervención en el medio físico construido previendo medidas de protección sobre bases científicamente argumentadas. Las experiencias derivadas de las catástrofes de Santiago de Cuba 1932 nos convocan a no dejar de prestar atención a la sismicidad como una premisa de desastres para Cuba. La mayoría de los estudios encaminados a la ocurrencia de este fenómeno en Cuba se han realizado en la Provincia de Santiago de Cuba debido al gran riesgo sísmico que presenta, pero la provincia de Guantánamo presenta también un alto riesgo sísmico y solo se han realizado estudios en el Municipio de Caimanera por lo que la provincia carece de un minucioso estudio de la posible ocurrencia de este fenómeno. Es por lo que la presente investigación está encaminada al estudio del fenómeno de licuefacción en la zona sur de la provincia de Guantánamo, específicamente en los municipios Imías, Maisí, Manuel Tames, San Antonio del Sur y Guantánamo.

Problema de la investigación: Necesidad de evaluar las condiciones ingeniero-geológicas para determinar si los suelos de la zona sur de la provincia Guantánamo son licuables ante un sismo de gran magnitud.

Objeto de estudio: Los suelos de la zona sur de la provincia Guantánamo.

Objetivo general: Evaluar las condiciones ingeniero-geológicas y el efecto de sitio de los suelos de la zona sur de la provincia Guantánamo para determinar el potencial de licuefacción.

Objetivos específicos:

1. Caracterizar las condiciones ingeniero-geológicas del área de estudio.
2. Aplicar un sistema de indicadores geotécnicos y sismológicos que permitan determinar escenarios licuables.
3. Delimitar los sectores que pudieran licuar ante un sismo de gran magnitud.

Hipótesis:

Si se caracterizan los suelos a partir de las condiciones ingeniero-geológicas entonces será posible determinar el potencial de licuefacción y el efecto de sitio ante un sismo de gran magnitud y delimitar los escenarios susceptibles.

Novedad de la investigación:

❖ Por primera vez se hace una caracterización ingeniero geológica de los suelos de los municipios Guantánamo, San Antonio del sur, Maisí, Imías y Manuel Tames, que permite la evaluación preliminar del potencial de licuefacción.

ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEORICO CONCEPTUAL

Introducción

La licuefacción del suelo es uno de los temas más interesantes y complejos inducidos por terremotos. Normalmente se presenta en los suelos granulares finos sueltos, en los que el espacio entre partículas individuales es rellenado con agua. Como consecuencia de los poros cubiertos totalmente con agua, se ejerce una presión sobre las partículas del suelo circundante. Cuando un terremoto afecta al suelo, las partículas de la superficie tienden a reagruparse hacia un estado compacto causando que el agua ejerza una fuerte presión para empujar afuera los espacios vacíos que estaban ocupados. Debido a que el promedio de movimientos es, por lo general, rápido así como el promedio por el cual el agua puede salir o escapar del suelo, la presión del agua en los espacios se incrementa (exceso de presión de agua) tendiendo a empujar las partículas del suelo unas con otras. Debido a que las partículas ya no se encuentran en estrecho contacto unas con otras, la resistencia del suelo decrece, produciéndose una falla en el caso que el suelo no pueda soportar más la carga impuesta. Bajo tal tensión en las fallas y el tiempo para disipar este exceso de presión de agua, las partículas colapsan al interior de una formación compacta mientras que el exceso de agua fluye por un camino hacia la superficie. Esto sucede en simultáneo con el asentamiento que logra el depósito por el estado de densidad luego de la falla. (Herrera-Delfín, 2015).

Conceptos de licuefacción

- Vallejo en 2002, define como suelos licuables, aquellos suelos con contenido areno- limoso, en estado saturado, al experimentar esfuerzos cortantes anómalos y rápidos, permiten un aumento de las presiones intersticiales (por falta de drenaje), en que la resistencia al corte desaparece y el material se comporta como líquido, dando lugar a movimientos verticales y horizontales de su masa, que se traducen en deslizamientos, o en grandes asentamientos.
- Rodríguez, Audemard, & Rodríguez, Departamento de Ciencias de la Tierra, Fundación Venezolana de Investigaciones sismológicas comentan que

la licuefacción de sedimentos es la transformación a estado líquido de materiales granulares, saturados como consecuencia del incremento de la presión de poros.

➤ Colectivo de Autores de la Sección de Sismología, Vulcanología y Exploración Geofísica, Geología. 2003. San Pedro, Costa Rica expresa que la licuefacción de los suelos es un fenómeno en el cual los terrenos saturados de agua, particularmente sedimentos recientes como arena o grava pueden perder mucha de su fuerza o firmeza y fluyen ante la acción de esfuerzos provocados por temblores. Esto aumenta significativamente el daño a estructuras como casas y edificios, las cuales pueden ser desplazadas, hundidas o volcadas, aun cuando permanezcan intactas estructuralmente.

➤ La licuefacción de sedimentos es la “disminución de la resistencia al corte en un suelo no cohesivo saturado, debido al aumento de la presión intersticial durante un terremoto, pudiendo llegar a producirse la anulación de la presión efectiva entre sus partículas” lo que hace que el terreno fluya como si fuera un líquido. (Colectivo de Autores, 2012)

➤ Según (Rodríguez Pascua, 1997), el suelo completamente saturado, con arenas sin cohesión, generalmente limpias, que pueden incluir algo de gravas puede ser licuefactado durante la sacudida sísmica.

Factores que influyen en la licuefacción

Los estudios de la licuefacción sísmica llevaron a postular las siguientes condiciones:

➤ Si la presión de poros inducida por la acción dinámica o cíclica del terremoto alcanza el valor de la presión de confinamiento, el suelo alcanzará el estado de licuefacción inicial.

➤ Si la arena sometida a acción cíclica alcanza el 20% de deformación se alcanzará la licuefacción total. (Seed, 1966)

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

1- Distribución del tamaño de los granos. La arena uniformemente graduada, con granos muy gruesos tiene mayor probabilidad de licuarse,

mientras que las arenas limosas y gravas lo hacen bajo cargas cíclicas muy severas.

- 2- **Profundidad de las aguas subterráneas.** Mientras menor sea el nivel de las aguas subterráneas, mayor será la probabilidad de que ocurra licuefacción.
- 3- **Densidad.** El suelo puede densificarse cuando está sujeto a una carga cíclica, reduciendo su volumen de suelo- agua e incrementando la presión intersticial si los poros intergranulares se llenan de agua. Cuando esto ocurre habrá menor posibilidad de que se produzca su licuefacción.
- 4- **Peso del recubrimiento y profundidad del suelo.** Las tensiones entre partículas aumentan a medida que aumenta la presión del recubrimiento y mientras mayor sea dicha tensión menor será la probabilidad que ocurra licuefacción. Por lo general, ocurre a profundidades menores de 9 metros; rara vez a mayores de 15 metros.
- 5- **Amplitud y duración de la vibración del terreno.** La licuefacción de suelos bajo condiciones de tensión provocadas por un terremoto puede ocurrir ya sea: cerca del epicentro si son pequeños o moderados, o a cierta distancia si son moderados a severos.
- 6- **Edad del depósito.** Los suelos jóvenes (menos de 3.000 años) son débiles y no cohesivos, de modo que tienen mayor probabilidad de licuarse que aquellos más antiguos donde actuaron procesos como compactación y cementación que incrementaron su resistencia.
- 7- **Origen del suelo.** El suelo depositado por procesos fluviales se sedimenta fácilmente y sus granos tienen poca probabilidad de compactarse, de modo que se licuarán con facilidad. Los depositados glaciales, generalmente ya son bastante densos y tienen menor probabilidad de licuarse.

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 W_n
- 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
- Humedad natural/ Límite líquido $w/LL > 0,9$

A este criterio se le conoció como criterio chino.

De igual manera, se señalan otros factores que influyen en 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 otro lado, (Wang, 1979) considera que si un material granular tiene menos del 15 % de finos (arcillosos) y el límite líquido (LL) es mayor que 35 % y el contenido natural de agua es menor de 90 %, estos materiales también se consideran no licuables.

Otras de las condiciones necesarias para que tenga lugar este modo de comportamiento del suelo son que el nivel freático 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 de las propiedades más importante que caracterizan los suelos licuefactibles es el bajo grado de compactación, es decir $N < 10$ para profundidades < 10 m y $N < 20$ para profundidades > 10 metros (González, 2002).

La susceptibilidad a la licuefacción de los suelos depende de varios parámetros como son, (Carrillo, 2007):

- Densidad relativa.
- Radio de sobre consolidación.
- Curva granulométrica / cohesión.

Estudios estadísticos sobre licuefacción de los suelos han sido abandonados para ampliar la caracterización de susceptibilidad de estos a partir de investigaciones más engorrosas y de mayor detalle. En estos casos se realizan muestreos los cuales permitirán proponer las zonas susceptibles a licuefacción; para esto se tienen en cuenta los siguientes parámetros, obtenidos a partir de muestreos ingeniero - geológicos en zonas importantes.

Son susceptibles a licuefacción bajo determinadas condiciones:

- Sedimentos arenosos y arenas.
- Suelos arcillosos (Dependiendo del tamaño de los granos).

No son susceptibles a licuefacción bajo ningún caso:

- Suelos gravosos mayor que 2 mm
- Suelos arcillosos (Dependiendo del tamaño de los granos).

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).

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 1: 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” (1979)
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) Iai <i>et</i>

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. Un 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 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.

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 ocurrió 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^o 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.

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.

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). (Figura 1).



Figura 1: Foto. Licuefacción de los suelos en calle La Alameda, en Santiago de Cuba. Terremoto del 3 de Febrero de 1932. Tomado de Chuy, 2002.

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.

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 solicitación sísmica en cercanía de los

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

En el trabajo “Zonación preliminar de la licuefacción de los suelos en la región de Cuba Oriental” (Rosabal, 2011) se expone una zonación de la licuefacción de los suelos, basada en el estudio de diferentes factores que inciden en la ocurrencia de la licuefacción: suelos susceptibles, intensidad sísmica, aceleración horizontal efectiva, topografía, reportes históricos de licuefacción, entre otros, se identifican las zonas que se caracterizan a licuar y zonas donde es baja o no existe la licuefacción de los suelos. Estos estudios constituyen una primera representación de la licuefacción a escala regional en Cuba, principal aporte de la investigación. La investigación se ubica en el Nivel o Grado I de Zonación (TC-4, 1999). Estos estudios regionales identifican zonas susceptibles a licuar. Es necesario evaluar la potencialidad de la licuefacción empleando información ingeniero-geológica ya que la misma no se hizo en esta investigación y no se puede hablar de licuefacción teniendo en cuenta solo la información geológica, desembocaduras de ríos, antiguos cauces o actual llanura fluvial, principal deficiencia encontrada en el trabajo.

Las investigaciones realizada por (Ordaz-Hernández, 2013) están enfocada en la evaluación de la susceptibilidad a la licuefacción de los sedimentos cuaternarios del emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal, provincia de Artemisa, Cuba. Los resultados fueron de acuerdo con la aplicación del criterio de Brandes (2003), la ciudad de San Cristóbal se emplaza mayormente sobre sedimentos no susceptibles a licuar (93 % de la superficie), los sedimentos medianamente susceptibles cubren el 6 % del área y los susceptibles apenas el 1 %. De forma general, solo en pequeños sectores coincidieron las dos condiciones (límite líquido y fracción de arcilla) para catalogarlos como suelos susceptibles. En estos sectores la columna de suelos está conformada, predominante, por arenas, formando estratos de hasta dos metros de espesor, intercalados con lentes de arcilla de 1,5 m. Ligeramente más propagados espacialmente se encuentran los suelos medianamente susceptibles. Estos coinciden aproximadamente con las terrazas de inundación del río San Cristóbal, en el extremo noreste del área, aunque también se identificaron en algunos sectores dentro de la Fm. Guane.

En el trabajo de diploma titulado “Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el Consejo popular Guiller món Moncada del municipio Santiago de Cuba por (Herrera-Delfin, 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. Esta investigación es de gran importancia ya que es actual y demuestra con datos la probabilidad de ocurrencia del fenómeno ante sismos de magnitud 7.5 y superiores. Se demostró que para magnitudes menores es muy poco probable la manifestación de la licuefacción de los suelos.

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

Los sismos en Cuba como el elemento disparador de la licuefacción de 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 2 se representa la sismicidad registrada en la región del Caribe.

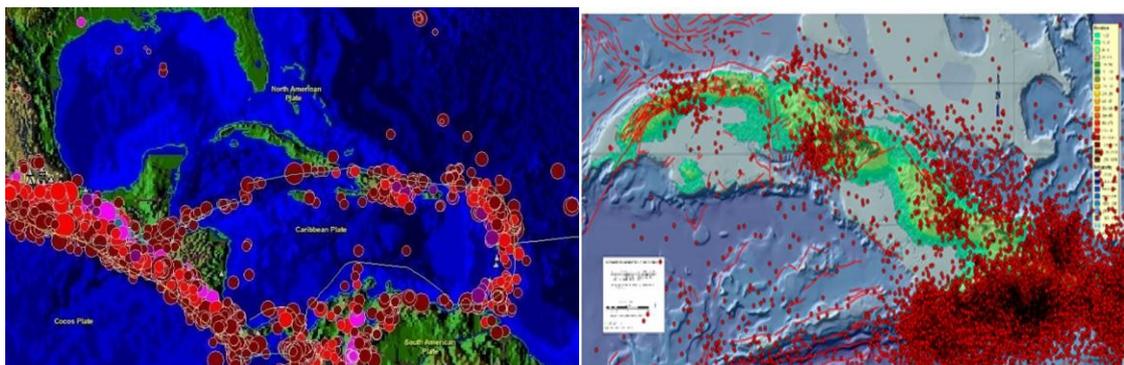


Figura 2: Izq. Sismicidad del Caribe y Centroamérica en los últimos 10 años. Dcha. Sismos registrados desde 1998-2014. Fuente Informe del CENAIIS.

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 3 y 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 3).

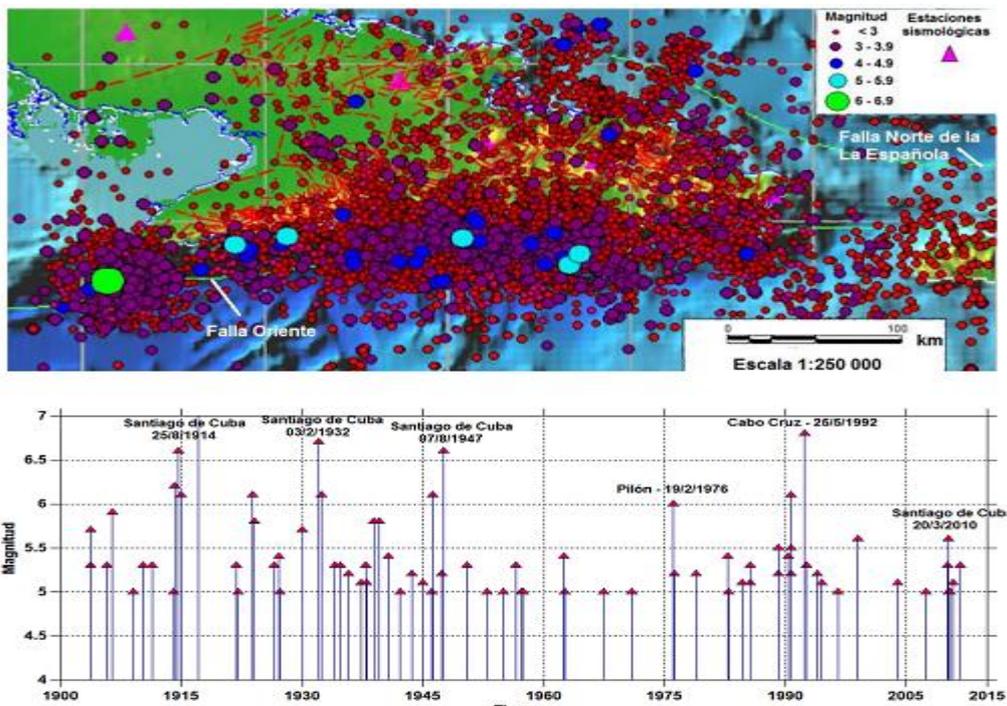


Figura 3: Ocurrencia de los terremotos de magnitud mayor a 5 reportados en la región suroriental de Cuba desde 1900. Fuente CENAIIS.

Efecto de sitio

Las condiciones o efectos locales de sitio son de los factores más influyentes en la distribución de daños durante sismos, de allí la importancia de adelantar estudios tendientes a determinar el comportamiento dinámico de los suelos y su respuesta cuando están sometidos a sismos y cargas dinámicas.

➤ La respuesta local de sitio puede ser evaluada por métodos teóricos y empíricos. Los primeros permiten un análisis de los distintos parámetros del problema, aunque requieren una descripción detallada de las capas del suelo que conforman el estrato y de las fuentes que generan los sismos, las cuales en algunos casos pueden ser muy complejas y por lo tanto, se dificulta la construcción realista de un modelo matemático. Los métodos empíricos se basan en registros de datos sísmicos en el sitio de interés, de tal manera que se puedan determinar amplificaciones relativas y períodos dominantes de vibración. A diferencia del método anterior, no se requiere una descripción detallada de las capas del suelo, pero se necesita tener una gran cantidad de registros o información sísmica, lo cual es posible en regiones donde se tenga una alta sismicidad y se cuente con redes de acelerógrafos o equipos de registro sísmico. En el caso de no contar con mucha información sísmica, se debe recurrir al uso de otros métodos. Entre las alternativas para obtener datos sísmicos de una región en particular se encuentran las microtrepidaciones. (Tomado de internet, Artículo: 239, publicado el: 2011-06-21 15:47:46).

Conceptos de efecto de sitio

➤ Es la amplificación del movimiento sísmico esperado, dadas las condiciones geológicas superficiales en el sitio de interés. (Figura 4).

