



Instituto Superior Minero
Metalúrgico de Moa.

Dr. Antonio Núñez Jiménez



Departamento de Ingeniería

Geológica

Trabajo de Diploma

En opción al título de Ingeniero Geólogo

Título: 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.

Autor: Wilfredo Bauta Torres

Tutor (a): MSc. Liuska Fernández Diéguez

Moa, 2017

Año 59 de la Revolución

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: Wilfredo Bauta Torres autor de este trabajo de diploma y Liuska Fernández Diéguez tutora de la tesis, declaramos la propiedad intelectual de este trabajo al departamento de Geología y Minería del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

Wilfredo Bauta Torres

Ms. C. Liuska Fernández Diéguez

Dedicatoria:

- ❖ A mis Padres, Iliana Esther Torres Marrero y Wilfredo Bauta Martínez, por haberme apoyado en todo momento, formando parte activamente también de este sueño hoy consumado. Gracias de todo corazón
- ❖ A mi hermanita linda, que también me apoyó mucho, a mi sobrinita Anaili, la bebé de la familia, ojalá y este triunfo familiar la inspire a formar parte en el futuro de nuestro ejército joven, alegre y comprometido que son los universitarios cubanos.
- ❖ A toda mi familia en general, en especial a los que ya no están físicamente, a mi tío Elías Bauta, y mis abuelos Ledia Marrero y Aurelio Bauta. Sus bendiciones me acompañan siempre.
- ❖ A mi amigo de la infancia: Osmani, mi hermano esto también es tuyo, en la constancia está el éxito.
- ❖ A mi hermanito Carlos Parra.

Agradecimientos

- ❖ Con nadie más puedo estar más agradecido que con mis padres, esto es una victoria nuestra.
- ❖ A nuestra Revolución, La Revolución de los humildes que soñó Martí y que Fidel cumplió.
- ❖ A todos aquellos profesores que tanto aportaron a mi formación académica y humana y además, depositaron su confianza en mí, en especial a Yordanis, Alexander, Yilian y Baby, Gracias también a ustedes hoy voy por el camino correcto.
- ❖ A los profesores del departamento de Geología. Gracias a los conocimientos y la voluntad de muchos de ellos hoy puedo mostrar orgullosamente mi tesis de diploma.
- ❖ A mis compañeros de grupo, de todos aprendí algo y todos forman parte de mi familia, de verdad.
- ❖ Al profesor y MsC Yurislely Valdez, por no tener miedo a decir "No hay problema" cuando las vicisitudes parecen imponerse ante las soluciones. Para usted todo el reconocimiento.
- ❖ A mis hermanos Carlos Luis, Norges, Ernesto y Greenidge, en nombre de todas las batallas que tuvimos que afrontar y de la amistad que fue creciendo día a día. Gracias por todo lo que me aportaron.
- ❖ A mis amigos que tuve que dejar atrás un día, después de muchos años juntos y que orgullosamente hoy ya son profesionales: Bauta, Dayron Yordanis, Emilio, Yadirka, Taimí, Yaricelis y otros tantos.
- ❖ Emilio, Luisi, Jorge, Juan, Enrique, Freddy, Charli, no mencionarlos sería injusto.
- ❖ A mi tutora, MsC Liuska Fernández Diéguez

A todos GRACIAS.

PENSAMIENTO

"Un emprendedor ve oportunidades allá donde solo otros ven problemas".

Michel Gerber.

"No se puede enseñar, no se puede preparar la mente, ni dotarla de conocimientos teóricos sino se enseña otra cosa muy importante, sino se enseña a trabajar"

Fidel Castro.

"La vida es una obra de teatro que no permite ensayos...Por eso canta, ríe, llora y vive intensamente cada momento de tu vida antes que el telón baje y la obra termine sin aplausos"

Charles Chaplin.

RESUMEN

La presente investigación se realizó dada la necesidad de conocer las condiciones ingeniero-geológicas de los suelos en los municipios de San Luis, Julio Antonio Mella y Palma Soriano de la Provincia Santiago de Cuba con el objetivo de identificar los escenarios susceptibles a la licuefacción inducidos por terremotos fuertes, específicamente los estratos con mayor susceptibilidad a licuar dentro de las diferentes formaciones geológicas presentes en las áreas de estudio. Para cumplir con el objetivo propuesto se tomó como metodología la validación del sistema de indicadores propuestos por Fernández Diéguez en el año 2015 y el cálculo del factor de seguridad corregido a partir de la obtención de variables correspondientes a las propiedades físico-mecánicas, para ello se revisaron informes de la Empresa Nacional de Investigaciones aplicadas (ENIA) sede Santiago de Cuba. Como resultado se determinó que los suelos de tipo GC (Gravas arcillosas) las arenas arcillosas (SC) de la formación San Luis, así como los aluvios gravo-arenosos y las arcillas aluviales de baja plasticidad (CL) pertenecientes a la formación Cauto de edad Cuaternario, la que a su vez sobreyace a la formación San Luis, son los que presentan mayor susceptibilidad a la licuefacción ante sismos fuertes.

ABSTRAC

The present investigation was carried out given the necessity to know the engineer-geologic conditions of the floors in the municipalities of San Luis, Julio Antonio Mella and Palma Soriano of the County Santiago from Cuba with the objective of defining the susceptible places to the liquefaction induced by strong earthquakes, specifically the strata with more susceptibility to liquefy inside the different formations geologic present in the study areas. To fulfill the proposed objective it took as methodology the validation of the system of indicators proposed by Fernández Diéguez in the year 2015 and the calculation of the factor of security corrected starting from the obtaining of variables corresponding to the physical-mechanical properties, for they were revised it reports of the National Company of Investigations applied (ENIA) headquarters Santiago from Cuba. As a result it was determined that the type floors GC the loamy (SC) sands of the formation San Luis, as well as the burden-sandy aluvios and the alluvial clays of low plasticity (CL) belonging to the Cautious formation of Quaternary age, the one that in turn to the formation San Luis, they are those that present bigger susceptibility to the liquefaction before strong earthquakes.

ÍNDICE

RESUMEN	VI
INTRODUCCIÓN	1
MARCO TEÓRICO y ESTADO DEL ARTE.....	3
Factores que condicionan el fenómeno de licuefacción	7
Registros históricos del efecto de Licuación.....	19
CAPITULO I. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DE LA REGIÓN DE ESTUDIO.....	27
1.1 Ubicación geográfica:.....	27
1.2 Clima	28
1.3 Geomorfología y Relieve:.....	29
1.4 Hidrogeología	31
1.5 Geología regional	32
1.6 Sismicidad.....	36
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN GENERADA POR SISMOS DE GRAN MAGNITUD EN LOS MUNICIPIOS DE SAN LUIS, JULIO A. MELLA Y PALMA SORIANO.....	40
2.1.1 Primera etapa de la investigación. Búsqueda bibliográfica	40
2.1.2 Segunda etapa de la investigación.....	41
2.1.3 Tercera etapa de la investigación.....	41
2.2. Metodología aplicada para determinar los escenarios susceptibles a la licuefacción en las áreas de estudio.....	42
2.2.1 Análisis de las condiciones geológicas.....	42
2.2.2 Análisis del comportamiento de la Sismicidad en el área de estudio	42
2.2.3 Análisis del comportamiento del nivel freático en el área de estudio	43

2.2.4 Análisis de las condiciones ingeniero geológicas	44
2.2.5 Cálculo del factor de seguridad para la licuefacción (FSL).....	45
CAPITULO III: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN EN EL	
ÁREA DE ESTUDIO.....	52
3.1 Valoración general de los sistemas de indicadores aplicados a la investigación:.....	52
3.2 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio Julio A. Mella.....	53
3.2.1 Condiciones Geológicas.....	53
3.2.2 Sismicidad	54
3.2.3 Características hidrogeológicas	55
3.2.4 Condiciones ingeniero-geológicas.....	55
3.2.5 Cálculo del factor de seguridad para la licuefacción	55
3.2.6 Conclusiones Parciales para Julio A. Mella	57
3.3. Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio San Luis.	58
3.3.1 Condiciones geológicas.....	58
3.3.2 Sismicidad	59
3.3.3 Características hidrogeológicas	60
3.3.4 Condiciones ingeniero-geológicas.....	60
3.3.5 Cálculo de factor de seguridad para la licuefacción.	60
3.3.6 Conclusiones parciales para San Luis.....	61
3.4 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio Palma Soriano.....	63
3.4.1 Condiciones geológicas.....	63
3.4.2 Sismicidad	64

3.4.3 Características hidrogeológicas	64
3.4.4 Condiciones ingeniero-geológicas.....	65
3.3.5 Cálculo de factor de seguridad: para la licuefacción.	65
3.3.6 Conclusiones parciales para Palma Soriano	66
CONCLUSIONES.....	68
RECOMENDACIONES	69
BIBLIOGRAFÍA	70

INTRODUCCIÓN

Los sismos, principalmente los de mayor Magnitud suelen provocar efectos considerables a la infraestructura de cualquier territorio, esto por supuesto se traduce también en innumerables pérdidas humanas y cuantiosos daños a la economía que pueden llevar en ocasiones a catalogarlo como desastre, súmele a esto que la percepción del riesgo ante fenómenos geológicos como los sismos, los deslizamientos y la erosión todavía es baja en varios sectores profesionales, decisores y pobladores de distintas zonas del país (Galván Rodríguez, 2014). El Sismo trae aparejado varios efectos que multiplican el daño en dependencia de las condiciones geológicas y geotécnicas del medio en el que ocurre. Uno de los más comunes es el fenómeno conocido como Licuefacción de los suelos, el cual ocurre en suelos arcillosos o arenas limosas saturadas debido a la pérdida de la resistencia de los mismos producido a la vez por el aumento gradual de la presión intersticial, llegando a anular las tensiones tangenciales a tal punto que el terreno se comporta como un pseudolíquido.

