



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

Dr. Antonio Núñez Jiménez.

Facultad de Geología Minería

*Tesis presentada en opción al título de Ingeniera
Geóloga.*

*Susceptibilidad a la ocurrencia de
licuefacción de los suelos en la ciudad de
Bayamo inducido por fuertes terremotos.*

Raisa Peña Leyva.

Moa 2018.



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

Dr. Antonio Núñez Jiménez.

Facultad de Geología Minería

*Tesis presentada en opción al título de Ingeniera
Geóloga.*

*Susceptibilidad a la ocurrencia de
licuefacción de los suelos en la ciudad de
Bayamo inducido por fuertes terremotos.*

Autor: Raisa Peña Leyva.

Tutor(a): Msc Ing. Liuska Fernández Diéguez.

Moa 2018.

Pensamiento

Pensamiento

*El futuro de nuestra Patria tiene que ser necesariamente
un futuro de hombres de ciencia...*

FIDEL CASTRO RUZ



Agradecimientos

Agradecimientos

Agradezco:

A la revolución por haberme permitido formarme como ingeniera geóloga.

A mi abuela Maribel Riverón Bientz por haberme dado lo mejor de su vida, educado con tanto amor y cariño, y, por haber forjado a la persona que soy hoy.

A mis padres Nelson Peña Urrutia y Yaritza Leyva Riverón por haberme dado la vida y enseñarme que siempre hay que mirar al futuro y dar lo mejor de uno para triunfar.

A mi compañero Carlos E. Cruz Rodríguez por apoyarme y darme su amor a toda costa.

A mis familiares y amigos por su apoyo incondicional.

A mi tutora Ms.C Ing. Liuska Fernández Diéguez, por guiarme y por apoyarme en la realización de este trabajo.

Al claustro de profesores del Departamento de Ingeniería Geológica que de una forma u otra ayudaron a mi formación profesional.

A todos los que pusieron su granito de arena para la realización de este trabajo.

A todos muchas gracias.

Dedicatoria

Dedicatoria

A mi abuela Maribel Riverón Bientz por luchar día a día para sacarme adelante y darme
siempre lo mejor de ella.

A mis padres por todo lo que me han brindado a lo largo de mi vida.

A mi compañero y amigo por su entrega y amor.

A mi familia y amigos por su apoyo incondicional.

Resumen

Resumen:

Los estudios sobre los efectos de los sismos se han desarrollado a lo largo de los años a partir de su observación directa. Las experiencias del terremoto ocurrido en Santiago de Cuba en 1932 y en Bayamo 1947 nos convocan a no dejar pasar por alto la sismicidad de nuestro país como fuente de desastres. La investigación surge por la necesidad de conocer las características de los suelos y los terremotos donde ha ocurrido la licuefacción para predecir zonas susceptibles en la provincia de Granma. La investigación se realiza con el objetivo de evaluar la susceptibilidad a la licuefacción de los suelos generada por sismos de gran magnitud en la zona correspondiente al área urbana del municipio Bayamo dentro de la cuenca del Cauto en la provincia Granma. Para dar respuesta a los objetivos de la investigación se llevó a cabo por los métodos histórico lógico y de análisis y síntesis. Se realizó un resumen de las principales características de los terremotos donde ha ocurrido la licuefacción y de las condiciones de los suelos. Se concluye que las condiciones ingeniero geológicas de los suelos de la zona urbana del municipio Bayamo en sentido general no son favorables para que ocurra la licuefacción dado que está compuesto por materiales de compactación media a dura, el nivel freático a más de 3 metros, baja saturación y alta concentración de partículas finas, solo en algunos sectores específicos, principalmente en las zonas cercanas al río Bayamo, donde se encuentran los sedimentos aluviales indiferenciados del Pleistoceno Superior al Holoceno podrá ocurrir el fenómeno.

ABSTRACT:

Studies on the effects of earthquakes have developed over the years from direct observation. The experiences of the earthquake that occurred in Santiago de Cuba in 1932 and in Bayamo 1947 call us to not overlook the seismicity of our country as a source of disasters. The research arises from the need to know the characteristics of soils and earthquakes where liquefaction has occurred to predict susceptible areas in the province of Granma. The research is carried out with the objective of evaluating the susceptibility to liquefaction of soils generated by large-scale earthquakes in the area corresponding to the urban area of Bayamo municipality within the Cauto basin in Granma province. In order to respond to the objectives of the research, it was carried out by historical logical methods and analysis and synthesis methods. A summary was made of the main characteristics of earthquakes where liquefaction and soil conditions have occurred. It is concluded that the geological engineer conditions of the soils of the urban area of Bayamo municipality in a general sense are not favorable for the liquefaction to occur given that it is composed of materials of medium to hard compaction, the water table to more than 3 meters, low saturation and high concentration of fine particles, only in some specific sectors, mainly in the areas near the Bayamo river, where the undifferentiated alluvial sediments of the Upper Pleistocene to the Holocene can be found.

Tabla de contenido

Tabla de contenido

Resumen:.....	ii
ABSTRACT:.....	iii
INTRODUCCIÓN:.....	8
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE DE LA INVESTIGACIÓN.....	10
Factores que condicionan la ocurrencia de licuefacción. (Shadenet, 1990). Citado en (Parellada - Reyes, 2016).....	11
Factores que influyen en la licuefacción:	12
Condición de un suelo para que ocurra la licuefacción:	13
Métodos utilizados para evaluar la susceptibilidad a la licuefacción.	16
Evidencias históricas del fenómeno de licuefacción de suelos.....	17
Sismicidad en Cuba.	20
Reportes históricos de licuefacción de los suelos en Cuba.....	24
Efecto de sitio.....	32
CAPÍTULO 1: CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DE LA REGIÓN DE ESTUDIO.....	36
Introducción:	36
1.1 Ubicación geográfica de la provincia Granma.....	36
1.2 Relieve.	37
1.3 División política administrativa.	38
1.4 Clima.....	40
1.5 Características hidrográficas.	41
1.6 Geomorfología.	42
1.7 Geología regional.	43
1.8 Sismicidad regional y del área de estudio.....	47
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA PARA ESTUDIAR EL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN.....	52
Introducción:	52

2.1 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)).	55
Cálculo del Factor de seguridad para la licuefacción.	57
2.2 Metodología aplicada para el análisis de los indicadores para el estudio de la susceptibilidad a la licuefacción en el área de estudio.	62
2.2.1 Análisis de las condiciones geológicas del área de estudio.	62
2.2.2 Análisis del comportamiento de la sismicidad en el área de estudio.	62
2.2.3 Análisis del comportamiento del nivel freático en el área de estudio.	62
2.2.4 Análisis de las condiciones ingeniero geológicas.	62
2.2.5 Análisis del cálculo del factor de seguridad para la licuefacción (FSL).	63
CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO.	66
Introducción:	66
3.1. Criterios para la selección de escenarios susceptibles a la licuefacción.	66
3.2 Validación del sistema de indicadores propuestos para el municipio Bayamo.	67
3.2.1 Condiciones geológicas:	67
3.2.2 Sismicidad	69
3.2.3 Características hidrográficas:	70
3.2.4 Condiciones ingeniero-geológicas:	71
3.2.5 Cálculo de Factor de seguridad para la licuefacción.	77
3.3 Conclusiones parciales para Bayamo.	77
CONCLUSIONES GENERALES	80
RECOMENDACIONES	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
ANEXOS:	88

Introducción

INTRODUCCIÓN:

Desde el surgimiento de la humanidad y a lo largo del desarrollo de la misma uno de los fenómenos naturales que más le ha interesado ha sido sin lugar a dudas la sismicidad. Aunque en la actualidad se ha logrado alcanzar un alto nivel de conocimiento acerca de este tema, no existe un método de predicción temprana que nos alerte ante la ocurrencia de un terremoto.

Un terremoto, es un fenómeno de sacudida brusca y pasajera de la corteza terrestre producida por la liberación de energía acumulada en forma de ondas sísmicas (Wikipedia, 2018b). Estos constituyen uno de los factores de riesgo mayores a los que se enfrenta la sociedad, de ahí la importancia de estudiar sus efectos en aras de disminuirlos.

Unos de los fenómenos más destructivos inducidos por fuertes terremotos es la licuación de los suelos. El termino licuación o licuefacción incluye todos los fenómenos donde se dan excesivas deformaciones o movimientos como resultado de transitorias o repetidas perturbaciones de suelos saturados poco cohesivos.(Perucca; Pérez y Navarro, 2006).

En Cuba se han llevado a cabo una serie de estudios sobre este tema pues las experiencias adquiridas a partir de lo ocurrido en Santiago de Cuba en 1932 y Bayamo en 1947 nos convocan a no dejar pasar por alto la sismicidad del país como fuente de desastres.

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

Por lo que en el presente trabajo se realizaran los estudios pertinentes para determinar el potencial de los suelos a licuar ante la ocurrencia de sismos de gran

magnitud en la provincia Granma, específicamente en la ciudad de Bayamo, dentro de la zona de la cuenca Cauto.

Problema:

Insuficiente conocimiento de las condiciones ingeniero – geológicas para determinar si los suelos de la ciudad de Bayamo son propensos a licuar ante un sismo de gran magnitud.

Objeto de estudio:

Los suelos de la ciudad de Bayamo dentro de la cuenca Cauto.

Objetivo general:

Evaluar las condiciones ingeniero – geológicas para determinar si los suelos de la ciudad de Bayamo son propensos a licuar ante un sismo de gran magnitud.

Objetivos específicos:

- ❖ Caracterizar las condiciones ingeniero – geológicas de la región.
- ❖ Aplicar un sistema de indicadores geotécnicos y sismológicos que permitan determinar escenarios licuables.
- ❖ Delimitar las áreas dentro de la ciudad de Bayamo que son propensas a licuar ante un sismo de gran magnitud.

Hipótesis:

Si se logra caracterizar los suelos del área de estudio a partir de conocer las condiciones ingeniero - geológicas entonces se podrá determinar el potencial de licuefacción, el efecto de sitio y delimitar las áreas de mayor susceptibilidad.

Novedad de la investigación:

Se hace una caracterización ingeniero geológica de los suelos de la ciudad de Bayamo que permite la evaluación preliminar del potencial de licuefacción.

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE DE LA INVESTIGACIÓN.

Introducción:

A lo largo de la historia de la humanidad, uno de los temas más interesantes pero dañinos es, sin lugar a dudas, la licuefacción de los suelos inducidos por terremotos, y es uno de los principales contribuyentes al riesgo sísmico urbano. Por lo general la licuefacción ocurre en suelos granulados sueltos, saturados o moderadamente saturados, con un drenaje pobre, tales como arenas sedimentadas o arenas y gravas que contienen vetas de sedimentos impermeables. Este fenómeno puede causar daño a estructuras en varias maneras. Ejemplo de ello constituyen los asentamientos drásticos e irregulares de las estructuras, pérdida repentina de los cimientos que se encuentren en la capa licuable, las tuberías de agua, gas y otros ductos pueden flotar y desplazarse hacia la superficie, etc.(Wikipedia, 2018b).

Conceptos de licuefacción.

- ❖ Rico, A. y Del Castillo, H. (1988), manifiesta que el fenómeno de licuación de suelo consiste en la pérdida rápida de resistencia al esfuerzo cortante, temporal o definitivo. citado en (Parellada - Reyes, 2016)
- ❖ Sauter (1989), opina que el estado de licuefacción, se presenta únicamente en suelos saturados y pocos densos como arenas y las arenas limosas sin consolidar. Citado en (Parellada - Reyes, 2016)
- ❖ 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.
- ❖ González de Vallejo (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 asientos.

- ❖ 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. (Colectivo de Autores de la Sección de Sismología, Vulcanología y Exploración Geofísica, Geología. 2003. San Pedro, Costa Rica) en (Parellada - Reyes, 2016)
- ❖ 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) en (Parellada - Reyes, 2016)
- ❖ (RODRÍGUEZ; AUDEMARD y RODRÍGUEZ)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.

Factores que condicionan la ocurrencia de licuefacción. (Shadenet, 1990). Citado en (Parellada - Reyes, 2016)

- ❖ **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.

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

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).

Condición de un suelo para que ocurra la licuefacción:

Para que ocurra el fenómeno de licuefacción de los suelos, particularmente, en aquellos suelos de grano fino, deben cumplir con ciertas condiciones granulométrica propuesta por Wang en el año 1979. Las mismas 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.

Por otra parte, 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 conoce como el 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).

Según el Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (SUCS), arenas clasificadas como CL-ML, SM-SC, o GM-GC son potencialmente licuables, (Youd,1998). Por otra parte, (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.

(González de Vallejo, 2002) planteo: 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.

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 mayores 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 y Idriss, 1982), y más recientemente (Youd y Idriss, 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 (1983)) y (Seed y De Alba, 1986) han presentado el método simplificado, en base a ensayos de penetración estándar y el cono holandés. En Japón, (Tokimatsu y Yoshimi, 1983); (Iwasaki, 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 y

Campanella, 1985). La corrección de sobrecarga se realizó de acuerdo a (Liao y 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.

Son diversos los métodos existentes para evaluar el potencial de licuefacción de los suelos, los mismos pueden dividirse en tres grupos fundamentales:

- ❖ 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.

Estos métodos 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.

- ❖ 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.
- ❖ 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.

Estos dos últimos métodos, a su vez, 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 basados en el comportamiento observado en terremotos anteriores: 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).

Evidencias históricas del fenómeno de licuefacción de suelos.

Existen diversas evidencias a lo largo de la historia, de la ocurrencia de este fenómeno, algunos ejemplos son: el terremoto del 3 de marzo de 1985 en Chile, 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), 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. El estudio de las causas y efectos de este devastador terremoto ha marcado pautas en el estudio de estos fenómenos naturales. Otro ejemplo es el de Mayomba, 4 de abril de 1991, etc.

A pesar de los avances científicos y tecnológicos, en la actualidad, es un hecho que este fenómeno afecta a todos y no podemos predecirlo. Deslizamientos, derrumbes, daños en las construcciones, puentes, viales, pérdidas de vidas humanas, entre otros, son los daños más frecuentes, así lo evidencia los últimos terremotos ocurridos.

Perú

(Pisco, Chincha), el 15 de agosto de 2007, su epicentro se localizó en las costas del centro del Perú a 40 km al oeste de Pisco y a 150 km al suroeste de Lima, y su hipocentro se ubicó a 39 km de profundidad, con una magnitud de 8,0 en la escala sismológica de magnitud de momento y una intensidad máxima de IX en la escala de Mercalli. Dejó 595 muertos, 2291 heridos, 76 000 viviendas totalmente destruidas e inhabitables y 431 000 personas resultaron afectadas.² Las zonas más afectadas fueron las provincias de Pisco, Ica, Chincha, Cañete, Yauyos, Huaytará y Castrovirreyna. También afectando a la capital de Perú, Lima. La magnitud destructiva del terremoto también causó grandes daños a la infraestructura que proporciona los servicios básicos a la población, tales como agua y saneamiento, educación, salud y comunicaciones. En el distrito Chinchano de Tambo de Mora, el violento sismo destruyó las casas de adobe, mientras que las de material noble fueron destruidas por una aparente licuefacción del suelo, ya que se hundieron 2,1 m sobre el nivel del suelo.

Haití, el 12 enero de 2010, 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.

Chile, 7 de febrero de 2010, un terremoto de magnitud 8.8 destruye el centro y sur del país con un total de 486 víctimas fatales oficialmente reconocidas, 79 personas desaparecidas y un importante daño en la infraestructura.

Japón, 11 de marzo de 2011, Se ubicó en el mar, frente a la costa de Honshu, 130 km al este de Sendai, en la prefectura de Miyagi, Japón, a una profundidad de 32 kilómetros. Con una magnitud de 9.0 Mw. El terremoto fue seguido de un enorme tsunami. Hubo afectaciones en el transporte, las telecomunicaciones, en los puertos, aeropuertos, licuefacción de los suelos y muchos otros.

México, 19 de septiembre de 2017, El epicentro ha sido localizado en los límites de los estados de Puebla y Morelos, a 120 kilómetros de Ciudad de México y a una profundidad de 57 kilómetros y con una magnitud de 7,1 R. a nivel nacional dejó un total de 369 víctimas, cientos de obras dañadas, edificios derrumbados, escuelas, etc.

Nieves Sánchez Guitián, secretaria del Colegio Oficial de Geólogos, ha explicado que el conocido como “efecto local”, que se produce porque el terreno se comporta como un fluido, es lo que ha producido la mayor devastación en Ciudad de México.

Según la experta, el terreno sobre el que se asienta dicha capital “está formado por cenizas volcánicas poco consolidadas, con líquido intersticial —entre los poros— que le confiere un comportamiento fluido y reduce su resistencia, un fenómeno conocido como licuefacción”.

De esta manera, ha añadido, “el terreno actúa como si fuera una esponja, con el nivel de agua entre los poros, y al producirse las vibraciones por la onda sísmica, el líquido se mueve y se genera un riesgo mayor”, ya que los edificios cimentados de manera superficial “se hunden en cuanto reciben el impacto”. (autores, 2017)

Este terremoto causó más daño en todo el país que el anterior del 7 de septiembre, a pesar de que este fue de mayor energía y de magnitud 8,2 grados a una profundidad mucho mayor, causó 78 muertos en Oaxaca, 16 en Chiapas y 4 en Tabasco, que sumaron un total de 98, y el del 19 de septiembre fue mucho más superficial de ahí que causo mucho más daño.

Sismicidad en Cuba.

Los terremotos como fenómenos geológicos constituyen la principal amenaza de origen endógeno en nuestro archipiélago, por tal motivo en nuestro país se llevan a cabo un gran número de investigaciones sobre este tema. La región oriental es la de mayor riesgo sísmico del país, así lo evidencian los registros.

La génesis u origen de la sismicidad de Cuba es tectónica y está determinada por estructuras y fallas activas, donde se reconocen la existencia de:

- ❖ Terremotos de entre placas.
- ❖ Terremotos de interface.
- ❖ Terremotos de interior de placas.

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.