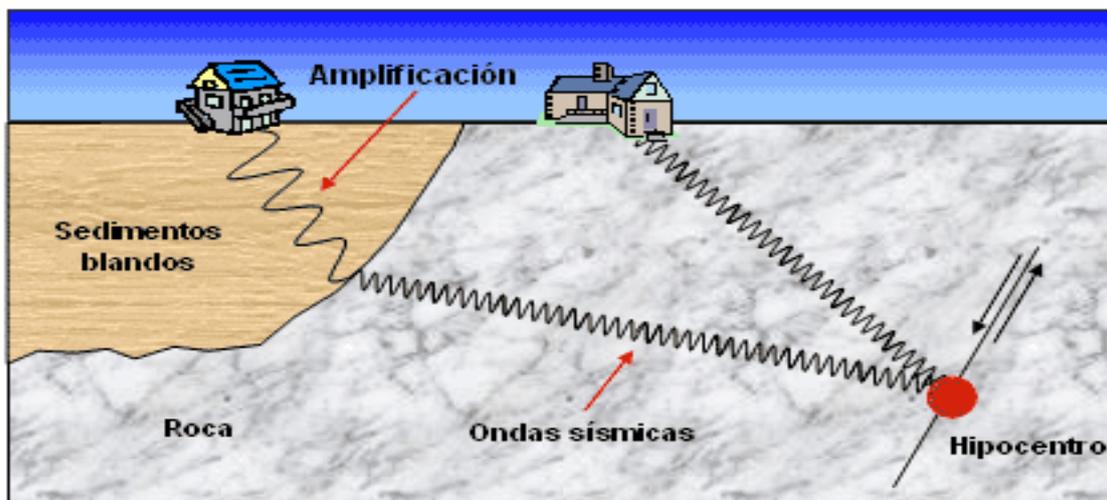


Figura 4: Ejemplificación del efecto de sitio. (Tomado de Ecured. 2016).

- Movimiento del terreno debido a un sismo en un punto dado, depende naturalmente de los parámetros asociados a la fuente sísmica y de la atenuación de la energía sísmica conforme que se propaga desde la fuente al sitio de interés.
- Los efectos de sitio son modificaciones en amplitud, duración y contenido frecuencial que experimentan las ondas sísmicas cuando llegan a la superficie. Entre más blando sea el tipo de suelo que exista bajo la estación, mayor será la amplificación. (Tomado de internet, Artículo: 239, publicado el: 2011-06-21 15:47:46).

CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS DE LA REGIÓN DE ESTUDIO.

Introducción

El presente capítulo tiene como objetivo destacar las características físico – geográficas y geológicas de la región de estudio. Además, obtener una información general de las condiciones ingeniero-geológicas, climatológicas, tectónicas y sísmicas existentes en la región.

Características generales de la Zona Sur de la Provincia Guantánamo.

1.1 Ubicación geográfica del municipio Guantánamo.

1.2 Relieve

1.3 Clima

1.4 Geomorfología

1.6 Características hidrogeológicas.

1.6 Condiciones ingeniero geológicas

1.7 Geología regional

1.8 Sísmicidad y régimen sísmico

1.9 Desarrollo económico social

1.1. Ubicación geográfica del municipio Guantánamo.

La provincia Guantánamo está localizada en el extremo más oriental de la Isla de Cuba, posee una extensión superficial de 6 186,2 km², lo que representa el 5,58 % de la superficie de todo el país. Limita hacia el norte con la provincia Holguín y el océano Atlántico, al sur con el Mar Caribe, al este con el Paso de los Vientos que separa la Isla de Cuba con la República de Haití, y al Oeste

con la provincia Santiago de Cuba. (Tomado de Ecured. 2016). (Figura 5).

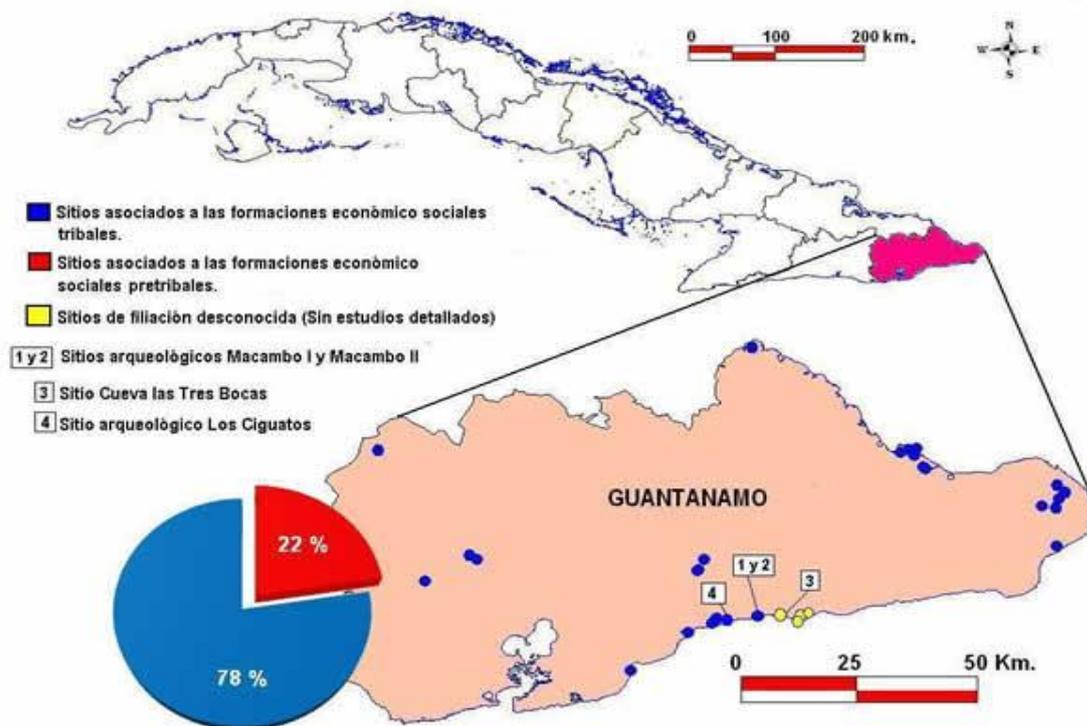


Figura 5: Ubicación geográfica de la provincia Guantánamo. (Tomado de Ecured. 2016).

1.2. Relieve

La provincia está formada por dos grandes regiones naturales: El Valle de Guantánamo, con relieve llano y una extensa Bahía de Bolsa catalogada como la tercera en superficie a nivel mundial. Presenta importantes ríos que conforman la tercera cuenca hidrográfica priorizada a nivel nacional, llamada Guantánamo - Guaso donde se concentra el 80 % de la población del territorio. Los suelos más productivos son los pardos y aluviales dedicados a la actividad agropecuaria: caña de azúcar, cultivos varios, zonas para el desarrollo ganadero y forestal.

La zona montañosa abarca el 75 % del territorio, donde se localiza el Macizo Sagua - Baracoa, uno de los más extensos y atractivos del país. Al Norte se localiza una franja costera estrecha con extensos cocales cortada por la desembocadura de numerosos ríos, por el Sur se extiende una franja costera con presencia de valles aluviales intramontanos donde se practica la actividad agropecuaria, separados de la línea costera por cerros en forma de terrazas

marinas. En el extremo Este se localiza la meseta de Maisí con uno de los sistemas de terrazas marinas mejores delineadas a nivel mundial, con numerosas cuevas de gran belleza (Tomado de Ecured. 2016). (Figura 6).

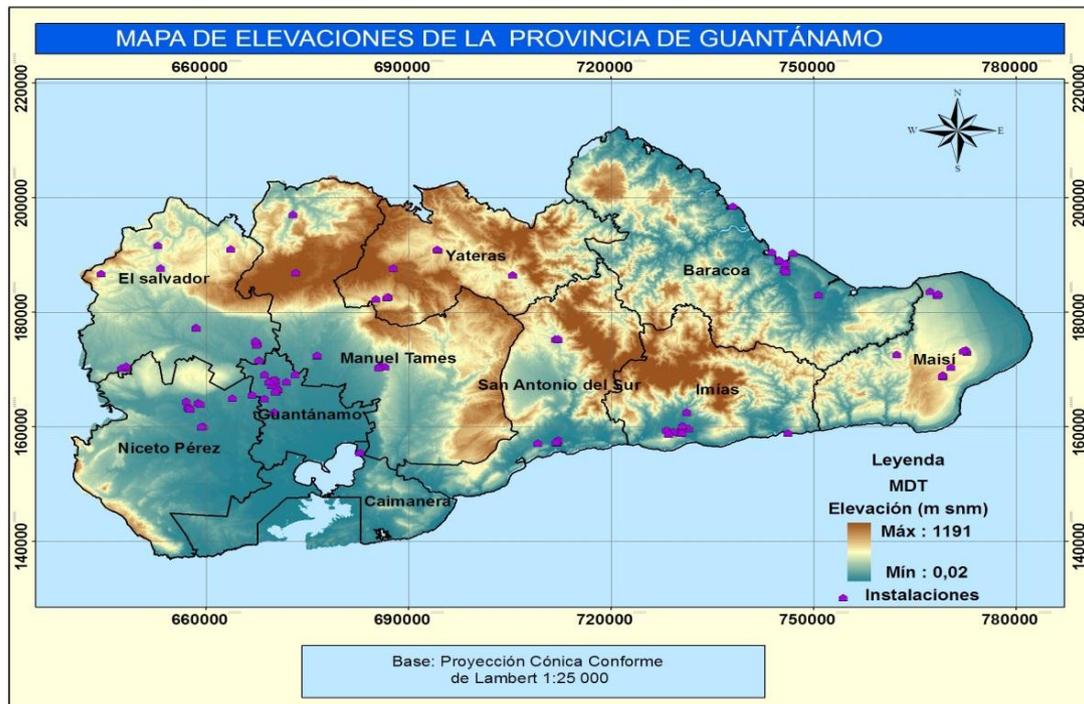


Figura 6: Mapa de elevaciones de la provincia Guantánamo.

1.3. Clima

Las condiciones climáticas presentan particularidades interesantes que las diferencian del resto de la isla, ya que en su vertiente norte del macizo montañoso Sagua - Baracoa, se registran los mayores valores de precipitación anual del país por encima de 2 200 mm, y en la vertiente sur del macizo los menores índices de pluviosidad a nivel de nación que no rebasan los 600 mm anuales. La temperatura media anual fluctúa entre los 25 °C y los 26,8 °C en la zona llana, y entre 20 °C y 24 °C en la parte montañosa, y la humedad relativa oscila del 70 al 86 %.(Tomado de Ecured. 2016).

1.4. Geomorfología

Se destaca hacia el sur del territorio una franja costera de amplitud variable, existiendo en ella una amplia manifestación del carso costero donde el lapíes (diente de perro) ocupa una gran parte del litoral. En el litoral se destacan importantes playas de la costa sur guantanamera como Yacabo Abajo, Imías,

Tacre y Cajobabo, existen otras más pequeñas como Boquerón, Yime, Managuaco y Guayacanes. Son típicos del relieve del sur del territorio los cerros litorales los cuales poseen una altura variable, teniendo su ladera norte escarpada y la meridional aterrazada (Rodríguez Prado, S.1981).

1.5. Características Hidrogeológicas.

La vertiente sur donde se concentra la mayor densidad de población y donde existen las mejores tierras para la agricultura, los ríos por lo general son de corto recorrido y escaso caudal. El potencial hidráulico total de la provincia es de los más elevados del país y se calcula que asciende a 3892 millones de m³, correspondiendo la mayor parte a las aguas superficiales, ya que las subterráneas son escasas producto a las características del relieve y a la naturaleza poco permeable de las rocas del subsuelo. En la actualidad cuenta con un total de 7 embalses, 5 derivadoras y 9 micropresas, cuya capacidad de almacenamiento total asciende a 349.0 millones de m³, y que están vinculadas en lo fundamental para el abasto poblacional y para los fines de irrigación. (Tomado de Ecured. 2016).

La profundidad de yacencia de las aguas dentro de los límites de la región varía desde 0.5 y 1-3 m en la parte sur (hacia la bahía), y hasta 3-5 m y más al avanzar hacia el Norte. Generalmente por las particularidades hidráulicas de este complejo acuífero predominan las aguas subterráneas freáticas. Se consideran los valores promedios de los gastos entre 3-5 l/s. (Arencibia, E. 2002).

1.6. Condiciones ingeniero – geológicas.

En el área de estudio en ocasiones se presenta en los suelos el fenómeno de saturación, en esto influyen las corrientes de aguas subterráneas que existen, hay otras zonas donde los suelos no están saturados. Se distinguen dentro del territorio capas. La capa vegetal está compuesta por (OH) arcilla orgánica de alta plasticidad y su espesor varía entre los 0.10 y 0.40 m. Predomina en la capa 1 sedimentos CL arcilla de baja plasticidad y la capa tiene un espesor que varía desde los 0.30 hasta los 1.60 m. En la capa 2, 3 y 4 encontramos GM4 y

GM3 lo cual es una arenisca y aleurolitas con cemento calcáreo variando el grado de meteorización en el caso de GM4 es alto grado y GM3 es medio, el espesor de la capa 2 varía entre los 0.60 y 10 m, mientras que el de la 3 varía entre 0.34-10 m, la cuarta capa presenta un espesor variable entre 0.70-3.40 m.

1.7. Geología regional.

La zona Sur de la Provincia Guantánamo entra dentro del sector geológico de Cuba Oriental donde aparecen rocas de diferentes edades y tipos, como rocas del Cretácico inferior- superior destacándose las brechas, conglomerados, esquistos metavulcanógenos, tobas, diabasas, andesitas, basaltos; todas estas se localizan fundamentalmente hacia la región septentrional.

Aparecen hacia la zona de Imías rocas características del eoceno medio como areniscas, calizas, pedernales, conglomerados, brechas, olistostomas y también rocas del eoceno medio superior, del plioceno superior y del pleistoceno inferior, las principales formaciones son San Ignacio, Sierra del Purial, Maquey, Charco Redondo.

Hacia el municipio Manuel Támes, Guantánamo y San Antonio del Sur, aparece la formación San Luis, representada por intercalaciones rítmicas de areniscas aleurolitas calcáreas, margas y subordinadamente calizas y conglomerados polimícticos.

En el litoral las rocas son del pleistoceno medio-superior seco donde hay arcillas, arenas, limos, calcarenitas y calizas. Todas estas rocas de diferentes edades se agrupan en diferentes formaciones geológicas siendo las más representativas: Sierra del Purial, Río Macío, Maya, Jaimanitas, San Ignacio, etc. (Colectivo de autores, Léxico Estratigráfico. 2013).

Principales formaciones presentes en la región.

Formación San Luis: 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. Edad Eoceno Medio, parte alta - Eoceno Superior. (Colectivo de autores, Léxico Estratigráfico. 2013). (Anexo 1).

Formación Sierra del Purial: Andesito-basaltos y basaltos, principalmente tobas y lavobrechas, andesidacitas, areniscas polimícticas, areniscas derivadas de granitoides e intercalaciones y lentes de calizas. Estas rocas se encuentran metamorizadas en condiciones de muy bajo grado y baja presión, en las facies de esquistos verdes. Los colores son de tonalidades grises, verdes y hasta negros. Edad Cretácico Inferior (Aptiano) - Cretácico Superior (Campaniano). Tiene un espesor mayor de 1 000 m. (Colectivo de autores, Léxico Estratigráfico. 2013). (Anexo 1).

Formación Maquey: Alternancia de areniscas, limolitas y arcillas calcáreas de color gris y margas de color blanco a crema, que contienen intercalaciones de espesor variable de calizas biodetríticas, arenáceas y gravelíticas de colores blanco amarillo y crema, ocasionalmente amarillo grisáceo. La estratificación es fina a media, menos frecuentemente gruesa o masiva. Algunos horizontes, particularmente de limolitas y calizas biodetríticas, son fosilíferos, en los que abundan grandes lepidocyclinas. Otros horizontes contienen yeso, lignito y restos vegetales lignitizados. Su espesor es mayor de 700 m. Edad, Oligoceno Superior - Mioceno Inferior parte baja. (Colectivo de autores, Léxico Estratigráfico. 2013). (Anexo 1).

Formación Yateras: Areniscas de grano fino, conglomerados de cemento terrígeno, con clastos de calizas biodetríticas, calizas arrecifales, alternancia de

calizas detríticas, biodetríticas y biógenas, de grano fino a grueso; estratificación fina a gruesa o masivas, muy duras, de porosidad variable, a veces aporcelanada. Por lo general, la coloración es blanca, crema o rosácea, menos frecuentemente amarronada (carmelitosa). Es frecuente la presencia de grandes foraminíferos (lepidocyclinas) en las calizas de la unidad. Su espesor oscila entre 160 m y 500 m. Edad, Oligoceno Superior - Mioceno Inferior, parte baja. (Colectivo de autores, Léxico Estratigráfico. 2013). (Anexo 1).

Formación Charco Redondo: Calizas compactas organodetríticas, fosilíferas, de color variable, predominando los tonos blancos a grises verdosos. En la parte inferior del corte, son frecuentes las brechas, donde predomina la estratificación gruesa, mientras que en la parte superior predomina la estratificación fina. Edad Eoceno Medio y tiene un espesor que oscila entre los 50 m y 200 m. (Colectivo de autores, Léxico Estratigráfico, 2013). (Anexo 1).

1.8 Sismicidad y régimen sísmico.

El extremo oriental de Cuba también es afectado por la sismicidad que se genera en la falla conocida como Norte de la Española, la cual es la continuidad de la zona de subducción de las Antillas Menores y es la responsable de la sismicidad que se genera al norte de República Dominicana y Haití. La falla Oriente y la falla Norte de la Española constituyen las principales fallas activas de primer orden donde pueden ocurrir sismos fuertes que afecten al archipiélago cubano. (Figura 7).