Debido a la situación que presenta Cuba con respecto a su posición geotectónica, en especial el oriente Cubano, nuestra isla no está ajena a la afectación de un sismo de gran magnitud. Los estudios precedentes ubican a Santiago de Cuba como el territorio Cubano con mayor peligro sísmico, las réplicas percibidas en esta región en los últimos años corroboran lo antes planteado, por lo que el estudio de estos fenómenos se hace cada vez más necesario, además, el pasado ya recoge los efectos de los sismos en la región. Para reducir el riesgo que pueda provocar el fenómeno es necesario conocer el peligro y de esta manera identificar las vulnerabilidades, es por esto que la presente investigación se encamina a conocer la respuesta de estos suelos característicos ante un sismo de gran magnitud.

Problema de la Investigación: Necesidad de identificar los escenarios susceptibles a la licuefacción en los municipios San Luis, Julio Antonio Mella y Palma Soriano de la provincia de Santiago de Cuba ante un sismo de gran

magnitud teniendo en cuenta las condiciones ingeniero- geológicas de los suelos de estos territorios.

Objeto de estudio: Los suelos de los municipios Julio Antonio Mella, San Luis y Palma Soriano.

Campo de acción: El Fenómeno conocido como licuefacción de los suelos

Objetivo general: Identificar escenarios susceptibles a la licuefacción a partir de la caracterización de las condiciones ingeniero geológicas de los suelos de los territorios San Luis, Palma Soriano y Julio A. Mella

Objetivos específicos

- Caracterizar las condiciones ingeniero geológicas de los suelos de los territorios San Luis, Mella y Palma Soriano
- Aplicar un sistema de indicadores geotécnicos y sismológicos que permitan determinar escenarios licuables
- Identificar estratos susceptibles a la licuefacción de los suelos.

Hipótesis: Si se caracterizan los suelos a partir de las condiciones ingeniero-geológicas entonces será posible identificar escenarios susceptibles a la licuefacción en los territorios de San Luis, Julio Antonio Mella y Palma Soriano ante un sismo de gran magnitud.

Novedad de la Investigación:

Se amplía el estudio de susceptibilidad a la Licuefacción en la Provincia Santiago de Cuba al realizarse estudios de carácter local a los territorios de Julio A. Mella, Palma Soriano y San Luis.

MARCO TEÓRICO y ESTADO DEL ARTE

Introducción

El fenómeno licuefacción se define como la transformación del material granular del estado sólido al licuado, como consecuencia del incremento de las presiones de poro y de la reducción de presiones efectivas. El incremento de las presiones de poro se induce por la tendencia de materiales granulares a compactarse cuando se someten a las deformaciones de cortante cíclicas. El cambio de estado ocurre con preferencia en suelos sueltos a medianamente compactos, pobremente drenados, como son arenas limosas o gravas confinadas o con sellos de materiales impermeables. Durante la licuación el estrato de suelo se ablanda, suaviza, reblandece aumentando su deformabilidad, permitiendo grandes deformaciones cíclicas. En materiales sueltos, el reblandecimiento puede ser acompañado con la pérdida de resistencia al esfuerzo cortante, en materiales moderadamente densos a densos, la licuación conduce al reblandecimiento transitorio y al incremento de las deformaciones cíclicas por esfuerzo cortante, pero la tendencia de dilatarse durante el incremento de esfuerzos cortantes inhibe las pérdidas mayores de resistencia y generación de grandes deformaciones de suelo. La licuación de los materiales granulares, moderadamente compactos puede ser acompañada con el desarrollo de la condición de la movilidad cíclica y/o licuación cíclica. Los suelos sueltos se compactan durante la licuación y re consolidación, conduciendo al asentamiento de suelo. (Tanasijevic, 2011)

Otras particularidades que influyen en la susceptibilidad a la licuación de los suelos son: la forma de las partículas y la estructuración expresada a través de los contactos entre las partículas, su tamaño y su uniformidad.

Los suelos más susceptibles a la licuefacción son aquellos formados por depósitos jóvenes (producidos durante el Holoceno, depositados durante los últimos 10,000 años) de arenas y sedimentos de tamaños de partículas similares, en capas de por lo menos más de un metro de espesor, y con un alto contenido de agua (saturadas). Tales depósitos por lo general se presentan en los lechos de ríos,

playas, dunas, y áreas donde se han acumulado arenas y sedimentos arrastrados por el viento y/o cursos de agua. (Sánchez, 2013)

La licuefacción debe su causa al incremento de los esfuerzos cortantes actuantes en el suelo o a la disminución de su resistencia por la acción de una sollicitación brusca en el suelo provocada por una sacudida de este ya sea natural o artificial.

Es más probable que la licuefacción ocurra 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. Durante el proceso en que actúa la fuerza exterior, por lo general una fuerza cíclica sin drenaje, tal como una carga sísmica, las arenas sueltas tienden a disminuir su volumen, lo cual produce un aumento en la presión de agua en los poros y por lo tanto disminuye la tensión de corte, originando una reducción de la tensión efectiva. (Sánchez, 2013)

Conceptos de Licuefacción

González Vallejos (2002), define suelos licuables, aquellos suelos con contenido arenoso limoso, en estado saturado que al experimentar esfuerzos cortantes anómalos y rápidos, permiten un aumento de las presiones intersticiales (por falta de drenaje), en que la resistencia al corte desaparece y el material se comporta como líquido, dando lugar a movimientos verticales y horizontales de su masa, que se traducen en deslizamientos, o en grandes asentamientos.

Franz Sauter F. Fundamento de Ingeniería Sísmica (1989) Transformación de suelos granulares saturados y poco consolidados, por ejemplo arena, en una masa con propiedades de un líquido o fluido debido a la vibración del terreno causada por un sismo.

Schmidt, R. (2005) Efecto secundario durante terremotos. Se refiere a sedimentos pocos o no consolidados y saturados de agua. Los depósitos en la superficie o en un nivel cercano de la superficie pueden perder su resistencia causados por el movimiento de la tierra. Cuando ocurre debajo de edificios u otras estructuras de construcción pueden causar daños graves.

Rodríguez Pascua (1997): La licuefacción es la disrupción in situ del soporte mutuo entre granos, generalmente por una sacudida sísmica, en la que se produce la pérdida total o parcial de la resistencia de cizalla de los materiales afectados. En suelos sin cohesión, la transformación de un estado sólido a líquido es el resultado del aumento de la presión de los poros que disminuye el coeficiente de fricción durante un terremoto. El suelo completamente saturado, con arenas sin cohesión, generalmente limpias, que pueden incluir algo de gravas puede ser licuefaccionado durante la sacudida sísmica por la propagación de las ondas de cizalla.

Colectivo de Autores (2012) 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.

Programa Nacional de Difusión y Divulgación de Ciencia y Tecnología “Un Recorrido por las Ciencias de la Vida y las Ciencias de la Tierra” (2000-2003): Consecuencia de los terremotos. Los suelos no consolidados, no cohesivos o fácilmente disgregables y saturados en agua, se separan, debido a las vibraciones del terremoto perdiendo su resistencia de manera temporal. El sedimento cae hacia abajo y el agua de saturación tiende a salir como una fuente surgente, comportándose como material licuado, cuyo resultado es la producción de un desplazamiento o falla del terreno.

Tanasijevic, 2011: Transformación del material granular del estado sólido al licuado, como la consecuencia del incremento de las presiones de poro y de la reducción de presiones efectivas.

“Mapa de Susceptibilidad de Licuefacción para la Península de Nicoya, Guanacaste, Costa Rica” de OVSICORI-UNA (Octubre, 2003): Proceso en el cual los materiales térreos se licuan como una amenaza sísmica secundaria causada por una condición especial de algunos suelos o substratos constructivos, a veces

llamados suelos suaves, principalmente aluviones y sedimentos poco consolidados al ser sometidos a las aceleraciones de un sismo de magnitud mayor o igual a 7.0.

Causas principales a lo que puede atribuirse la pérdida de la resistencia al esfuerzo cortante

- Incremento de los esfuerzos cortantes actuantes y aumento correspondiente de presión de poro.
- Desarrollo rápido de elevadas presiones en el agua intersticial, quizás como consecuencia de un sismo, una explosión, etc. Esta segunda causa se asocia a un colapso estructural rápido del suelo cuyos vacíos, saturados de agua, tienden a reducirse, desarrollándose presiones en aquella. (Elgamal, 2013)

Principales categorías en las que se subdivide la licuefacción

Flujo por Licuación: El flujo por licuación es un fenómeno en el cual el equilibrio estático es destruido por cargas estáticas o dinámicas en un depósito de suelo con baja resistencia residual. La resistencia residual es aquella que posee el suelo después de haber licuado. Cargas estáticas, por ejemplo, pueden ser aplicadas por las edificaciones sobre una ladera en pendiente que ejerce fuerzas adicionales en el suelo por debajo de la cimentación. Los terremotos, voladuras, y el hincado de pilotes son ejemplos de cargas dinámicas que pueden producir flujo por licuación. Las fallas debido al flujo por licuación se caracterizan comúnmente por grandes y rápidos movimientos que producen efectos desastrosos después de ocurrido un terremoto.