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 1) y donde se aprecian los sismos más significativos. En la (Tabla 1) se puede observar un registro de terremotos ocurridos en el país desde 1551 hasta 1992 de magnitudes e intensidades significativas, en la misma 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 y Oliva, 2014)

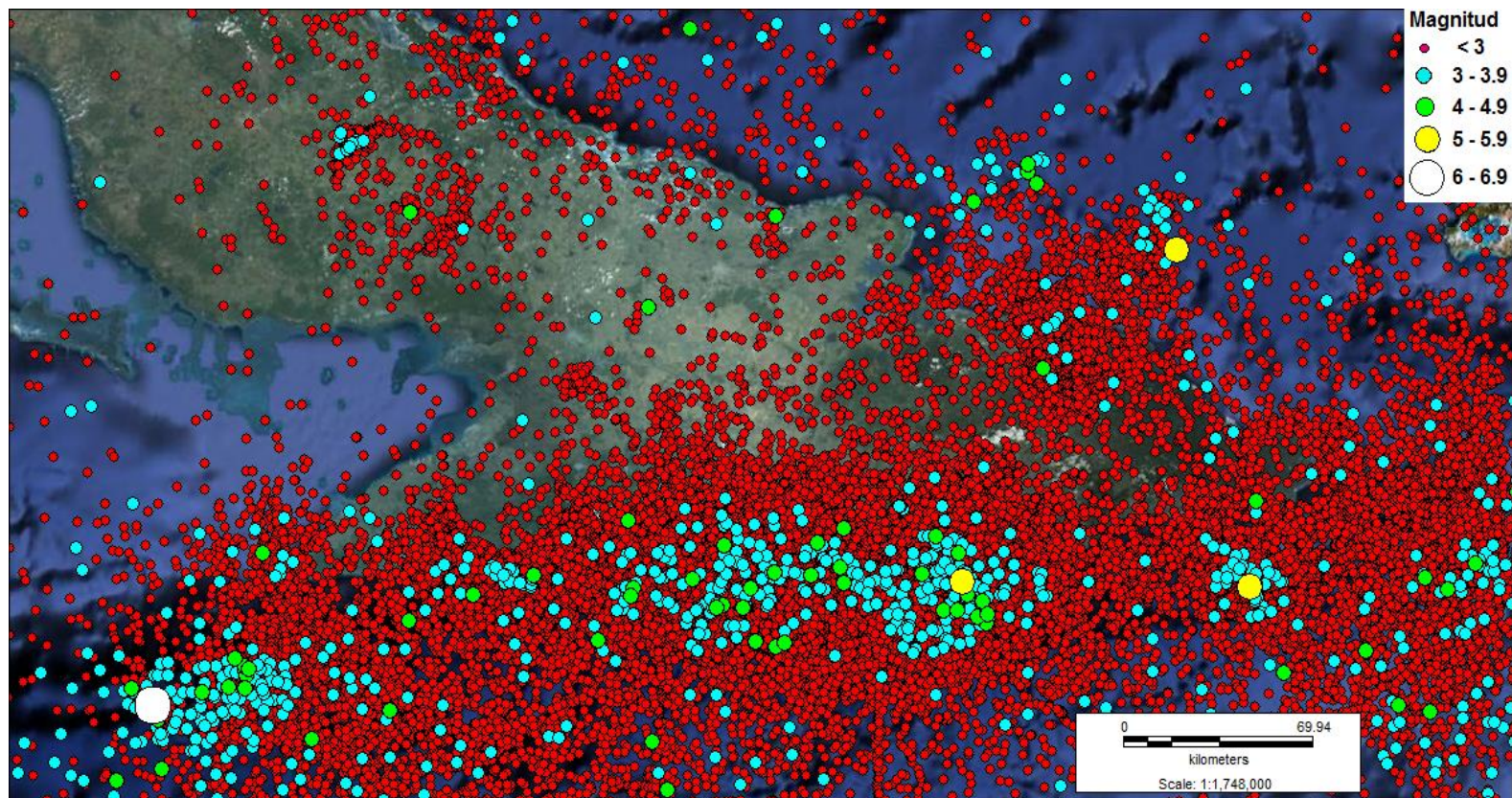


Figura 1: Sismicidad registrada por el SSN de 1998 a mayo 2016 en la región oriental. (Fuente CENAIIS)

Tabla 1: Terremotos históricos de gran magnitud e intensidad ocurridos en Cuba. (Fuente CENAIIS).

Ms: Magnitud; I: Intensidad MSK; H: Profundidad (km)

AÑO	MES	DÍA	HORA	Lat. N.	Long. W.	Ms	H	I	LOCALIDAD
1551	OCT	18	-	(20.40)	(76.60)	(5.8)	(15)	8.0	BAYAMO
1578	AGO		-	(19.90)	(76.00)	(6.8)	(30)	8.0	SANTIAGO DE CUBA
1580			-	(19.90)	(76.00)	(5.8)	(30)	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1624	OCT		-	(20.40)	(76.00)	(5.2)	(15)	7.0	BAYAMO
1675	FEB	11	-	(19.90)	(76.00)	(5.8)	(30)	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1678	FEB	11	14:59	(19.90)	(76.00)	(6.8)	(30)	8.0	SANTIAGO DE CUBA
1682			-	(19.90)	(76.00)	(5.8)	(30)	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1752	OCT		-	(19.90)	(76.00)	(5.8)	(30)	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1760	JUL	11	-	(19.90)	(76.00)	(6.8)	(30)	8.0	SANTIAGO DE CUBA
1766	JUN	12	05:14	(19.80)	(76.10)	(7.6)	(35)	9.0	SANTIAGO DE CUBA
1775	FEB	11	-	(19.90)	(76.00)	(5.8)	(30)	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1826	SEP	18	09:29	(19.90)	(76.00)	(5.8)	(30)	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1842	JUL	07	-	(19.90)	(76.00)	(6.0)	(30)	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1852	AGO	20	14:05	(19.77)	(75.35)	(7.3)	(30)	9.0	SANTIAGO DE CUBA
1852	NOV	26	08:44	(19.50)	(76.25)	(7.0)	(35)	8.0	SANTIAGO DE CUBA
1858	ENE	28	22:04	(19.90)	(76.00)	(6.5)	(30)	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1880	ENE	23	04:39	(22.70)	(83.00)	(6.0)	(15)	8.0	SAN CRISTOBAL
1903	SEP	22	08:09	(19.90)	(76.00)	(5.7)	(30)	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1906	JUN	22	07:09	(19.65)	(76.25)	(6.2)	(30)	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1914	FEB	28	05:19	(21.22)	(76.17)	(6.2)	(32)	7.0	GIBARA
1914	DIC	25	05:19	(19.45)	(76.30)	(6.7)	(30)	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1926	AGO	03	11:30	(20.30)	(77.10)	(5.4)	(15)	7.0	MANZANILLO
1930	ENE	17	12:00	(19.90)	(76.00)	(5.8)	(25)	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1932	FEB	03	06:15	19.80	75.80	6.75	-	8.0	SANTIAGO DE CUBA
1939	AGO	15	03:52	22.50	79.25	5.6	-	7.0	REMEDIOS- CAIBARIEN
1947	AGO	07	00:40	19.90	75.30	6.75	50	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1976	FEB	19	13:59	19.87	76.87	5.7	15	8.0	PILON
1992	MAY	25	16:55	19.62	77.70	7.0	30	7.0	CABO CRUZ

Reportes históricos de licuefacción de los suelos en Cuba.

Terremoto del 18 de octubre de 1551 ubicado en Bayamo, los reportes históricos argumentan la ocurrencia de la licuefacción (Cotilla-Rodríguez y Córdoba-Barba, 2010)

Fue posible confirmar estos datos basados en una colección de documentos inéditos y otros en el Archivo General de Indias, mejorando el conocimiento sobre la sismicidad de este territorio. El daño máximo se experimentó a lo largo de la falla Cauto-Nipe. Hay evidencia de campo concluyente para mostrar que este terremoto se asoció con fallas superficiales. Como resultado de los choques, algunas áreas que rodean Bayamo, así como otros a cierta distancia fueron intensamente dañados. De la descripción de los efectos del terremoto, está claro que la licuefacción del suelo tenía un efecto significativo sobre el daño y sobre las intensidades asignadas al área de Bayamo.

De acuerdo con la información encontrada en los documentos, el daño causado por este terremoto se puede resumir de la siguiente manera (localidad = Intensidad, escala MSK): Cabo Cruz = 9, Sierra Maestra (Las Mercedes) = 9-8, Bayamo = 8, Cauto Embarcadero = 8, Niquero = 8, Yara = 8-7, Manzanillo = 8-7, Jobabo Mines = 7, Jiguaní = 6, Puerto Príncipe = 5 y Sancti Spíritus = 3. El terremoto alcanzó una magnitud de 6.6 y el epicentro se situó en 19.6 N-77.8 W. (Cotilla-Rodríguez y Córdoba-Barba, 2010)

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 2)



Figura 2: Foto. Licuefacción de los suelos en calle La Alameda, en Santiago de Cuba. Terremoto del 3 de febrero de 1932. Tomado de Chuy, 2002.

Investigaciones realizadas en Cuba y en la región de estudio.

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. al., 2002).

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.

I CONFERENCIA INTERNACIONAL “Peligrosidad, Riesgo Geológico e Ingeniería Sísmica (MSc. Ing. Noel David Heredia Veranesⁱ y DrC. Ing Francisco Calderín Mestre.) En el trabajo se calcularon los factores de seguridad contra la licuación en la zona más propensa a experimentar este fenómeno en la ciudad de Santiago de Cuba siguiendo varios esquemas de cálculo. La estratigrafía de la zona que

circunda la bahía de Santiago de Cuba, a diferencia de lo que se ha planteado hasta hoy por numerosos investigadores, está compuesta por depósitos predominantemente arcillosos, rocosos y semirocosos los cuales no son susceptibles de experimentar licuación incluso bajo sismos de magnitud 8 con aceleraciones de la gravedad de 0.25g. Los resultados arrojados fueron analizados según los modelos de Seed & Idriss (Norteamérica), Iwasaki (Japón) y el usado por la escuela china. Ellos demuestran, después de revisar toda la información geotécnica disponible de la zona que se encuentra en los archivos de la ENIA – 8, que el fenómeno solo se manifiesta en puntos aislados del área siendo necesaria una revisión de los esquemas de vulnerabilidad por licuación para la ciudad de Santiago de Cuba.

En el artículo “Evaluación de la susceptibilidad a la licuefacción de los sedimentos cuaternarios del emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal, provincia de Artemisa, Cuba “(Ordaz-Hernández; et. al., 2013) expone los resultados 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, solos 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 del Fm. Guane.

Modelación de parámetros geotécnicos como contribución a la zonación sísmica local: ciudad de San Cristóbal, Cuba (Ordaz-Hernández; et. al., 2014). Esta investigación propone un procedimiento para la estimación y modelación de los principales parámetros geotécnicos que inciden en la zonación sísmica local de la ciudad de San Cristóbal. El procedimiento consta de cuatro etapas: la elaboración

de bases de datos, el análisis exploratorio de datos, la creación del modelo geológico 3D y, finalmente, la generación del modelo cuantitativo. La aplicación de esta metodología en la ciudad de San Cristóbal reveló valores bajos de densidad natural, lo que sugiere condiciones desfavorables de respuestas de los suelos frente a sismos.

Procedimiento para la gestión y gestión de riesgos geológicos en la provincia de Santiago de Cuba (Galván, 2014) en un artículo donde el autor propone un procedimiento para la gestión de riesgos geológicos en la provincia Santiago de Cuba basado en los principios de la gestión por procesos. Su aplicación logra resultados importantes, entre ellos: múltiples mapas de peligro, vulnerabilidad, riesgos geológicos y zonación ingeniero-geológica de multi amenazas; la proposición de distintas acciones estratégicas según la situación estudiada, así como, un conjunto de recomendaciones para la mejora continua de la gestión de riesgos geológicos en este territorio. Se confeccionó un mapa de susceptibilidad a la licuefacción para el municipio Santiago de Cuba a partir de la utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Finalmente, la validación del procedimiento propuesto a través de un grupo de expertos en la materia, confirma sus posibilidades de generalización a otros territorios del país.

En el trabajo de diploma titulado “Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el Consejo popular Guillermon Moncada del municipio Santiago de Cuba por (Herrera - Delfín, 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.

Fernández - Diéguez (2017) 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.

En el trabajo de diploma “Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en la zona sur de la Provincia Guantánamo” (Parellada - Reyes, 2016) lograron aplicar 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 le permitió evaluar el potencial de licuefacción en los escenarios propuestos. Además, a partir de 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. Y lograron determinar que 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.

En el trabajo de diploma “Identificación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el municipio Santiago de Cuba” (Lavañino - Fleita, 2017) aplican un sistema de indicadores que permitió evaluar el potencial de licuefacción en los escenarios propuestos. Determinaron, en el municipio de Santiago de Cuba, los sectores más susceptibles a la ocurrencia del fenómeno de licuefacción, luego de realizar el cálculo del factor de seguridad ante un sismo de magnitud 6 es del 18.3 %, en suelos ML, magnitud 7 del 27.3 %, en suelos ML-CL y magnitud 8 del 36.4 %, en suelos ML, CH y CL. Se identificaron las propiedades físico-mecánicas de los suelos existentes en el área de estudio, a partir de los informes de la ENIA. Así como que los suelos más susceptibles dentro del municipio Santiago de Cuba, son los: limos de baja plasticidad (ML) y las arcillas de baja plasticidad (CL), encontrándose sobre

sedimentos pertenecientes al grupo El Cobre y la formación La Cruz, ubicados cerca de la Bahía.

En el trabajo de diploma “Evaluación de riesgo por licuefacción en los municipios de Guamá, III Frente y Contramaestre de la provincia de Santiago de Cuba” (Gutiérrez - Sánchez, 2017) su autora realiza una evaluación de riesgo por licuefacción en los municipios de Guamá, III Frente y Contramaestre de la provincia de Santiago de Cuba. En el mismo se determinó que en algunos sectores los suelos del municipio Guamá y Contramaestre son de origen fluvial. La cercanía del nivel freático y a una zona sísmo generadora, son los principales factores que propician la posible ocurrencia de la licuefacción. El mayor riesgo por licuefacción está dado en el municipio Guamá en los sectores cercanos a la costa, estos se caracterizan por una alta complejidad geológica y tectónica. En el municipio Contramaestre las obras ingenieriles construidas sobre sedimentos de origen fluvial y suelos de composición areno arcilloso con grava representan las áreas más vulnerables a la ocurrencia de la licuefacción, así como que los elementos más vulnerables son las áreas de asentamiento poblacional que sobreyacen a depósitos fluviales, siendo esto suelos muy flexibles e inestables en relación a procesos tectónicos y los suelos más vulnerables para la licuefacción son los clasificados como: arena acrillosa con grava (SC) y la arcilla de baja plasticidad (CL) representados principalmente en las formaciones Cauto y San Luis.

En el trabajo de diploma “Identificación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducidos por sismos de gran magnitud en los municipios de San Luis, Julio Antonio Mella y Palma Soriano de la provincia Santiago de Cuba” (Bauta - Torres, 2017) realizan una delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducidos por sismos de gran magnitud en los municipios de San Luis, Julio Antonio Mella y Palma Soriano de la provincia Santiago de Cuba. El mismo tenía como objetivo evaluar las condiciones ingeniero geológicas de los suelos para saber el potencial de licuefacción ante un sismo de gran magnitud. Se aplicó un sistema de indicadores a partir de conjugar factores como: Geología, sismicidad, características hidrogeológicas, 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 resultados indicaron que el municipio Julio A. Mella es el más propenso a la ocurrencia de licuefacción, siendo los estratos de tipo GC (grava arcillosa) y SC (arena arcillosa) los más susceptibles al fenómeno.

Trabajos realizados en el área de estudio:

Entre los trabajos que se han realizados en la región de estudios encontramos:

La tesis de maestría “Riesgo sísmico para el planeamiento urbano de la ciudad de Bayamo” (Rivera, 2001) en la cual su autora realizó un estudio del Riesgo Sísmico en el área correspondiente a la ciudad de Bayamo, dada la necesidad de un estudio detallado del suelo y su comportamiento ante la ocurrencia de sismos fuertes y moderados, el cual no era posible realizar a partir de trabajos anteriores por la escasez y dispersión de los datos existentes entre las diferentes Instituciones que realizaron estudios en el área, además de estar incompleta el área de la Ciudad y la no existencia de mediciones microsísmicas instrumentales.

Otros trabajos investigativos realizados en el área están encaminados a la búsqueda y prospección de yacimientos gasopetrolíferos, entre ellos encontramos: el trabajo de diploma: “Ubicación de estructuras favorables para la acumulación de hidrocarburos en la parte central de la Cuenca Cauto, a partir de la interpretación sísmica y datos de pozos”(Guerra - Santiesteban, 2011); en el mismo, su autor, tenía como objetivo ubicar las zonas con mayores perspectivas para encontrar acumulaciones de hidrocarburos en la parte central de la Cuenca Cauto; sobre la base de la interpretación de los datos sísmicos y de pozos. Logrando ser ubicadas dos estructuras como perspectivas para la acumulación de petróleo. Se localizó además una nueva anomalía del tipo flat spot, se llevó a cabo un estudio sismo estratigráfico de la parte central de la cuenca y se definieron algunos de los componentes del posible sistema petrolero.

El trabajo de diploma, “Evolución tectono-estratigráfica de la Cuenca Cauto, según modelo de sistema de cuenca de antepaís”(Tutaleni-Kambwa, 2013). La misma se realizó con el objetivo de evaluar las relaciones tectono-estratigráficas de la Cuenca Cauto, a través de un modelo evolutivo de sistema de cuenca de antepaís

para localizar las zonas con mayores perspectivas en el desarrollo de su sistema petrolero. Fueron evaluadas las relaciones tectono-estratigráficas de la Cuenca Cauto, a través de dicho modelo. Se pudo afirmar que las estructuras en forma de anticlinal presentes en la cuenca Cauto, coinciden con el movimiento paralelo al transporte tectónico de las estructuras compresivas de colisión y pliegan las secuencias del Eoceno medio, justo antes de la discordancia del Eoceno Superior, indicando la sedimentación sobre un paleorelieve deformado por compresión y luego enterrado en el proceso de extensión tectónica de la cuenca Cauto.

Efecto de sitio.

La naturaleza y la distribución de los daños que se pueden producir en las infraestructuras con la ocurrencia de un terremoto, está muy influenciada por la respuesta del terreno frente a cargas cíclicas, como consecuencia de lo cual se produce una modificación de la señal sísmica (Aki, 1988, Seed *et al.*, 1997). La modificación de esta señal sísmica debida a la influencia de las condiciones geológicas y topográficas, se conoce como *efecto de sitio* y consiste en la amplificación de dicha señal en varios órdenes de magnitud. El estudio de la respuesta sísmica del suelo es un campo de interés en el análisis de riesgo sísmico y en el diseño sismorresistentes está siendo objeto de numerosos trabajos sobre todo tras los desastres de recientes terremotos clasificados como de muy destructivos (Northrig, 1994, Kobe, 1995, Turquía, 1999, El Salvador, 2001 entre otras)

La presencia de terrenos, considerados geotécnicamente como blandos, próximos a la superficie del terreno produce un aumento considerable de los daños generados por terremotos en las infraestructuras situadas sobre ellos, al condicionar la amplificación de las ondas sísmicas en un rango de periodos de vibración (períodos altos) de los materiales, que coincide con el periodo de vibración de las estructuras. La respuesta y la magnitud de esa amplificación de la señal están controlada principalmente por las propiedades geotécnicas de los materiales geológicos, especialmente por sus características dinámicas, así como

el espesor de las capas y la profundidad a la que se encuentra el sustrato rocoso, (Aki, 1988, Borchardt, 1994, Seed *et al.*, 1997)

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) en (Parellada - Reyes, 2016).

Conceptos de efecto de sitio

- ❖ Es la amplificación del movimiento sísmico esperado, dadas las condiciones geológicas superficiales en el sitio de interés. (*Figura 3*)

Efecto de sitio



Figura 3: Ejemplificación del efecto de sitio. (Tomado de internet.)

- ❖ 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) en (Parellada - Reyes, 2016).

Capítulo 1

Características geográficas y geológicas de la región de estudio.

CAPÍTULO 1: CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DE LA REGIÓN DE ESTUDIO.

Introducción:

En este capítulo se recogerán las características generales de la región de estudio, dígase relieve, hidrografía, geología del área, sismicidad, tectónica, etc. en aras de lograr conocer más sobre la región para poder cumplir con los objetivos propuestos.

1.1 Ubicación geográfica de la provincia Granma.

La provincia Granma se encuentra ubicada en la porción suroeste de la región oriental de la isla de Cuba, limita al norte con las provincias de Las Tunas y Holguín, al este con las de Holguín y Santiago de Cuba, al sur con Santiago de Cuba y el Mar Caribe y al oeste con el Golfo del Guacanayabo. (Wikipedia, 2018a). (Figura 4)



Figura 4: Ubicación geográfica de la provincia Granma. (Tomado de Google).

Ubicación geográfica del área de estudio.

La ciudad de Bayamo se encuentra ubicada en la provincia Granma, al Oriente de Cuba. Se extiende desde los 20° hasta los 23° de latitud norte y entre los 76° y 38° de longitud oeste. Posee una extensión territorial de 917,5 km² y una población en el 2009, de 229 932 habitantes.