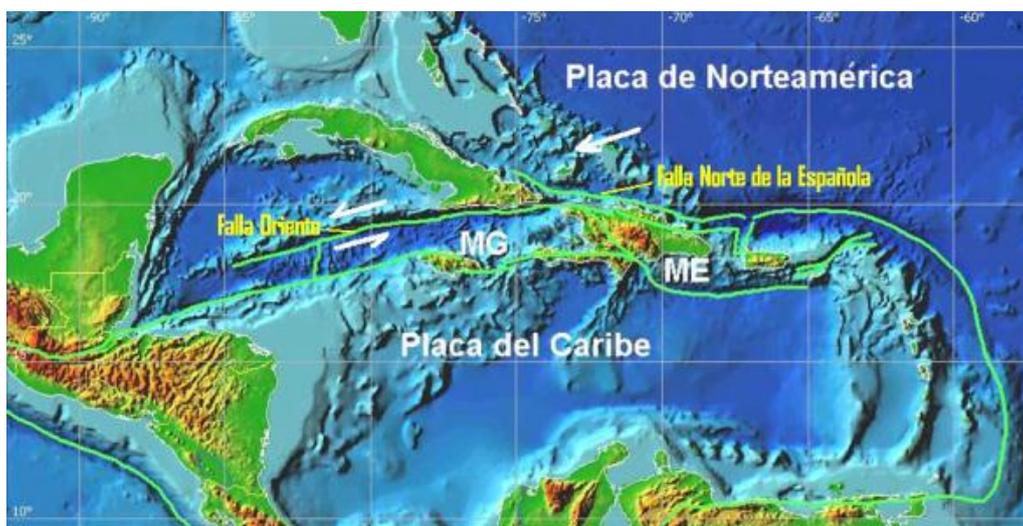


Figura 7. Contexto geodinámico donde se encuentra el archipiélago cubano (MG - Microplaca de Gonave). (Tomado de Artículo del CENAIIS).

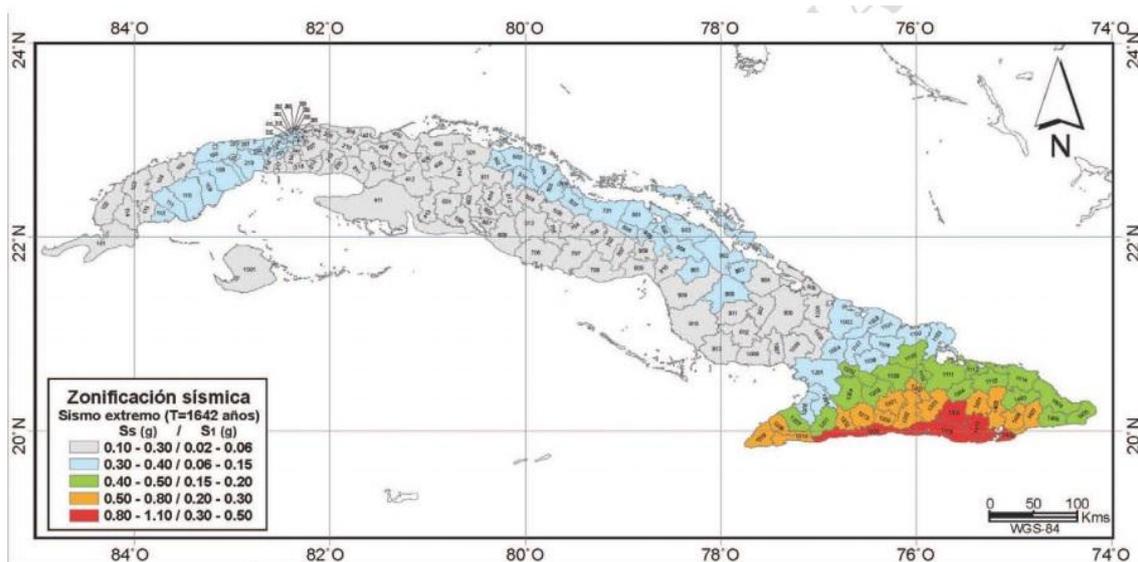


Figura 8: Mapa de zonificación sísmica para la República de Cuba. (Tomado de Norma para Construcciones sismorresistentes).

1.9 Desarrollo económico-social.

El desarrollo económico de la región descansa fundamentalmente en la agricultura, así como en otras ramas secundarias como son: industria ligera, alimenticia, sedero mecánica, etc. La parte agropecuaria descansa fundamentalmente en el sector azucarero donde se cultiva la caña de azúcar en las partes bajas de la región localizándose cultivos cítricos en el municipio Niceto Pérez. El sector ganadero, se localiza fundamentalmente en los municipios Manuel Tames y Guantánamo logrando transformar genéticamente gran parte del ganado vacuno en ganado de marcada características lechera, debiendo destacarse los significativos avances obtenidos en los servicios de Veterinaria. En la región se desarrollan otros cultivos de importancia, como son: viandas y vegetales, así como hacia la zona montañosa el cultivo del café.

Por otro lado el campo industrial, la producción de materiales de construcción se ha incrementado notablemente con las instalaciones de capacidades de producción tales como los de tubos y piezas de barro, carpintería etc. También se produce prefabricado, siendo destinado este a construcción de viviendas, centros educacionales y obras agropecuarias. Socialmente la región presenta buenas condiciones, la rama educacional ha incrementado notablemente las actividades de la educación técnica y profesional, la formación de maestros, así como la enseñanza universitaria, aparejadamente se incrementa el desarrollo

cultural, deportivo y científico. La rama de la cultura cuenta para su difusión con una emisora local, también con unidades o equipos de proyección que brindan esta actividad en las zonas rurales de la región, así como sales-teatros, salones de exposición, museos, bibliotecas, librerías etc. Los servicios de salud pública están al alcance de toda la población, aun en las zonas montañosas, donde se cuenta con puestos médicos rurales, etc. En la región se encuentran 5 hospitales, diversos policlínicos, además de la dotación de camas a los dispensarios de las escuelas en el campo (Rodríguez Prado, S.198)

CAPITULO II: METODOLOGÍA PARA ESTUDIAR EL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN

Introducción

El presente capítulo tiene como fin elaborar la metodología para realizar el estudio al área de interés a partir de las etapas de investigación (búsqueda bibliográfica, trabajos de campo y trabajos de gabinete). Se brinda un resumen de las metodologías para el estudio del potencial de licuefacción teniendo en cuenta las condiciones ingeniero geológicas y sismológicas del medio.



2.1 Metodología de la investigación

Primera Etapa: Revisión bibliográfica

En esta etapa se realizó la recopilación de la información recogida en trabajos de diplomas que abordan el tema, artículos publicados en Internet u otros sitios Web de interés, en revistas y libros, etc. Además la utilización de informes en el archivo de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de Santiago de Cuba permitió una comprensión mejor de las condiciones del área de estudio. Toda esta información permitió un buen desarrollo del trabajo. El método seguido fue el Método Histórico lógico y síntesis.

Segunda Etapa: Procesamiento de la información

En esta etapa se realizó el procesamiento de los datos de las perforaciones realizadas de un gran número de obras en los municipios Manuel Tames, Imías, Maisí, San Antonio del Sur y Guantánamo por parte de la ENIA e INVESCONS Santiago de Cuba. Las perforaciones se realizaron años atrás, es por ello que no pudimos presenciar las perforaciones de las calas, no obstante, podemos describir los trabajos realizados después de un profundo estudio. Las calas se perforaron con máquina tipo Mark V de fabricación Inglesa, por el método de perforación vertical a percusión con selección de testigos mediante la cuchara cubana o tubo dividido de 73 mm de diámetro y 460 cm de longitud lo que conllevó a la obtención de datos reales en cuanto a las propiedades geotécnicas del suelo, el conocimiento del nivel freático y la litología presente.

Tercera Etapa: Interpretación de la información

Todos los datos primarios obtenidos en los trabajos de campo (perforaciones, reconocimiento geológico del área, descripción y muestreo, pruebas hidrogeológicas y observaciones sistemáticas) y de laboratorios (ensayos de granulometría y límites de atterberg,) son expresados mediante el análisis del nivel freático, elaboración del esquema ingeniero geológico a partir de las propiedades físico mecánicas del suelo, realización del cálculo del factor de seguridad y la confección del esquema de susceptibilidad a la licuefacción.

2.2. Sistema de indicadores aplicados para el estudio de la susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en la región oriental de Cuba (propuesto por Fernández-Diéguez, 2015)

Para evaluar el potencial de licuefacción se llevó a cabo mediante un sistema de indicadores en el cual se unifican los parámetros propuestos por diversos autores (Seed & Idress, 1971, 1982); (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:

1. Condiciones geológicas

La primera condición que debe cumplir un suelo para que sea licuable es que corresponda a depósitos jóvenes (menos de 10.000 años) a las que pertenecen las formaciones del Cuaternario (Holoceno). Debe cumplir además que la relación entre el estrato licuable y el no licuable sea menor que 1. Coincidiendo también que el estrato de suelo no licuable encima del licuable debe ser menor de 8.0 m. Para la selección de los sectores se hace una búsqueda en el mapa geológico y se seleccionan las formaciones pertenecientes al cuaternario que están representadas por el color amarillo en sus diferentes variantes.

2. Sismicidad

Otro factor importante para que pueda licuar un suelo es la sismicidad, para ello se analiza la cercanía con una zona sísmica generadora capaz de generar sismos fuertes o magnitud mayor de 5,5 y las aceleraciones de las partículas lleguen a ser iguales o superior $0,2g/cm^2$. Para la selección se tiene en cuenta la norma: Construcciones Sísmo resistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción de Cuba de 1999 (propuesta 2013) en la que aparece un mapa con la zonación de las aceleraciones esperadas para cada municipio de

nuestro país, además de la tabla de peligro sísmico en las diferentes zonas del territorio nacional donde se muestra el 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 CENAI.

3. Profundidad del Nivel Freático

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

4. Condiciones ingeniero geológicas

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

Se tiene en cuenta:

- ❖ Por ciento de partículas finas ≤ 15
- ❖ Límite Líquido $\leq 35 \%$
- ❖ Contenido Natural de agua $> 0,9 LL$
- ❖ Índice de liquidez $< 0,75$
- ❖ Forma de las partículas. Principalmente redondas
- ❖ N de SPT < 20 golpes
- ❖ Compacidad relativa (Cr) $< 75\%$
- ❖ Uniformidad de la arena. $C_u < 5$

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

- ❖ Arena fina,
- ❖ Arena Media,
- ❖ Arena Limosa,
- ❖ Arena con bajo por ciento de arcilla
- ❖ Arena con bajo por ciento de materia orgánica o
- ❖ Arena con partículas.
- ❖ Sedimentos eluviales, llanuras aluviales y zonas de manglar.

5. Cálculo del Factor de seguridad para la licuefacción.

Calcular el Cyclic Stress Ratio (CSR)

Para determinar la resistencia a la licuefacción de los suelos arenosos y con contenidos de finos, la relación de tensiones cíclicas (CSR) se compara con la relación de resistencia cíclica (CRR), esta última se obtiene de correlaciones empíricas entre la relación de esfuerzos cíclicos requeridos para causar licuefacción y los valores de N (SPT) normalizados por profundidad y energía de los golpes del martillo (valores de $(N_1, 60)$). En la Figura 9 se muestran las curvas recomendadas por (Seed, et al.2003).

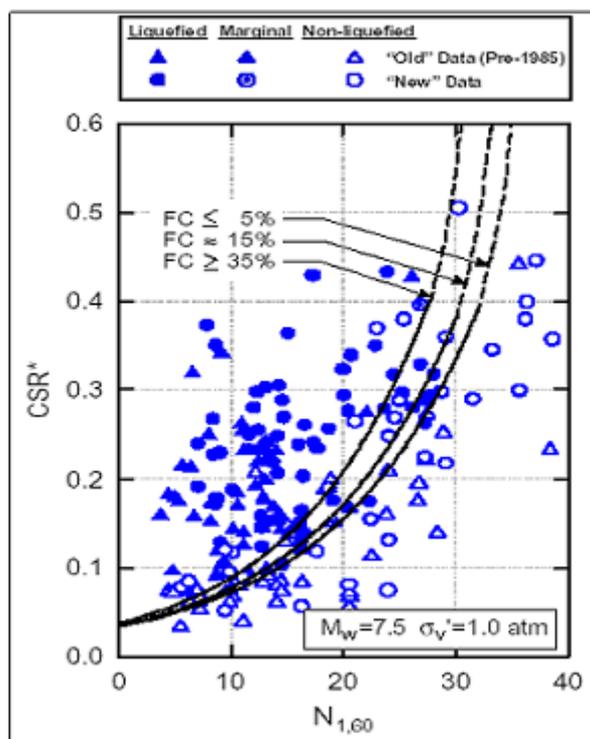


Figura 7: Relación entre razones de tensiones causantes de licuefacción y valores corregidos del SPT (para $M_w=7.5$ y $\sigma_v'=1.0$ atm) con ajuste de contenido de finos. (Fuente: Seed, et al 2003).

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:

- La excitación sísmica del estrato de suelo, expresada en términos de la relación de tensiones cíclicas promedio ($CSR = \tau_{pro} / \sigma'_{vo}$).
- 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 (amax / g) ($\sigma_{vo} / \sigma'_{vo}$) rd

Dónde:

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

amax: aceleraciones máximas generadas por un sismo de diseño.

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

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

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

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

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

z: profundidad por debajo de la superficie del suelo en 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

Una vez obtenido el resultado de CSR se compara con los valores de la figura 10 y se comprueba si es un estrato licuable o no.

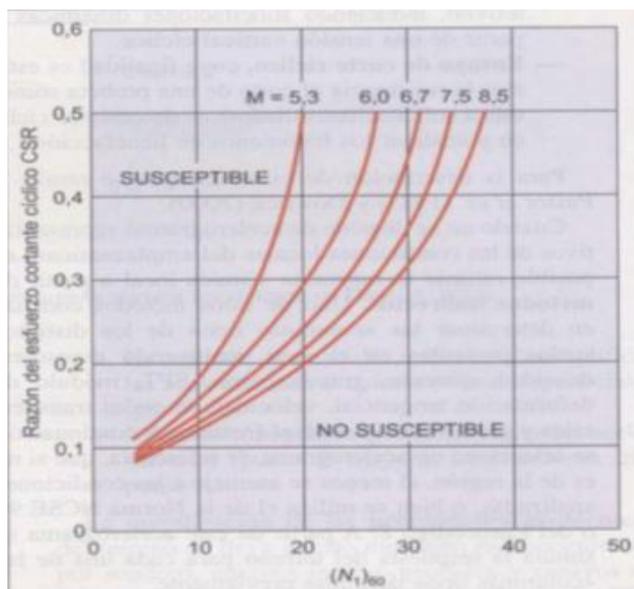


Figura 8: Susceptibilidad de licuefacción de un suelo en función de $(N_1)_{60}$ y la razón del esfuerzo cortante cíclico CSR (Ho et al., 1986) tomado de (González, 2002)

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 $(N_1)_{60}$, es decir el número de golpes suministrado al terreno, representado también por la letra N.

$N_{160} = (N_1)_{60}$ = El número de golpes de la prueba SPT normalizada a un esfuerzo geostático de 100 kPa y a la energía del martillo de 60%.

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

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

Esta ecuación es válida para los $(N_1)_{60} < 30$. Para $(N_1)_{60} \geq 30$, los suelos granulares limpios tienen el grado de compactación demasiado alto para sufrir la licuefacción.

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

$$N_1 = N \times C_N$$

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

Donde:

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

σ_v = tensión efectiva vertical en atmósferas

La resistencia del suelo queda representada por $(N_{1,60})$, la cual es la cantidad de golpes del SPT corregido para una presión de sobrecarga efectiva de 1 Ton/pie² ($\approx 1 \text{ kg/cm}^2$), y para una razón de energía del 60% de la máxima teórica.

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

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

Donde:

Tabla 2: Correcciones a SPT (Skempton, 1986).

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

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

2.3.1. Análisis de las condiciones geológicas del área de estudio.

Se realizaron los mapas de esquema geológicos por parte de la oficina de Geocuba Guantánamo de los cinco municipios estudiados: San Antonio del Sur, Guantánamo, Maisí, Imías y Manuel Tames. Esto permitió evaluar las condiciones geológicas, determinando las formaciones presentes en cada municipio y de acuerdo a las edades y sedimentos de cada una de ellas se delimitó cuáles eran las más expuestas a la ocurrencia del fenómeno de licuefacción.

2.3.2. Análisis del comportamiento de la sismicidad en el área de estudio.

Para llegar a las conclusiones de este indicador se revisó la norma para construcciones sísmo resistentes, requisitos básicos para el diseño y construcción. Dentro de esta se revisó el capítulo 4 donde se describen las zonas sísmicas del territorio nacional y se tomó la descripción de los municipios en estudio.

2.3.3. Análisis del comportamiento del nivel freático en el área de estudio

En la zona Sur de la Provincia Guantánamo, de manera general, aparecen los litotipos tales como arenas, arcillas, limos, areniscas, aleurolitas, margas,

calizas, conglomerados y rocas volcánicas, lo que permite la determinación del nivel freático con más facilidad partiendo de la observación del mismo cuando se realizaron las perforaciones en el área de estudio las cuales fueron ejecutadas con una máquina perforadora MARK V de fabricación británica por los métodos a percusión y rotario. Los datos se obtuvieron a partir de los antecedentes de investigación de las obras emplazadas en el área.

2.3.4. Análisis de las condiciones ingeniero geológicas

Se revisaron los informes ingeniero geológicos efectuados por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) y se seleccionaron las propiedades físicas y mecánicas por cada obra de los cinco municipios estudiados. Se confeccionó una base de datos con los principales parámetros que influyen para que un suelo sea licuable, entre los que se encuentran (Límite Líquido, Índice de Plasticidad, humedad natural, densidad húmeda y densidad seca, por ciento de partículas finas, cortante, saturación, compactación del suelo a partir del N de spt entre otras).