Movilidad Cíclica: La Movilidad Cíclica es un fenómeno de licuación provocado por una carga cíclica, ocurre en depósitos de suelo con esfuerzos de corte estáticos menores que la resistencia del suelo. Las deformaciones debido a la movilidad cíclica se incrementan porque los esfuerzos estáticos y dinámicos subsisten durante un terremoto. El desplazamiento lateral, es un resultado común

de la movilidad cíclica, puede ocurrir sobre terrenos suavemente inclinados y en terrenos llanos cercados por ríos y lagunas. (Elgamal, 2013)

Factores que condicionan el fenómeno de licuefacción

- **Origen del suelo.** Los suelos depositados por procesos fluviales, litorales y eólicos se sedimentan fácilmente y sus granos tienen poca probabilidad de compactarse, de modo que se licuarán con facilidad. Los depósitos glaciales, generalmente, ya son bastante densos y tienen menor probabilidad de licuarse. Suelos compuestos por roca no son en absoluto licuables.
- **Distribución del tamaño de los granos:** La arena uniformemente graduada, de grano muy grueso a medio tiene mayor probabilidad de licuarse, mientras que las arenas limosas finas y las gravas lo hacen bajo cargas cíclicas muy severas.
- **Profundidad de las aguas subterráneas:** Mientras más cerca de la superficie se encuentre el nivel de las aguas subterráneas (nivel freático), mayor será la probabilidad de que ocurra licuefacción.
- **Edad del depósito:** Los suelos jóvenes (menos de 3.000 años) son débiles y no cohesivos, de modo que tienen mayor probabilidad de licuarse comparado con aquellos más antiguos donde han actuado procesos de compactación y cementación natural. Dichos procesos incrementan su resistencia.
- **Amplitud y duración de la vibración del terreno:** La licuefacción de suelos bajo condiciones de tensión provocadas por un terremoto aumenta con la magnitud y la duración del sismo. Por esta razón, sismos pequeños licuarán únicamente los suelos más próximos al epicentro, mientras que ante un sismo de magnitud mayor será posible reconocer licuefacción a distancias muy grandes. En el caso del sismo del 27 febrero de 2010 se

observó licuefacción hasta al menos 400 km de distancia del epicentro (Valparaíso).

- **Peso del recubrimiento y profundidad del suelo:** Las tensiones entre partículas aumentan a medida que aumenta la presión del recubrimiento (a mayor profundidad). Mientras mayor sea dicha tensión menor será la probabilidad que ocurra licuefacción. Por lo general, la licuefacción ocurre a profundidades menores de 9 m y, rara vez, a mayores de 15. (Alfaro, 2011)

Evidencias superficiales más comunes de la ocurrencia de licuación (Leyton, 2011)

- Volcanes de arena
- Las grietas en el terreno.
- Las pérdidas de capacidad portante.
- Los movimientos laterales.
- Las oscilaciones horizontales del terreno.
- Las fallas de taludes por flujo del terreno.

Efectos de la licuefacción

El fenómeno de licuefacción se manifiesta en la superficie del terreno por la formación de grietas, hundimientos de terreno, asentamientos diferenciales de estructuras, “golpes de agua” (surgimiento de agua) y volcanes de arena. Los dos últimos son producto del súbito aumento de la presión de agua de poros ocasionada por la vibración, forzando a que este fluido fluya rápidamente a la superficie. Si el flujo asciende lo suficientemente rápido se generan “golpes de agua”. Al mismo tiempo, el agua ascendente puede transportar partículas de arena hasta la superficie donde son depositadas formando montículos de arena, a los que por analogía se les denomina “volcanes de arena”. (Obando,2009)

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

- Flujos de tierra: Los materiales del suelo se desplazan rápidamente cuesta abajo en un estado licuado, a veces causando coladas de barro o avalanchas.
- Propagación lateral: Tipo de remoción en masa en que se produce desplazamiento limitado de las capas superficiales del suelo a favor de pendientes suaves o hacia superficies libres, como por ejemplo, en márgenes de ríos y taludes de terrazas fluviales. En este tipo de desplazamientos, a menudo ocurre que las capas sub-superficiales están revestidas de cubiertas antrópicas, como por ejemplo asfaltos. Cuando las capas más profundas se licuan, las capas superficiales antrópicas, generalmente, se mueven lateralmente en bloques, tanto durante como después del sismo, provocando una deformación permanente del suelo y ruptura de las cubiertas.
- Flotación: Objetos enterrados en el suelo bajo licuación son desplazados. Es común que tanques, buzones o tuberías de alcantarillado asciendan a través del suelo y floten en la superficie.
- Pérdida de resistencia de soporte: Reducción de la capacidad de soporte de los cimientos debido al debilitamiento del material del suelo subyacente o colindante. A menudo provocan que las estructuras se hundan o dañen. (Obando,2009)

Criterios de Susceptibilidad

No todos los suelos son susceptibles de presentar licuefacción, así que el primer paso en el desarrollo de una evaluación de riesgo de licuefacción es la determinación de la susceptibilidad de licuefacción. La susceptibilidad de licuefacción de un suelo puede ser evaluada usando criterios históricos, geológicos, basados en su composición o según su estado:

Criterios históricos: Se ha observado que la licuefacción ocurre frecuentemente en los mismos lugares cuando las condiciones del sitio se mantienen constantes, es por esto que la evidencia de la ocurrencia histórica de licuefacción, observada en forma de paleo licuefacción, puede ser utilizada como prueba de susceptibilidad de licuefacción, en un determinado lugar.

Criterios geológicos: Las condiciones geológicas también pueden indicar susceptibilidad de licuefacción, por ejemplo los suelos de depósitos fluviales y eólicos, cuando se encuentran saturados, tienen una alta probabilidad de ser susceptibles de presentar licuefacción. También se ha observado licuefacción en depósitos de abanicos aluviales, playas y estuarios, pero no de manera tan evidente como en los casos anteriores. Otro criterio geológico es la edad del depósito, en general los depósitos de suelo jóvenes son más susceptibles de licuefacción que los depósitos más antiguos.

Criterios basados en la composición del suelo: La composición física de un suelo juega un importante papel en la determinación de su susceptibilidad de licuefacción. Las arenas uniformemente gradadas y limpias, compuestas principalmente de partículas redondeadas son intrínsecamente más susceptibles, mientras que los suelos bien gradados y los suelos con partículas angulares son menos susceptibles. La presencia de finos, particularmente finos plásticos ($IP > 10$), tiende a disminuir la susceptibilidad de licuefacción.

Criterios basados en el estado del suelo: El potencial de licuefacción de un suelo también depende de su estado, como las tensiones efectivas a las que está sometido y su densidad in situ, ya que la tendencia de un terreno a densificarse, bajo condiciones de carga cíclicas, depende de su densidad y de las tensiones efectivas. Los suelos sueltos son bastante más susceptible de licuefacción que los suelos densos y, para una densidad dada, los suelos bajo tensiones de confinamiento efectivas altas son más susceptible que los suelos bajo tensiones de confinamiento efectivas bajas. (Kramer & Stewart, 2004)

Condiciones granulométricas para la ocurrencia de la licuefacción de los suelos según (Wang, 1979)

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

Circunstancias en las que ocurre la licuefacción

- Sismos con magnitud igual o superior a 5.5 con aceleraciones superiores o iguales a 0.2g
- Bajo grado de compactación, es decir $N < 10$ para profundidades < 10 m y $N < 20$ para profundidades > 10 metros.
- 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. (Obando,2009)

Metodologías usadas para la determinación del potencial de licuefacción

En la actualidad se presentan en las publicaciones científicas diversas metodologías (Seed & Lee 1966; Seed & Idriss 1971; Seed, Idriss & Arango 1983; Tokimatsu & Yoshimi 1983; Alcocer et al. 1994; Youd et al. 2001; González-Labbe 2011) para cuantificar la licuación de los suelos resultantes de acciones dinámicas (sísmicas). Algunas de ellas mencionadas a continuación;

Evaluación del potencial de licuefacción de suelos granulares sujeto a movimientos sísmicos

Estos métodos solicitan definir el nivel de aceleración del terreno como requisito para evaluar el potencial de licuefacción. A menudo este nivel se

establece a partir de relaciones entre la magnitud del sismo, la distancia al epicentro y la aceleración pico.