Limita al Norte con el municipio Cauto Cristo, al Noroeste con el municipio Río Cauto, al Oeste con el municipio Yara, al Suroeste con el municipio Buey Arriba, al Sur y sureste con el municipio Guisa y al Este con el municipio Jiguaní. (Ecured, 2018). (Figura 4)

Este municipio se encuentra dentro de la cuenca del Cauto. (Figura 5)

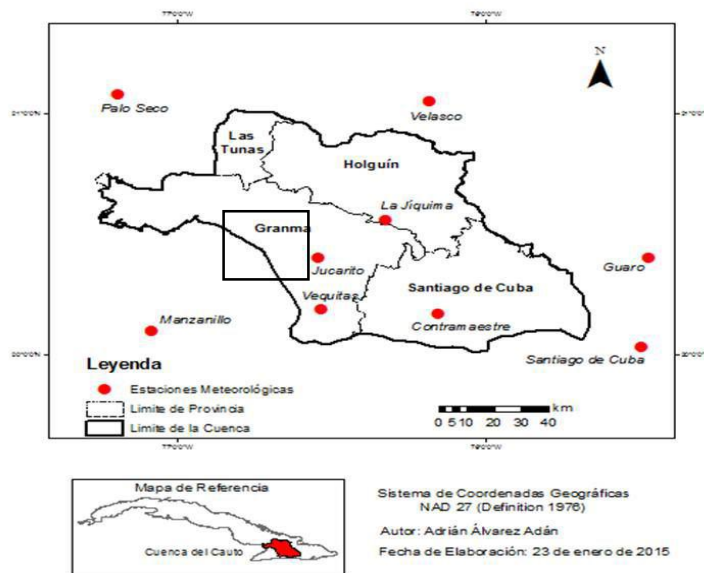


Figura 5: Ubicación geográfica del área de estudio dentro de la cuenca del Cauto.

1.2 Relieve.

El rostro físico de Granma está caracterizado por el armónico contraste entre el llano y la montaña. En sus límites se encierran muchas de las cimas más altas del territorio cubano, junto a la inconmensurable vastedad de la llanura del Cauto, una de las más extensas y uniformes del país.

Al Sur, ocupando una tercera parte de su territorio, se alza la Sierra Maestra, verdadera espina dorsal de la geografía oriental. La elevación máxima de Granma es el pico La Bayamesa a 1 730 metros sobre el nivel del mar.

El contraste físico que caracteriza a la provincia se aplica igualmente a sus costas y mares: de las orillas bajas y cenagosas, pobladas de manglares y pantanos, las aguas poco profundas y las cayerías del Guacanayabo a la árida majestad de las terrazas del Sur, donde se localiza el punto más meridional de la isla de Cuba, la punta del inglés. (Ecured., 2018a)(Figura 6).

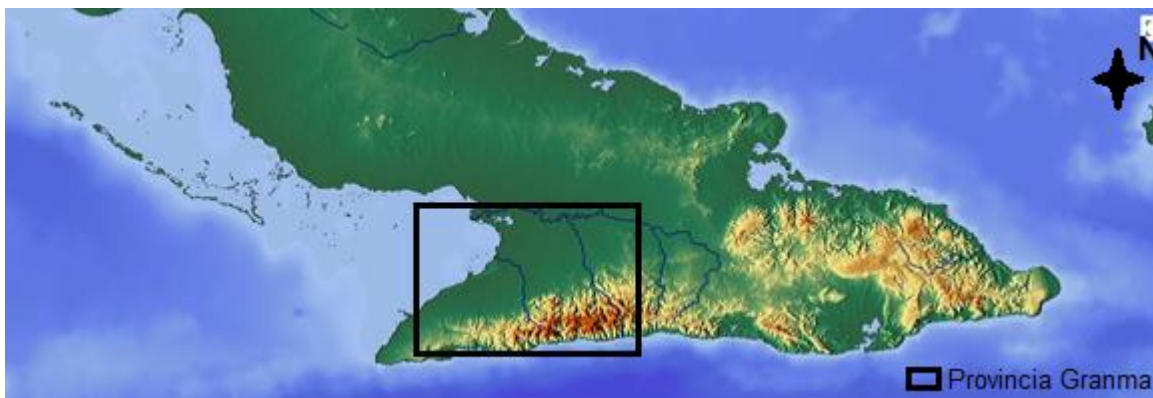


Figura 6: Relieve de la provincia Granma. (Tomado de internet).

1.3 División política administrativa.

La provincia Granma surge a raíz de la última división política administrativa, aprobada en noviembre de 1976, y asume su nuevo nombre en honor al desembarco por playa Las Coloradas del heroico yate Granma.

Administrativamente, está dividida en trece municipios: Río Cauto, Cauto Cristo, Jiguaní, Bayamo, Yara, Manzanillo, Campechuela, Media Luna, Niquero, Pilón, Bartolomé Maso, Buey Arriba, Guisa. (Ecured., 2018a) (Figura 7).

El área a estudiar es el municipio Bayamo.

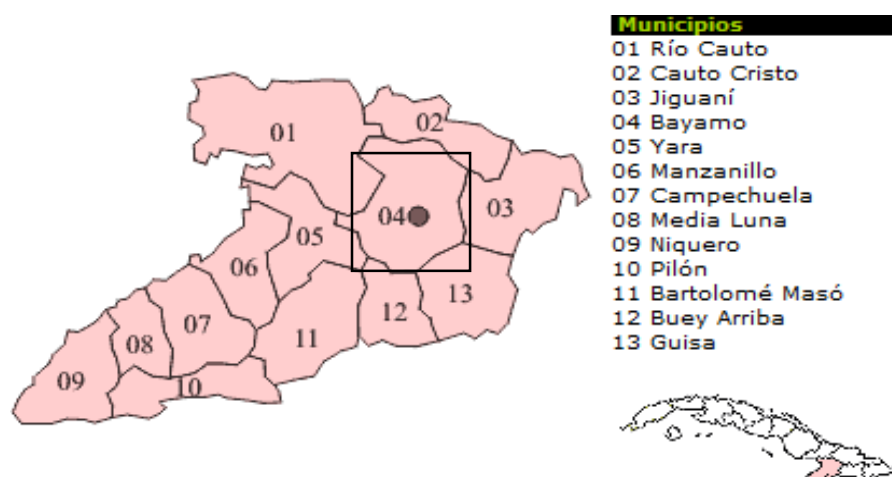


Figura 7: División política administrativa. (Tomado de internet)

A continuación, se muestra el área urbana del municipio Bayamo, área a estudiar en esta investigación. (Figura 8)

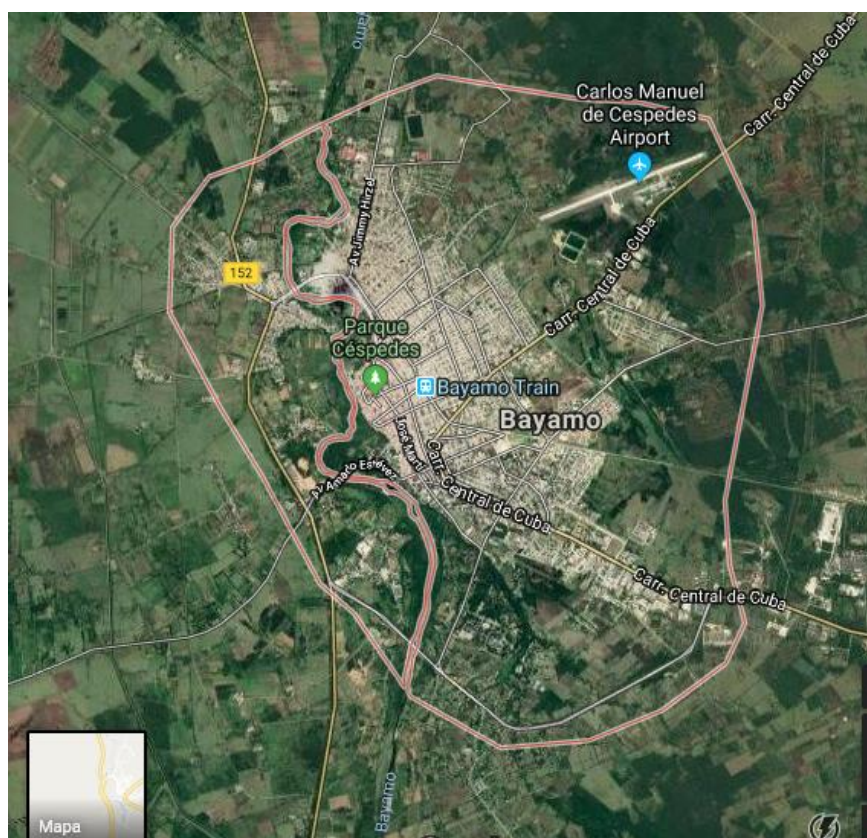


Figura 8: Área urbana del municipio Bayamo. Provincia Granma. (Tomado de Google)

1.4 Clima.

La provincia, en general se caracteriza por tener un clima cálido tropical como el resto del país, es cálido en las llanuras y frío en las alturas. Se caracteriza por: los valores más bajos de lluvia, los cuales se registran en las zonas de Cauto Cristo, Río Cauto, Jiguaní y Pílon.

En el Valle del Cauto existen zonas de muy baja pluviosidad, se pueden presentar láminas de 800 mm anuales y aún menos, convirtiéndose en una de las llanuras más secas de la isla.

Aun cuando el clima es vulnerable ante la irracionalidad de la actividad socioeconómica, y en particular la precipitación, guarda vínculos estrechos con la deforestación que en el caso de la cuenca constituye un problema extendido, no existen argumentos para fundamentar que la actual distribución espacial de la lluvia tenga solo las referidas causas. También en áreas de escaso abastecimiento pluvial se evidencian altos contenidos de sales.

El período menos lluvioso tuvo aproximadamente 200 a 300 mm, insuficiente para el abastecimiento de algunos tipos de cultivos y para el consumo de animales y otras demandas socioeconómicas. El período lluvioso, con 600 y hasta 1 100 – 1200 mm de agua caída mitigando las carencias de humedad. La media anual de la provincia es de 1031.1 mm.

La humedad relativa es normalmente alta con valores por encima del 60%, aumentando cuando ocurre la salida del Sol, registrándose valores superiores al 95%, más elevada en las zonas montañosas, las mínimas se ubican en las costas fundamentalmente al medio día.

Los meses más húmedos son septiembre y octubre y los menos abril y marzo. La radiación solar global anual media toma valores entre 15 - 15.5 MJ/m² en la parte de la Sierra Maestra y en la zona llana entre 16.5 y 17.0 MJ/m² (MJ= Mega Joule). En el municipio Bayamo el clima es tropical húmedo al igual que en el resto de la provincia, con una temperatura promedio de 26 °C, siendo la mínima promedio de 19 °C y su máxima 33 °C. La humedad relativa es de 77 %. (Ecured., 2018a)

1.5 Características hidrográficas.

Los Recursos Hídricos Potenciales en Granma alcanzan los 4499 hm³, de los cuales 3895 corresponden a las aguas superficiales y 604 a las aguas subterráneas.

Está constituida por tres sub-regiones hidrológicas dentro de la Región Hidrológica Oriental.

Subregión Cuenca del Cauto

Su corriente superficial principal es el Río Cauto que atraviesa las provincias de Santiago de Cuba, Holguín, Granma y Las Tunas. Los afluentes de mayor importancia de este río en el territorio son precisamente: Contramaestre, Cautillo, Bayamo y Salado, con longitudes que alcanzan hasta 120 km. Excepto el Cauto y el Salado los demás corren en dirección norte.

Subregión Vertiente Meridional de la Sierra Maestra

Abarca las laderas meridionales de la cordillera, desde Cabo Cruz hasta el parte de agua con el río Macío; esta subregión se caracteriza por la existencia de ríos pequeños con grandes pendientes longitudinales, motivo por el cual en épocas de avenidas arrastran gran cantidad de azolves. Su recorrido hasta la desembocadura en el Mar Caribe, lo hace con un rumbo sur.

Subregión Sur Oeste

Está comprendida desde la zona de Manzanillo en la parte suroeste de las provincias orientales, limita al norte y al este con la Cuenca del Cauto y al sur con la vertiente meridional de la Sierra Maestra. Estos ríos en su mayoría tienen un recorrido en dirección noroeste hasta la desembocadura en el Golfo de Guacanayabo. (Ecured., 2018b)

El municipio Bayamo se encuentra dentro de la subregión Cuenca del Cauto siendo el río Bayamo, el principal accidente geográfico de la ciudad, históricamente, la población ha estado vinculada al mismo a través de las diferentes manifestaciones: constructivas, comerciales, recreativas y otras. Con el tiempo y la acción irracional en la explotación de los recursos, se ha acelerado el

deterioro integral ambiental de este importante curso de agua, lo cual tiene tendencia a agudizarse por el crecimiento de la población.

Además de los embalses de Cautillo y Cauto el Paso, donde prevalecen los suelos hidromórficos, vertisuelos y pardos; tributan al río los arroyos El Salado y El Managua, con los cuales recibe un impacto significativo por los vertimientos de residuales, materiales de construcción así como del pastoreo de animales.

1.6 Geomorfología.

Desde el punto de vista geomorfológico dentro de la zona de la cuenca del Cauto son destacables varias unidades como:

Unidad de inundación de la llanura fluvial y marina deltaica plana, parcialmente cenagosa.

Coincide con el área de la desembocadura y el delta del río Cauto con dos niveles de terrazas marinas y fluviales en los intervalos de altura entre los 2-3 m, y los 5-7m.

Unidad del cauce actual y meandros abandonados.

Esta unidad está formada por meandros enanos ubicados en diferentes paleocauces del río Cauto.

Las dimensiones (largo y ancho) de cada sistema de nodos morfoestructural, controlan las dimensiones que tiene cada meandro y la longitud total de estos sistemas de nodos, define la cantidad de meandros sobre el cauce del río. El gasto del río que permitió la formación de estos meandros determina el escurrimiento máximo permisible que puede drenar por cada meandro.

Unidades de los planos de inundación entre los 10 a 30 m y de 30 a 60 m de altitud.

La morfología de estas unidades, su pendiente y altura del relieve están fuertemente controladas por la estructura en forma de gráben Nipe Guacanayabo y las oscilaciones del nivel del mar del pleistoceno, lo que determinó el perfil de equilibrio del río y la formación y existencia de al menos los tres paleocauces reconocidos en el río. La alimentación del escurrimiento fluvial de estas unidades

proviene principalmente de las subcuencas fluviales que ocupan las alturas y submontañas de las vertientes norte y sur de la cuenca.

Unidades fluviales de la vertiente norte.

Se reconocen las unidades de los ríos que drenan la llanura de articulación abrasiva – acumulativa ligeramente ondulada y plana con altura entre los 10 – 30m. Estos ríos son Naranjo, Majibacoa, La Rioja, Cacocum. En estas unidades se presentan siete segmentos de cauces que alimentan directamente a la llanura del río. **Unidades fluviales en la vertiente Sur.**

En la vertiente Sur se conocen las unidades fluviales de los ríos Bayamo, Cautillo y Contramaestre, que drenan cinco segmentos de cauces directamente a la llanura del río. (Guerra - Santiesteban, 2011)

En nuestra región de estudio se encuentran representadas las unidades fluviales de la vertiente sur principalmente asociadas al río Bayamo.

1.7 Geología regional.

La ciudad de Bayamo, cabecera del municipio de igual nombre, desde el punto de vista geológico se encuentra enmarcada en la cuenca Cauto.

La cuenca presenta la forma de un polígono irregular limitado por fallas transcurrentes, característicos de un desarrollo tectónico. (Figura 9)

La cuenca del Cauto, está cubierta casi totalmente por depósitos del Mioceno – Cuaternario. Al norte afloran secuencias sedimentarias del Paleógeno y Cretácico con un alto aporte de material volcánico. Estas ocupan una posición intermedia entre la Cuenca y los afloramientos de rocas magmáticas correspondiente al arco volcánico Turquino del Paleógeno (Miró, 1993; Álvarez, 1994; Millán, 1997; Álvarez, 2001a, b). El conjunto sedimentario está acomodado en dos grandes hundimientos de tipo pull – apart, con espesores totales de rocas sedimentarias (6 – 7 Km) de acuerdo con los datos sísmicos (Millán, 1997).citado en (Tutalenikambwa, 2013).

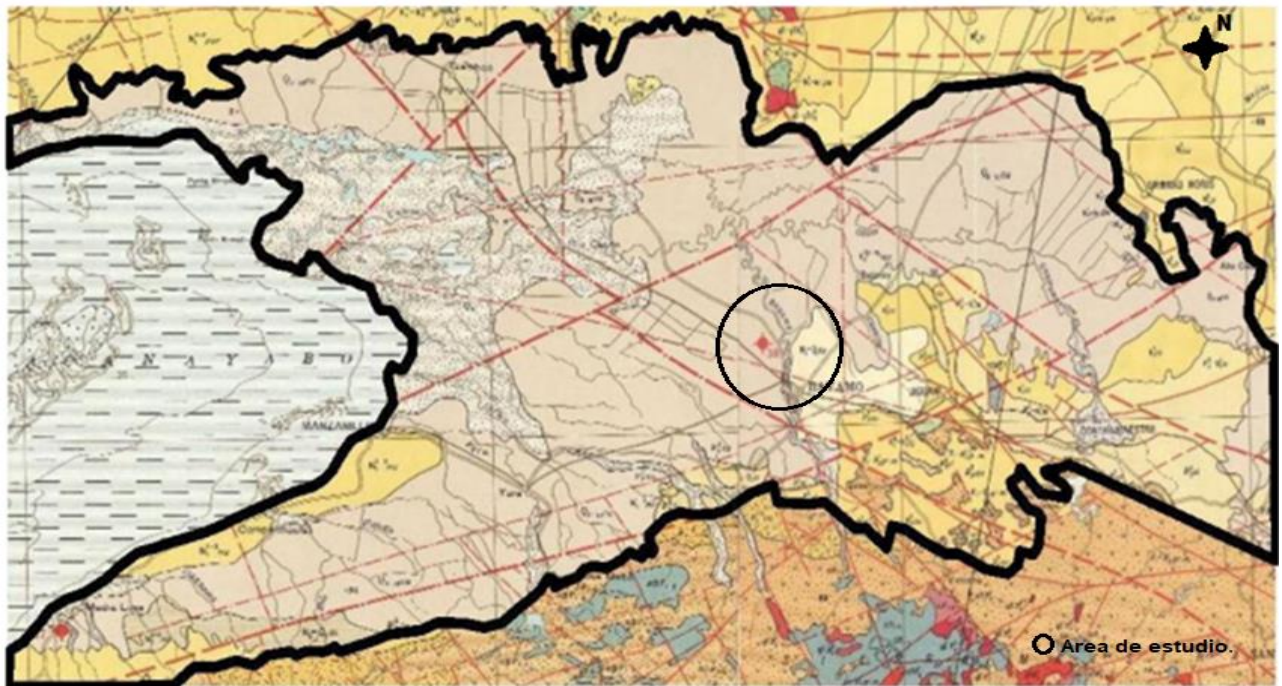


Figura 9: Esquema geológico de la Cuenca Cauto a escala 1:500000.(Tutaleni-Kambwa, 2013)

Estratigrafía de la Cuenca Cauto

La formación de la cuenca del Cauto, está ligada al desarrollo del arco volcánico Cretácico, ocupando una posición entrearco, modelada en la colisión con las Bahamas (Pindell .et al, 2006) en (Tutaleni-Kambwa, 2013).

La información estratigráfica de la región, generalizada en la (Figura 10) proviene de los diferentes levantamientos geológicos realizados en el área y principalmente de 15 pozos profundos perforados aquí por compañías norteamericanas en el período 1956-1960 y del pozo paramétrico Granma perforado a principios de la década del 80, así como el Creciente 1X en la década del 90 del siglo pasado.