2.3.5. Análisis del cálculo del factor de seguridad para la licuefacción (FSL).

El FSL se calcula a partir de las formulas explicadas anteriormente y con los datos obtenidos de los informes ingeniero geológicos. Primero se calcula el CSR, luego CRR, y MSF.

Si el valor es menor o igual a 1 se considera que es un estrato licuable. Si los valores dieran relativamente mayor que 1 se puede considerar posible licuefacción siempre que el estrato inferior sea licuable. Teniendo en cuenta la magnitud del sismo el estrato puede licuar aunque en menor medida.

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

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

M_w: Magnitud del sismo de diseño.

El factor de escala de acuerdo con la magnitud de sismo se calculó para sismos de magnitud 6; 7; y 8. A continuación se muestran los resultados.

Magnitud del sismo	MSF
6	1,76
7	1,19
8	0.84

CAPITULO III: EVALUACION DEL SISTEMA DE INDICADORES PARA DETERMINAR EL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO.

Introducción

En este capítulo se validarán los indicadores propuestos para determinar si los escenarios propuestos son licuables o no ante un sismo de gran magnitud. Se llevará a cabo en los 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. No existen reportes de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en los municipios Imías, Maisí, Manuel Támes, San Antonio del Sur y Guantánamo. Se ha observado que la licuefacción ocurre frecuentemente en los mismos lugares cuando las condiciones del sitio se mantienen constantes, es por esto que la evidencia de la ocurrencia histórica de licuefacción, puede ser utilizada como prueba de susceptibilidad en un determinado lugar.

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

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

Se analizó además, la edad de los depósito. Las áreas que se estudiaron pertenecen a formaciones del Paleógeno donde los estratos son poco

consolidados y de poca densidad. Se tuvo en cuenta que los depósitos fueran de arena arcillosa, arena limosa, entre otras con poco contenido de finos que estuvieran uniformemente gradadas y limpias, compuestas de partículas redondeadas preferiblemente. Se analizó la posibilidad de que fueran muelles, tierra recuperada, canal de río abandonado, relleno límite entre las arenas y las tierras bajas, relleno sobre pantano o ciénaga y/o relleno de tierra recuperada por drenaje.

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 2 utilizamos perforación a percusión para la hincada de muestreador cuchara SPT (Penetración dinámica). Penetración estática del muestreado Shelbys (Presión hidráulica). Los diámetros utilizados son: 73, 89 y 108 mm Martillo 300 libras. Caída del martillo 18 pulgadas con Varillas 0.40, 1.50 y 3.00 m. Muestreadores: Shelbys, Obsterberg, Dennison. Muestras de cuchara, porta testigos doble tubo rígido y porta testigo simple.

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

3.2.1 Condiciones geológicas

Llevar a cabo un estudio ingeniero geológico de los municipios de la zona sur de la provincia Guantánamo, hace posible realizar evaluaciones sobre la licuefacción como fenómeno geológico secundario.

En el municipio Imías predomina la formación San Ignacio, compuesta por brecha polimíctica con fragmentos de esquistos verdes, filitas y serpentinitas, en una matriz arcillosa. Está presente además la Formación Sierra del Purial la cual presenta areniscas derivadas de granitoides e intercalaciones y lentes de calizas. La formación Maquey se presenta con alternancia de areniscas, limolitas y arcillas calcáreas de color gris y margas de color blanco a crema, que contienen intercalaciones de espesor variable de calizas biotriticas, arenáceas y gravelíticas de colores blanco amarillo y crema, ocasionalmente

amarillo grisáceo. La Formación Charco Redondo tiene calizas compactas organodetríticas, fosilíferas, de color variable, predominando los tonos blancos a grises verdosos, poco probable a que exista algún fenómeno de licuefacción. En menor porción se encuentran rocas del grupo El Cobre donde, las rocas más abundantes son: tobas, desde aglomeráticas hasta cineríticas, lavas, lavas brechas y aglomeráticas, de composición andesítica, andesito-dacítica y dacítica, raramente riolítica, riodacítica y basáltica. En su constitución también participan tobas cineríticas, tufitas, tobas calcáreas, calizas tobáceas, areniscas polimícticas y vulcanomícticas, así como. Hacia la zona sur hay depósitos aluviales los cuales son vulnerables a la ocurrencia del fenómeno. (Colectivo de Autores, Léxico Estratigráfico de Cuba, 2013). (Figura 11).

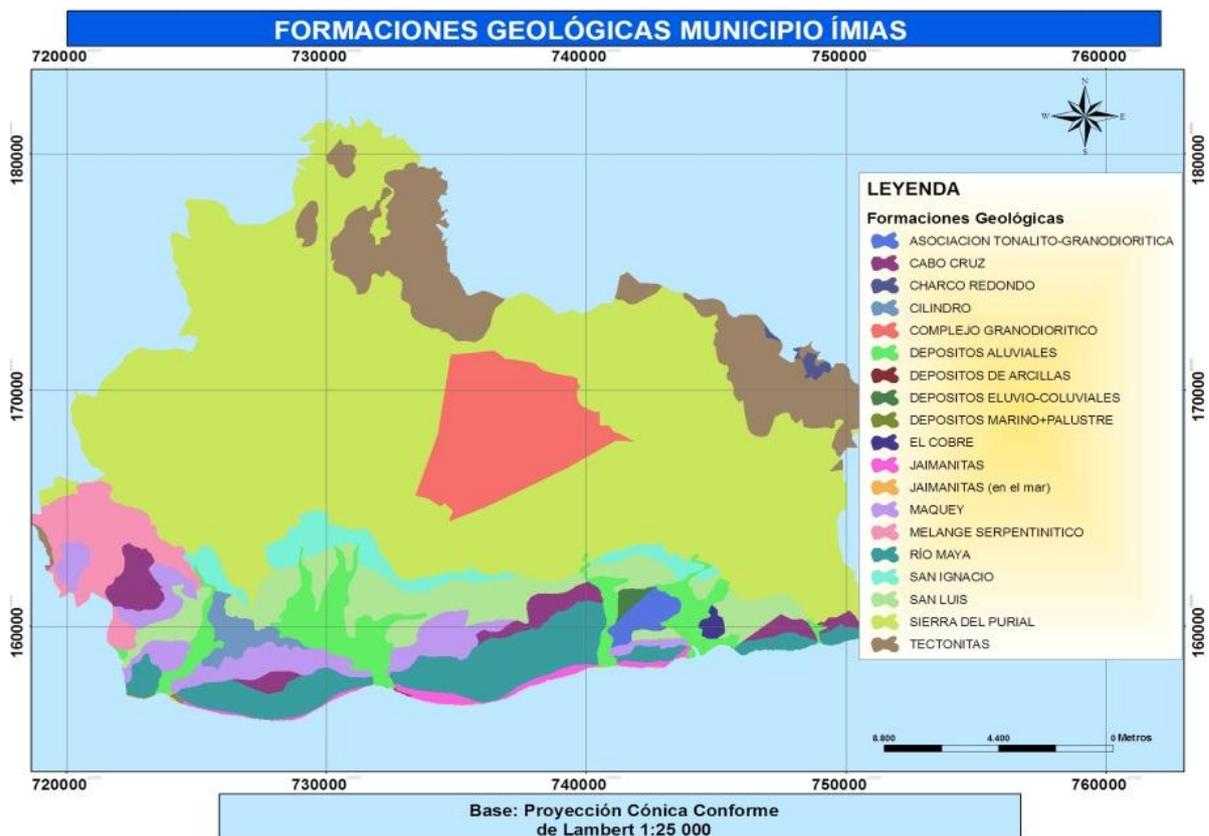


Figura 9: Esquema de formaciones geológicas del municipio Imías.

3.2.2 Sismicidad

El municipio Imías pertenece a la zona 3 la cual es de riesgo sísmico moderado, que puede ocasionar daños a las construcciones debiéndose tomar medidas sismorresistentes en todas las estructuras y obras en función de la

categoría ocupacional de las mismas y el nivel de protección definido según la probabilidad de exceder un sismo de diseño. Los valores de la aceleración espectral horizontal máxima del terreno para el cálculo S_a estarán entre 0,40-0,50 g para periodos cortos (S_s) y entre 0,15-0,20 g para periodos largos (S_1) (NC 46-2013 propuesta 0 (proyecto de norma)).

3.2.3 Características hidrográficas

La hidrología de Imías obedece a las características climáticas imperantes de altas temperaturas y escasas precipitaciones, de ahí que presente una red hidrográfica poco desarrollada, pero es un territorio que a pesar de estas características que influye en el desarrollo de su red hidrográfica, es uno de los territorios de la provincia que mayor cantidad de ríos posee, 20 en total. Aunque los ríos son de caudal reducido en algunos casos desaparecen en determinadas épocas del año como en el Tacre. Imías está estimado como un territorio con abundantes aguas subterráneas con un potencial cercano a los 3 millones de m^3 . La profundidad del nivel freático varía entre los 2.5 y 5.0 m, lo cual es una profundidad en la que se podría manifestar en fenómeno de licuefacción.

3.2.4 Condiciones ingeniero-geológicas (Tabla 3).

Para el estudio de las condiciones ingeniero geológicas se confeccionó la tabla resumen con algunas propiedades entre las que se encuentran: por ciento de Arena (Ar), por ciento de finos (Fi), límite líquido (LL), humedad natural (W), densidad húmeda (γ_f), densidad seca (γ_d), peso específico y prueba estándar de penetración. A continuación en la tabla se muestran los valores de estos parámetros para las obras estudiadas. (Tabla 3).

Tabla 3: Clasificación geotécnica del suelo del municipio Imías.

Obras	N de SPT	LL	% finos	% arenas	Wn (%)	γ_f	γ_d	C (kPa)	descripción
Joven Club de computación y electrónica		np	27	26	3,44	19	18,37	5	GM
Reconstrucción y ampliación de la escuela primaria Ciro Frías Cabrera.	24	36	32	32	13,3	18,45	16,28	15	GC y CL

Sala de fisioterapia y rehabilitación con fango.		np	27	26	3,44	19	18,37	5	GM
Policlínico Imías		np	27	26	13,44	19	18,20	5	GM
Remodelación y ampliación policlínico con camas Rafael La Laffita.		41	83	13	29,27	18,47	14,29	35	CL y lentes de SC
Reconstrucción del taller de maquinaria MINAGRI		np	27	26	13,44	19	18,20	5	GM con arena
Construcción de viviendas para médicos		40	27	26	13,44	19	18,20	5	GM con arena y catos rodados
2 viviendas vi plantas para médicos	9		69	25	23,12	19,03	15,46	35	CL
Renovación barrio el Salado.	9	38	84	15	14,10	17,54	15,37	25	CL
Escuela especial 4 de Abril.	9	38	84	15	14,10	17,54	15,37	25	CL

De 27 informes ingenieros geológicos revisados solos se pudieron utilizar 10 que contenían las coordenadas y la mayoría de las propiedades físico mecánicas, de estas, se le pudo realizar el cálculo de FSL a 4 las cuales contenían los parámetros necesarios como N de SPT, Yf, Yd y nivel freático. (Tabla 4).

3.2.5 Cálculo de Factor de seguridad para la licuefacción.

Resultados de calcular el Relación de Esfuerzo Cíclico (CSR)

Se calculó la Relación de Esfuerzo Cíclico para el que por sus condiciones ingeniero-geológicas tienen mayor potencial para que se produzca la licuefacción y para otras que coincidían algunos parámetros. Los cálculos se realizaron de forma aleatoria pues algunas obras 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 (CRR) 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.

Tabla 4: Resultado del cálculo de FSL para Imías.

obras	CR R	CSR	FSL para Mw 6	licuable s	FSL para Mw 7	licuable s	FSL para Mw 8	Licuales
Reconstrucción y ampliación de la escuela primaria Ciro Frías Cabrera.	1.67	0.11	24.76	no	13.93	no	11.82	no
2 viviendas vi plantas para médicos	0.63	4.22	0.26	si	0.14	si	0.12	si
Renovación barrio el Salado.	0.63	0.17	6.56	no	3.69	no	3.13	no
Escuela especial 4 de Abril.	0.63	0.15	7.22	no	4.06	no	3.45	no

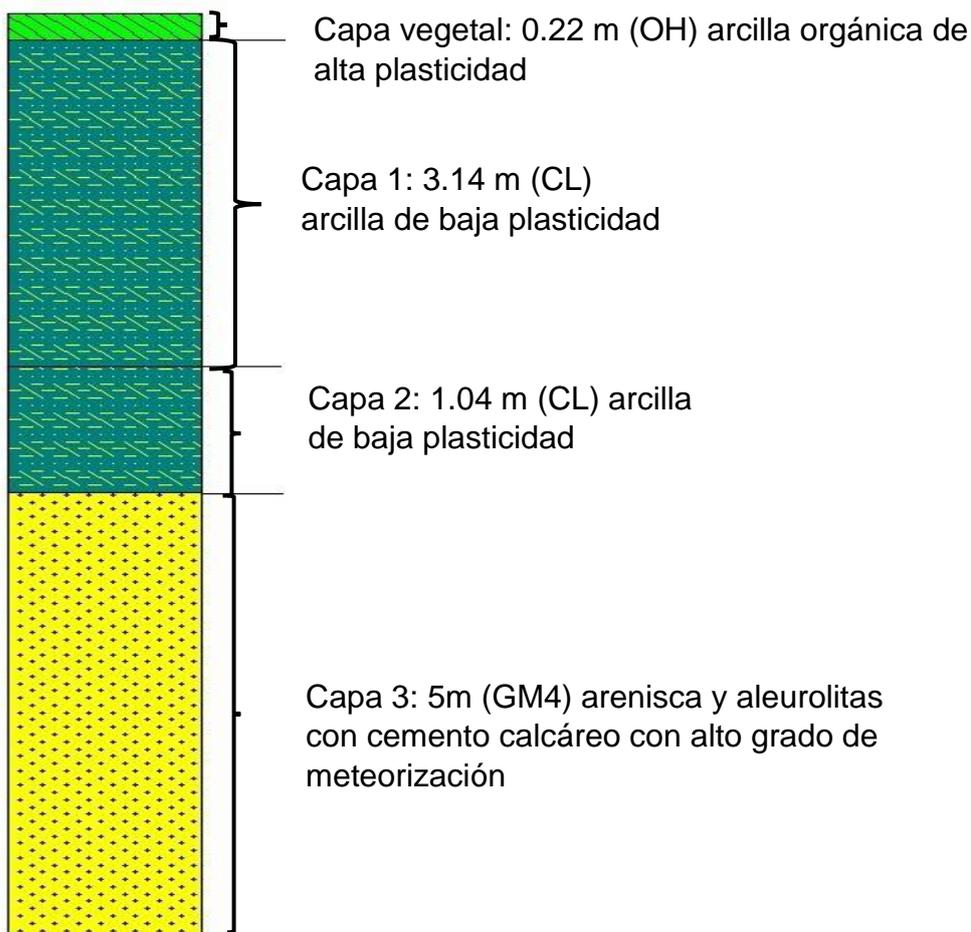


Figura 12: Columna litoestratigráfica esquemática de Imías.

Conclusiones parciales para Imías.

De toda esta clasificación se puede concluir que los suelos del territorio de Imías son sedimentos del Paleógeno, clasificados por un Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) como (GM) que es arenisca y aleurolitas polimícticas con cemento calcáreo, CL que es arcilla de baja plasticidad, SC que es una arena arcillosa con grava, los niveles freáticos varían entre los 2,50 y 5.0 m, presentan un alto por ciento de finos, el por ciento de humedad natural menor de 90. Los suelos son poco cohesivos y se encuentran semi saturados. Todas estas características son bastante acorde a que ocurra el fenómeno de licuefacción. Los resultados que se obtuvieron de las 4 obras que se realizaron el cálculo, son que ante un sismo de magnitud mayores o igual a 6, podría verse afectada la obra (2 viviendas vi plantas para médicos), la misma está enmarcada sobre suelos CL, en sedimentos aluviales.

3.3 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio Maisí.

3.3.1 Condiciones geológicas

En el municipio Maisí se presentan en grades rasgos formaciones tales como: Cabo Cruz, representada por calizas biodetríticas arcillosas, fosilíferas, que por desagregación dan lugar a margas secundarias y pseudoconglomerados. Otra formación existente es Chafarina con mármoles esquistosos con buena estratificación, de color gris oscuro, con intercalaciones de mármoles de colores crema a rosáceos, y dolomitas cristalinas sacaroidales. Los mármoles oscuros a veces contienen bitumen y pueden ser fétidos. Se encuentran también intercalaciones de finas capas de cuarcitas metapedernáticas, las cuales raras veces alcanzan más de 1.0 m de espesor y esquistos calcáreos moscovítico. En las zonas donde predomine esta formación es poco probable que exista el fenómeno de licuefacción debido al grado de consistencia de estas rocas metamórficas. En menor proporción se encuentra la formación Güira de Jaruco con anfibolitas bandeadas, granulares o esquistas, de grano grueso a fino, predominando las variedades de grano fino, de color negruzco, con intercalaciones de gneises y de metasilicitas. Los protolitos de esta formación son rocas intrusitas básicas (gabros y gabrodiabasas). La formación Jaimanita se presenta en gran parte del territorio con calizas biodetríticas masivas, generalmente carsificadas, muy fosilíferas, con contenido principalmente de conchas bien preservadas, corales de especies actuales y, ocasionalmente, biohermos. La formación La Picota está compuesta por conglomerados polimícticos con intercalaciones de areniscas polimícticas y conglomerados con brechas mal seleccionadas, que se intercalan con argilitas. Los clastos son predominantemente de diabasas y serpentinitas, calizas, rocas efusivas de composición media a básica, gabros, dioritas y piroxenitas. El tamaño de los fragmentos varía desde algunos centímetros hasta cientos de metros. En la parte sur del territorio hacia el litoral, hay depósitos aluviales con probabilidad de que ocurra la licuefacción. (Colectivo de Autores, Léxico Estratigráfico de Cuba, 2013). (Figura 13).