Métodos empíricos: Basado en observaciones in situ del comportamiento de depósitos tipo arena durante movimientos sísmicos anteriores y correlaciones entre predios que no se han licuado, apoyados por algunos ensayos simples de laboratorio y densidad relativa del número de golpes de ensayos SPT,

Métodos analíticos: Basados en la determinación en laboratorio de las características de resistencia a la licuefacción de muestras no alteradas y el uso de análisis de respuestas dinámica del predio para determinar la magnitud de las tensiones de corte inducidas por los movimientos sísmicos. El análisis del potencial de licuefacción en este estudio sigue procedimientos basados en la determinación de la razón de esfuerzos cíclicos (CSR). Esta razón CSR depende directamente de la máxima aceleración horizontal en el sitio; lo cual motivó a un análisis de microzonificación sísmica del área, a fin de obtener un mejor estimado de este parámetro. Como resultado de este análisis se espera definir los estratos que son potencialmente licuables. (Moya Fernández, 2009)

Métodos realizados para evaluar la resistencia de los suelos a la licuefacción

Modelos Físicos: Estos métodos requieren del uso de centrífugas o tablas vibratoras para simular la carga sísmica bajo condiciones de contorno bien definidas. El suelo utilizado en el modelo es re moldeado para representar diferentes densidades y condiciones geométricas. A causa de las dificultades en conseguir un modelo con las mismas condiciones del sitio, los modelos físicos rara vez se utilizan para estudiar la resistencia a la licuación de un sitio específico. Sin embargo, los modelos físicos son valiosos para analizar y entender el comportamiento generalizado del suelo y para evaluar la validez de modelos constitutivos bajo condiciones de contorno bien definidas, como se indica en los comentarios relativos a los métodos analíticos.

Técnicas empíricas: Entre ellas, uno de mayor difusión y aplicación, el Procedimiento Simplificado, en que se calculan dos variables sísmicas primarias

tales como: a) la excitación sísmica de la capa de suelo, expresada en términos de la relación de esfuerzos cíclicos promedios ($CSR = t_{pro} / s'_{vo}$); y b) la capacidad de la capa de suelo para resistir la licuación, en términos de la relación de resistencia a la licuefacción. Para determinar la resistencia a la licuación de los suelos arenosos, la relación CSR se compara con la relación CRR. (Obando,2009)

Procedimientos “*in situ*” para evaluar la capacidad de los suelos arenosos para resistir la licuación

- Penetración estándar (SPT)
- Penetración con cono (CPT)
- Velocidad de ondas de corte (V_s)
- Penetración Becker en gravas (BPT)

Métodos de potencial de licuefacción según Kishida (1969) y Ohsaki (1970)

Estas técnicas están basadas en el número de golpes suministrados al terreno mediante ensayos tipo SPT, cuyos resultados son empleados en el análisis de las condiciones de los suelos ante solicitaciones sísmicas, capaces de generar la licuación del terreno, tal y como ocurrió en el año 1964 en la Ciudad de Niigata (Japón).

Kishida propone que para la ocurrencia de licuación del suelo ante sismos de magnitud $M \geq 7$ es requerido el cumplimiento de las siguientes condiciones:

- a) El nivel freático está cerca de la superficie.
- b) El espesor del estrato de suelo no licuable, arriba del licuable, es menor que 8 m.
- c) La compacidad relativa (C_r) es menor que el 75 %.

Mientras que Ohsaki considera que los suelos se licuan bajo las siguientes

Condiciones:

- a) El nivel freático está cerca de la superficie.

b) Las características granulométricas satisfacen las siguientes relaciones:

$2 \text{ mm} < D_{60} < 0,2 \text{ mm}$ $D_{10} < 0,1 \text{ mm}$ Siendo D_{60} y D_{10} los tamaños efectivos que dejan pasar, respectivamente, el 60 y el 10 % en peso, de las partículas.

c) El número de golpes en la prueba de penetración estándar (NSPT) es menor que dos veces la profundidad z expresada en metros.

Método de Seed et.al. (1982)

Una de las numerosas relaciones matemáticas resultante de reiterados ensayos de campo conocida fue propuesta por el científico Seed en el año 1983. Hoy día, esta expresión numérica es muy usada para averiguar las condiciones físicas del subsuelo. Este algoritmo está dado por el siguiente modelo cuantitativo:

$$V_s \text{ (m/seg)} = 56 \text{ (N)}^{1/2}$$

Dónde:

V_s : Velocidad de propagación de ondas de corte

N : Número de golpes suministrados al terreno evaluado. (SEED & IDRIS, 1982)

Henríquez, C. (2007): Para sismos con $M = 8,5$, no se producirá licuación si la V_s , en los 15 m superiores, supera los 350 m/seg. Esto coincide con lo establecido en otras investigaciones, según las cuales las arenas del Holoceno, con valores típicos de V_s entre 200 y 225 m/seg, son más susceptibles de licuarse que las del Pleistoceno, con V_s mayor que 325 a 350 m/seg.

Investigaciones realizadas en el campo de la evaluación de potencial de licuefacción en Latinoamérica y el mundo en la actualidad

- **Determinación del potencial de licuación con el método de microtremores.** (Universidad Nacional Autónoma de México, 2012)

En este trabajo se estudia el fenómeno de licuación de arenas en el Valle de Mexicali, proponiendo para ello una metodología para caracterizar el suelo arenoso con perfiles de la velocidad de ondas de corte (V_s) obtenidos a partir del análisis espectral del ruido sísmico ambiental o microtremores. El método que se desarrolló permite estimar el potencial de licuación utilizando registros de vibración sísmica ambiental, también conocido como microsismos, microtremores, campo natural, ruido ambiental etc.

A partir de los registros de microtremores obtenidos en esta zona, se desarrolló un procedimiento que permitió modelar y evaluar los perfiles de la velocidad de onda de corte (V_s) teniendo como referencia la información geológica y geotécnica de la zona para lo cual se contó con los datos de seis sondeos de penetración estándar realizados en la zona después del temblor. Una vez determinado el perfil de velocidad de la onda de corte, se recurrió a criterios ya conocidos.

- **Evaluación del potencial de licuación basado en el ensayo triaxial cíclico.**

Describe los métodos de evaluación de potencial de licuación a partir del ensayo triaxial cíclico de suelos arenosos. Estos métodos realizan las correcciones más relevantes como la condición de esfuerzos in situ, movimiento del sismo multidireccional, irregularidades de la forma de onda del esfuerzo cortante y magnitud del sismo.

La resistencia a la licuación del suelo es evaluada a partir de los resultados del ensayo triaxial cíclico. En este método, el potencial de licuación se evalúa por comparación de la resistencia a la licuación de un suelo con el esfuerzo cortante cíclico generado durante un sismo, a partir del procedimiento propuesto por Seed *et al*, 1971. (Huamán Soto, 2010)

Investigaciones realizadas en el campo de la Evaluación de Potencial de Licuefacción en Cuba

➤ Posibilidad de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en la cuenca de Santiago de Cuba por terremotos fuertes.

En esta investigación La autora hace un mapa esquemático pronóstico de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en Santiago de Cuba por terremotos fuertes. 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. Además, se hace una suposición conjugando factores como la geología, geomorfología y el nivel freático dándose una propuesta totalmente cualitativa basándose solo en la magnitud e intensidad del sismo. (Fernández Dieguez, 2000)

➤ Modelación de parámetros geotécnicos como contribución a la zonación sísmica local: ciudad de San Cristóbal, Cuba

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. (Hernández Ordaz & et.al, 2014)

➤ Escenarios susceptibles a la licuefacción inducida por sismos de gran magnitud en Santiago de Cuba

El propósito de esta investigación fue obtener, para el Consejo Popular Guillermon Moncada del municipio de Santiago de Cuba, la zonación del potencial de licuefacción de los suelos; para ello se evaluaron las condiciones ingeniero-geológicas y las particularidades sísmicas que propician este fenómeno. Se calculó el factor de seguridad corregido después de determinar las intensidades máximas posibles, a partir de magnitudes sísmicas que puedan provocar

licuefacción en el área de estudio. Se obtuvo como resultado el esquema de susceptibilidad a la licuefacción. (Fernández Diéguez & et.al,2016)

➤ **Zonación preliminar de la licuefacción de los suelos en la región de Cuba Oriental**

El autor expone una zonación de la licuefacción de los suelos, basada en el estudio de la incidencia de diferentes factores: suelos susceptibles, intensidad sísmica, aceleración horizontal efectiva, topografía, reportes históricos de licuefacción, entre otros y se identifican las zonas propensas a licuar y aquellas donde es baja o no existe este fenómeno. La investigación se ubica en el nivel o grado I de zonación (TC4-ISSMGE 1999). Se tuvo en cuenta solo la información geológica, desembocaduras de ríos, antiguos cauces o actual llanura fluvial. (Rosabal, 2011)

➤ **Procedimiento para la gestión y gestión de riesgos geológicos en la provincia de Santiago de Cuba**

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. 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. (Galván Rodríguez, 2014)

➤ **Susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en la ciudad de Caimanera, Guantánamo**

La investigación tuvo el objetivo de evaluar las condiciones ingeniero–geológicas de los suelos de Caimanera, provincia de Guantánamo, para determinar su potencial de licuefacción. Se analizó la posibilidad de amplificación de las ondas sísmicas teniendo en cuenta el efecto de sitio, a partir de las propiedades físico-mecánicas del área de estudio. El sistema de indicadores aplicado incluyó parámetros ingeniero-geológicos y el cálculo del factor de seguridad para la licuefacción. Se concluye que los suelos de mayor potencial para la ocurrencia de licuefacción se ubican al centro de la ciudad, donde se encuentra el mayor asentamiento poblacional y el material de relleno existente se comporta como un suelo tipo arena arcillosa y arcilla arenosa con grava. (Fernández Diéguez et.al, 2017)