El basamento de la cuenca del Cauto, lo ocupan las rocas del Arco Volcánico Cretácico con su cobertura Campaniano-Maastrichtiano de composición siliciclásticos-carbonatada, que no ha sido cortado por ningún pozo, afloran al sur de la Sierra Maestra, y en la región del río Silantro, aunque existen algunos afloramientos aislados al norte de la Sierra Maestra en la región de Palma del Perro, y en el camino de Los Callejones a la Pimienta, al sur de Guisa, donde afloran por debajo del Fm. Charco Redondo. Estas rocas están constituidas por

micritas de color gris oscuro, fétidas, masivas, carsificadas en forma de lapiez. Hacia el centro este de la Cuenca también afloran rocas cretácicas en la región de Babiney., (García, et.al) en (Tutaleni-Kambwa, 2013)

Periodo	Epoca	Edad	Esquema estratigráfico			Descripción de las unidades			
Cuaternario		Q ₂	(mQ)	(pQ)	(alQ)	(mQ ₂) Depósitos marinos: Arenas carbonatadas y camellones de tormenta.	(pQ ₂) Depósitos palustres: Limos, arcillas, limos carbonatados de color crema-grisáceo y blanquecino.	(alQ ₂) Depósitos aluviales: Arenas de granos finos y medios.	
		Q ₃	Fm. Jaimanitas	Fm. Cauto		Fm. Jaimanitas (Q ₁ ¹ js) Calizas biotriticas masivas, biocalcarenitas.	Fm. Cauto (Q ₁ ¹ ca) Arcillas, limos, arenas, gravas polimicticas y conglomerados polimicticos.		
		Q ₂							
		Q ₁							
Neógeno	Paleoceno	N ₂	Fm. Datil	Fm. Bayamo		Fm. Datil (N ₂ ² -Q ₁ ¹ dt) Depósitos de cantos rodados, bloques, guijarros de silicita, arenas arcillosas polimicticas.	Fm. Bayamo (N ₂ ² -Q ₁ ¹ by) Arenas de granos finos, areniscas y conglom.-merados, arcillas arenosas y arenas arcillosas.		
		N ₁	Fm. Manzanillo			Fm. Manzanillo (N ₁ ^{3b} -N ₁ ¹ mz) Calizas biotritico-arcillosas, biohermicas, micriticas, dolomíticas, margas limosas, arenáceas, limolitas calcáreas, calcarenitas, calciruditas, arcillas esmecticas, calcáreas, limosas, yesíferas.			
	Mioceno	N ₃	Fm. Cabo Cruz			Fm. Cabo Cruz (N ₃ ^{2b} ccz) Calizas biotritico-arcillosas, fosilíferas, margas, pseudoconglomerados.			
		N ₂	Fm. Paso Real			Fm. Paso Real (P ₂ ² -N ₃ ³ psr) Calizas, dolomitas, calcarenitas, margas, pseudoconglomerados, areniscas, limolitas y arcillas, conglomerados en la base.			
		N ₁		Fm. Camazán	Fm. Río Jagüeyes			Fm. Río Jagüeyes (N ₁ ^{3a} rj) Limolitas, areniscas, lutitas, margas, calizas, calcarenitas y arcillas.	
	Oligoceno	P ₃			Fm. Bitirí				
		P ₂							
	Paleógeno	Eoceno	P ₁	Fm. Casanova			Fm. Casanova. (P ₁ ¹ csn) Argilitas calcáreas, margas y limolitas calcáreas, calizas biógenas, calcarenitas.		
			P ₂						
		Paleoceno	P ₃	Fm. San Luis	Fm. Barrancas		Fm. San Luis (P ₃ ^{2b} -P ₃ ¹ sl) Areniscas polimicticas, limolitas, margas, arcillas, calizas y conglomerados polimicticos.	Fm. Barrancas (P ₃ ^{2b} -P ₃ ¹ bs) Tobas riolíticas-riodacíticas cristalovitroclásticas y vitroclásticas, margas, areniscas calcáreo-tobáceas, calizas biotriticas y calcilutitas.	
P ₂			Fm. Farallón Grande			Fm. Farallón Grande (P ₂ ^{2b} fg) Brechas polimicticas, conglomerados, areniscas, lutitas, calizas tobáceas, calizas, areniscas tobáceas y limolitas.	Fm. Puerto Boniato (P ₂ ² pb) Calizas, margas, sílice negro - barduzco.		
P ₁			Fm. Charco Redondo	Fm. Boniato		Fm. Charco Redondo (P ₂ ² chr) Calizas biotriticas, brechas en la base.	Fm. El Caney (P ₂ ^{2b} ecy) Tobas cineríticas, tufitas, tobas calcáreas, tobas lapiliticas, calizas tobáceas, lavas y aglomerados.	Fm. Marión (P ₂ ^{2b} m) Conglomerado, calcarenitas y margas amarillentas.	
P ₁			Fm. El Caney	? Fm. Marión					
Paleoceno		P ₂	Fm. Pilón	Fm. Guamá	Fm. Jiguani	Fm. Pilón (P ₁ ¹ p ₁) Tufitas, areniscas volcanomicas y polimicticas, grauvacas, limolitas, calizas y tobas.	Fm. Guamá (P ₁ ¹ gm) Tobas psefito-aglomeráticas, psammiticas, psefiticas, de composicion andesítica y raramente andesito-dacítica, psefiticas, limolitas, calizas. Lavas andesiticas	Fm. Jiguani (P ₁ ¹ jni) Compuesta por calizas y margas con lentes y capillas de silicitas.	
		P ₃							
		P ₄							
		P ₄	Fm. Ojo del Toro	Fm. Uvero	Fm. Babiney	Fm. Ojo del Toro (P ₁ ¹ oj) Arenisca de diferente granulometria, conglom. merados.	Fm. Uvero (P ₁ ¹ uv) Tobas desde aglomeráticas a psamiticas de andesito-basaltos limolitas y areniscas, caliza.	Fm. Babiney (K ₂ ¹ -P ₁ ¹) Areniscas polimicticas, limolitas, lutitas, conglomerados y tobas, calizas y margas.	
Cretácico	Superior	K ₂							
		K ₁	Fm. Manacal			Fm. Manacal (K ₁ ² mc) Areniscas, limolitas polimicticas y tobáceas, argilitas, calizas, tobas, andesitobasálticas, conglomerados.			

Figura 10: Columna generalizada de la cuenca Cauto, datos de levantamiento geológico y de pozos. (Tutaleni-Kambwa, 2013).

Como podemos observar en la columna generalizada la cuenca posee una constitución geológica bastante compleja, pero por el grado de significación que tiene para esta investigación y teniendo en cuenta la ubicación del área de estudio, solo haremos hincapié en la formación Bayamo y Cauto, las cuales serán descritas a continuación.

Formación Bayamo: Se extiende a lo largo de la llanura del río Cauto, provincias Granma y Las Tunas. Como holoestratotipo se designó un corte de unos 20 m de

altura en la margen occidental del río Cauto, en la localidad El Sombrero, a unos 9 km al W del poblado de Cauto Cristo, provincia de Granma. Coordenadas Lambert x= 529 150, y= 212 950, en la hoja topográfica Tranquera, 4877 I. Las litologías principales son arenas de tonos grises y amarillo grisáceos, de granos finos, con lentes de areniscas y conglomerados de guijarros finos, así como con intercalaciones de arcillas arenosas de color verde-grisáceo, y arenas arcillosas manchadas de gris. La estratificación se puede observar frecuentemente en las arenas. Las fracciones gravoso-arenoso-limosas son de composición polimícticas. Predominan los granos de volcanitas alteradas, granos de epidota, rocas silíceas, cuarzo, feldespatos, cloritas, zeolitas y granos y peletas bien redondeados, de composición carbonática. Los granos de arenas gruesas están bien redondeados, los más finos son subangulares. Los sedimentos se encuentran débilmente cementados por cemento carbonático. La componente carbonática del cemento está representada por calcita y en la arcillosa predominan las esmectitas; subordinadamente aparecen clorita y, probablemente, clorita-esmectita interestratificada. Esta cubre discordantemente las formaciones Camazán, Charco Redondo y el Gr. Guacanayabo (Manzanillo y Paso Real). La sobreyace discordantemente la Formación Cauto. La edad es Plioceno Superior - Pleistoceno Inferior. Se formó en un ambiente aluvial con influencia marina y, en parte, estuarina. (Colaboradores, 2013).

Formación Cauto: se extiende por todo el Valle del río Cauto, provincias Granma, Holguín y Santiago de Cuba. El holoestratotipo no fue precisado por el autor. Se designó un lectoestratotipo representado por un corte de 20 m en el río Cauto, a unos 10 km al NW del poblado de Babinéy, cerca de la localidad de Las Palmitas, provincia de Granma. Las coordenadas Lambert son x=529 700, y=214 000, en la hoja topográfica Tranquera, 4877 I. Las litologías principales son Arcillas, limos, arenas, gravas polimícticas y conglomerados polimícticos, con estratificación horizontal y cruzada, predominando la horizontal. Coloración gris, gris pardusco y amarillo grisáceo. Las arenas son de grano fino hasta grano grueso. Generalmente están mal seleccionadas y casi siempre contienen arcillas. El porcentaje de arcillas es variable y puede alcanzar hasta un 80%-90%. Estas arenas forman capas que

casi siempre contienen gránulos, cuyo diámetro puede variar entre 0.5 cm hasta 2 3 cm. Su material es vulcanógeno y, menos frecuentemente, de calizas y jasperoides. Yace discordantemente sobre las formaciones Bayamo, Barrancas, Bitirí, Camazán, Dátil, Río Jagüeyes, San Luis y los grupos El Cobre (parte indiferenciada) y Guacanayabo (formaciones Manzanillo y Paso Real). Está cubierta concordantemente por los sedimentos aluviales del Holoceno. La edad de la formación es Pleistoceno Superior, parte baja. Se formó en depósitos aluviales y deluviales, con alguna influencia marina cerca de la desembocadura del río Cauto, que debe haber sido mayor durante las transgresiones del Plioceno y el Cuaternario. (Colaboradores, 2013)

1.8 Sismicidad regional y del área de estudio.

El territorio está caracterizado por una compleja constitución geólogo-tectónica, debido a diferentes etapas evolutivas, pudiéndose diferenciar en la actualidad distintas regiones con características propias, litología, edad y tectonismo.

En la provincia Granma se pueden citar las siguientes estructuras regionales (Comisión Ad-hot, 1991) de Norte a Sur, que afectan en gran medida la ciudad:

- ❖ Cuenca del Cauto
- ❖ Falla Cauto-Nipe
- ❖ Sierra Maestra.
- ❖ Sistema de Fallas Bartlett-Caimán

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

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

El Sistema de Fallas transformantes Bartlett-Caimán se extiende en dirección sublatitudinal al Sur de la región Oriental con una longitud de más de 1800 Km, con una profundidad aproximada de 50 Km y un ancho entre 10 y 15 Km. Se

caracteriza por una actividad sísmica significativa, concentrada en tres sectores fundamentalmente, de los cuales el sector central (75-77 grados) y el Occidental son los que representan el mayor peligro para el área de estudio.

La frontera entre la Placa Norteamericana y la del Caribe, se localiza en las acuatorias de la parte Sur Oriental de Cuba y a su vez de la provincia Granma, este contacto entre ambas placas tectónicas constituye la principal zona sismogeneradora del área del Caribe, en la cual se han producido sismos de gran magnitud que han provocado a su vez los mayores daños en esta región.

El peligro sísmico en Cuba presenta una particularidad interesante y que al mismo tiempo hace que su estudio sea para algunas áreas de carácter complejo. Esta consiste en el hecho de que en el Archipiélago cubano se presentan dos génesis de sismos dadas por la ubicación espacial y origen de los terremotos: de entre placas y de interior de placas. Esto significa que en nuestro territorio no existe el mismo nivel de potencialidad sísmica en todas sus partes (Figura 11), destacándose el primer tipo de sismicidad la Región Sur Oriental por la frecuencia con que históricamente ocurren en ella terremotos de alta magnitud e intensidad, lo que implica que sea considerada como la de mayor peligrosidad sísmica del país y se corresponde con la Zona Sismogénica de Bartlett-Caimán, donde se han reportado 22 terremotos fuertes, de ellos 20 en la provincia de Santiago de Cuba y 2, los más recientes en la provincia de Granma (Chuy, 1999)

Durante los años 1968-1995 se han registrado por la Red de Estaciones Sismológicas de la región 72 terremotos con epicentro en la ciudad de Bayamo y 2 que fueron sacados de los datos de sismicidad histórica.

Esta actividad sísmica se ha mantenido durante todos estos años. Al cierre del año 2017 en toda el área de Cuba se habían reportado un total de 4567 terremotos. La zona donde se reportó la mayor cantidad de terremotos fue Pílon – Chivirico, con un total de 1824. Esta actividad sísmica inicio con un sismo el 17 de enero de dicho año, de magnitud 5.8 grados, el cual fue sentido en toda la región oriental con afectaciones a viviendas en varias localidades de la provincia Granma. El mismo alcanzo una intensidad máxima de VI grados en la escala EMS – 98 (Vicedirección Técnica, 2018)

Por lo que tenemos que prestar una especial atención al comportamiento de la sismicidad en esta área.

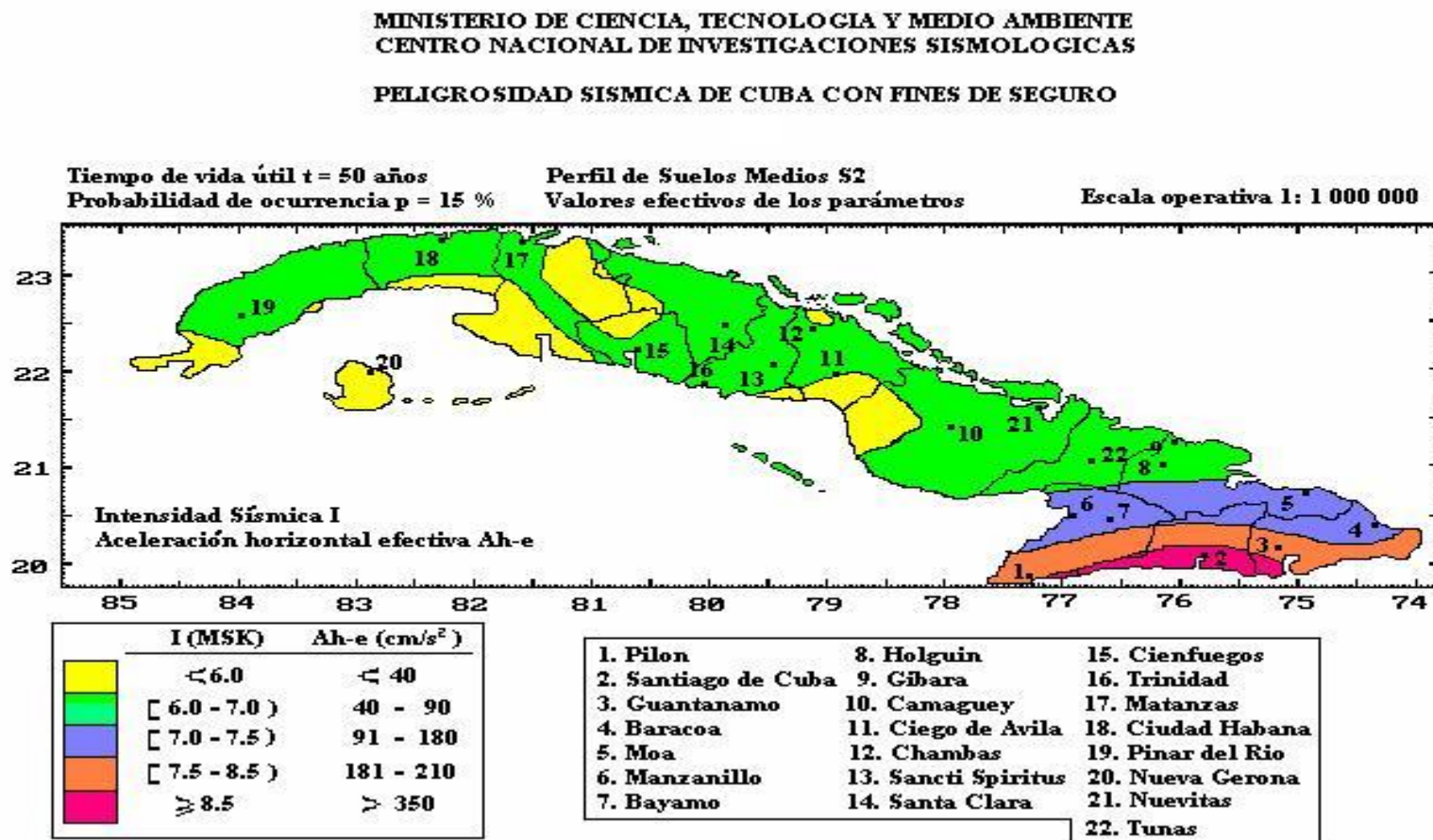


Figura 11: Mapa de peligrosidad sísmica de Cuba con fines de seguro. Nótese que la región de Cuba Oriental posee altos valores de intensidad sísmica y aceleración horizontal del territorio cubano. Tomado de Chuy y Álvarez, 1995.

Capítulo 2

Metodología para estudiar el potencial de licuefacción.

CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA PARA ESTUDIAR EL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN.

Introducción:

En el presente capítulo se dará a conocer un resumen de la metodología utilizada para evaluar el potencial de licuefacción a partir de las etapas de investigación, las cuales se detallan a continuación.

Primera etapa: Revisión bibliográfica.

Esta etapa de la investigación se realizó en aras de aumentar el conocimiento sobre el tema y de sustentar científicamente la investigación; para ello se consultaron las bibliografías necesarias, como, por ejemplo: libros, revistas, artículos, informes de proyectos anteriores, datos de archivos de empresas como la ENIA Holguín, GEOCUBA, CENAI, etc. También se realizó una búsqueda en INTERNET, WIKIPEDIA y ECURED. Esta etapa nos permitió sustentar la investigación, así como validarla. El método a utilizar es el Histórico lógico y análisis y síntesis.

Segunda etapa: Procesamiento de la información.

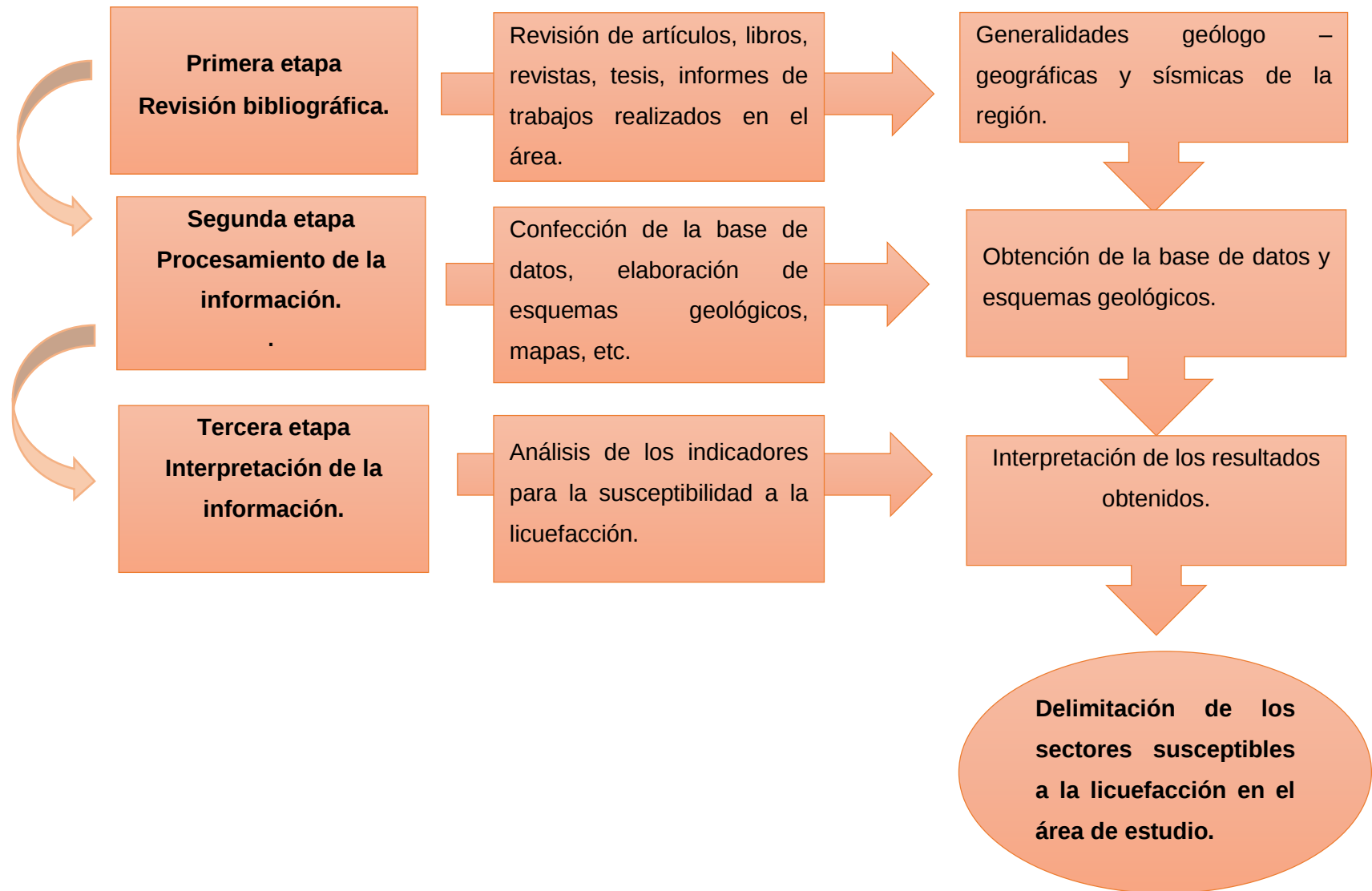
En esta etapa se procesó toda la información recopilada de los artículos e informes técnicos de las empresas antes mencionada. Para ello se utilizaron los programas y software necesarios tales como Microsoft Word, Excel y Power Point, para la redacción y presentación de la información, así como para el trabajo con bases de datos.