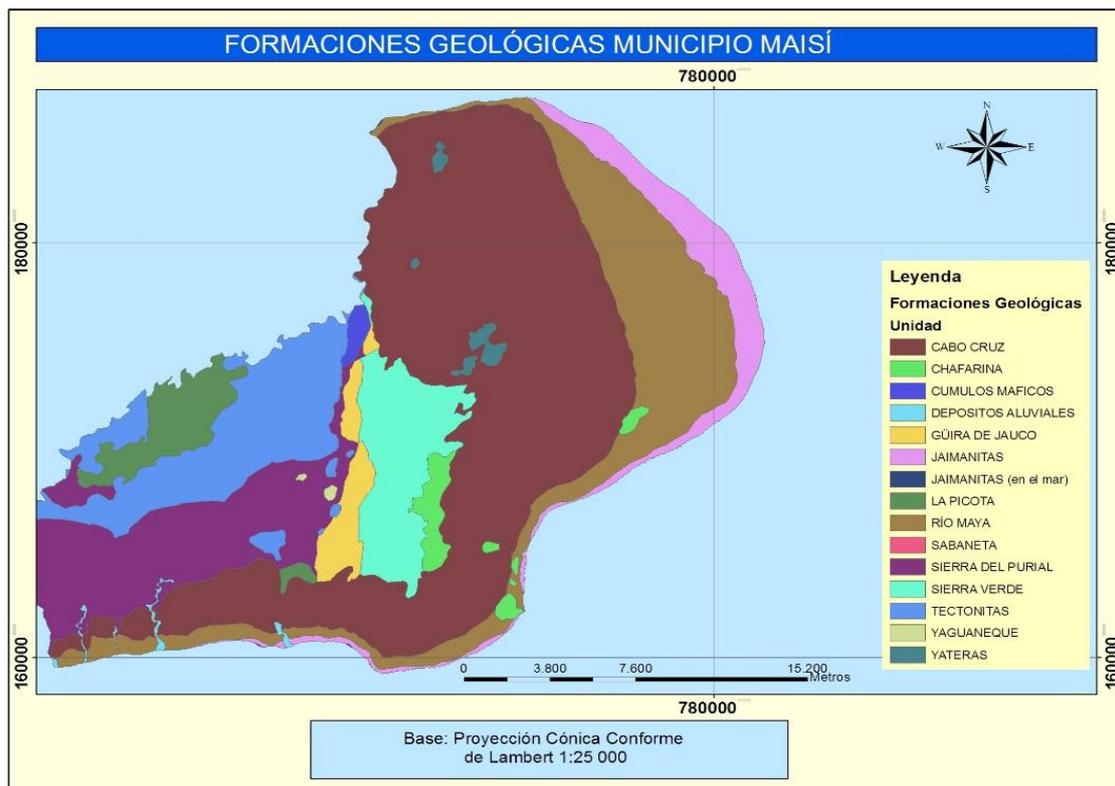


Figura 13: Esquema de formaciones geológicas del municipio Maisí.

3.3.2 Sismicidad

Maisí pertenece a la zona 3 la cual es de riesgo sísmico moderado, que puede ocasionar daños a las construcciones debiéndose tomar medidas sismorresistentes en todas las estructuras y obras en función de la categoría ocupacional de las mismas y el nivel de protección definido según la probabilidad de exceder un sismo de diseño. Los valores de la aceleración espectral horizontal máxima del terreno para el cálculo S_a estarán entre 0,40-0,50 g para periodos cortos (S_s) y entre 0,15-0,20 g para periodos largos (S_1) (NC 46-2013 propuesta 0 (proyecto de norma)).

3.3.3 Características hidrográficas

El territorio se caracteriza por poseer una red hidrográfica bastante densa, con ríos predominantes cortos y de poco caudal que fluyen en dirección al Atlántico y al Mar Caribe, a partir de las zonas más elevadas, como otras características es meritorio citar que los ríos de Maisí presentan un curso muy irregular, originado por las características del relieve por donde atraviesan, estos ríos no desembocan directamente al mar, en lo que ejerce una gran influencia al

predominio de un relieve cársico, la época de crecida de los ríos coincide con los meses de mayores lluvias, octubre, noviembre y diciembre y en los meses de junio, julio y agosto los ríos generalmente se encuentran en estiaje, estos presentan cañones profundos y muy hermosos. Dentro de la red hidrográfica se destacan los siguientes ríos: río Maya, río de Jauco, río Ovando, río Seco y parte del río Yumurí. El territorio se caracteriza por poseer una gran reserva de agua subterránea, la cual no se explota en su totalidad. (Ecured. 2016).

La profundidad del nivel freático varía desde mayor de 2.0 m hasta los 9.0 m en algunos casos, por lo que en los casos en que el nivel freático esté por debajo de los 9.0 m será poco probable que ocurra el fenómeno de licuefacción.

3.3.4 Condiciones ingeniero-geológicas (Tabla 5).

Tabla 5: Clasificación geotécnica del suelo del municipio Maisí.

Obras	N de SPT	LL	% finos	% arenas	Wn (%)	Yf	Yd	C (kPa)	descripción
Ampliación de la sub-estación eléctrica Maisí.	10	43	12	8	23,13	19,42	15,77	40	CL
ESBEC Pedro Agustín Pérez.	8	40	77	22	20,77	19,82	16,41	20	CL
Remodelación y ampliación Policlínico Sabana Maisí.		45	78	22	23,50	18,50	13,98	15	ML
Servicentro Maisí.	16	36	76	21	15,16	21,32	18,51	40	CL
ESBEC Adriano Galano.	8	38	38	44	17,55	21,66	21,62	1	SC
Sala fisioterapia y rehabilitación con fango los llanos.	37	26	5	18	5,60	21,23	20,10	15	GW y GC
Sala de fisioterapia y rehabilitación Sabana. Poblado vertientes.		43	16	8	25,48	18,80	14,98	15	OH
Escuela primaria Antonio Maceo	8	43	16	8	25,48	18,80	14,98	15	OL
Joven Club de computación y electrónica los Llanos.		41	20	15	18,13	20,80	17,58	50	CL

Sala de fisioterapia y rehabilitación Sabana. Poblado Sabana.					20,28	17,38	14,45		
		42	14	11				50	CL
Hospital patricio cierra alta. Poblado los llanos	20				17,94	20,73	17,58		Compuesta por material de relleno y CL.
		43	24	15				50	
Base torre TAM 48/150 C.T. La Máquina.	10				23,13	19,42	15,77		
		43	12	8				15	ML

De 41 informes ingenieros geológicos revisados solos se pudieron utilizar 8 que contenían las coordenadas y la mayoría de las propiedades físico mecánicas, de estas, se le pudo realizar el cálculo de FSL a 6 las cuales contenían los parámetros necesarios como N de SPT, Yf, Yd y nivel freático. (Tabla 6).

3.3.5 Cálculo de Factor de seguridad para la licuefacción.

Tabla 6: Resultado del cálculo de FSL para Maisí.

Obras	CRR	CSR	FSL para Mw 6	Licuables	FSL para Mw 7	licuables	FSL para Mw 8	licuables
Ampliación de la sub-estación eléctrica Maisí.	3.23	0.17	32.97	No	18.55	no	15.73	No
ESBEC Pedro Agustín Pérez.	3.23	0.63	8.96	No	5.04	No	4.27	No
Remodelación y ampliación Policlínico Sabana Maisí.	3.23	0.16	35.28	No	19.84	No	16.84	No
Servicentro Maisí.	3.23	0.44	12.93	No	7.27	No	6.17	No
ESBEC Adriano Galano.	3.23	0.10	55.30	No	31.10	No	26.39	No
Sala fisioterapia y rehabilitación	3.89	0.33	20.25	no	11.39	No	9.66	No

con fango los llanos.							
-----------------------	--	--	--	--	--	--	--

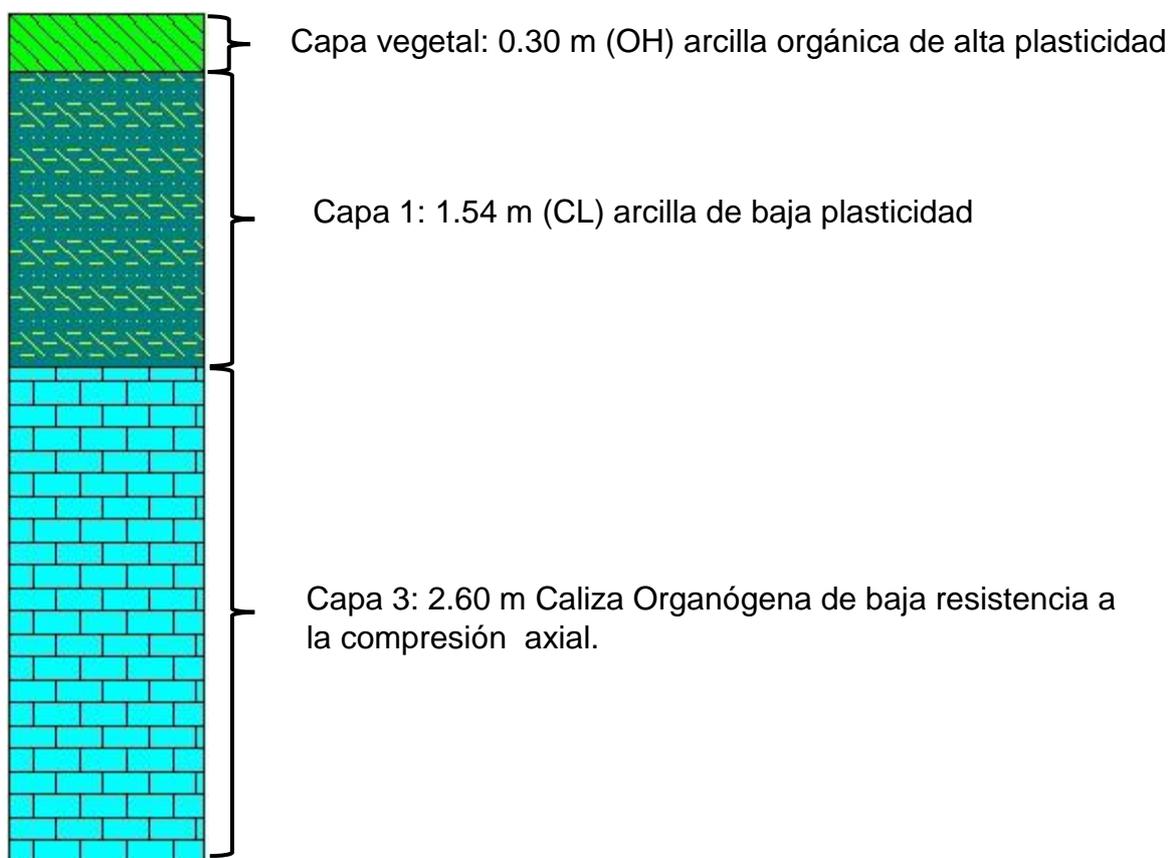


Figura 14: Columna litoestratigráfica esquemática Maisí.

Conclusiones parciales para Maisí.

Los suelos del territorio de Maisí tienen edades del Cretácico y Jurásico los cuales no son tan resientes, están clasificados como CL que es una arcilla de baja plasticidad, OL que es una arcilla limosa orgánica, OH Limo orgánico, ML que es limo, GW grava bien graduada, GC grava arcillosa. La profundidad de los niveles freáticos varían entre 2.0 y hasta 9.0 m, el por ciento de finos es alto en la mayoría de los caso. Se analizaron 6 obras, ninguna de ellas dio como resultados que podrían ser susceptibles a licuar ante sismos de magnitudes mayores o igual a 6. Las características de los suelos del área estudiada del municipio Maisí al parecer son poco susceptibles a que ocurra licuefacción, aunque en las áreas donde existan depósitos aluviales pudiera ocurrir licuefacción.

3.4 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio Manuel Tames.

3.4.1 Condiciones geológicas

En el municipio Manuel Tames predomina la formación Maquey con alternancia de areniscas, limolitas y arcillas calcáreas de color gris y margas de color blanco a crema, que contienen intercalaciones de espesor variable de calizas biodetríticas, arenáceas y gravelíticas de colores blanco amarillo y crema, ocasionalmente amarillo grisáceo, que pudieran ser vulnerables a la ocurrencia del fenómeno de licuefacción. Otra formación que predomina es Yateras con areniscas de grano fino, conglomerados de cemento terrígeno, con clastos de calizas biodetríticas, calizas arrecifales, alternancia de calizas detríticas, biodetríticas y biógenas, de grano fino a grueso, en el caso de estas areniscas de granos finos pudiera producirse la licuefacción en caso de un terremoto de gran magnitud. La formación San Luis 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, muy proclive a la ocurrencia de licuefacción. La formación Santo Domingo presente en el territorio se caracteriza por el dominio del componente piroclástico en el corte, con intercalaciones de litofacies terrígenas finas, silicitas, tufitas, efusivos principalmente de composición andesítica-basáltica y andesítica, raramente hasta dacíticas, con la presencia de cuerpos de dioritas, dioritas cuarcíferas, gabro-dioritas, gabrodiabas y diabasas, con desarrollo limitado de rocas esquistosas calcáreas, calizas y corneanas. Más escasa se encuentra la formación Puerto Boniato, esta unidad está representada por una alternancia de calizas organodetríticas aporcelanadas, algáceas y margas, con intercalaciones finas de sílice, limolitas y lutitas. En su corte predominan las calizas. Gran Tierra es otra formación presente, se compone principalmente de conglomerados monomícticos con cemento calcáreo, que transicionan hasta calizas fragmentarias producto de la disminución del volumen de material clástico. Se intercalan areniscas calcáreas vulcanomícticas y tobáceas, limonitas, tufitas, margas y tobas. Existen pequeñas zonas con depósitos

aluviales y eluvio coluviales donde pudiera producirse licuefacción. (Colectivo de Autores, Léxico Estratigráfico de Cuba, 2013). (Figura 15).

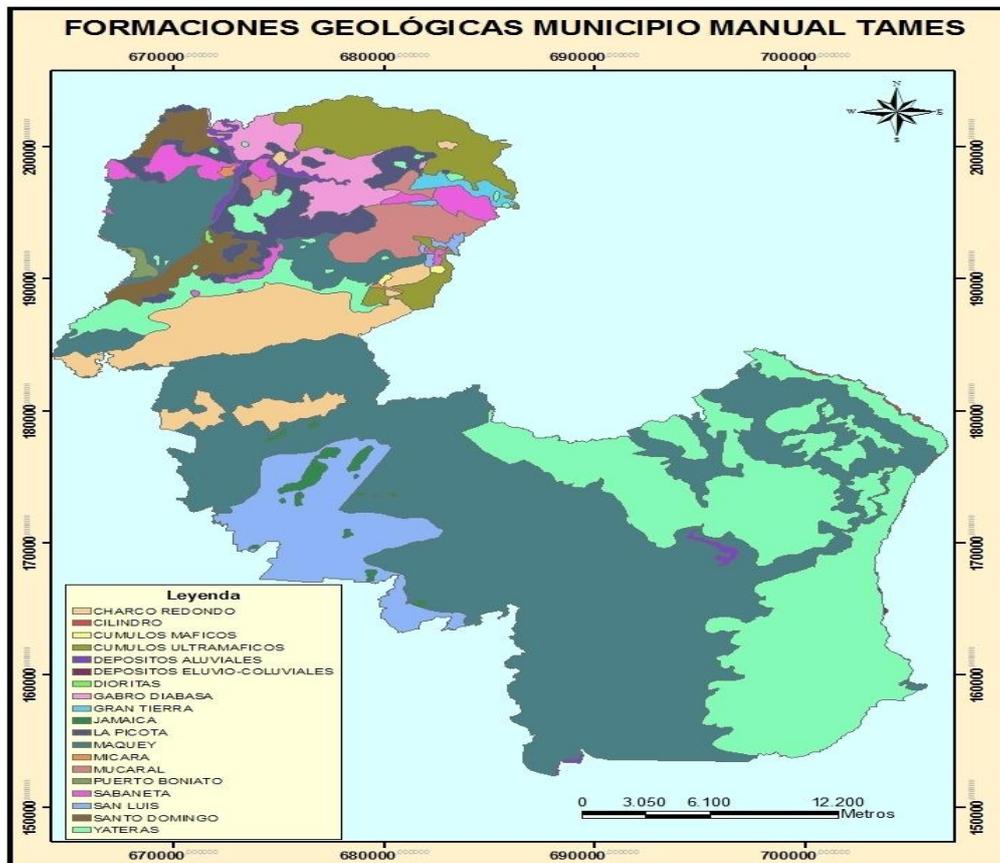


Figura 15: Esquema de formaciones geológicas del municipio Manuel Tames.

3.4.2 Sismicidad

Manuel Tames pertenece a la zona sísmica 4 de riesgo sísmico alto que puede ocasionar daños significativos en las construcciones debiéndose tomar medidas sismorresistentes en las estructuras y obras en función de la categoría ocupacional de las mismas y el nivel de protección definido según la probabilidad de exceder un sismo de diseño. Los valores de la aceleración espectral horizontal máxima del terreno para el cálculo S_a estarán entre 0,50-0,80 g para periodos cortos (S_s) y entre 0,20-0,30 g para periodos largos (S_1) (NC 46-2013 propuesta 0 (proyecto de norma)).

3.4.3 Características hidrográficas.

La no existencia de una amplia red hidrográfica se refleja notablemente partiendo de que el territorio es bañado de norte a sur por los ríos “Yateras” y “San Andrés”, uniéndose a estos otros arroyos que provienen de las aguas

subterráneas a manantiales que predominan en las zonas permitiendo un aumento gradual de su caudal. Los niveles freáticos varían entre los 1.50 y mayor de 6.50 m de profundidad, en la cual pudiera producirse el fenómeno.

3.4.4 Condiciones ingeniero-geológicas (Tabla 7).

Tabla 7: Clasificación geotécnica del suelo del municipio Manuel Tames.