➤ **Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el consejo popular Guillermón Moncada del municipio de Santiago de Cuba.**

En esta investigación se realizó la delimitación de escenarios susceptibles a la Licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el Consejo popular Guillermón Moncada para lo que se utilizaron un conjunto de métodos tales como el cálculo del factor de seguridad corregido, la determinación de intensidades máximas que se pueden obtener a partir de magnitudes sísmicas que provoquen licuefacción en el área de estudio. Se obtuvo como resultado un mapa de susceptibilidad a la licuefacción en el área de estudio. (Herrera Delfin, 2015)

➤ **Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducidos por terremotos de gran magnitud en la zona sur de la provincia Guantánamo**

Se delimitaron los escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud e n la zona sur de la provincia Guantánamo, principalmente en los municipios, Imías, Maisí, San Antonio del Sur, Manuel

Tames y Guantánamo. Se utilizaron un conjunto de métodos que resolvieran la necesidad de la investigación, como la validación de los resultados de acuerdo al análisis del sistema de indicadores propuestos por Fernández-Diéguez. 2015, el cálculo del factor de seguridad corregido y la determinación de intensidades máximas que se pueden obtener a partir de magnitudes sísmicas que provocan licuefacción en el área de estudio. (Parellada Reyes, 2016)

➤ **Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducidos por terremotos de gran magnitud en los municipios Baracoa, Yateras, El Salvador, Niceto Pérez de la Provincia Guantánamo**

La investigación estuvo encaminada a delimitar los escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en los municipios de Baracoa, Yateras, Niceto Pérez y El Salvador de la provincia de Guantánamo. Para lo cual se clasificaron los suelos predominantes en las áreas de estudio a partir de las condiciones ingeniero geológicas, además se realizó el cálculo del factor de seguridad en los suelos de las áreas de estudio. Finalmente se determinaron los escenarios susceptibles a la licuefacción en las áreas de estudio según las condiciones ingeniero-geológicas. (Reinosa Mercanfety, 2016)

Registros históricos del efecto de Licuación

Bayamo, 1551: Los reportes históricos argumentan la ocurrencia de la licuefacción (Cotilla & Córdoba, 2010) basados en datos de archivo general de Indias, declaran su aparición en la localidad de Cauto Embarcadero, en las cercanías del río Cauto, identificado como el río de mayor extensión de Cuba, ubicado en la provincia Granma y su desembocadura la realiza en el Golfo del Guacanayabo. Los reportes históricos deben ser considerados como un área potencial de licuefacción para futuros terremotos. (Cotilla, 1999)

Argentina, 1894: El 27 de octubre de 1894 se produjo un sismo con epicentro en el noroeste de la provincia de San Juan, considerado por sus efectos a grandes distancias del foco, como el de mayor magnitud ocurrido en territorio argentino. (Bodebender, 1894) denomina este sismo “*Terremoto Argentino*” y le asigna una

magnitud 8.2, ubicando su epicentro al noroeste de San Juan y La Rioja. Una de sus particularidades fue la gran alteración del terreno aún en áreas muy alejadas al epicentro, a más de 200 km de distancia. Se produjeron deslizamientos y fenómenos de licuefacción, agrietamiento del terreno, volcanes de arena y salida de agua en forma de chorros en los terrenos saturados de agua y sin cohesión. Los daños causados por la licuefacción incluyen fallas debajo de edificaciones, caminos, líneas férreas, canales de riego, campos, tanques y viviendas. Los depósitos holocenos de llanura aluvial y playa han sido prácticamente los únicos tipos de depósitos afectados por este fenómeno.

Santiago de Cuba, 1932: El terremoto del 3-2-1932 (15:55.0 U.T.; 19,80 N y -75,800) fue considerado muy fuerte, dados los daños producidos. En Santiago de Cuba el 80% de las edificaciones fueron afectadas y el 5% totalmente destruidas, (*ver figura 1*). Aunque los daños fueron debidos principalmente a la baja calidad de los materiales utilizados en las construcciones, sin duda la composición de los suelos, sedimentos cuaternarios recientes que descansan sobre sedimentos de origen marino sedimentario multiplicaron los efectos desastrosos del sismo. (Fernández Dieguez, 2000).Hubo 14 muertos y 300 heridos. La intensidad máxima alcanzó 8 grados (MSK) y la $M_s=6,75$. (Cotilla, 1999)



Figura (1) Afectaciones producidas en la zona de La Alameda (Avenida Jesús Menéndez) en la ciudad de Santiago de Cuba durante el terremoto de 1932 causadas por la licuefacción de los suelos (Galván Rodríguez, 2014)

Anchorage, Alaska 1964: En el sismo de Alaska, en 1964 de magnitud de 9.2 grados en la escala de Richter, se observó que las estructuras de puentes cimentadas sobre arenas sufrieron más daños por licuefacción que los que se cimentaron sobre gravas o depósitos aluviales. Muchos daños fueron en forma de desprendimiento de tierras y licuefacción, el evento sísmico duró tres minutos aproximadamente y fue sentido en un área de 500,00 millas cuadradas. El movimiento cortical fue tan extenso que se pudieron observar levantamientos y descenso del terreno en un área de 200,000km².

Niigata, Japón 1964: Durante junio de 1964, en Niigata, Japón, tuvo lugar un terremoto de magnitud 7.5 en la escala de Richter, hubo daños muy graves causados por licuefacción en arenas. Muchas estructuras se asentaron más de un metro y se inclinaron notablemente; en el terremoto un edificio giró 80 grados, quedando prácticamente tendido en el suelo. También se pudo evidenciar otros fenómenos de licuefacción. Poco después del sismo se observó agua brotando del suelo por grietas que se formaron, en las cuales llegaron a hundirse casas y automóviles; al mismo tiempo, se veía emerger a la superficie estructuras que deberían permanecer en el sub-suelo, como fue el caso de un tanque de aguas negras. En la figura 2 se muestran en imágenes algunas de las afectaciones provocadas por este sismo en la ciudad de Niigata.



Figura (2) Efectos del fenómeno de Licuefacción de los suelos en Niigata, Japón, 1964. (<http://www.planetacurioso.com/2008/12/16/sabias-que-existen-terremotos-donde-el-suelo-se-comporta-como-liquido/>, 2008)

Chimbote, Perú, 1970: Ocurrieron desplazamientos laterales con grietas de 10 cm de ancho y 50 cm de profundidad, además se dañaron segmentos de la carretera entre las localidades de Moyobamba y Tahuishco. La mayoría de las casas sobre los taludes se derrumbaron. Todas las casas de tapial y algunas casas de albañilería en terreno blando se derrumbaron.

Amatitlán, Guatemala 1976: Hubo varias observaciones de licuefacción en las orillas del Lago de Lopango. La licuefacción causó daños importantes en los muelles de Amatitlán y agrietamiento en la pista del aeropuerto de Lopango. Ocurrió un desplazamiento lateral a lo largo del río de Motagua. Sobre el nivel del terreno, debido a la alta presión de agua de poros ocasionada por licuación.

San Salvador, octubre de 1986 y enero de 2001: Debido a la topografía de San Salvador, especialmente por su alto relieve y las barrancas que cruzan la ciudad, mucha construcción se hace encima de zonas de relleno donde se nivela el terreno con suelo extraído de otro lugar. Lo que provocó que durante el sismo se observaron edificios de concreto reforzado que sufrieron daños estructurales importantes debidos al asentamiento diferencial en sus zapatas, que se apoyaban en un relleno artificial no compactado, además, en terrenos donde existieron lagos o lagunas; estos al producirse el terremoto perdieron su consistencia y mientras duró la vibración, perdieron su capacidad portante, es decir, la de sostener las estructuras que fueron construidas allí. En general se cuantificaron numerosos deslizamientos y fenómenos de licuefacción de suelos, que resultó en 1.159 personas fallecidas, 8.122 personas heridas y 1.582.428 damnificados en el país.

Loma Prieta, Estados Unidos, octubre de 1989: Volcanes de arena fueron observados en varios lugares como evidencia de la ocurrencia de licuación como el aeropuerto de Oakland, en las zonas que se encuentran a lo largo del río Salinas y la estación de aterrizaje marítima Moss a raíz de este terremoto de magnitud 7 en la escala de Richter.

Limón, Costa Rica 1991: El 22 de abril de 1991 a las 3:57:00 hora local, un fuerte terremoto sacudió la zona de Limón en Costa Rica con una intensidad de 7.7 M y una profundidad de 10 kilómetros. En total se registraron 48 muertos, 651 heridos y 4452 casas colapsadas en Costa Rica, mientras que en Panamá se registraron 79 muertos y 1061 heridos. Este fue el terremoto de mayor magnitud sentido en el mundo en 1991. Algunos muelles del puerto fueron dañados y varios kilómetros de una carretera costera fueron, no dañados, sino destruidos.