Tercera etapa: Interpretación de los resultados.

El procesamiento de toda la información recopilada fue de suma importancia ya que nos permitió una mejor interpretación y con ello alcanzar los objetivos propuestos. Esta última etapa en la investigación nos permitió analizar e interpretar 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, etc.) los cuales son expresados mediante el análisis del nivel

freático, elaboración del esquema ingeniero geológico a partir de las propiedades físico mecánicas del suelo, identificación de los estratos con condiciones para licuar y el cálculo del factor de seguridad en estratos con características dudosas y la confección del esquema de susceptibilidad a la licuefacción.

Esquema 1: Metodología de la investigación.



2.1 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 utilizará un sistema de indicadores en el cual se unifican los parámetros propuestos por diversos autores (Seed y Idriss, 1982); (Wang, 1979) (Youd, 1996); (Shadanet, 1999); (González de Vallejo, 2002); (Kramer & Stewart, 2004) 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 factores que se proponían. Después de una revisión de las metodologías propuestas por los autores antes mencionados, se elaboró una propuesta que brindó un orden y permite cuantificar el fenómeno, a partir de todo lo antes expuesto se propone analizar las condiciones siguientes:

❖ Condiciones geológicas:

La primera condición que debe cumplir un suelo para que sea licuable es que corresponda a depósitos jóvenes (menos de 10.000 años) a las que pertenecen las formaciones del Cuaternario (Holoceno-Pleistoceno). 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. (Anexo 6)

❖ Sismicidad:

Otro factor importante para que pueda licuar un suelo es la sismicidad, para ello se analiza la cercanía con una zona sismo generadora capaz de generar sismos

fuertes o magnitud mayor de 5,5 y las aceleraciones de las partículas lleguen a ser iguales o superior $0,2g/cm^2$. Para la selección se tiene en cuenta la norma: Construcciones Sismo resistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción de Cuba de 1999 (propuesta 2013) en la que aparece un mapa con la zonación de las aceleraciones esperadas para cada municipio de nuestro país, además de la tabla de peligro sísmico en las diferentes zonas del territorio nacional donde se muestra el periodo de recurrencia esperado, la aceleración sísmica y la zona sísmica a la que pertenece cada región. Esta información puede ser obtenida, además, de los informes de especialistas del CENAIIS.

❖ **Profundidad del Nivel Freático:**

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.

❖ **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.
- ❖ Arena con partículas.
- ❖ Sedimentos eluviales, llanuras aluviales y zonas de manglar.

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

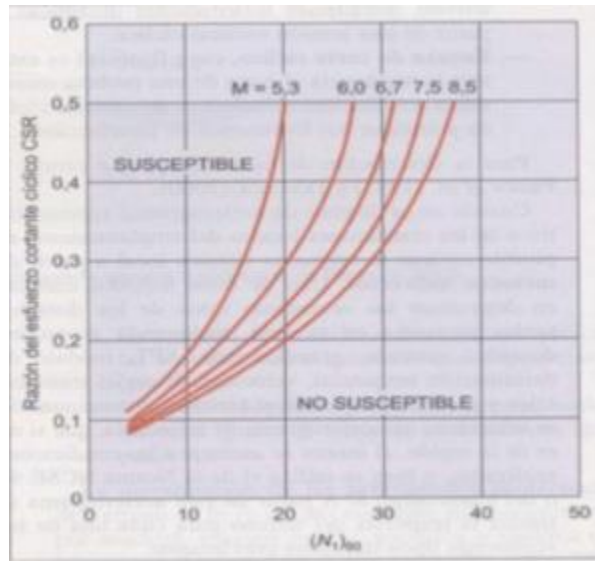


Figura 12: Susceptibilidad de licuefacción de un suelo en función de $(N_1)_{60}$ y la razón del esfuerzo cortante cíclico CSR (Ho et al., 1986) tomado de (Vallejo, 2002)

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

El procedimiento requiere calcular dos variables sísmicas que son:

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

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

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

$$CSR = 0.658(a_{\max} / g)(\sigma_{vo} / \sigma_{vo'})rd \quad (1.1)$$

Dónde:

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

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

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

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

rd : Coeficiente de reducción del suelo, que toma en cuenta la deformabilidad del perfil de subsuelo.

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

Para $z \leq 9.15m$,

$$rd = 1.0 - 0.00765z \quad (1.2)$$

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

$$rd = 1.174 - 0.0267z \quad (1.3)$$

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

A partir de los valores obtenidos de los informes provenientes de la ENIA se calcula el CSR y se plotean los valores obtenidos en la curva de CSR vs SPT .

Una vez obtenido el resultado de CSR se compara con los valores de la (Figura 12) y se comprueba si es un estrato licuable o no.

Cálculo del Coeficiente de Resistencia Cíclica (CRR).

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

Enfoque de resistencia cíclica (CRR)

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.

$$CRR = \frac{1}{34 - N} + \frac{N}{13.5} + \frac{50}{[10N + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (1.4)$$

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

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

$$N_1 = N * C \quad (1.5)$$

$$C_N = \left[\frac{1}{\sigma'_V} \right]^{0.5} \quad (1.6)$$

Dónde:

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:

$$N_{1,60} = N_1 * C_R * C_S * C_B * C_E \quad (1.7)$$

En la (Tabla 2) se recogen los factores que intervienen en la estimación del número de golpe normalizado $(N_1, 60)$.

Tabla 2: Correcciones a SPT. (Skempton 1986)

Factor	Variable de Equipo	Término	Corrección
Presión vertical normal efectiva	N/A	C _N	$(P_a / \sigma'_{vo})^{0,5}$
Presión vertical normal efectiva	N/A	C _N	C _N ≤ 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	C _B
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	0,80
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

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

2.2.1 Análisis de las condiciones geológicas del área de estudio.

Con la revisión de los mapas y esquemas geológicos del área de estudio realizados por parte de la oficina de GEOCUBA y en trabajos precedentes, se pudo realizar la evaluación de las condiciones geológicas, determinando así las formaciones presentes en el área y de acuerdo a las edades y sedimentos de cada una de ellas se delimitaron las zonas más expuestas a la ocurrencia del fenómeno de licuefacción.

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

Para realizar el análisis del comportamiento de la sismicidad en el área de estudio se revisó la norma para construcciones sismo resistente, requisitos básicos para el diseño y construcción. Dentro de esta se revisó el capítulo 4 donde se describen las zonas sísmicas del territorio nacional y se tomó la descripción del área en estudio, también se tuvo en cuenta los registros de terremotos que tuvieron su epicentro en el área de la propia ciudad o cercana a ella.

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

Para realizar el análisis del comportamiento del nivel freático en el área se tomó en cuenta los resultados expuestos en los informes ingenieros geológicos de la ENIA Holguín como parte del trabajo de perforación realizados por partes de ellos.

2.2.4 Análisis de las condiciones ingeniero geológicas.

Se revisaron los informes ingeniero geológicos efectuados por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) Holguín y se seleccionaron las propiedades físicas y mecánicas por cada obra presentes en el área de estudio. Se confeccionó una base de datos con los principales parámetros que influyen

para que un suelo sea licuable, entre los que se encuentran (Límite Líquido, Índice de Plasticidad, humedad natural, densidad húmeda y densidad seca, por ciento de partículas finas, cortante, saturación, compactación del suelo a partir del N de SPT entre otras).

2.2.5 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:

$$FS = \frac{CRR}{CSR} MSF \quad (1.8)$$

Dónde:

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

$$MSF = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}} \quad (1.9)$$

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

En nuestro caso no se realizó el análisis del cálculo del factor de seguridad para la licuefacción (FSL), puesto a que: no todas las obras estudiadas presentaban las propiedades físicas -mecánicas necesarias para el cálculo, tales como límite líquido, profundidad del nivel freático, saturación, compactación, etc. Los valores de N de SPT se encontraban en la mayoría de los casos superiores a las normas, mayores a 30 golpes/30 cm, en 15 metros, profundidad máxima de investigación, por lo que son valores muy altos, lo que indican que la consistencia es de media a alta. Por otro lado, se tomó en cuenta que en la mayoría de los casos no se cortó el nivel freático, encontrándose este a profundidades mayores a 4.00 m. y que los suelos predominantes en el área son de tipo arcillosos.

Solo en algunos puntos específicos consideramos que podría ocurrir el fenómeno, siempre y cuando estén dadas las condiciones necesarias, lo que no descarta la posibilidad que tras la ocurrencia de un terremoto superior a los 7.5⁰ y en determinadas condiciones ocurra el fenómeno en otras áreas del municipio.

Capítulo 3

Evaluación del potencial de licuefacción en el área de estudio.

CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO.

Introducción:

En este capítulo realizaremos un análisis de los resultados obtenidos durante todo el proceso de investigación, logrando con ello una evaluación preliminar del potencial de licuefacción en el área de estudio.

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

Los escenarios propuestos coinciden con varios criterios (Kramer & Stewart, 2004) en (Parellada - Reyes, 2016) para determinar si un suelo es licuable o no.

El primero que se analizó fue el criterio histórico. Aunque propiamente dicho en el área no se reportó la ocurrencia de este fenómeno, si hubo un reporte en una zona muy próxima a raíz del terremoto de 1551, en el poblado de Cauto Embarcadero a orillas del río Cauto, municipio Río Cauto. Este poblado se encuentra cercano a la ciudad de Bayamo a unos 27 km de esta, por carretera. La formación geológica principal que podemos encontrar en esta región es la Formación Cauto constituido principalmente por arenas y arenas arcillosas, etc. y el nivel freático se encuentra muy cercano a la superficie. Podemos establecer una relación teniendo en cuenta este criterio pues en la región de Bayamo está presente esta formación, principalmente para la zona oeste del municipio. Existen otras condiciones que pudieran favorecer la ocurrencia de la licuefacción.

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

Se analizaron además las condiciones geológicas como otro criterio de gran importancia, casi todos los escenarios propuestos están cerca de depósitos fluviales. Estos suelos se encuentran semisaturados y saturados en algunos

sectores pues el nivel freático se encuentra en algunas zonas a muy poca profundidad y además el clima y el relieve de la región así lo propicia.

Se analizó, además, la edad del depósito. Las áreas que se estudiaron pertenecen a formaciones del Cuaternario donde los estratos son poco consolidados y de poca densidad. Se tuvo en cuenta que los depósitos fueran de arena arcillosa, arena limosa, entre otras con poco contenido de finos que estuvieran uniformemente gradadas y limpias, compuestas de partículas redondeadas preferiblemente.

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. Para el caso nuestro estos valores se encontraban fundamentalmente por encima de las normas establecidas para que ocurra la licuefacción, por encima de los 20 golpes/30 cm en 15 metros, profundidad máxima alcanzada.

3.2 Validación del sistema de indicadores propuestos para el municipio Bayamo.

3.2.1 Condiciones geológicas:

Desde el punto de vista geológico Bayamo se encuentra ubicado dentro de la cuenca del Cauto. (*Anexo 6*)

Las litologías principales que podemos encontrar son arcillas: de diferentes plasticidad y tonalidades que varían de carmelita oscuro a carmelita amarillento, ubicadas principalmente hacia la zona central de la ciudad, arenas de diferentes granulometrías, de colores que varían de carmelita a gris, y sedimentos de origen aluviales de diferentes composiciones, estos se encuentran en todo el cauce del río Bayamo y su llanura de inundación.

Estas litologías están representadas principalmente en las Formaciones Cauto, Bayamo y los Sedimentos aluviales indiferenciados del Pleistoceno Superior-Holoceno. (*Figura 13*)

La **formación Cauto**: de edad Pleistoceno Superior, parte baja. Se extiende por todo el Valle del río Cauto. Sus litologías principales son arcillas, limos, arenas, gravas polimícticas y conglomerados polimícticos, con estratificación horizontal y cruzada, predominando la horizontal. Coloración gris, gris pardusco y amarillo grisáceo.(Colaboradores, 2013)

En el área de estudio fue cortada en varias ocasiones, las litologías que se encontraron fundamentalmente son: arcillas y arenas de diferentes tonalidades que varían de carmelita a gris, con potencias muy variables desde los primeros metros hasta profundidades mayores a 5.00 m. de consistencia media a dura. Las arenas son de grano fino a grueso y las arcillas de plasticidad por lo general alta.

La **formación Bayamo** se extiende a lo largo de la llanura del río Cauto. Las litologías principales son arenas de tonos grises y amarillo grisáceos, de granos finos, con lentes de areniscas y conglomerados de guijarros finos, así como con intercalaciones de arcillas arenosas de color verde-grisáceo, y arenas arcillosas manchadas de gris. La estratificación se puede observar frecuentemente en las arenas. Las fracciones gravoso-arenoso-limosas son de composición polimícticas. Los granos de arenas gruesas están bien redondeados, los más finos son subangulares. La edad es Plioceno Superior - Pleistoceno Inferior.(Colaboradores, 2013)

En el área de estudio fue cortada en la mayoría de las obras estudiadas por las arcillas de diferente plasticidad y de consistencia de media a dura, intercalada con arenas de diferentes granulometrías y consistencia, de tonalidades grisáceas – carmelita amarillento y de potencias muy variadas.

Sedimentos aluviales indiferenciados del Pleistoceno Superior-Holoceno. Se extiende en el cauce de los ríos, orilla y en la desembocadura de los mismos. Se observa una potente secuencia de los sedimentos aluviales, capa vegetal, bloques, gravas, cantos rodados, arenas no consolidadas y aleurolitas subordinadamente arcillas.(Rivera, 2001)

En nuestra región de estudio fue cortado principalmente en las obras ubicadas cercanas o en la llanura aluvial del río Bayamo, las principales litologías cortadas

fueron capa vegetal mezclada con arenas, gravas, etc. Relleno de diferente composición; arenas con contenido de limo, gravas y arcillas; etc.

Consideramos que estos sedimentos indiferenciados dada la escasa consistencia son los más propensos a licuar ante un sismo de gran magnitud.

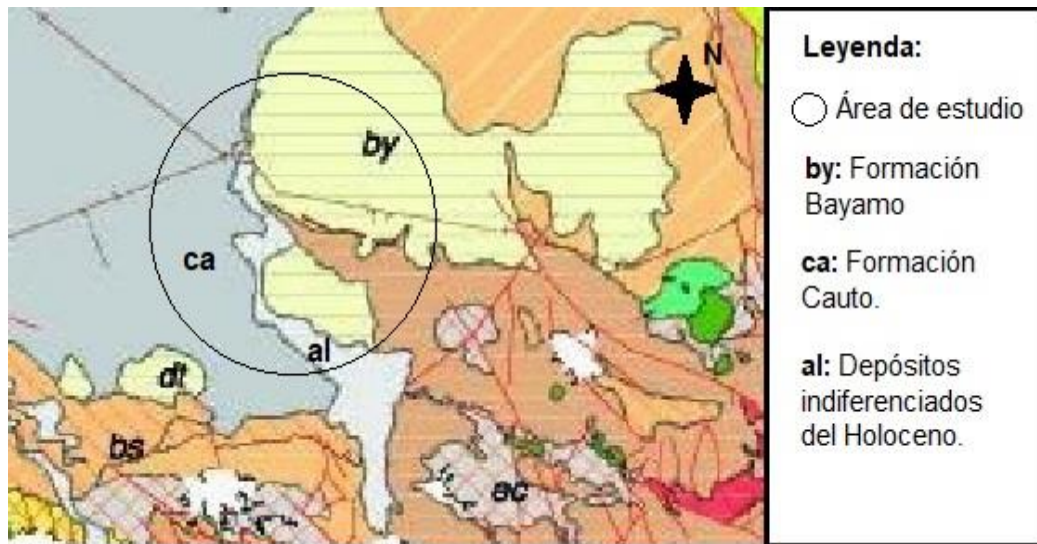


Figura 13: Recorte del mapa geológico de la República de Cuba, escala 1: 100 000. (I.G.P)

3.2.2 Sismicidad

El municipio Bayamo se encuentra muy próximo a la principal zona sismogeneradora activa del país, donde han ocurrido a lo largo del tiempo innumerables sismos con epicentros en el área de la propia ciudad o muy cercanas a ellas, provocando daños a las estructuras, etc.

Según el mapa de zonificación sísmica (Figura 14) propuesto en la Norma Cubana (Norma Cubana, 2012) para la construcción de obras sismorresistentes; este municipio se encuentra en la zona 3, en una escala del 1 al 6, 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 (Ss) y entre 0,15-0,20 g para períodos largos (S1). (Norma Cubana, 2012)

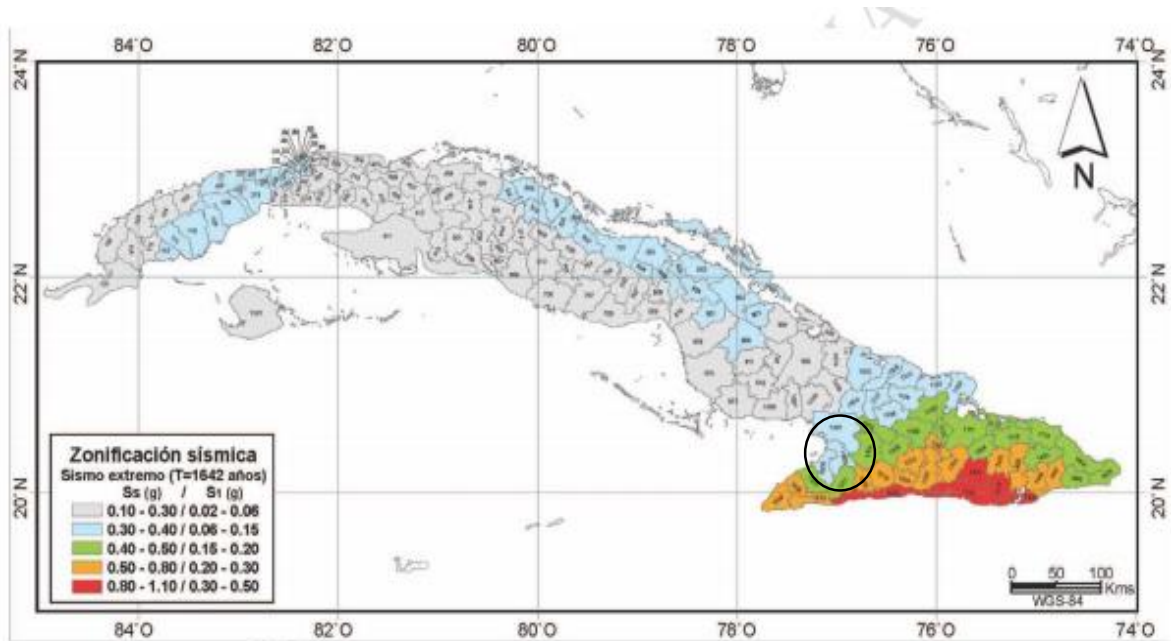


Figura 14: Zonificación sísmica de la República de Cuba. (Tomado de la Norma Cubana para construcciones sismorresistentes.)

3.2.3 Características hidrográficas:

La ciudad de Bayamo se encuentra atravesada por el río Bayamo; este la bordea hacia la parte Oeste, observándose grandes y numerosos meandros, lo cual indica su cambio de curso en repetidas ocasiones.