Obras	N de SPT	LL	% finos	% arenas	Wn (%)	Yf	Yd	C (kPa)	descripción
Caldera CAI		54	49	8	25,09	17,86	14,28	35	CH de origen aluvial
Sistema de enfriamiento UEB Central Azucarero Argeo Martínez.					11,34	20,60	18,50	100	GM3
Organismos políticos y de masas. Sistema de la Vivienda Jamaica.	16	49	94	6	25,50	17,25	13,75	22	CL con nódulos de CaCO3
Poder Popular. Organismos Globales. Jamaica.	12	55	88	12	22,60	19,30	15,75	40	CH
Escuela Especial 4 de abril.	16	61	88	12	18,93	18,90	15,89	60	CH
Sector militar	11	50	88	12	23,17	18,53	15,04	60	CH
Policlínico	>50	34	25	25	12,2	22,60	20,14	50	GC

De 18 informes ingenieros geológicos revisados solos se pudieron utilizar 7 que contenían las coordenadas y la mayoría de las propiedades físico mecánicas, de estas, se le pudo realizar el cálculo de FSL a 1 la cual contenía los parámetros necesarios como N de SPT, Yf, Yd y nivel freático.

3.4.5 Cálculo de Factor de seguridad para la licuefacción.

Tabla 8: Resultado del cálculo de FSL para Manuel Tames.

Obras	CRR	CSR	FSL para Mw 6	licuables	FSL para Mw 7	licuables	FSL para Mw 8	licuables
Escuela	1.11	0.24	7.85	no	4.42	no	3.75	no

Especial 4 de abril.								
----------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--

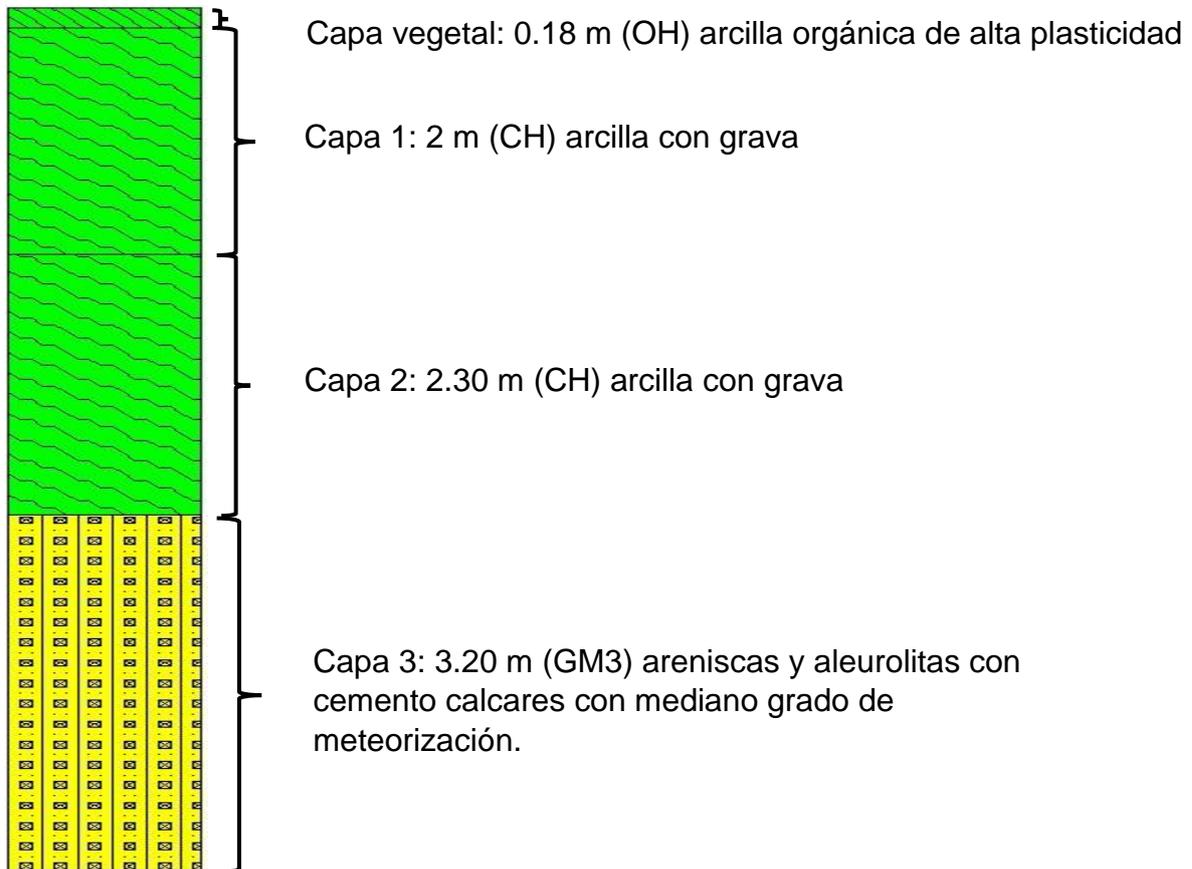


Figura 16: Columna litoestratigráfica esquemática Manuel Tames.

Conclusiones parciales Manuel Tames.

El Municipio Manuel Tames se caracteriza por presentar suelos de edad del Paleógeno y Cretácico, estos suelos están clasificados como CH arcilla con grava, CL arcilla de baja plasticidad, GC grava arcillosa con arena y GM4 que son areniscas con aleurolitas con cemento calcáreo altamente meteorizadas. El nivel freático varía entre los 2 m y hasta mayor de 6,50 m, los valores del límite líquido son elevados así como los % de finos, presenta además altos valores para la cohesión, siendo características de suelos poco licuables. Solo se pudo analizar una obra la cual no es susceptible a que se vea afectada por licuefacción. A pesar de esto en el municipio está presente la formación San Luis y Maquey las cuales presentan sedimentos que pueden ser susceptibles a la licuefacción.

3.5 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio San Antonio del Sur.

3.5.1 Condiciones geológicas

Las principales formaciones geológicas que podemos encontrar en San Antonio del Sur están: Formación Sierra del Purial la cual presenta rocas andesito-basaltos y basaltos, principalmente tobas y lavobrechas, andesidacitas, areniscas polimícticas, areniscas derivadas de granitoides e intercalaciones y lentes de calizas. Formación San Luis en la parte central del municipio compuesta 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. Otra formación presente en el municipio es Charco Redondo compuesta por calizas compactas organodetríticas, fosilíferas, de color variable, predominando los tonos blancos a grises verdosos. En la parte inferior del corte, son frecuentes las brechas, donde predomina la estratificación gruesa, mientras que en la parte superior predomina la estratificación fina. La formación Rio Maya se encuentra en la porción más Sur del territorio pegado al litoral. La Formación Sabaneta presente también está constituida por tobas de ácidas a medias, de colores claros, vitroclásticas, litovitroclásticas, cristalovitroclásticas con intercalaciones de tufitas calcáreas, areniscas tobáceas, calizas, conglomerados tobáceos, limolitas, margas, gravelitas, conglomerados vulcanomícticos y ocasionalmente pequeños cuerpos de basaltos, andesitas, andesito-basaltos y andesito-dacitas. Es muy característica, debido a la alteración de las tobas, la presencia de minerales del grupo de la montmorillonita (bentonita) y de las zeolitas (zeolitas). En las tobas, el promedio de vidrio volcánico es superior al 60% (M. Iturralde, 1976). La Formación Jaimanitas presenta calizas biodetríticas masivas, generalmente carsificadas, muy fosilíferas, con contenido principalmente de conchas bien preservadas, corales de especies actuales y, ocasionalmente, biohermos. Los bolsones cársicos se encuentran en ocasiones rellenos por una fina mezcla carbonático-arcillosa-ferruginosa, de color rojo ladrillo. Pasan a biocalcarenitas, de granulometría y estratificación variables o masivas. En mayor o menor cantidad, contienen fragmentos de sedimentos terrígenos, que incluyen calizas preexistentes.

En la parte central de San Antonio del Sur existe además presencia de zonas con depósitos aluviales y depósitos de gravas arenosas vulnerables a la ocurrencia del fenómeno de licuefacción, al igual que en las zonas donde existen depósitos palustres y marinos palustres. (Colectivo de Autores, Léxico Estratigráfico de Cuba, 2013). (Figura 17).

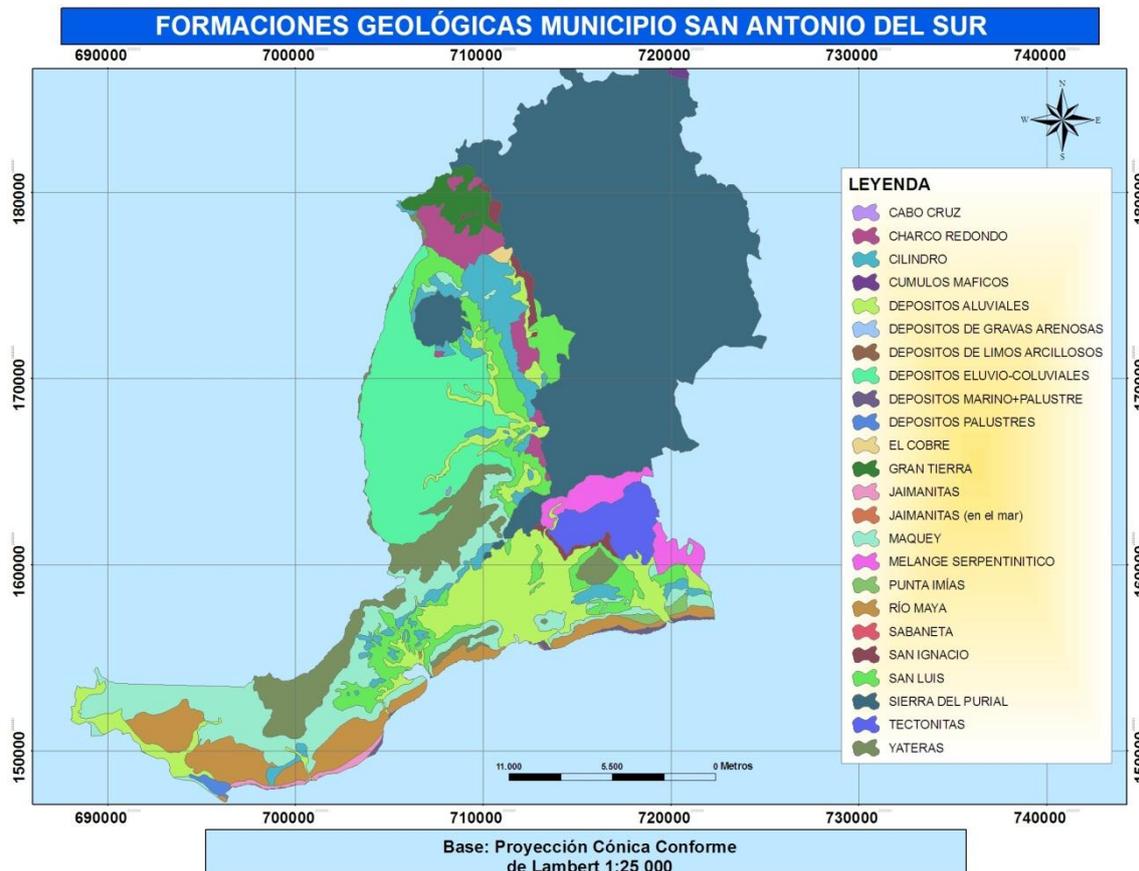


Figura 17: Mapa geológico del municipio San Antonio del Sur.

3.5.2 Sismicidad

San Antonio del Sur pertenecen a la zona sísmica 4 de riesgo sísmico alto que puede ocasionar daños significativos en las construcciones debiéndose tomar medidas sismorresistentes en las estructuras y obras en función de la categoría ocupacional de las mismas y el nivel de protección definido según la probabilidad de exceder un sismo de diseño. Los valores de la aceleración espectral horizontal máxima del terreno para el cálculo S_a estarán entre 0,50-0,80 g para periodos cortos (S_s) y entre 0,20-0,30 g para periodos largos (S_1) (NC 46-2013 propuesta 0 (proyecto de norma)).

3.5.3 Características hidrográficas

La hidrografía de este municipio está formada por ríos, arroyos, lagunas, presas y el mar Caribe. Se destacan dos vertientes, norte y sur. En la vertiente norte, se encuentran los ríos Arroyón, Quiviján, Barbudo, la Alegría, Los Guineos y El Jacinto mientras que en la vertiente sur, se encuentran los ríos Yateras y Sabanalamar; siendo éste último el más importante ya que su recorrido lo hace de norte a sur, desembocando en forma de estuario en la playa Sabanalamar. La profundidad del nivel freático varía desde 1.0 m hasta mayor de 3.90 m, profundidad en la que se podría manifestar la licuefacción.

3.5.4 Condiciones ingeniero-geológicas (Tabla 9).

Tabla 9: Clasificación geotécnica del suelo del municipio San Antonio del Sur.

Obras	N de SPT	LL	% finos	% arenas	Wn (%)	γ_f	γ_d	C (kPa)	descripción
Sala de fisioterapia y rehabilitación con fango	10	21	27	34	8,13	19,03	17,60	10	SW y SM
Escuela primaria Pedro Hernández	3	33	16	21	27,59	18,43	13,70	16	SC
Joven Club de computación y electrónica Purial		49	25	59	14,12	18,92	14,83	10	SC
Sala de Fisioterapia y rehabilitación Puriales de Caujerí.		42	11	26	14			10	SC
Hospital 4to Congreso	7	25	35	18	34,48	18,43	13,70	25	CL y ML
Policlínico Nuevo	14	59	11	39	10,25	21,46	19,46	10	GP y GC
Remodelación y ampliación Policlínico Puriales de Caujerí		33	26	26	15,3	21,30	18,47	12	GP y GM
Oficina comercial de	3	33	49	51	27,59	18,92	14,83	10	SC

ETECSA									
Sub estación eléctrica 110/34.2 kv	7	33	91	16	6,8	15,15	14,18	14	CL

De 36 informes ingenieros geológicos revisados solos se pudieron utilizar 10 que contenían las coordenadas y la mayoría de las propiedades físico mecánicas, de estas, se le pudo realizar el cálculo de FSL a 5 las cuales contenían los parámetros necesarios como N de SPT, Yf, Yd y nivel freático.(Tabla 10).

3.5.5 Cálculo de Factor de seguridad para la licuefacción.

Tabla 10: Resultado del cálculo de FSL para San Antonio del Sur.

Obras	CRR	CSR	FSL para Mw 6	Licuable s	FSL para Mw 7	Licuable s	FSL para Mw 8	Licuable s
Escuela primaria Pedro Hernández	0.23	0.17	2.39	no	1.34	no	1.14	si
Hospital 4to Congreso	0.50	0.16	5.41	no	3.04	no	2.58	no
Policlínico Nuevo	0.97	0.20	8.35	no	4.70	no	3.98	no
Oficina comercial de ETECSA	0.23	0.12	3.45	no	1.94	no	1.64	no
Sub estación eléctrica 110/34.2 kv.	0.50	0.13	6.75	no	3.79	no	3.22	no

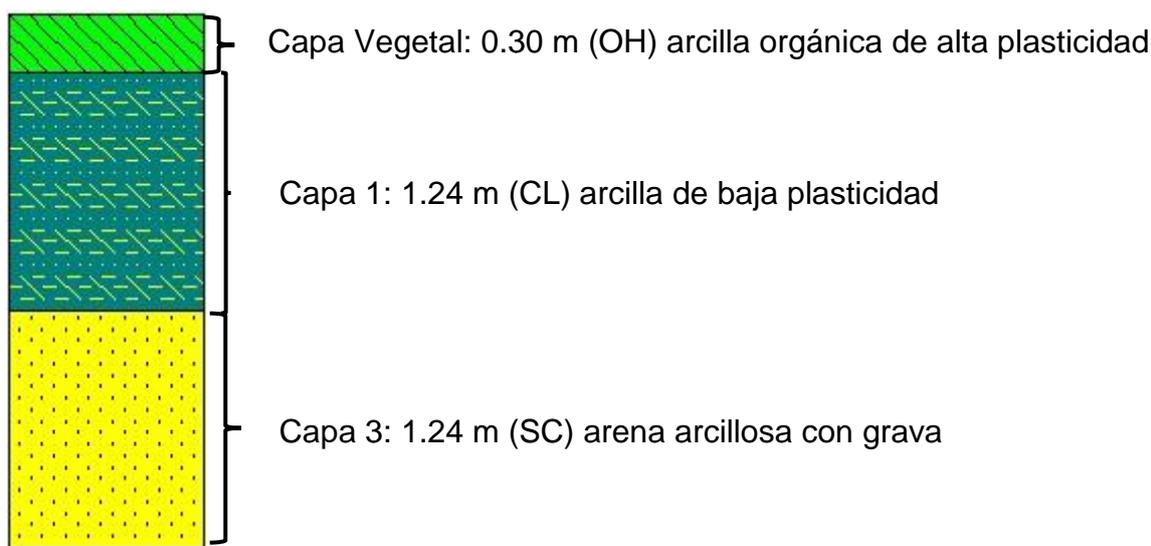


Figura 18: Columna litoestratigráfica esquemática San Antonio del Sur.

Conclusiones parciales para San Antonio del Sur.

Los suelos de San Antonio del Sur son de edad Eoceno, están clasificados como SW arena bien graduada, SM arena limosa con grava, SC arena arcillosa con grava, GP grava mal graduada y ML limo. El por ciento de arena en la mayoría de los casos es mayor que el de finos, tiene altos por cientos de humedad natural. Los suelos poco cohesivos y presentan altos grados de saturación. Los cálculos de FSL arrojaron que la obra (Escuela primaria Pedro Hernández) podría verse afectada por el fenómeno de licuefacción ante sismos de magnitud mayor o igual a 8, la misma está en sedimentos SC. La mayoría de las obras están enmarcadas en la formación San Luis y depósitos aluviales, los cuales son susceptibles a que ocurra licuefacción.

3.6 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio

Guantánamo.