Kobe, Japón, 17 de enero de 1995: Fue uno de los más devastadores terremotos que golpearon a Japón, dejando más de 5,500 muertos y 26,000 heridos. La pérdida económica se ha estimado cerca de 200 billones de dólares. La proximidad del epicentro a la región altamente poblada, ayuda a explicar la gran pérdida de vidas y el alto nivel de destrucción. *(Ver figura 3)*

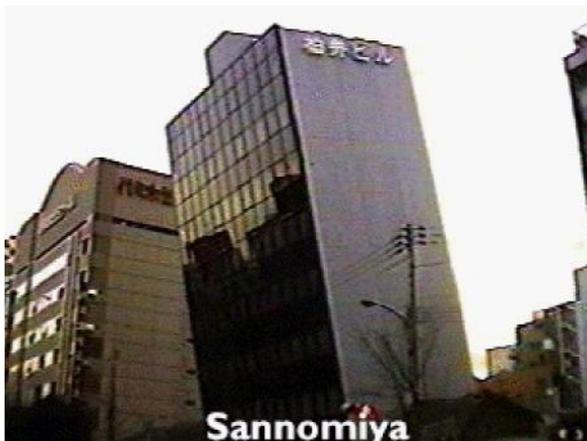


Figura (3) Inclinación de un edificio debido a fallas del terreno a causa de la licuefacción de suelos en Kobe, Japón, 1996. (<http://www.planetacurioso.com/2008/12/16/sabias-que-existen-terremotos-donde-el-suelo-se-comporta-como-liquido/>, 2008)

El suelo en esta ciudad está formado por diferentes tipos de suelos sueltos, rocosos y blandos. El movimiento del terreno fue de período largo de aproximadamente 16 cm en la dirección horizontal y de 10 cm en la dirección vertical, las más grandes jamás registradas en Japón. Lo que provocó inclinación y colapso de varias edificaciones.

Pisco, Perú 2007: El 15 de agosto de 2007, un sismo de magnitud 8.0 ocurrió en el mar frente a Pisco, Perú. Este sismo produjo múltiples daños en las regiones costeras cercanas al epicentro. Muchos de los daños en el terremoto se debieron al fenómeno de licuación en arenas, la cual sucedió a lo largo de 250 kilómetros de las costas del litoral peruano. La ocurrencia del fenómeno de licuación de suelos ocasionó pérdida de vidas humanas y cuantiosos daños materiales. Se observaron desplazamientos de suelo de hasta 3 km de sur a norte y 1 km de este a oeste.

Haití, 2010: El 12 de 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.

Efecto de Sitio

Cuando ocurre un terremoto, las ondas sísmicas se propagan desde el foco o hipocentro en todas las direcciones a través de lo que se denomina el medio de propagación. Este medio está formado por todos los estratos e irregularidades que existen bajo la superficie de la tierra y cuyo efecto sobre la señal se manifiesta en una modificación de su contenido frecuencia y de su amplitud. La señal va perdiendo energía conforme avanza hacia la superficie. Sin embargo, es precisamente cerca de la superficie cuando esta situación se invierte. Cerca de la superficie la amplitud tiende a aumentar producto de la baja impedancia característica de cuencas sedimentarias, zonas de relleno y valles aluviales por ejemplo. Los sitios en roca, tales como afloramientos de intrusivos, calizas y lavas no producen una amplificación tan importante como es el caso de materiales menos consolidados (*ver figura 4*), pero cierto nivel de amplificación ha sido detectado en tales ambientes (Steidl et al., 1996). A este fenómeno se le denomina efecto de sitio y modifica el registro sísmico en su contenido frecuencial, amplitud y duración. 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. (Moya Fernández, 2009)

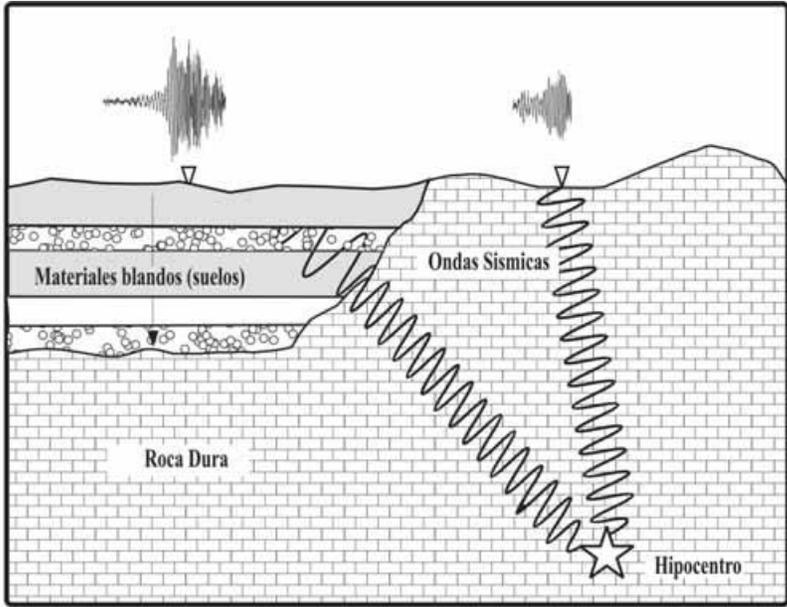


Figura (4) Esquema de paso de las ondas sísmicas en terrenos con distintas características

CAPITULO I. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DE LA REGIÓN DE ESTUDIO

1.1 Ubicación geográfica:

El municipio **San Luis** se encuentra ubicado en la parte norte de la provincia Santiago de Cuba. Limita al norte con el municipio holguinero de Cueto, al sur con el municipio Santiago de Cuba, al este con Segundo Frente y Songo La Maya y al oeste con los municipios Mella y Palma Soriano. El territorio ocupa un área de 764. 9 km², cuenta con una población de 82 454 habitantes y una densidad poblacional de 107,8 hab/km². Es el cuarto por su extensión superficial y el quinto por su población en la provincia Santiago de Cuba. (Ecured, 2017)

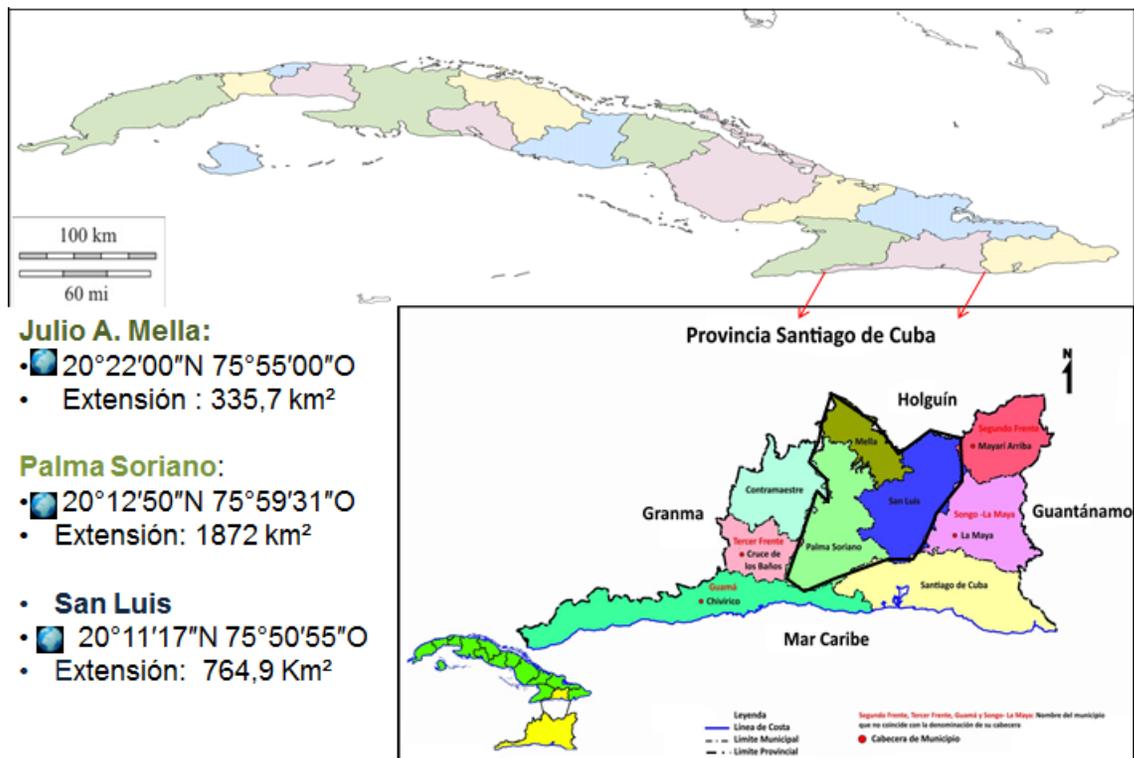


Figura (1.1) Ubicación geográfica de las áreas de estudio

Julio Antonio Mella está ubicado en la parte norte de la Provincia Santiaguera, al mismo centro de las Provincias Orientales. Limita al Norte y al Oeste con los municipios holguineros de Cueto y Urbano Noris respectivamente, al Este con el municipio San Luís y nuevamente con Cueto, al Sur con los Municipios Palma

Soriano y San Luís. Posee una población de 36 258 hab. Contando con una densidad poblacional de 108 hab/km². El Municipio tiene una extensión superficial de 335,7 km² (Ecured, 2017)

El municipio Palma Soriano Se encuentra ubicado en la Llanura del Cauto, Limita al norte con el municipio Mella , por el este con el municipio San Luis, al sur con los municipios Santiago de Cuba y Guamá y al oeste con los municipios de Tercer Frente y Contramaestre. Cuenta con una superficie geográfica de 851, 07 Km², el 13,82 % del territorio de la Provincia. Palma Soriano exhibe una población de 129 806 habitantes y una densidad poblacional de 152.5 hab/km². (Ecured, 2017).