Solapando la llanura del río Bayamo, se interpone la llanura aluvial del río Salado, el cual le sirve de afluente al antes mencionado. Se observan además varios arroyos hacia la parte Norte de la ciudad.

Podemos decir que por lo general en esta zona los ríos corren en dirección de Sur a Norte y son afluentes del río Cauto. (Rivera, 2001)

El nivel freático es muy variable dependiendo en gran medida de la época del año en que se encuentre, siendo menor en los periodos de lluvia y mayor en épocas de sequías; además de la influencia del relieve y del coeficiente de infiltración. Según los informes ingenieros geológicos revisados este alcanza en ocasiones

niveles de 0.85 a 3.90 m, y en la mayoría de los casos se encuentran entre 6.00 y 10.00 m de profundidad.

Por lo general estas aguas subterráneas se encuentran en intercalaciones y lentes de arenas; aumentando el contenido de agua hacia la parte inferior del corte y en el contacto con las rocas más antiguas.(Rivera, 2001)

3.2.4 Condiciones ingeniero-geológicas:

Para determinar las condiciones ingeniero – geológicas se revisaron y consultaron los informes ingeniero – geológicos de las obras estudiadas en el área, teniéndose en cuenta los resultados obtenidos en los diferentes ensayos de laboratorios realizados y sus respectivos parámetros tales como: Límite líquido (LL), Límite Plástico (LP), Índice Plástico (IP), Humedad Natural (W), Pesos específico húmedo y Peso específico seco, % de arena, grava, finos, limo y arcilla, cohesión, compactación, etc.(Anexo 1)

En el área de estudio encontramos diferentes tipos de suelos los cuales serán descritos a continuación:

- ❖ Capa vegetal: esta se encuentra en ocasiones mezclada con arcilla orgánica, gravas y arenas, de coloraciones variadas entre gris oscuro, carmelita oscuro o negro. Su espesor varía desde 0.10 hasta 1.90 m aproximadamente.
- ❖ Relleno: de color carmelita oscuro a grisáceo, constituido por arena, arcilla, limo, gravas, cantos rodados de diferentes diámetros, en ocasiones puede aparecer mezclado con la capa vegetal. Su espesor es muy variado desde 0.50 hasta 4.00 m y en ocasiones puede encontrarse en la superficie.
- ❖ Suelos de tipo arcilloso, por lo general plásticos, de color carmelita amarillento con diferentes tonalidades, en ocasiones fisuradas, en ocasiones puede contener cantos rodados, gravas y arenas, con cierta limosidad. Puede presentar manchas de óxido de hierro, con fragmentos de caliza y bolsones de CaCO_3 . Consistencia de media a dura. Su espesor es

muy variable, desde los primeros metros del corte hasta 10.00 m. Por su contenido y propiedades se pueden clasificar en:

1. Arcilla de alta plasticidad
 2. Arcilla de baja plasticidad.
 3. Arcilla limosa.
 4. Arcilla arenosa.
 5. Arcilla calcárea.
- ❖ Arenas: de diferente granulometría desde granos finos hasta gruesos, de variados colores desde carmelita amarillento hasta gris, mezclado con arcillas, limo y gravas de granulometrías pequeñas a medianas; compacta. Su espesor es muy variado desde 2.50 hasta 10.00 m. Por su contenido se clasifican en:
1. Arena gravosa.
 2. Arena arcillosa.
 3. Arena limosa con fragmentos de gravas.
- ❖ Suelo gravoso o conglomerático: constituido por gravas y fragmentos de rocas de origen volcánico y sedimentario, de coloraciones carmelitas con tonalidades amarillentas, grises y blancuzcas; subredondeadas y subangulares, en ocasiones en una matriz de arcilla limo – arenosa, con contenido de CaCO_3 . Compacto. Su espesor varía desde 2.50 hasta 6.00 m.

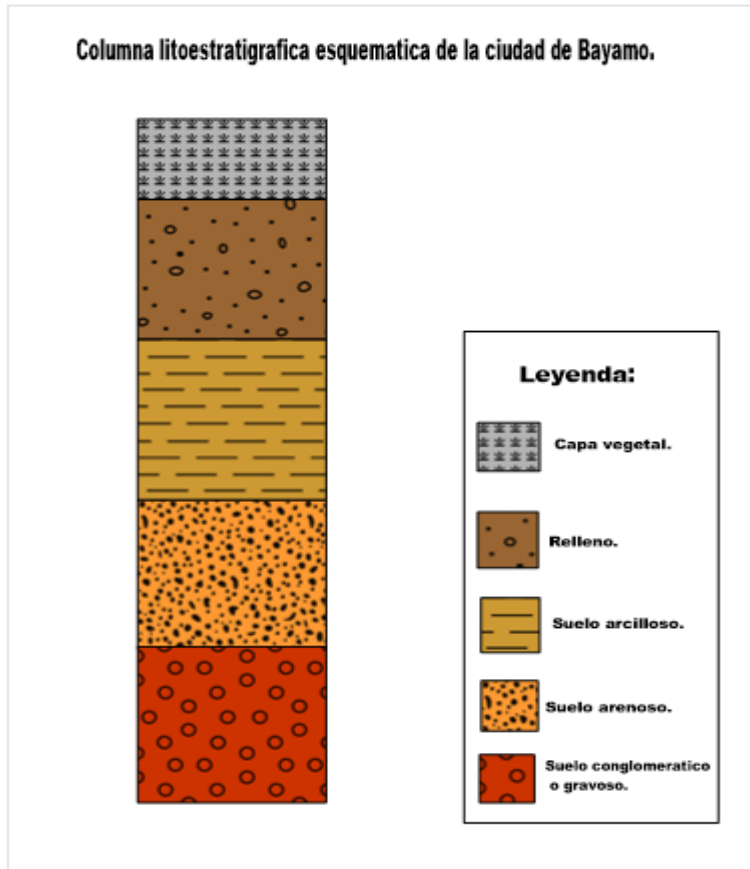


Figura 15: Columna litoestratigráfica esquemática para el municipio Bayamo, Granma.

Las áreas propensas a licuar se caracterizan por ser estratos de poca compactación, alta saturación, el nivel freático entre 0 y 3.0 metros, además, de predominar las arenas. En el área estudiada se identificaron 3 puntos con indicadores cerca de lo establecido para que un suelo sea susceptible a licuar. Hay que tener en cuenta que estos indicadores, aunque no cumplan en todos los valores puede licuar si se varían otros como: la magnitud del sismo, así como la profundidad y la distancia. Si aumentara la magnitud y la aceleración de las partículas estas pudieran perder la resistencia al cortante y manifestarse en alguna de las diferentes formas de los efectos como desplazamientos laterales o asentamiento diferencial. En los casos donde no rompe la estructura debido a la alta concentración de partículas finas y a la cercanía del nivel freático puede ocurrir una amplificación de las ondas sísmicas y causar daño a las estructuras debido al propio movimiento de suelo. Algunas de las propiedades de los puntos

con los indicadores en los rangos aceptables para licuar se muestran a continuación.

Propiedades ingeniero – geológicas de las obras estudiadas.

En la (Tabla 3) que aparece a continuación se presentan las principales propiedades ingeniero geológicas de las obras ubicadas en los sectores más propensos a licuar dentro del área de estudio. En el (Anexo 1) podemos encontrar la tabla resumen para las demás obras.

Tabla 3: Propiedades físico - químicas de las obras estudiadas en el municipio Bayamo.

obras	NF	capas	F	A	G	LL	LP	IP	W	S	P.E.H	P.E.S	C	Clasificación
1*	2,90 – 3,90	capa 1	79	15	6	52	13	39	23,2	90	19,7	16	45	CH
		capa 2	29	59	12	48	23	25	21,5	84	19,4	16	7	SC
		capa 3	83	13	4	48	20	28	22,4	81	18,8	15,4	50	CL
2*	2,03 – 2,10	relleno	44	35	21	42	27	15	27,2	100	20,5	16,1	15	SM
		capa 1	81	17	2	64	24	40	29	85	18	14	69	CH
		capa 2	58	33	9	34	17	17	25	81	18,5	14,8	36	CL
3*	1,60 – 1,90	relleno	72	21	7	36	20	16	18. 2	81	19.8	16.8	54	CL
		capa 1	78	20	2	67	28	39	31.8	91	18.2	13.8	40	CH
		capa 2	46	28	26	37	20	17	20.2	77	19.1	15.9	6	SC

Leyenda:

N.F: Nivel Freático; LL: Limite líquido (%); LP: Limite plástico (%); IP: Índice plástico (%); W: Humedad natural (%); S: Saturación (%); P.E.H: Peso específico húmedo (Kn/m3); P.E.S: Peso específico seco (Kn/m3); C: Cohesión (k Pa); F: Finos (%); A: Arena (%); G: Grava (%).

Obras:

1*: Seminternado Antonio Briones Montoto, Bayamo.

2*: I.P.U.E.C: Máximo Gómez Báez.

3*: I.P.U.E.C: Luis Marcano.

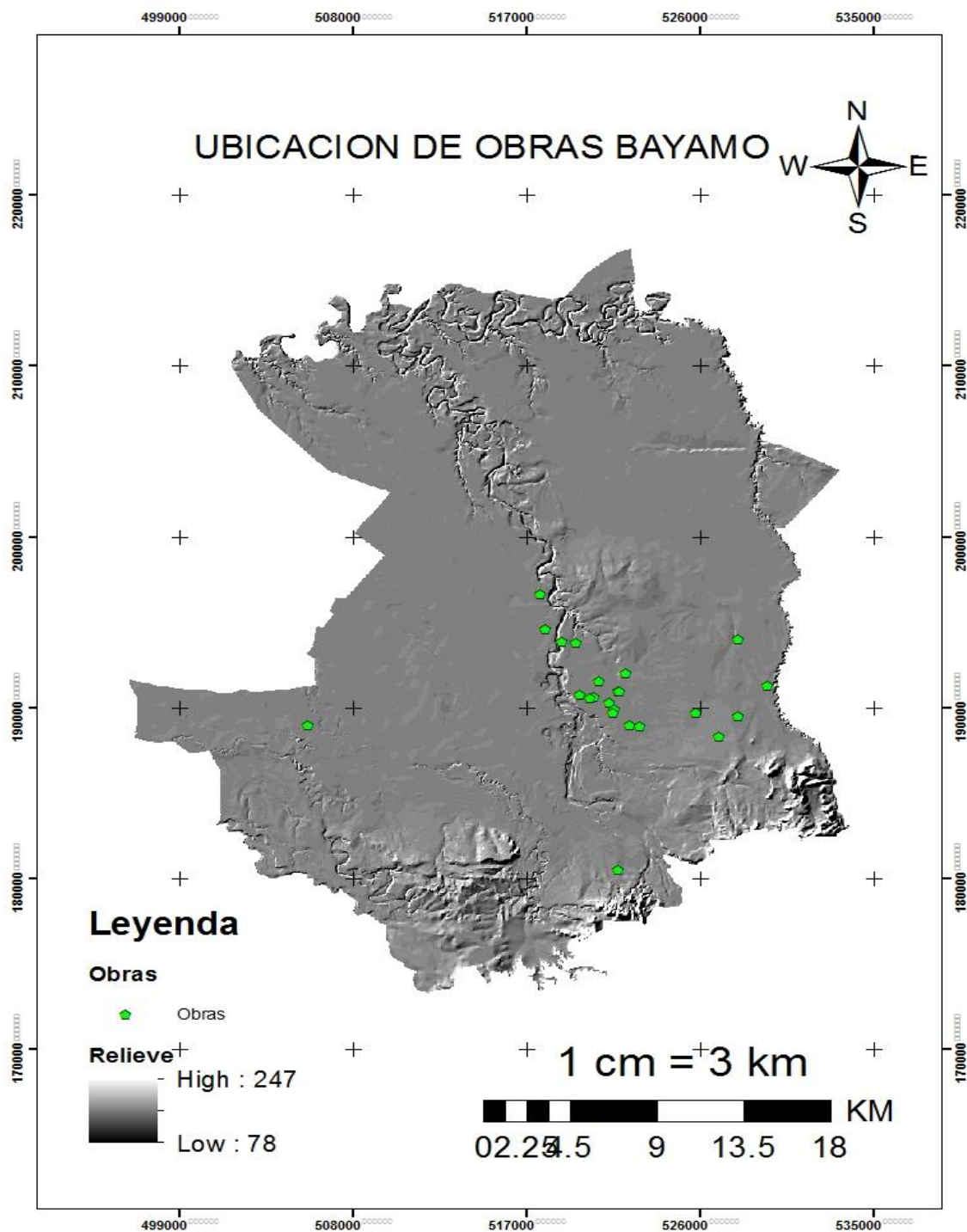


Figura 16: Mapa de ubicación de las obras estudiadas en el área.

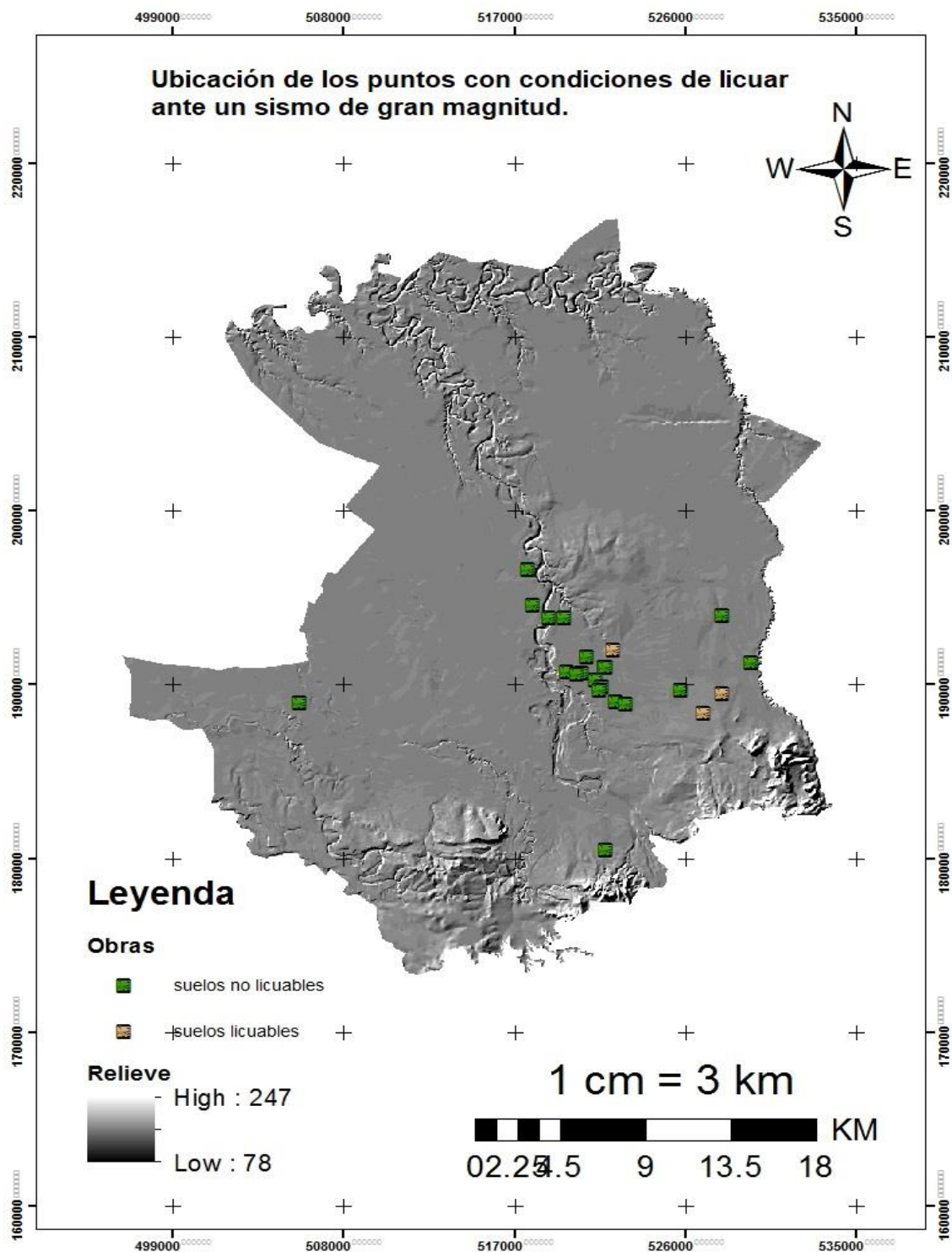


Figura 17: Ubicación de los puntos con condiciones de licuar ante un sismo de gran magnitud.

3.2.5 Cálculo de Factor de seguridad para la licuefacción.

En nuestro caso no se realizó el análisis del cálculo del factor de seguridad para la licuefacción (FSL), puesto que: no todas las obras estudiadas presentaban las propiedades físicas y mecánicas necesarias para el cálculo, tales como límite líquido, profundidad del nivel freático, saturación, compactación, etc. Los valores de N de SPT se encontraban en la mayoría de los casos superiores a las normas, mayores a 30 golpes/30 cm, en menos de 15 metros de profundidad de la capa estudiada, por lo que son valores muy altos, lo que indican que la consistencia es de media a alta.

Solo en algunos puntos específicos consideramos que podría ocurrir el fenómeno, siempre y cuando estén dadas las condiciones necesarias, lo que no descarta la posibilidad que tras la ocurrencia de un terremoto superior a los 7.5⁰ y en determinadas condiciones ocurra el fenómeno en otras áreas del municipio.

3.3 Conclusiones parciales para Bayamo.

El municipio Bayamo, provincia Granma, desde el punto de vista geológico se encuentra ubicado dentro de la región de la cuenca Cauto. Las principales formaciones que podemos encontrar en la región son: Formación Cauto, Bayamo y los Sedimentos aluviales indiferenciados del Pleistoceno Superior-Holoceno.

Las principales litologías encontradas en el área de estudio son: arcillas, por lo general plásticas, de color carmelita amarillento con diferentes tonalidades, en ocasiones fisuradas, puede contener cantos rodados, gravas y arenas, con cierta limosidad. Consistencia de media a dura. Su espesor es muy variable, desde los primeros metros del corte hasta 10.00 m. Por su contenido y propiedades se pueden clasificar en: arcilla de alta plasticidad; arcilla de baja plasticidad; arcilla limosa; arcilla arenosa; arcilla calcárea. Arenas; de diferente granulometría desde granos finos hasta gruesos, de variados colores desde carmelita amarillento hasta gris, mezclado con arcillas, limo y gravas de granulometrías pequeñas a medianas; compacta. Su espesor es muy variado desde 2.50 hasta 10.00 m. Por

su contenido se clasifican en: arena gravosa; arena arcillosa; arena limosa con fragmentos de gravas; y Suelo gravoso o conglomerático: constituido por gravas y fragmentos de rocas de origen volcánico y sedimentario, de coloraciones carmelitas con tonalidades amarillentas, grises y blancuzcas; subredondeadas y subangulares, en ocasiones en una matriz de arcilla limo – arenosa, con contenido de CaCO_3 . Compacto. Su espesor varía desde 2.50 hasta 6.00 m.

El nivel del manto freático es muy variable dependiendo en gran medida de la época del año en que se encuentre, siendo menor en los periodos de lluvia y mayor en épocas de sequías; además de la influencia del relieve y del coeficiente de infiltración. Según los informes ingenieros geológicos revisados este alcanza en ocasiones niveles de 0.85 a 3.90 m, y en la mayoría de los casos encontrándose entre 6.00 y 10.00 m de profundidad.

Este municipio se encuentra muy próximo a la principal zona sismogeneradora activa del país, donde han ocurrido innumerables sismos con epicentros en el área de la propia ciudad o muy cercanas a ellas, provocando daños a las estructuras, etc.

Según el mapa de zonificación sísmica propuesto para Cuba en la Norma Cubana para la construcción de obras sismorresistentes; este municipio se encuentra en la zona 3, 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.