3.6.1 Condiciones geológicas

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

Las areniscas generalmente son de color gris, gris pardusco y pardo (intemperizadas). Están bien estratificadas y el espesor de las capas varía desde algunos centímetros hasta 20 – 40 cm. Generalmente son de grano fino a medio, a veces grueso, siendo estas de grano fino vulnerables a que ocurra el fenómeno de licuefacción. Otra formación presente es Camarones: está constituida por conglomerados polimícticos, de cantos subredondeados y redondeados, y areniscas polimícticas, de grano grueso. La matriz del conglomerado es de composición arenosa y polimíctica. Estas litologías gruesas transicionan hasta areniscas de grano medio, pero mantienen su composición. La Formación Charco Redondo tiene calizas compactas organodetríticas, fosilíferas, de color variable, predominando los tonos blancos a grises verdosos, poco probable a que exista algún fenómeno de licuefacción. Formación Jamaica: conglomerados polimícticos de matriz arcilloso-carbonática, con clastos más o menos redondeados y de selección mediana, que corresponden a calizas, metavolcanitas, silicitas y ultramafitas. Pueden contener intercalaciones finas de arenas y limos. El componente arcilloso de la matriz es predominantemente esmectita, aunque también están presentes las mica-esmectitas, cloritas e hidromicas, poco probable que exista licuefacción. La formación Maquey se presenta con alternancia de areniscas, limolitas y arcillas calcáreas de color gris y margas de color blanco a crema, que contienen intercalaciones de espesor variable de calizas biodetríticas, arenáceas y gravelíticas de colores blanco amarillo y crema, ocasionalmente amarillo grisáceo, donde en estas zonas donde predominen las areniscas pudiera ocurrir fenómenos de licuefacción. En las zonas cercanas al litoral existen depósitos aluviales y palustres todos estos vulnerables a que se produzca algún fenómeno de licuefacción. (Colectivo de Autores, Léxico Estratigráfico de Cuba, 2013). (Figura 19).

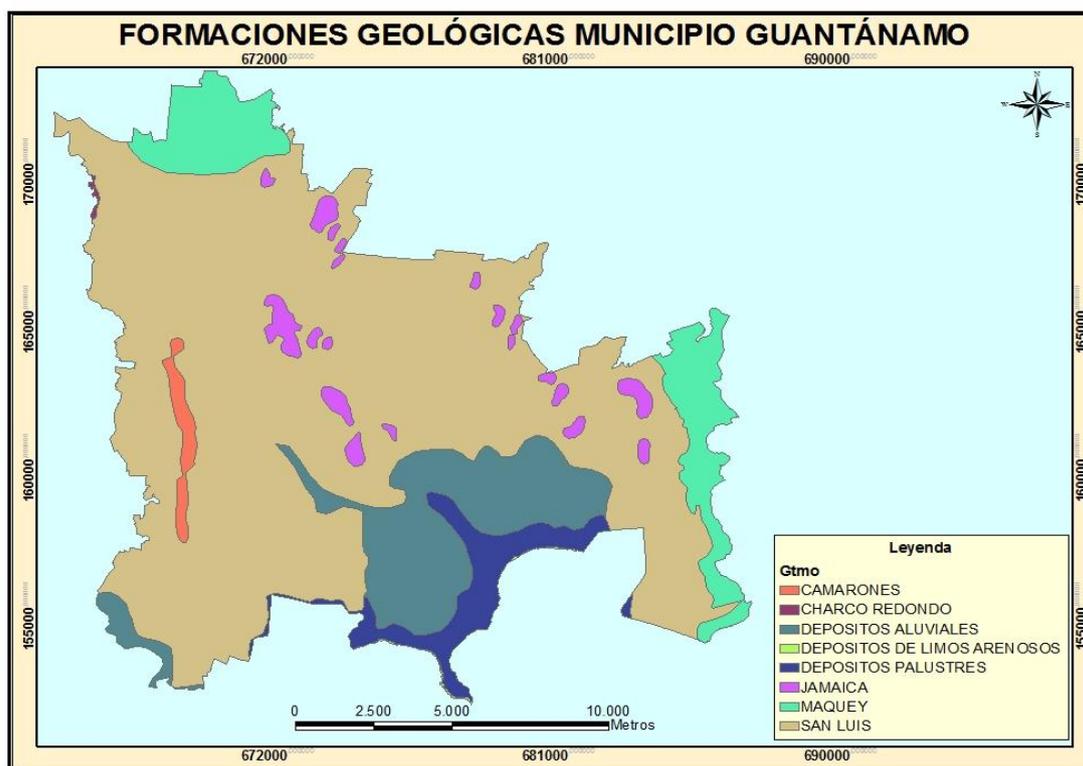


Figura 19: Mapa geológico del municipio Guantánamo.

3.6.2 Sismicidad

El municipio Guantánamo, pertenecen a la zona sísmica 4 de riesgo sísmico alto que puede ocasionar daños significativos en las construcciones debiéndose tomar medidas sismorresistentes en las estructuras y obras en función de la categoría ocupacional de las mismas y el nivel de protección definido según la probabilidad de exceder un sismo de diseño. Los valores de la aceleración espectral horizontal máxima del terreno para el cálculo S_a estarán entre 0,50-0,80 g para periodos cortos (S_s) y entre 0,20-0,30 g para periodos largos (S_1) (NC 46-2013 propuesta 0 (proyecto de norma)).

3.6.3 Características hidrográficas

Se destacan importantes cuencas hidrográficas superficiales, como la del Guaso, entre cuyos afluentes principales están el Bano, y sus arroyos afluentes: El Salado, Mal Paso, Monacal y Cacao. Gran parte de su curso (más de 9 Km) es subterráneo. Se sumerge en el sistema cártico La Tagua (La Deseada, El Avispero, Hondones) y renace en la caverna El Campanario, para continuar su curso superficialmente hasta desembocar en la ensenada de

Manatí (Bahía de Guantánamo). La profundidad del nivel freático varía entre 0.40 y 3.60 m.

3.6.4 Condiciones ingeniero-geológicas (Tabla 11).

Tabla 11: Clasificación geotécnica del suelo del municipio Guantánamo.

Obras	N de SPT	LL	% finos	% arena	Wn (%)	Yf	Yd	C (kPa)	Descripción
Parque Solar Fotovoltaico Santa Teresa					16,59	19,29	16,55	15	GM3
Sala penal del hospital Pediátrico Luis Ramírez, zona Sur Oeste.					10,84	22,32	20,14	40	GM 3
Viviendas Ho Chi Minh.	17	49	84	11	20,25	18,92	15,73	22	CL
Parque Fotovoltaico de 2.5 MW en S/E 110-34. Kv.	17	77	85	10	20,45	18,87	15,75	12	OH
Informe de los resultados de la vivienda. san Gregorio y El 13 Norte	25				15,58	21,05	18,22	88	GM 4
Informe de los resultados de la escuela de música Guantánamo.	15	42	80	10	11,9	18,08	16,16	16,16	CL
Edificio GPFB-3 Tribunal (6 norte)	25				15,58	21,05	18,22	88	MH y restos de materiales de construcción y mezclas de OH
Oficina comercial OBE Reparto Obrero.		29	31	29	8,78	20	18,39	12	GC
ONIT. Filial	39				21,7	20	16,43	14	GM 4

Provincial Guantánamo.									
4 edificios de viviendas calle 13 norte y Martí	17	51	84	11	20,25	18,92	15,73	74	CL arenosa con grava mezclada con OH
Fiscalía provincial Guantánamo.	14	68	90	8	18,30	18,80	15,89	50	GM 4
Línea de secado. Salina Glorieta.	3	28	80	20	36,43	18,72	13,72	20	CL y ML
Taller automotriz provincial OEBE Guantánamo.	15	50	80	16	18,04	18,44	15,62	44	relleno compacto y CH
Sede Danza Libre	10	68	94	5	18,3	18,80	15,98	50	CH

De 74 informes ingenieros geológicos revisados solos se pudieron utilizar 21 que contenían las coordenadas y la mayoría de las propiedades físico mecánicas, de estas, se le pudo realizar el cálculo de FSL a 9 las cuales contenían los parámetros necesarios como N de SPT, Yf, Yd y nivel freático. (Tabla 12).

3.6.5 Cálculo de Factor de seguridad para la licuefacción.

Tabla 12: Resultado del cálculo de FSL para Guantánamo.

Obras	CRR	CSR	FSL para Mw 6	Licuables	FSL para Mw 7	Licuables	FSL para Mw 8	Licuables
Viviendas Ho Chi Minh. NS	1.18	0.11	17.62	no	9.91	no	8.412	no
Parque Fotovoltaico de 2.5 MW en S/E 110- 34. Kv.	3.02	0.15	34.38	no	19.34	no	16.41	no
Informe de los resultados de la	1.74	0.17	17.15	no	9.64	no	8.18	no

vivienda. san Gregorio y El 13 Norte								
Informe de los resultados de la escuela de música Guantánamo	1.11	0.12	15.47	no	8.70	no	7.38	no
Edificio GPFB-3 Tribunal (6 norte)	1.74	0.32	9.33	no	5.25	no	4.45	no
4 edificios de viviendas calle 13 norte y Martí	1.18	0.25	8.05	no	4.52	no	3.84	no
Fiscalía provincial Guantánamo	0.97	0.20	8.27	no	4.65	no	3.95	no
Línea de secado. Salina Glorieta.	0.23	0.39	1.04	si	0.59	si	0.50	si
Taller automotriz provincial OEBE Guantánamo	1.04	0.36	5.05	no	2.84	no	2.41	no

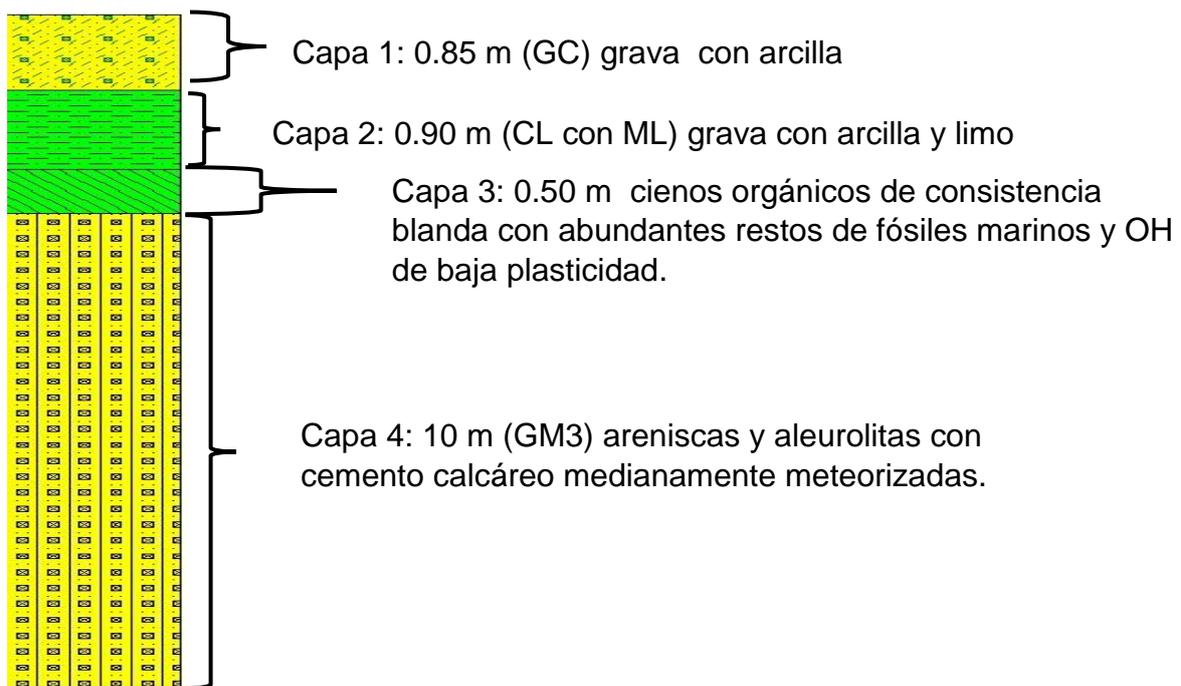


Figura 20: Columna litoestratigráfica esquemática del Municipio Guantánamo.

Conclusiones parciales para Guantánamo.

Guantánamo se caracteriza por presentar sedimentos del Eoceno, estos suelos están clasificados como GM3 que son areniscas y aleurolitas con cemento calcáreo medianamente meteorizadas, CL arcilla de baja plasticidad, GC grava arcillosa con arena, ML que es limo y CH que es una arcilla con grava, todos enmarcados en la formación San Luis. La profundidad de los niveles freáticos varía entre 1.0 y en ocasiones hasta mayor de 10 m, siendo poco probable que en los casos donde esté por debajo de 10 m ocurra licuefacción, los suelos se encuentran semi saturados y poco cohesivos. El cálculo de Factor de seguridad concluyeron que solo una obra podría verse afectada por la licuefacción ante sismos de magnitudes mayores o iguales a 6, esta obra es la (Línea de secado Salina) la cual está emplazada en suelos del tipo (GC) grava arcillosa con arenosa.

Conclusiones

- ❖ Se aplicó un sistema de indicadores a partir de conjugar factores como: geología, sismicidad, características hidrográficas, condiciones ingeniero geológicas y el cálculo del factor de seguridad para la licuefacción que permitió evaluar el potencial de licuefacción en los escenarios propuestos.
- ❖ Los valores del cálculo de factor de seguridad para suelos de tipo arcilla de baja plasticidad y limo (CL y ML) y arena arcillosa con grava (SC) identificados en el área de estudio dieron menores que 1 por lo que son favorables para que ocurra la licuefacción.
- ❖ Los municipios Guantánamo, Imías y San Antonio del Sur, presentan sectores susceptibles a la ocurrencia del fenómeno de licuefacción inducido por sismos de magnitudes mayores o iguales a 6. Estos sectores se enmarcan sobre sedimentos de la formación San Luis, Maquey y sedimentos aluviales, siendo los suelos, (CL y ML) arcilla de baja plasticidad y limo y (SC) arena arcillosa con grava no favorables para la construcción de obras.

Recomendaciones

- ❖ Realizar el estudio de vulnerabilidad en los municipios Guantánamo, San Antonio del sur, Manuel Tames, Imías y Maisí
- ❖ 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

1. ACERES & 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
2. 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.
3. ALVA H.; & PARRA D. (2011) Evaluación del potencial de licuefacción de suelos. Chimbote, Perú.
4. 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.
5. ALVA, J.E. & ORIHUELA P. “Estudio de Licuefacción y Amplificación Sísmica en Chimbote, Perú”, IV Congreso Nacional de ingeniería Civil, Chiclayo, Perú.1982.
6. ALCOCER, S. Comportamiento ante cargas laterales de sistemas de muros de mampostería con diferente tipo de refuerzo horizontal. México: CENAPRED. 1994.
7. 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.
8. ARENCIVIA, E.” Ingeniería de detalle Abasto Caimanera”. UEBPI. Guantánamo. Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 2002
9. BANDERA, C.: Evaluación ingeniero – geológica de la ciudad de Caimanera. Holguín. Trabajo de Diploma. ISMM. 2015.
10. 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

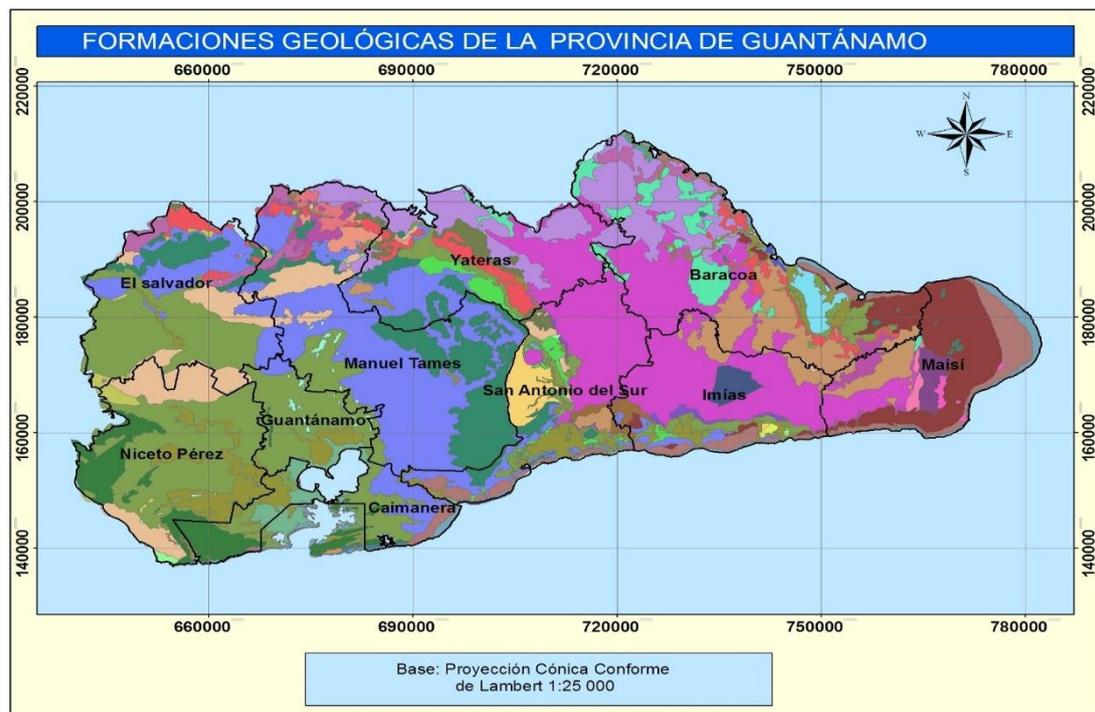
11. CARRILLO. Licuación de suelos durante el sismo Pisco - Perú. (2007).
12. CARRILLO. Licuación de suelos durante un sismo de gran magnitud. (2007).
13. CHUY, R. "Modelo del peligro sísmico de la provincia de Santiago de Cuba". CENAI. 2010.
14. CHUY. Sismos Perceptibles en la Provincia de Santiago de Cuba. 1999
15. CHUY y OTROS. Sismicidad en Santiago de Cuba. Santiago de Cuba. 2002
16. COLECTIVO DE AUTORES. Léxico Estratigráfico de Cuba. Instituto de Geología y Paleontología. 2013
17. COLECTIVO DE AUTORES. Sección de Sismología, Vulcanología y Exploración Geofísica, Geología. San Pedro, Costa Rica. 2002
18. COLECTIVO DE AUTORES. Terremoto de Lorca. Lorca, Murcia, España. 2012
19. DARTON, & MEINZER.: "Geology of the Guantánamo Basin Cuban". Guantánamo. 1926
20. 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
21. FIGUERAS, C. "Caracterización de efectos sísmicos locales en la ciudad de Lorca", Física de la Tierra Vol. 24 (2012) 235-254
22. FERNANDEZ, D.: "Licuefacción de los suelos generada por sismos de gran magnitud. Caso de estudio Caimanera y Santiago de Cuba." Tesis de Maestría. ISMM. Moa. 2015.
23. GONZÁLEZ. L. Ingeniería Geológica. PEARSON EDUCACION. (2002 Madrid. 744p
24. 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 Bío Bío. Argentina. 2011.
25. GONZALEZ. "Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT. X Jornadas geotécnicas de la ingeniería colombiana - SCI -SCG - Colombia. 1999