1.2 Clima

Julio A. Mella: La temperatura media anual está cerca de los 26°C, lo que significa una abundancia de calor, las oscilaciones térmicas son evidentemente más amplias que la de los litorales y aún que la de los interiores de Cuba, por el hecho geográfico de estar dentro del espacio de mayor continentalidad del país, es decir, a la de mayor distancia de las costas marítimas; esto determina días más calurosos y noches más frías. Las precipitaciones responden en mayor o menor medida al ritmo anual de los campos centrales y de las llanuras de Cuba, acumulándose un total anual de 110000 milímetros de lluvias, lo que permite debido a la temporada en que caen y su distribución, excelentes cosechas de caña de azúcar y otros cultivos. (Ecured, 2017)

Palma Soriano: La temperatura promedio anual en el municipio es de 26,2 °C; la media anual baja es de 23,6 °C; la media anual alta es de 28,3°C. La temperatura máxima se observa en las zonas llanas. La dinámica de las precipitaciones en el municipio está dada por el incremento a medida que avanza hacia el sur, adentrándose en la cordillera de la Sierra Maestra y a la Zona Montañosa del Sur oscilando entre los 800-1000 mm/a en el valle central del municipio, hasta 1600-1800 mm/a en las zonas más montañosas (Ecured, 2017)

San Luis: El clima es tropical con verano relativamente húmedo y una temperatura media anual entre 22 y 26 grados centígrados, siendo en el período de invierno la media anual entre 20 y 24 grados centígrados y en el período de verano entre 24 y 28 grados. La precipitación media, en el período lluvioso en los meses mayo- octubre, varía desde 1.000-1.400 mm y en el período seco, en los meses de noviembre- abril se enmarca entre 200-400 mm. La humedad relativa del aire alcanza sus valores extremos en las primeras horas de la mañana y de la tarde. Se puede apreciar que a las 07.00 hs la humedad relativa media anual en el municipio tiene un valor entre 90- 95 % y a las 13.00 hs el valor oscila entre 60- 70 % (Ecured, 2017). En la figura 1.2 se muestran gráficamente los promedios de precipitaciones anuales en la provincia de Santiago de Cuba.

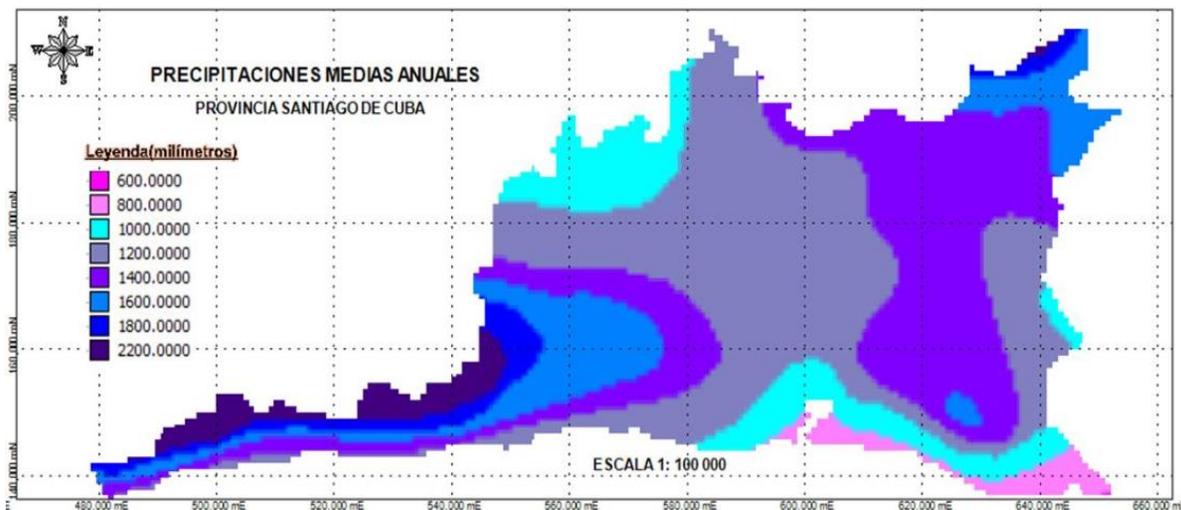


Figura (1.2) Imagen del mapa de precipitaciones medias anuales de la provincia Santiago de Cuba. Fuente: (Galván Rodríguez, 2014)

1.3 Geomorfología y Relieve:

San Luis: El municipio de San Luis tiene un relieve complejo, pues encontramos dos zonas elevadas al norte y al sur, y al centro una cuenca deprimida. Encontramos de sur a norte, a la Sierra de Boniato, perteneciente a la Sierra Maestra, en su centro está la depresión del Valle Central y hacia el norte se encuentra una meseta estratificada con pequeñas alturas del Neógeno, que procede de la Meseta de Pinares de Mayarí. En algunos sitios hay

manifestaciones cársticas, que se corresponden con el antiguamente nombrado Anillo Cársico de Nipe. En ese mismo lugar hay una pequeña montaña de bloque, baja y en forma de mesa, con una altitud de 1000 metros. También hay un bloque de montañas bajas y diseccionadas del Neógeno y el Cuaternario con una altura de 300 metros. Esta región norteña se corresponde con las montañas del Grupo Nipe-Sagua-Baracoa, que ocupa la mayor porción del territorio. En el centro, y correspondiéndose con la sub-cuenca del río Guanicum hay una llanura fluvial, erosiva, alta y diseccionada del Cuaternario, o sea, más reciente que las alturas circundantes. Al este, y en los límites con los municipios de Songo-La Maya y el de Segundo Frente se encuentra una llanura alta con colinas residuales, con una altitud máxima de 250 metros. Este territorio se corresponde con el Valle Central. Al sur hay pequeñas alturas, y una meseta estratificada del Neógeno, limitada con un bloque pre-montañoso en forma de mesa, cuya altura es de 400 metros. Estas se corresponden con la Sierra de Boniato, cuya mayor altitud es de 560 metros, y que es el límite natural con el municipio de Santiago de Cuba. Esta serranía pertenece a la Sierra Maestra. (Ecured, 2017)

Palma Soriano: Cuenta con un relieve variado: llano, montañoso y ondulado con presencia en muchos lugares de Colinas o lomas sin conexión alguna entre sí. El territorio que ocupa el Municipio cuenta con un área total de 851,07 km²., de esta pertenece al área montañosa 413,03 km².y a la zona llana 438,04 km². Por las características que presenta en el relieve la administración municipal se ha dividido en 3 áreas naturales. Área de llanuras, área de pre cordillera y área montañosa. Está conformada por varias pendientes, de faldas o laderas no escarpadas, están cubiertas por una fecunda capa de tierra vegetal. Entre ellas se destaca la Loma de Aguacate al centro, La Loma del Pilar y La Loma de La Unión, por el oeste la Loma de Cabeza de Vaca, la Loma Raspadura, la Loma Bambú y la Loma Ojo de Agua. En la zona sur se destaca en la Sierra Maestra el territorio de La Cubana, punto situado al oeste de Nuevo Mundo en la Costa a 775 m sobre el nivel del mar. (Ecured, 2017)

Julio A. Mella: Se caracteriza por las llanuras, aunque no son completamente planas, predominando en ellas suaves ondulaciones. Se destacan la Sabana de Bío o Hato en Medio, la de Cayo Rey, Miranda y la de San Felipe o Baraguá. La región es llana, desde las márgenes del Río Cauto y va haciéndose ligeramente onduladas al este, cortadas generalmente por pequeños valles de erosión. Estas llanuras están clasificadas como: llanuras medianamente húmedas y erosivas - denudativas, formadas por rocas sedimentarias carbonatadas y terrígenas carbonatada. (Ecured, 2017)

1.4 Hidrogeología

San Luis: El municipio es atravesado por el Río Guaninicum, Río Grande y Santa Cruz, siendo el primero la principal fuente hídrica y se caracteriza por un área de la cuenca de 640 km cuadrado, una longitud del cauce principal de 56 km y una pendiente media del río de 0.28 %.. Estas aguas son de baja mineralización en el orden de 0.4 – ml, son aguas hidrocarbonadas cálcicas magnésicas o hidrocarbonada cálcica. (Ecured, 2017). Las aguas subterráneas se encuentran en los sedimentos de la formación San Luis. Son aguas freáticas de la corteza de intemperismo de las areniscas, conglomerados, margas y calizas, las rocas son poco acuíferas, la dirección principal del flujo subterráneo se produce hacia el noroeste del territorio. (ENIA, Informe geológico, Batería 12 máquinas Fuel Oil, 2003)

Palma Soriano: En el territorio existen 11 ríos y 28 arroyos. Entre los ríos tenemos: El río Cauto, Mefán, Caney, Curial, Río Grande, Yarayabo, Marianao, Cañas, La Cubana, Domingo y Palenque. Entre los arroyos tenemos: El Salado, La Pimienta, El Muerto, Catunda, Manacas, Cayaguazán, Cenizas, San Francisco, El Bejimen, Aguacate, Los Doctores, Hicotea, Los Jarros, San Alejandro, Brazo Malo, El Diamante, Yarey, El Corajo, Mayala, San Juan, Solís, Come Tierras, Ceiba, Las Tunas y los Güao. El territorio cuenta con 5 presas, 3 micro presas y 17 tanques. (Ecured, 2017)