Las áreas más propensas a licuar son aquellas que se encuentran fundamentalmente en la llanura de inundación de los ríos o cercanas a estas, donde se encuentran los sedimentos más recientes, en suelos con alto grado de saturación y baja compactación, no se descarta que ante la ocurrencia de un terremoto que exceda los 7.5 grados ocurra el fenómeno en algunas áreas no identificadas en este estudio dada que los datos son escasos y puntuales.

Conclusiones y Recomendaciones

CONCLUSIONES GENERALES

- ❖ Las condiciones ingeniero geológicas de los suelos de la ciudad de Bayamo en sentido general no son favorables para que ocurra la licuefacción dado que está compuesto por materiales de compactación media a dura, el nivel freático a más de 3 metros, baja saturación y alta concentración de partículas finas.
- ❖ Los principales estratos identificados son de composición arcillosa, arenosa; y suelos gravosos o conglomerático. Las principales clasificaciones son: (CL); (GP – GM); (SM); (CH); (SC); (GC o SC); (GM); (SP – SM); (GM).
- ❖ Las áreas que pueden licuar son: las zonas cercanas o en la llanura de inundación del río Bayamo, donde se encuentran fundamentalmente los sedimentos acumulados producto de la erosión fluvial, también en algunos sectores representados por la formación Cauto y Bayamo, principalmente donde se encuentran las arenas y los suelos areno – gravosos, muy saturados ubicados hacia la parte sureste de la zona urbana.

RECOMENDACIONES

- ❖ Realizar el cálculo del Factor de Seguridad a la licuefacción de los suelos para las obras donde los indicadores evaluados dieron favorables en algunos parámetros, específicamente para los puntos representados por las obras nombradas: Seminternado Antonio Briones Montoto; I.P.U.E.C: Máximo Gómez Báez, I.P.U.E.C: Luis Marcano.
- ❖ Se recomienda realizar un estudio de Vulnerabilidad en las comunidades en el municipio para tener conocimiento de las principales afectaciones que pudieran presentarse en caso de que ocurra el fenómeno, así como el nivel de percepción de la población.
- ❖ Se recomienda continuar con el estudio ingeniero geológico para determinar el potencial de licuefacción en otros municipios de la provincia.
- ❖ Se recomienda utilizar el resultado de la investigación en los centros de Gestión de Riesgo, Instituto de Planificación Física y en el Consejo de la Administración municipal y provincial para hacer el correcto uso del suelo en el ordenamiento territorial.
- ❖ Aplicar las normas constructivas establecidas tanto en las zonas susceptibles a licuar como en los sectores donde no licuará, dado que puede verse afectada por la magnitud del sismo ante la mala calidad de las construcciones.

Referencias bibliográficas

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AUTORES, C.D. *Fuerte terremoto de magnitud 7.1 sacude la Ciudad de México, a 32 años del gran sismo de 1985*. 2017. Disponible en:<<http://www.cubadebate.cu/noticias/2017/09/19/un-fuerte-terremoto-de-magnitud-71-sacude-nuevamente-a-mexico/>>.
2. BAUTA - TORRES, W. Identificación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducidos por sismos de gran magnitud en los municipios de San Luis, Julio Antonio Mella y Palma Soriano de la provincia Santiago de Cuba 2017.
3. CETIN, K.O.; et. al. Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2004, 130(12): 1314-1340.
4. COLABORADORES. Léxico estratigráfico de Cuba. En MINAS, I.D.G.Y.P.S.G.D.C.M.D.E.Y., 2013, vol. 3.
5. COTILLA-RODRÍGUEZ, M.O. y D. CÓRDOBA-BARBA. The Bayamo Earthquake (Cuba) of the 18 October 1551. *International journal of Geosciences*, 2010, 1(01): 1.
6. CHUY, R. Modelo del peligro sísmico de la provincia de Santiago de Cuba. *Archivos CENAI*. Santiago de Cuba, 2010.
7. CHUY, T.-J. Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de peligrosidad y microzonación sísmica. *Fondos de la Fundación "García Sñériz", España*, 1999.
8. ECURED, C.D. Bayamo. En: *Ecured* [en línea]. 2018. Disponible en:<<https://www.ecured.cu/Bayamo>>.
9. ECURED., C.D. Provincia Granma. En: *Ecured* [en línea]. 2018a. Disponible en:<[http://www.ecured.cu/Provincia_de_Granma_\(Cuba\)](http://www.ecured.cu/Provincia_de_Granma_(Cuba))>.
10. -----, Recurso hídrico de Granma. En: *Ecured* [en línea]. 2018b. Disponible en:<https://www.ecured.cu/Recurso_h%C3%ADrico_de_Granma>.
11. FERNÁNDEZ - DIÉGUEZ, L. *Licuefacción de los suelos generada por sismos de gran magnitud. Caso de estudio Caimanera y Santiago de Cuba*. Tesis de maestría. ISMM. Moa, 2015.
12. FERNÁNDEZ - DIÉGUEZ, L.B.-C., IRAYASELIS ;GUARDADO - LACABA,RAFAEL; OLIVA ÁLVAREZ, RICARDO Susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en la ciudad de Caimanera, Guantánamo. En *Minería y Geología*. 2017.
13. FERNÁNDEZ, B. *Posibilidad de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en la cuenca de Santiago de Cuba catalizado por terremotos fuertes*. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, 2000.
14. GALVÁN, L. *Procedimiento para la gestión y reducción de riesgos geológicos en la provincia Santiago de Cuba*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 2014.
15. GARCÍA, J.; et. al. Mapa de Riesgo Sísmico de la ciudad de Santiago de Cuba. *Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas*, 2002.

16. GARCIA, L. Informe ingeniero geologico para 54 viviendas en el Reparto Siboney. 2004. Archivo 3 – 05 – 210.
17. GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.I. *Ingeniería geológica.*, 2002. 744.
18. GUASCH, F. y R. OLIVA. Análisis de la vulnerabilidad habitacional y los riesgos inducidos en los edificios altos de la ciudad de Santiago de Cuba. *Archivos CENAI*, 2014.
19. GUERRA - SANTIESTEBAN, D.R. *Ubicación de estructuras favorables para la acumulación de hidrocarburos en la parte central de la Cuenca Cauto, a partir de la interpretación sísmica y datos de pozos.* Instituto Superior Minero - Metalurgico de Moa., Geología, 2011.
20. GUTIÉRREZ - SÁNCHEZ, A. Evaluación de riesgo por licuefacción en los municipios de Guamá, III Frente y Contramaestre de la provincia de Santiago de Cuba 2017.
21. HERRERA - DELFÍN, I. *Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducida por terremotos de gran magnitud en el consejo popular Guillermon Moncada, municipio Santiago de Cuba.* ISMM, geología, 2015.
22. ING. ZOBIDA CORDOVÍ SOTO, I.M.D.S. Informe ingeniero geologico ESBU Mabay. 1977. Archivo 3 – 05 – 102c.
23. ING: IDALMIS MATUREL, E.R., VICTOR VALDES DE LA VEGA. Informe ingeniero geologico Circulo Infantil de 180 niños, Reparto Jesus Menendez. . 1984. Archivo 3 – 05 -46c
24. ----- Informe ingeniero geologico Banco Popular de ahorro. 1985. Archivo 3 – 05 – 50 c.
25. IWASAKI, T. A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan. En: *Proc. Second Int. Conf. Microzonation Safer Construction Research Application, 1978.* 1978, p. 885-896.
26. IWASAKI, T. Soil liquefaction studies in Japan: state-of-the-art. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1986, 5(1): 2-68.
27. LAVAÑINO - FLEITA, D. Identificación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el municipio Santiago de Cuba 2017.
28. LIAO, S.S. y R.V. WHITMAN. Overburden correction factors for SPT in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1986, 112(3): 373-377.
29. NORMA CUBANA. Construcciones sismoresistentes. Requisitos básicos para el diseños y construcciones.: 2012
30. 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 UNIA (Huelva, España). Huelva. 900pág, 2009.
31. ORDAZ-HERNÁNDEZ, A.; et. al. Modelación de parámetros geotécnicos como contribución a la zonación sísmica local: ciudad de San Cristóbal, Cuba. *Minería y Geología*, 2014, 30(1).

32. ORDAZ-HERNÁNDEZ, A.; et. al. La susceptibilidad a la licuefacción en el emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal, Cuba Occidental. *Minería y Geología*, 2013, 29(2).
33. PARELLADA - REYES, O. *Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en la zona sur de la Provincia Guantánamo*. Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa, 2016.
34. PERUCCA, L.; A. PÉREZ y C. NAVARRO. Fenómenos de licuefacción asociados a terremotos históricos. Su análisis en la evaluación del peligro sísmico en la Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 2006, 61(4): 567-578.
35. RIVERA, Z. *Riesgo sísmico para el planeamiento urbano en la ciudad de Bayamo*. Master Thesis, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, 2001.
36. ROBERTSON, P.K. y R.G. CAMPANELLA. Liquefaction potential of sands using the CPT. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, 111(3): 384-403.
37. RODRÍGUEZ, L.M.; F.A. AUDEMARD y J.A. RODRÍGUEZ. CASOS HISTÓRICOS DE LICUACIÓN DE SEDIMENTOS INDUCIDOS POR SISMOS EN VENEZUELA DESDE 1530.
38. SEED, H. y I. IDRIS. Ground motions and soil liquefaction during earthquakes: engineering monographs on earthquake criteria, structural design, and strong motion records. MNO-5. *Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, Calif*, 1982.
39. SEED, H.B. Special lecture: Evaluation of the dynamic characteristics of sands by in-situ testing techniques. *Revue française de géotechnique*, 1983, (23): 91-99.
40. SEED, H.B. y P. DE ALBA. Use of SPT and CPT tests for evaluating the liquefaction resistance of sands. En: *Use of in situ tests in geotechnical engineering*. ASCE, 1986, p. 281-302.
41. SEED, R.B.; et. al. Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework. En: *Proceedings of the 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar: Long Beach, CA*. 2003.
42. TEC. FERMIN FONT AGUILAR, T.L.R.T., ING. ANTONIO RODRIGUEZ. Informe ingeniero geologico Circulo Infantil Bayamo, Reparto Siboney. 1987. Archivo 3 – 05 – 97. .
43. TEC: JOSE J. BENITEZ, L.R.T., ING: ANTONIO RODRIGUEZ. Informe ingeniero geologico para proyecto tecnico ejecutivo Circulo Infantil Reparto Castro. 1989. Archivo 3 – 05 – 152
44. TOKIMATSU, K. y Y. YOSHIMI. Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content. *Soils and Foundations*, 1983, 23(4): 56-74.
45. TUTALENI-KAMBWA, M.A. Evolución tectono-estratigráfica de la cuenca Cauto. *Ciencia & Futuro*, 2013, 3(3): 1-10.
46. VICEDIRECCIÓN TÉCNICA, C. SISMICIDAD REGISTRADA EN EL TERRITORIO NACIONAL EN EL AÑO 2017 Y ESTADO DE
47. LA RED DE ESTACIONES DEL SERVICIO SISMOLOGICO NACIONAL. 2018.

48. WANG, W. *Some findings in soil liquefaction*. Earthquake Engineering Department, Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, 1979.
49. WIKIPEDIA, C.D. Provincia de Granma. En: *Wikipedia, La enciclopedia libre*.
50. [en línea]. 2018a. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Especial:Citar&page=Provincia_de_Granma&id=99049527>.
51. ----- . Terremoto. En: 2018b. Disponible en: <<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Terremoto&oldid=107937338>>.
52. YOUNG, T.L. y I.M. IDRIS. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2001, 127(4): 297-313.

ANEXOS:

ANEXOS:

Anexo 1: Obras estudiadas en el área y sus propiedades físico-mecánicas.

	obras	NF	capas/ espesores	N de SPT	LL	LP	IP	% de finos	% de arenas	% de arcilla	% de limo	%de gravas	W (%)	peso específico humedo (Kn/m ³)	Peso específico seco(Kn/ m ³)	Cohesión (k Pa)	Descripción
1	Adaptación de nave para laboratorio de combustible, Bayamo	mayores a 8 m	relleno / 069 - 0.47 m		24.00	19.00	5.00	6.00	22.00	x	x	x	9.00	22.80	20.90	4.00	GP - GM
			capa 1 / 2.65 - 1.55 m		x	x	x	17.00	83.00	x	x	x	14.60	18.60	16.20	6.00	SM
			capa 2 / 1.70 - 1.35 m		51.00	22.00	29.00	91.00	9.00	x	x	x	18.90	19.80	16.60	40.00	CH
			capa 3 / -		39.00	25	14.00	89.00	10.00	x	x	x	23.50	17.50	14.20	30.00	CL
2	Ampliación del policlínico Jimmy Hirtzel, Bayamo.	mayores a 6m	capa 1		59.00	25.00	34.00	95.00	5.00	x	x	x	27.60	19.60	15.40	62.00	CH
			capa 2		60.00	22.00	38.00	76.00	21.00	x	x	x	25.10	19.80	15.80	42.00	CH
3	ampliación del politécnico Vitalio Acuña	mayores a 7 m	capa 1		59.00	19.00	40.00	89.00	11.00	x	x	x	17.50	19.80	16.90	54.00	CH
			capa2		36.00	16.00	20.00	61.00	37.00	x	x	x	87.00	20.05	18.80	35.00	CL
			capa 3		38.00	18.00	20.00	41.00	55.00	x	x	x	13.00	20.50	18.20	17.00	SC
4	Bascula de Ferrocarril en Bayamo, Bayamo.	mayores a 5 m	capa 1		65.00	26.00	39.00	74.00	20.00	x	x	x	28.90	28.60	14.40	40.00	CH
5	Estación de Radio base Bayamo	mayores a 6 m	capa 1 / 3.25 - 3.05		73.00	26.00	47.00	90.00	7.00	x	x	x	37.60	17.40	12.60	30.00	CH
			capa 2 / hasta 6 m		43.00	22.00	21.00	77.00	23.00	x	x	x	21.60	18.20	15.00	25.00	CL

6	Planta de alimento ensilado. Molino de arroz.	mayores a 9 m	capa 1		42.00	23.00	19.00	87.00	13.00	x	x	x	21.60	19.50	16.00	25.00	CL
			capa 2		64.00	25.00	39.00	92.00	8.00	x	x	x	28.20	18.20	14.20	40.00	CH
7	Policlínico PPU Bayamo	no fue cortado	capa 1		46.00	24.00	22.00	98.00	2.00	x	x	x	23.30	17.40	14.10	41.00	CL
8	Edificio de 18 plantas, Bayamo	6,15 - 15,15	capa 2	16.00	57.30	21.50	35.80	x	x	x	x	x	22.40	1,85 g/cm3	1,49g/cm3		CH
			capa 3	24.00	55.30	23.60	31.70	x	x	x	x	x	22.00	1,92 g/cm3	1,56 g/cm3	0,5 kg/cm2	CH
			capa 4	44.00	43.60	21.60	22.00	x	x	x	x	x	19.10	1,91 g/cm3	1,6 g/cm3		CL
			capa 5	50.00	39.00	19.10	19.90	x	x				14.40				CL
			capa 6	50.00	46.90	22.10	24.80	x	x				20.10				
			capa 7	40.00				x	30.00	x	50.00	x	19.90				
9	54 viviendas en el Reparto Siboney, Bayamo	mayor a 6 m	capa 1/ 1,40 - 3,10		34.00	20.00	14.00	43.00	57.00	x	x	x	16.70	18.80	16.10	51.00	SC
			capa 2/2,3 - 4,0 m		39.00	23.00	16.00	32.00	33.00	x	x	x	12.70	19.60	17.40	35.00	GC o SC
10	BANCO Popular de Ahorra, Bayamo		capa 2	27.00	58.40	23.50	34.90	x	x	x	x	x	24.40	1,93g/cm3	1,54 g/cm3	0,4kg/cm2	arcilla de alta plasticidad
			capa 3	27.00	40.50	18.60	21.90	36limo arcilla	26.00		36.00		19.90	1.91	1.55	0.30	
11	circulo infantil 180 niños, Reparto Jesús Menéndez, Bayamo	no detectado	capa 2/1,00 - 4,50 m	31.00	48.20	23.60	24.60	x	x	x	x	x	21.60	1,89 g/cm3	1,55 g/cm3	0,46 kg/cm2	CL
			capa 3	50.00	39.40	20.50	19.10	43 limo arcilla	29.00		43.00		16.00	1.87	1.61		CL
1	circulo infantil,	7	capa 1		52.	23.	29.	x	20.00	44.00	35.00	x	30.	1,90	1.45	0,035 m	CH

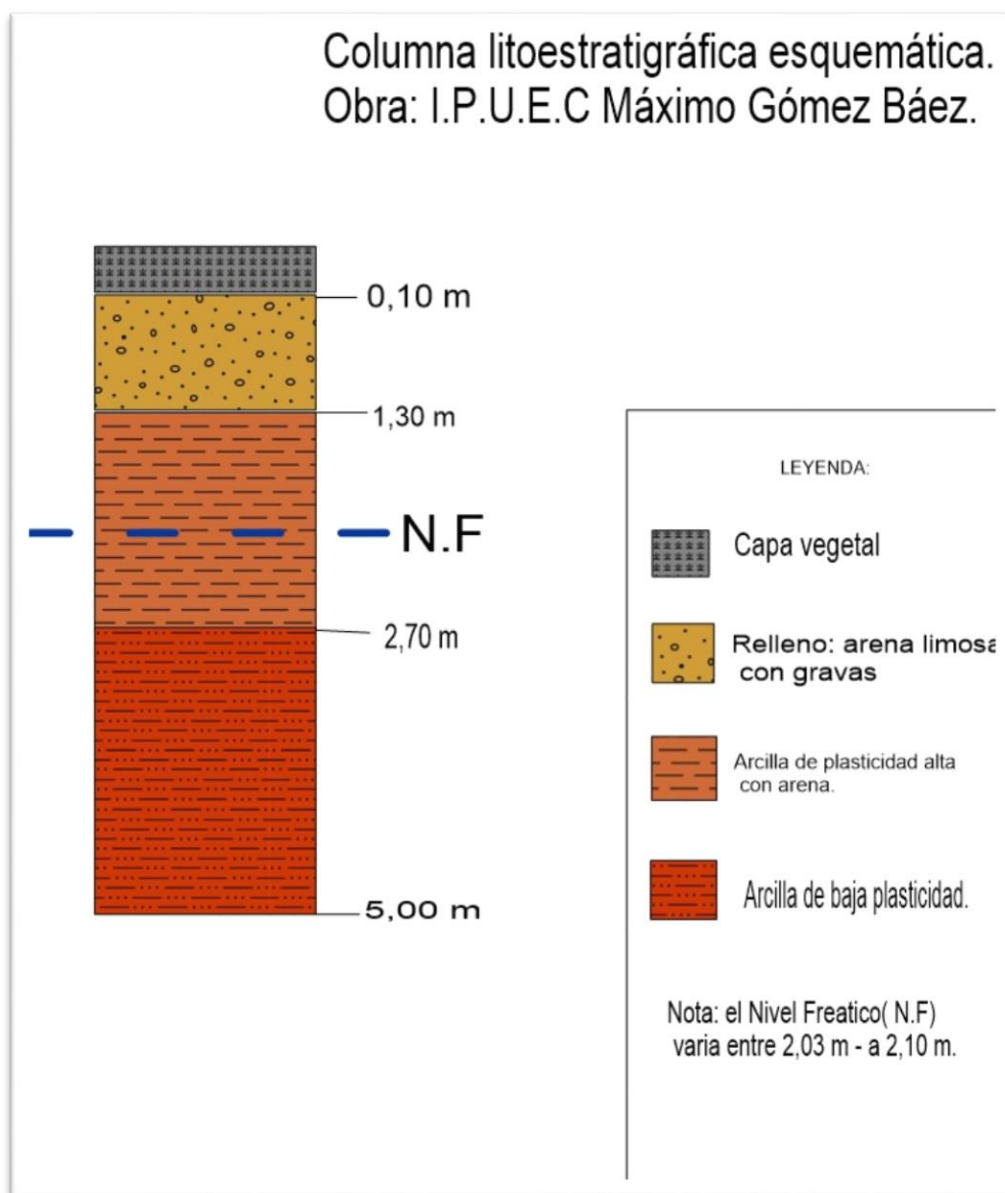
2	Reparto Castro, Bayamo				00	00	00						50	t/m3		Pa	
13	circulo infantil ,Reparto Siboney, Bayamo	no se detecto	capa 1/0,60 -- 1,20m		48.00	21.30	25.80	x	26.60	29.10	20.10	25.70	19.50	1.96g/cm3	1.64		CL
14	edificio gran panel 4 niveles Fiscalía, Bayamo	no se detecto	capa 1		57.00	22.00	35.00	87.00	10.00	x	x	x	25.00	18.90	15.10	40.00	CH
15	EIDE Pedro Batista Fonseca, Bayamo	no se detecto	capa 1		61.00	23.00	38.00	81.00	13.00	x	x	x	23.50	18.30	14.80	85.00	CH
16	ESBU Mabay, Bayamo	6,60 - 7,50 m	capa 2		33.00	21.00	12.00		23.00	29.00	4.8		14.00	1920 kg/m3	1650 kg/m3		limo arcilloso con arena
			capa 3		x	x	x	21.33	x	x	x	x	x	x	x	x	arena fina
			capa 4		44.00	23.00	21.00						24.00	1962.00	1467.00		arcilla limosa
17	escuela especial trastornos de la conducta, Bayamo	8 - 10 m	capa 1		45.10	21.10	24.00	x	32.00	40.00	22.00	x	19.20	2.01	1.68	x	Arcilla plástica con intercalaciones de arena y limo.
18	escuela técnica General Milanés, Bayamo	no se detecto	relleno		28.00	18.00	10.00	13.00	23.00	x	x	64.00	6.50	21.10	19.8	4.00	GC
			capa 1		62.00	25.00	37.00	85.00	14.00	x	x	1.00	26.10	18.80	14.90	42.00	CH
			CAPA 2		43.00	21.00	22.00	55.00	33.00	x	x	12.00	20.30	20.00	16.60	36.00	CL
			CAPA 3		35.00	20.00	15.00	43.00	51.00	x	x	6.00	15.40	19.90	17.20	6.00	SC
			CAPA 4		38.00	22.00	16.00	37.00	23.00	x	x	40.00	20.80	19.00	15.70	4.00	GC
19	Escuela especial para sordos. Bayamo	no se detecto	capa 1		51.21	22.07	33.29	x	28.21	43.41	27.71	3.14	24.64	1.90	1.57	x	CL
2	Fábrica de	no se	capa 1/1.00	no se	50.	19.	31.	x	33.22	27.44	37.33	0.89	19.	1,97g/c	1.65	x	CH