26. GUASCH, F. "Apreciación de la amenaza sísmica de Cuba". CENAI, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. 2014
27. HERRERA, D.: "Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el consejo popular Guillermón Moncada del municipio de Santiago de Cuba". Holguín. Tesis de Diploma. ISMMM. 2015.
28. 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
29. KOSARY, M. "Geological Reconmaí Sance of the Guantanamo Basin Área". Guantánamo. 1955
30. 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.
31. LEYTON. "Geología Superficial, frecuencias predominante de suelos y observaciones de licuefacción en Curicó tras el terremoto de Maule 2010". Tesis de diploma. Chile. 2011
32. LEONI. "Procesos de licuefacción de suelo área geotecnia". Facultad de ingeniería Universidad nacional Federico Villarreal escuela universitaria de post-grado. U.N.L.P.
33. MALAGA & KUROIWA. Mapa de peligros de la ciudad de Lambayeque Instituto nacional de defensa civil. INDECI – PNUD – PER/02/051. Diciembre 2003.
34. MANCEVO, V. "Construcción del edificio Socio – Administrativo del puerto de Boquerón". Informe Ingeniero Geológico. ENIA. Santiago de Cuba. 2009
35. MONTROYA, J. "Construcción de la oficina Sede de los Trabajadores Sociales". Informe Ingeniero Geológico. ENIA. Santiago de Cuba. 2005
36. MUSSIO, V. "Potencial de licuefacción mediante el método de microtemores en la colonia solidaridad social", Mexicali. Dr. Efraín Ovando Shelley. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. 111p. 2012

37. 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).
38. 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.
39. 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).
40. 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.
41. ORDAZ H. La susceptibilidad a la licuefacción en el emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal, Cuba Occidental. Minería y Geología / v.29 n.2 / abril-junio / 2013 / p. 1-15. 2013.
42. 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
43. Provincia Guantánamo disponible en:
http://www.ecured.cu/Guant%C3%A1nomo_%28provincia%29.
44. Riesgo Sísmico disponible en:
http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Riesgo_s%C3%ADsmico&oldid=8216050
5». (s.f.). Recuperado el 5 de mayo de 2015, de wikipedia.
45. RODRIGUEZ, PRADO, S. "Esquema ingeniero geológico del valle de Guantánamo". Guantánamo. Tesis de Diploma. ISMM. 1981.65p
46. ROSABAL. "Zonación preliminar de la licuefacción de los suelos en la región de Cuba Oriental". 2011.
47. 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.

48. 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.
49. SEED, B., AND IDRIS, M. "Ground motions and soils liquefaction during Earthquakes", Technical report, Earthquake Engineering Research Institute. 1982
50. SEED, CETIN, MOSS, & KAMMERER. "Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework". California. 2003
51. STOEV, S. "Esquema de Guantánamo. Guantánamo". Tesis de Diploma. ISMM. 1967. 60p
52. SEED. Estudios de licuación sísmica. 1966
53. 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.
54. TSIGE & GARCÍA. "Propuesta de clasificación geotécnica del "Efecto Sitio" (Amplificación Sísmica) de las formaciones geológicas de la Región de Murcia" Geogaceta, 40, 2006
55. VALVERDE, CHACÓN, VIDAL & IRIGARAY. "Susceptibilidad a licuefacción en la vega de Granada (España). 4 CNIS. GRANADA. 18-20 MAYO 2011.
56. WANG, W. "Some finding in soil liquefaction". Water conservancy and hydroelectric power scientific research institute, Beijing, China. 1979
57. YOUNG, 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° A ISSN 1090-0241.
58. YOUNG. Fenómenos Asociados a la licuación. 1992
59. YOUNG. Licuación de arena. 2001
60. YOUNG & IDRIS. Metodologías para la determinación del potencial de licuación. 2001

Anexo 1



Esquema geológico de la provincia Guantánamo.

Leyenda

 ASOCIACION TONALITO-GRANODIORITICA	 DEPOSITOS DE LIMO GRUESO (0.05-0.1mm)	 MELANGE SERPENTINITICO
 BARACOA	 DEPOSITOS DE LIMOS ARCILLOSOS	 MICARA
 CABACU	 DEPOSITOS DE LIMOS ARENOSOS	 MOREL
 CABO CRUZ	 DEPOSITOS ELUVIO-COLUVIALES	 MUCARAL
 CAMARONES	 DEPOSITOS MARINO+PALUSTRE	 PLAYA MOLINO
 CHAFARINA	 DEPOSITOS PALUSTRES	 PUERTO BONIATO
 CHARCO REDONDO	 DIORITAS	 PUNTA IMÍAS
 CILINDRO	 EL COBRE	 RÍO MAYA
 COMPLEJO GRANODIORITICO	 GABRO DIABASA	 SABANETA
 CUMULOS MAFICOS	 GRAN TIERRA	 SAN IGNACIO
 CUMULOS ULTRAMAFICOS	 GÜIRA DE JAUCO	 SAN LUIS
 DEPOSITOS ALUVIALES	 JAIMANITAS	 SANTO DOMINGO
 DEPOSITOS BIOGENICOS	 JAIMANITAS (en el mar)	 SIERRA DE CAPIRO
 DEPOSITOS DE ARCILLAS	 JAMAICA	 SIERRA DEL PURIAL
 DEPOSITOS DE ARENA GRUESA (10-0.5mm)	 LA LINER	 SIERRA VERDE
 DEPOSITOS DE ARENAS	 LA PICOTA	 TECTONITAS
 DEPOSITOS DE GRAVAS (1-10mm)	 MAQUEY	 YAGUANEQUE
 DEPOSITOS DE GRAVAS ARENOSAS	 MAR	 YATERAS

Anexo 2

obras Imías	N	valor de N1.60	CRR	Yd	H	(σ) encima n.f	Yf	H	(σ) debajo n.f	μ	(σ*)	(σ t)	rd	amax	CSR	FSL para mag 6	FSL para mag 7	FSL para mag 8
Joven Club de computación y electrónica				18.37	4	73.48	19	1	19	10	9	82.48	0.99235	0.16	0.94581099			
Reconstrucción y ampliación de la escuela primaria Ciro Frías Cabrera. N.S	24	21.6	1.676379149	16.28	0.4	6.512	18.45	4.2	77.49	42	35.49	42.002	0.96787	0.16	0.11912813	24.76683889	13.93134688	11.82053674
Sala de fisioterapia y rehabilitación con fango.				18.37	3.9	71.643	19	2.1	39.9	21	18.9	90.543	0.983935	0.16	0.49022203			
Policlínico Imías				18.2	2.6	47.32	19	3.4	64.6	34	30.6	77.92	0.97399	0.16	0.25793802			
Remodelación y ampliación policlínico con camas Rafael La Laffita. NS				14.29	0.45	6.4305	18.47	3	55.41	30	25.41	31.8405	0.97705	0.16	0.12732842			
Reconstrucción del taller de maquinaria MINAGRI				18.2	2.6	47.32	19	3.4	64.6	34	30.6	77.92	0.97399	0.16	0.25793802			
Construcción de viviendas para médicos				18.2	3	54.6	19	9	171	90	81	135.6	0.93115	0.16	0.16211666			
2 viviendas vi plantas para médicos	9	8.1	0.636759447	15.46	3.01	46.5346	19.03	0.13	2.4739	1.3	1.1739	47.7085	0.9990055	0.16	4.22246325	0.265412997	0.149294811	0.126674385
Renovación barrio el Salado.	9	8.1	0.636759447	15.37	0.87	13.3719	17.54	2.63	46.1302	26.3	19.8302	33.2021	0.9798805	0.16	0.17062588	6.568151341	3.694585129	3.134799503
Escuela especial 4 de Abril. NS	9	8.1	0.636759447	15.37	1.5	23.055	17.54	5.5	96.47	55	41.47	64.525	0.957925	0.16	0.15500968	7.229849212	4.066790182	3.450609851

Anexo 3

Obras San Antonio del Sur	N	valor de N1.60	CRR	Yd	H	(σ) encima n.f	Yf	H	(σ) debajo n.f	μ	(σ^*)	(σt)	rd	amax	CSR	FSL para mag 6	FSL para mag 7	FSL para mag 8
Sala de fisioterapia y rehabilitación con fango. NS	10	9	0.704410151	17.6	2.3	40.48	19.03	2.5	47.575	25	22.575	63.055	0.980875	0.16	0.28493039	4.351104337	2.44749619	2.076663434
Escuela primaria Pedro Hernández	3	2.7	0.236593944	14.83	0.36	5.3388	18.92	0.88	16.6496	8.8	7.8496	13.1884	0.993268	0.16	0.17355789	2.399230222	1.349567	1.145087151
Joven Club de computación y electrónica Purial				17.35	0.8	13.88	19.82	1.2	23.784	12	11.784	25.664	0.99082	0.16	0.22441905			
Sala de Fisioterapia y rehabilitación Puriales de Caujerí.				16.8	0.5	8.4	19.15	1	19.15	10	9.15	17.55	0.99235	0.16	0.19794942			
Hospital 4to Congreso	7	6.3	0.502054444	19.46	0.82	15.9572	21.46	2.33	50.0018	23.3	26.7018	42.659	0.9821755	0.16	0.16318963	5.414656559	3.045744315	2.584267903
Policlínico Nuevo	14	12.6	0.976772233	19.46	2	38.92	21.46	3.3	70.818	33	37.818	76.738	0.974755	0.16	0.20570305	8.357285596	4.700973148	3.988704489
Remodelación y ampliación Policlínico Puriales de Caujerí				18.47	1	18.47	21.3	1.2	25.56	12	13.56	32.03	0.99082	0.16	0.24340268			
Oficina comercial de ETECSA	3	2.7	0.236593944	13.7	0.18	2.466	18.43	1.67	30.7781	16.7	14.0781	16.5441	0.9872245	0.16	0.12065584	3.451182505	1.941290159	1.647155286
Sub estación eléctrica 110/34.2 kv. NS	7	6.3	0.502054444	14.18	0.6	8.508	15.15	5.3	80.295	53	27.295	35.803	0.959455	0.16	0.13088632	6.751017188	3.797447168	3.222076385

Anexo 4

Obras Manuel Tames	N	valor de N1.60	CRR	Yd	H	(σ) encima n.f	Yf	H	(σ) debajo n.f	μ	(σ^*)	(σt)	rd	amax	CSR	FSL para mag 6	FSL para mag 7	FSL para mag 8
Caldera CAI				14.28	0.62	8.8536	17.86	0.18	3.2148	1.8	1.4148	10.2684	0.998623	0.16	0.75377656			
Sistema de enfriamiento UEB Central Azucarero Argeo Martínez.				18.5			20.6											
Organismos políticos y de masas. Sistema de la Vivienda Jamaica. NS	16	14.4	1.114086812	13.75			17.25							0.16				
Poder Popular. Organismos Globales. Jamaica. NS	12	10.8	0.840239379	15.75			19.3							0.16				
Escuela Especial 4 de abril.	16	14.4	1.114086812	15.89	1.02	16.2078	18.9	1.28	24.192	12.8	11.392	27.5998	0.990208	0.16	0.24949723	7.858976177	4.420674099	3.750874993
Sector militar. NS	11	9.9	0.772238375	15.04			18.53							0.16				
Policlínico. NS	50	45	3.237628303	20.14			22.6							0.16				

Anexo 5

Obras Guantánamo	N	valor de N1.60	CRR	Yd	H	(σ)encima n.f	Yf	H	(σ)debajo n.f	μ	(σ *)	(σ t)	rd	amax	CSR	FSL para mag 6	FSL para mag 7	FSL para mag 8
Parque Solar Fotovoltaico Santa Teresa				16.55	1.2	19.86	19.29	4.2	81.018	42	39.018	58.878	0.96787	0.17	0.16138656			
Sala penal del hospital Pediátrico Luis Ramírez, zona Sur Oeste.				20.14	1	20.14	22.32	3.2	71.424	32	39.424	59.564	0.97552	0.17	0.1628627			
Viviendas Ho Chi Minh. NS	17	15.3	1.18	15.73	0.2	3.146	20.25	3.2	64.8	32	32.8	35.946	0.97552	0.17	0.11813407	17.62598131	9.914614485	8.412400169
Parque Fotovoltaico de 2.5 MW en S/E 110-34. Kv.	36	32.4	3.02	16.76	2.24	37.5424	19.93	7.76	154.6568	77.6	77.0568	114.5992	0.940636	0.17	0.15458042	34.38887153	19.34374024	16.4128705
Informe de los resultados de la vivienda. san Gregorio y El 13 Norte	25	22.5	1.74	18.22	0.45	8.199	15.58	2.25	35.055	22.5	12.555	20.754	0.9827875	0.17	0.17951759	17.15031952	9.647054731	8.185379772
Informe de los resultados de la escuela de música Guantánamo.	16	14.4	1.11	17	0.34	5.831	20.16	3.26	65.7216	32.6	33.1216	38.9526	0.975061	0.17	0.12671243	15.47435279	8.704323442	7.385486557
Edificio GPFB-3 Tribunal (6 norte) NS	25	22.5	1.74	18.22	1.5	27.33	15.58	2.4	37.392	24	13.392	40.722	0.98164	0.17	0.3298361	9.334284409	5.25053498	4.454999377
Oficina comercial OBE Reparto Obrero.				18.39	1.1	20.229	8.78	1.8	15.804	18	-2.196	18.033	0.98623	0.17	0.89490335			
ONIT. Filial Provincial Guantánamo. SIN NIVEL FREATICO	39	35.1	1.68	16.43	3	49.29	21.7	15	325.5	150	175.5	224.79	0.88525	0.17	0.12529337	23.68649865	13.32365549	11.30491981
4 edificios de viviendas calle 13 norte y Martí	17	15.3	1.18	15.73	1.02	16.0446	20.25	1.15	23.2875	11.5	11.7875	27.8321	0.9912025	0.17	0.25861216	8.051551033	4.528997456	3.84278572
Fiscalía provincial Guantánamo. NS	14	12.6	0.97	15.89	1.6	25.424	18.3	3.3	60.39	33	27.39	52.814	0.974755	0.17	0.20768961	8.277347625	4.656008039	3.950552276
Línea de secado. Salina Glorieta.	3	2.7	0.23	13.72	0.75	10.29	36.43	0.15	5.4645	1.5	3.9645	14.2545	0.9988525	0.17	0.39685075	1.049274421	0.590216862	0.500790065
Taller automotriz provincial OEBE Guantánamo.	15	13.5	1.04	16.43	0.35	5.7505	20	0.25	5	2.5	2.5	8.2505	0.9980875	0.17	0.36397466	5.054664203	2.843248614	2.41245337

Anexo 6

Obras Maisí	N	valor de N1.60	CRR	Yd	H	(σ)encima n.f	Yf	H	(σ)debajo n.f	μ	(σ *)	(σ t)	rd	amax	CSR	FSL para mag 6	FSL para mag 7	FSL para mag 8
Ampliación de la sub-estación eléctrica Maisí.	50	45	3.237628303	20.64	0.76	15.6864	20.69	1.84	38.0696	18.4	19.6696	35.356	0.985924	0.15	0.17278882	32.97797652	18.55011179	15.73948879
ESBEC Pedro Agustín Pérez.	50	45	3.237628303	19.09	2.44	46.5796	21.03	0.76	15.9828	7.6	8.3828	54.9624	0.994186	0.15	0.63554871	8.965836466	5.043283012	4.279149222
Remodelación y ampliación Policlínico Sabana Maisí.	50	45	3.237628303	23.38	3.33	77.8554	25.66	6.67	171.1522	66.7	104.4522	182.3076	0.9489745	0.15	0.16149026	35.28525947	19.84795845	16.84069202
Servicentro Maisí.	50	45	3.237628303	19.99	4.1	81.959	22.03	1.9	41.857	19	22.857	104.816	0.985465	0.15	0.44060982	12.93258918	7.274581414	6.172372109
ESBEC Adriano Galano.	50	45	3.237628303	18.09	0.19	3.4371	21.06	3.59	75.6054	35.9	39.7054	43.1425	0.9725365	0.15	0.10303061	55.30614631	31.1097073	26.39611528
Sala fisioterapia y rehabilitación con fango los llanos.	37	33.3	3.890588029	29.08	1.98	57.5784	20.03	2.27	45.4681	22.7	22.7681	80.3465	0.9826345	0.15	0.33809348	20.25308183	11.39235853	9.666243602
Sala de fisioterapia y rehabilitación Sabana. Poblado vertientes. NS			0.049103123	14,98			18,80							0.15				
Escuela primaria Antonio Maceo. NS	8	7.2	0.569299334	14,98			18,80							0.15				