0	galletas, Bayamo.	detecto	m a 6.40 m	realizo	75	63	13						80	m3			
			CAPA 2/1.00 m a 4.50 m		35.40	17.80	17.60	x	68.33	14.83	15.50	1.33	17.50	1.93	1.65	x	SC
			capa 3/ 3.00 m a 7.00 m		42.83	18.33	24.50	x	40.71	15.86	11.29	32.14	16.00	x	x	x	SC
21	Fiscalía Provincial	no se detecto	relleno /0.80 a 1.10		55.00	22.00	33.00	76.00	20.00	x	x	4.00	27.00	18.10	14.30	40.00	CH
			capa 1/		66.00	21.00	45.00	92.00	8.00	x	x	0.00	25.40	19.00	15.10	50.00	CH
22	Frigorífero, Bayamo.	no se detecto	capa 2/0.60 - 1.00 m	19.00	63.20	22.70	40.50	x	x	x	x	x	18.80	2.06g/cm3	1.74	x	arcilla de alta plasticidad
			capa 3/0.60 - 2.75	30.00	63.00	23.40	39.60	x	x	x	x	x	20.10	2.03	1.69	x	
			capa 4/	50.00	42.90	20.90	22.00	x	24.00	x	30.00	46.00	12.10	2.06	1.75	x	
23	Hospital Materno infantil	no se detecto	relleno		np	np	np	15.00	33.00	x	x	52.00	12.10	20.80	18.60	10.00	GM
			CAPA 1		67.00	24.00	43.00	95.00	4.00			1.00	27.70	19.20	15.00	80.00	CH
24	IPUEC 600 ALUMNOS.BA YAMO	5.30 - 6.20 m	CAPA 1/6.20- 7.50	no se realizo	49.20	17.90	31.30	x	22.00	35.00	43.00	x	21.50	1.96	1.61	x	CL
			CAPA 2		68.20	24.00	44.20	x	38.00	28.00	21.00	13.00	28.40	1.85	1.44	x	CH
25	IPUEC Ángel Frías, La reforma, Bayamo.	2,80 - 3,50 m	capa 1/ 2,80 - 9,40 m		67.40	29.41	47.08	x	17.36	57.27	23.45	0.09	28.81	1.91	1.48	x	CH
			CAPA 2/ 2.00 - 5.00 m	38.00	47.67	21.43	26.26	x	48.00	24.42	21.42	5.17	20.21	1,98 g/cm3	1.65	x	CL
26	IPUEC LUIS MARCANO,BA YAMO	0,85 - 1,90 m	RELLENO / 1,40 - 1,50 m		36.00	20.00	16.00	72.00	21.00	x	x	7.00	18.20	19.80	16.80	54.00	CL
			CAPA 1/		67.00	28.00	39.00	78.00	20.00	x	x	2.00	31.80	18.20	13.80	40.00	CH
			CAPA 2		37.00	20.00	17.00	46.00	28.00	x	x	26.00	20.20	19.10	15.90	6.00	SC
27	IPUEC MAXIMO GOMEZ,	2,03 - 2,10 m	RELLENO		42.00	27.00	15.00	44.00	35.00	x	x	21.00	27.20	20.50	16.10	15.00	SM

	BAYAMO																
			CAPA 1		64.00	24.00	40.00	81.00	17.00	x	x	2.00	29.00	18.00	14.00	69.00	CH
			CAPA 2		34.00	17.00	17.00	58.00	33.00	x	x	9.00	25.00	18.50	14.80	36.00	CL
28	IPUEC PERUCHO FIGUEREDO, BAYAMO.	no se detecto	capa 1		39.00	20.00	19.00	85.00	14.00	x	x	1.00	17.00	19.90	16.60	68.00	CL
			CAPA 2		NP	NP	NP	39.00	57.00	x	x	4.00	16.00	20.20	17.40	0.00	SM
29	SEMINTERNA DO 300 ALUMNOS, BAYAMO	no se detecto	CAPA 2	29.00	53.80	20.80	33.00	x	x	x	x	x	22.40	1,92 g/cm3	1.57	x	CH
			CAPA 3	36.00	34.40	19.00	15.40	x	x	x	x	x	20.40	1.88	1.56	x	CL
			CAPA 4					20.00	53.00	x	x	27.00	11.00	x	x	x	
30	SEMINTERNA DO ANTONIO BRIONES MONTOTO, BAYAMO	2.90 - 3.90 m	CAPA 1		52.00	13.00	39.00	79.00	15.00	x	x	6.00	23.20	19.70	16.00	45.00	CH
			CAPA 2		48.00	23.00	25.00	29.00	59.00	x	x	12.00	21.50	19.40	16.00	7.00	SC
			CAPA 3		48.00	20.00	28.00	83.00	13.00	x	x	4.00	22.40	18.80	15.40	50.00	CL
31	Telecentro provincial, bayamo	no se detecto	relleno		45.00	18.00	27.00	36.00	22.00	x	x	42.00	14.00	20.10	17.60	4.00	GC
			CAPA 1		56.00	18.00	38.00	89.00	11.00	x	x	0.00	24.40	19.40	15.60	40.00	CH
			CAPA 2		36.00	18.00	18.00	41.00	58.00	x	x	1.00	18.90	17.70	14.90	6.00	SC
32	Tribunal provincial popular, Bayamo.	no se detecto	CAPA 1/ 0.80 - 3.00 m		56.00	22.00	34.00	92.00	8.00	x	x	0.00	22.20	20.00	16.70	79.00	CH
			CAPA 2/120 - 3,00 m		41.00	23.00	18.00	54.00	46.00	x	x	0.00	24.50	19.00	16.90	45.00	CL
33	Viviendas biplantas para médicos, Bayamo	no se detecto	capa 1		41.00	17.00	24.00	48.00	27.00	x	x	25.00	19.10	19.20	16.10	6.00	SC
			CAPA 2		47.00	20.00	27.00	61.00	27.00	x	x	12.00	23.40	19.30	15.60	52.00	CL

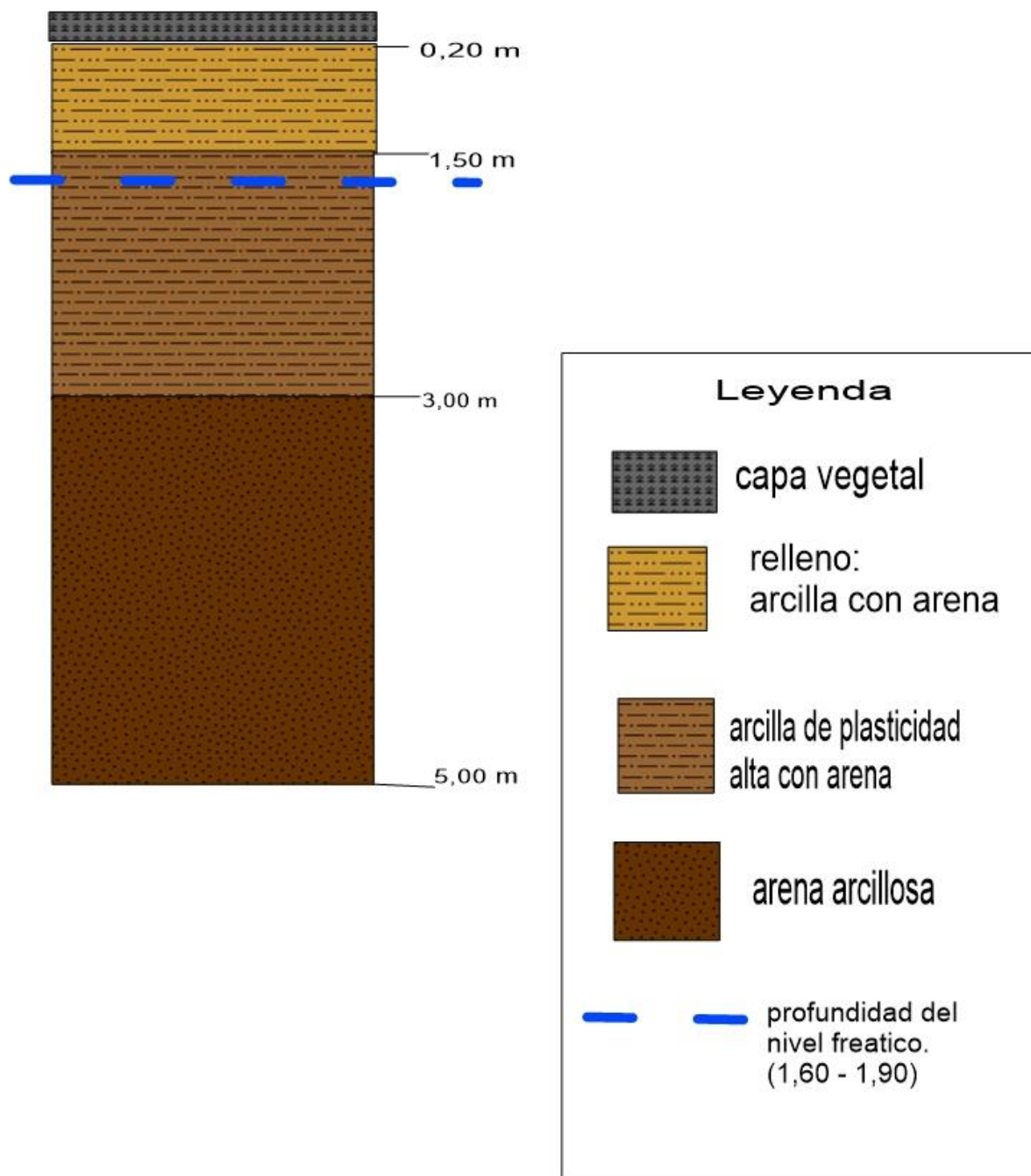
3 4	Viviendas cuatriplanta para médicos, Bayamo	no se detect o	CAPA 1		57. 00	23. 00	34. 00	68.0 0	25.00	x	x	7.00	20. 30	19.60	16.30	60.00	CH
3 5	Escuela primaria Manuel Ascunce Domenech, Bayamo	no se detect o	CAPA 1/0.90 - 1.00 m		np	np	np	14.0 0	85.00	x	x	1.00	16. 00	18.20	15.60	10.00	SM
			CAPA 2/1.50 - 3.00 m		32. 00	22. 00	10. 00	58.0 0	36.00	x	x	6.00	25. 30	19.00	15.20	1.00	CL
			CAPA 3/3.00 - 6.00m		51. 00	19. 00	32. 00	93.0 0	6.00	x	x	1.00	22. 00	20.40	16.50	60.00	CH
3 6	Silos fábrica de pienso, Bayamo	no se detect o	CAPA 1/1,80 - 2,50 m		48. 00	21. 00	27. 00	82.0 0	18.00	x	x	0.00	21. 00	19.80	16.30	35.00	CL
			CAPA 2/		np	np	np	11.0 0	88.00	x	x	1.00	17. 00	19.00	16.20	12.00	SP - SM

Anexo 2: Columna litoestratigráfica esquemática. Obra: I.P.U.E.C Máximo Gómez.

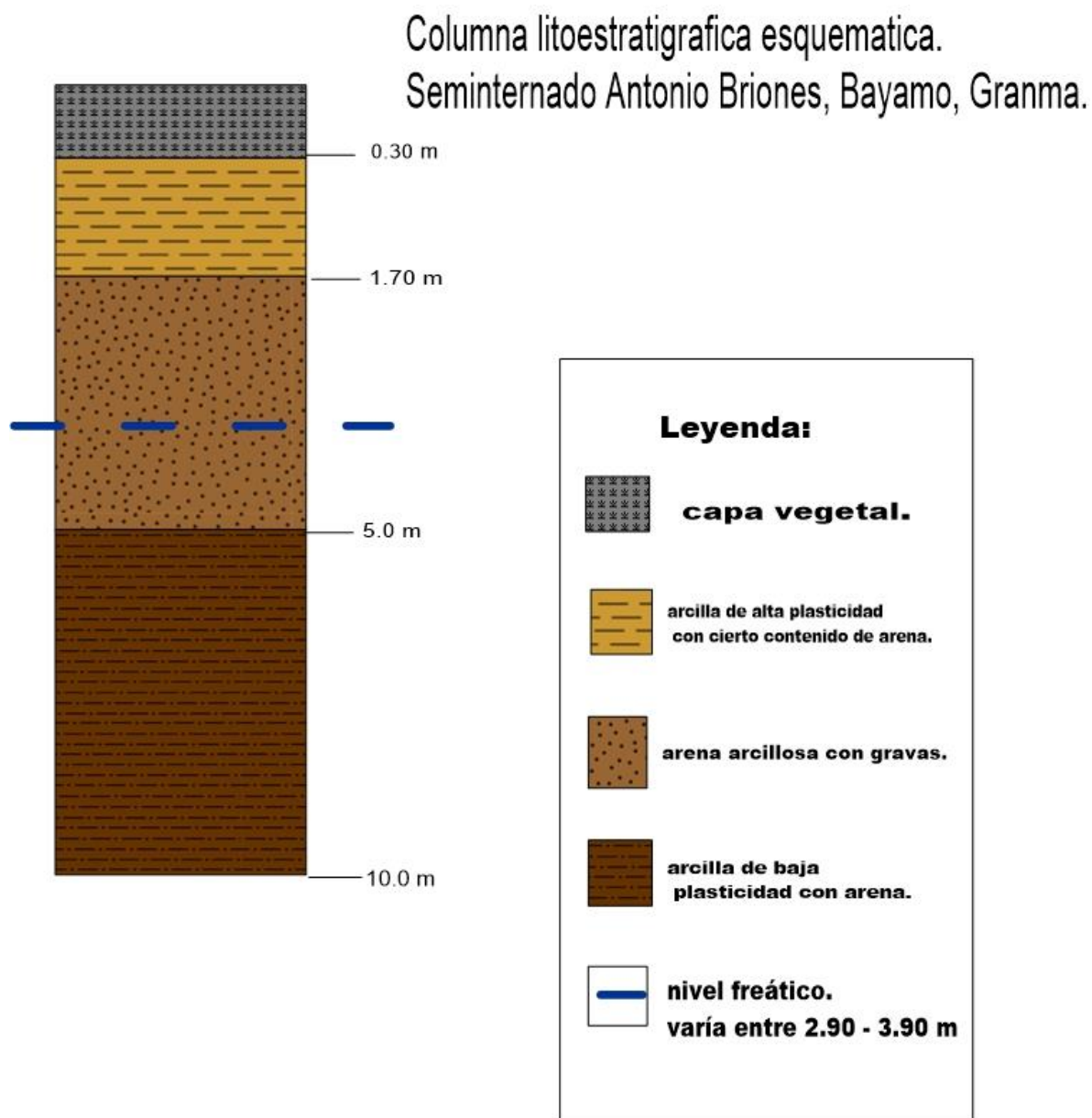


Anexo 3: Columna litoestratigráfica esquemática. Obra: I.P.U.E.C: Luis Marcano.

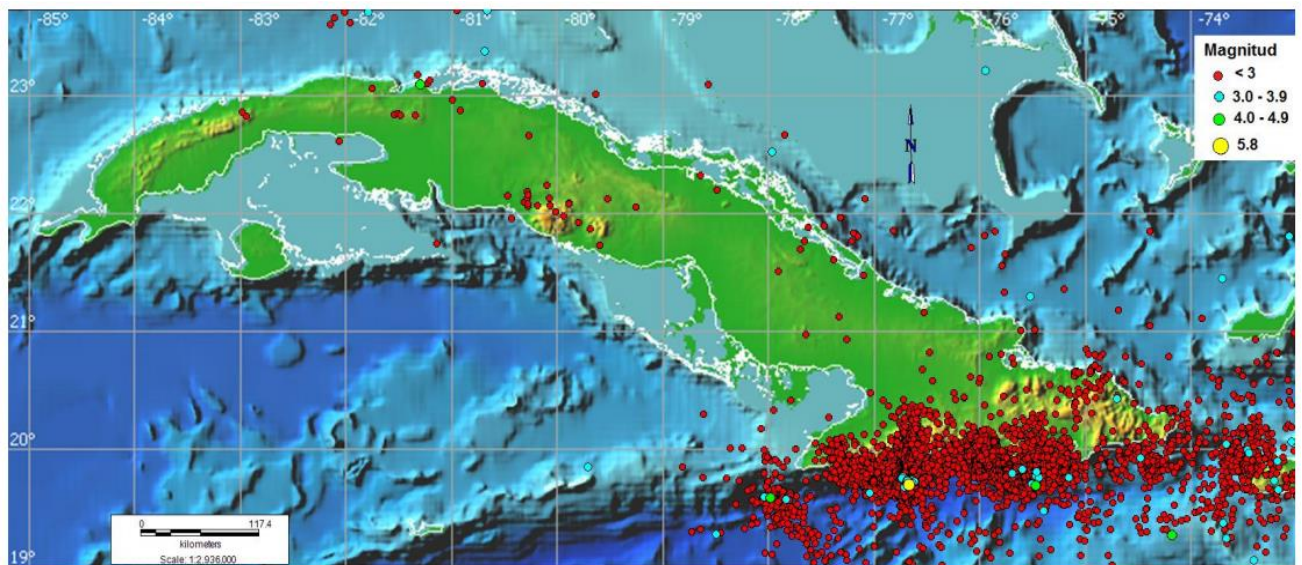
Columna litoestratigrafica esquematica. obra: I.P.U.E.C: Luis Marcano. Bayamo.



Anexo 4: Columna litoestratigráfica esquemática. Obra: Seminternado Antonio Briones.



Anexo 5: Resumen de sismicidad registrada durante el año 2017. (Fuente CENAIIS)



Anexo 6: Mapa geológico de la República de Cuba, escala 1:100000. (I.G.P)