Julio A. Mella: Los ríos del municipio son: Guaninicum, Baracaldo, Aura, Colorado, Jagua, Bayate, Baraguá y Bío, todos afluentes del Cauto. Existen también numerosos arroyuelos, algunos de los cuales no corren todo el año, entre lo que podemos mencionar; Bayate Seco, Pinalito, San Francisco y El Mijial. En el municipio el escurrimiento general es bueno, dirigido todo al Oeste, debido a las alturas que lo rodean por el Este, Noreste y Suroeste: la Sierra de Nipe, las ondulaciones de Alto Cedro y las alturas del Mogote de San Nicolás. Esto facilitó la construcción de la presa Protesta de Baraguá en 1977, que posee una capacidad de embalse de 280 millones metros cúbicos de agua, considerada como una de las más grandes del país. Es un embalse llano, solo en sus partes centrales que coinciden con el antiguo cauce del río se obtienen las profundidades mayores que oscilan de 12 a 14 metros, fuera de esas partes las profundidades oscilan de 6 hasta 8 metros. (Ecured, 2017)

1.5 Geología regional

La región del municipio San Luis separa el borde sur de Cuba Oriental, es decir, la cadena montañosa de la Sierra Maestra de la zona Nipe Baracoa-Sierra Cristal y se caracteriza por presentar rocas volcánicas, vulcanógenas sedimentarias y depósitos vulcanomícticos de edades que van desde el Cretácico al Cuaternario, distribuidas según el corte lito-estratigráfico desde la más joven hasta la más vieja, de arriba hacia abajo, notándose que en la evolución geológica del Municipio existe la ausencia de rocas de dos épocas es decir después de formadas las rocas del Mioceno debían de haberse formado rocas del Oligoceno, a estas ausencias de secuencias rocosas en un período determinado se le denomina geológicamente discordancia. (Ecured, 2017)

El drenaje es generalmente bueno, tanto superficial como interno, aunque en algunas áreas del territorio se observa erosión en forma laminar y de cárcavas. Está sustentado sobre una arcilla calcárea amarillenta a veces mezclada con arenisca. Generalmente la textura es arcillosa a través del perfil; el color va desde el pardo en el primer horizonte hasta el pardo claro y pardo achocolatado. La estructura es fragmentaria fina a media; la plasticidad y adhesividad aumentan a

partir del segundo horizonte y disminuyen en el último. Presenta en general buena porosidad y aireación. (ENIA, Informe geológico, Batería 12 máquinas Fuel Oil, 2003).

La geología del territorio de Palma Soriano está mayormente representada por la formación San Luis la cual se interdigita con la formación camarones hacia la parte norte y noroeste de la gran piedra y está constituida por litofacies carbonatadas compuestas por areniscas polimícticas, aleurolitas margas, arcillas, calizas arcillosas órgano detríticas sus depósitos se encuentran bien estratificados y plegados. En otros sectores se observa la presencia de sedimentos marinos sedimentarios de la formación San Luis compuestos por alternancia de areniscas y lutitas de grano medio moderadamente intemperizadas a muy intemperizadas en su parte superior. (ENIA, Informe geológico, Fiscalía Municipal, 2013)

El territorio de Julio A. Mella presenta una geología caracterizada por la presencia de la formación Cauto representada por arenas de grano fino a grueso con arcillas entre el 80 y 90 %, en muchas ocasiones con lentes de aglomerados constituidos esencialmente por cascajos de material carbonatado y calcáreo, influenciado por material margoso y aleurolitas arcillosas calcáreas del mioceno medio. (ENIA, Informa geológico; Laguna Facultativa ESBU Pinalito, Mella, 2010).

Formaciones presentes en las áreas de estudio

Formación San Luis: Tiene un amplio desarrollo en la región centro- sur de la antigua provincia de Oriente: en la Cuenca de Guantánamo, en el Inclinaria Central, en las áreas adyacentes a las cuencas de Guacanayabo-Nipe, en el borde N de la Sierra Maestra, en la Sierra de Nipe- Cristal- Baracoa, al S de la Sierra de Purial y al N del pueblo de Pión. Se caracteriza por la presencia de areniscas polimícticas, aleurolitas, margas, arcillas calizas arcillosas, organodetríticas, arenosas y conglomerados polimícticos. Se encuentra bien estratificada. (Léxico stratigráfico de Cuba, 2013)

Presenta gran variedad de rocas clásticas, terrígenas carbonatadas, de granulometrías variadas que influyen desde arcillas hasta conglomerados, además

contiene calizas laminares, se caracteriza por el predominio de areniscas de colores gris parduzco a pardo, intemperizadas. Hacia arriba en el corte se observa un aumento de la cantidad del material clástico. Se encuentra cortada por diques y cuerpos de basalto. Sus depósitos aparecen ligeramente plegados. La misma Yace concordantemente sobre las formaciones Charco Redondo, Farallón Grande y Puerto Boniato y discordantemente sobre las formaciones Sabaneta, San Ignacio y el Gr. El Cobre (parte no diferenciada). Es cubierta discordantemente por las formaciones Bitirí, Camazán y Maquey. Transiciona lateralmente a la Fm. Camarones. Espesor: 700 m. (Léxico estratigráfico de Cuba, 2013)

Formación La Picota: Se desarrolla en las provincias de Holguín, Santiago de Cuba y Guantánamo. La litología está caracterizada por la presencia de Conglomerados polimícticos con intercalaciones de areniscas polimícticas y conglobrechas mal seleccionadas que se intercalan con argilitas. Su edad es Cretácico Superior (Campaniano- Maestrichtiano). La Picota Se depositó en la zona del talud a profundidades medias. Los conglomerados son de origen marino y fluvio-marino, de facies deltaicas y en mayor parte continental. (Léxico estratigráfico de Cuba, 2013).

Formación Puerto Boniato: Se desarrolla en forma de franja discontinua en la Sierra Maestra, al S de la Sierra de Cristal y al S de Baracoa, provincias de Santiago de Cuba, Holguín y Guantánamo. Presenta una Alternancia de calizas órgano-detriticas aporcelanadas, algáceas y margas, con intercalaciones de sílice negro- parduzco. La edad de la formación es Eoceno Medio. (Léxico estratigráfico de Cuba, 2013)

Formación Cauto: Arcillas, limos, arenas, gravas polimícticas y conglomerados polimícticos del Cuaternario, con estratificación horizontal y cruzada. Coloración abigarrada. Yace concordantemente sobre la Fm. Bayamo y discordantemente sobre las formaciones Barrancas, Bitirí, Camazán, Dátil, Manzanillo, Paso Real, San Luis y el Gr. El Cobre. Es cubierta concordantemente por los sedimentos aluviales del Holoceno y también probablemente por la Fm. Camacho. La litología de la formación varía mucho, las capas forman lentes de diferentes tamaños, la

facie de estos depósitos es aluvial, a veces con influencia fluvio marina. (Léxico estratigráfico de Cuba, versión 2013). La formación Cauto posee algunos sectores susceptibles a la licuefacción para magnitudes sísmicas 7 y 8 principalmente las gravas arcillosas y arenas arcillosas de origen aluvial de la parte alta del Neógeno. (Léxico estratigráfico de Cuba, 2013)

Formación Camarones: Está constituida por conglomerados polimícticos de cantos subredondeados y redondeados, areniscas polimícticas de grano grueso. La matriz del conglomerado es arenosa de composición polimíctica. Yace concordantemente sobre la Fm. San Luis con la cual transiciona lateralmente también. Su límite superior es erosivo, excepto cerca de la costa, en que está cubierta discordantemente por el Miembro. Gobernadora (Fm. Maquey). Su edad es Eoceno superior. (Léxico estratigráfico de Cuba, 2013)

Formación Charco redondo: Calizas compactas órgano- detríticas, fosilíferas, de color variable de edad Eoceno Medio. En la parte inferior del corte, son frecuentes las brechas. En esta parte predomina la estratificación gruesa, mientras que en la superior predomina la estratificación fina. Yace discordantemente sobre las formaciones La Picota, Sabaneta, Santo Domingo y Vigía y el Gr. El Cobre. Es cubierta concordantemente por las formaciones Mucaral y Sierra de Capiro y discordantemente por la Fm. San Luis. (Léxico estratigráfico de Cuba, 2013)

La formación está constituida por calizas compactas órgano-detríticas, en la parte inferior de la secuencia son frecuentes las capas brechosas (brechas interformacionales), en la parte superior predomina la estratificación más fina (decenas de centímetros), los colores parduzcos y aumenta la presencia de capas constituidas por foraminíferos grandes. La potencia de la formación varía entre 50m y 200m y la edad, según su contenido faunal es Eoceno medio. (Léxico estratigráfico de Cuba, 2013)

Formación Bayamo: Areniscas polimícticas de variada granulometría de cemento calcítico y calcítico- arcilloso débil con intercalaciones lenticulares de arcillas, arenas arcillosas e inclusiones ocasionales de yeso; las areniscas tienen con frecuencia nódulos de calcita, goethita y oolitos ferromangánicos. La coloración es abigarrada y la estratificación es fina, lenticular cruzada, a veces indefinida. Edad Plioceno. Se depositó en un ambiente estuarino a aluvial-lagunar.

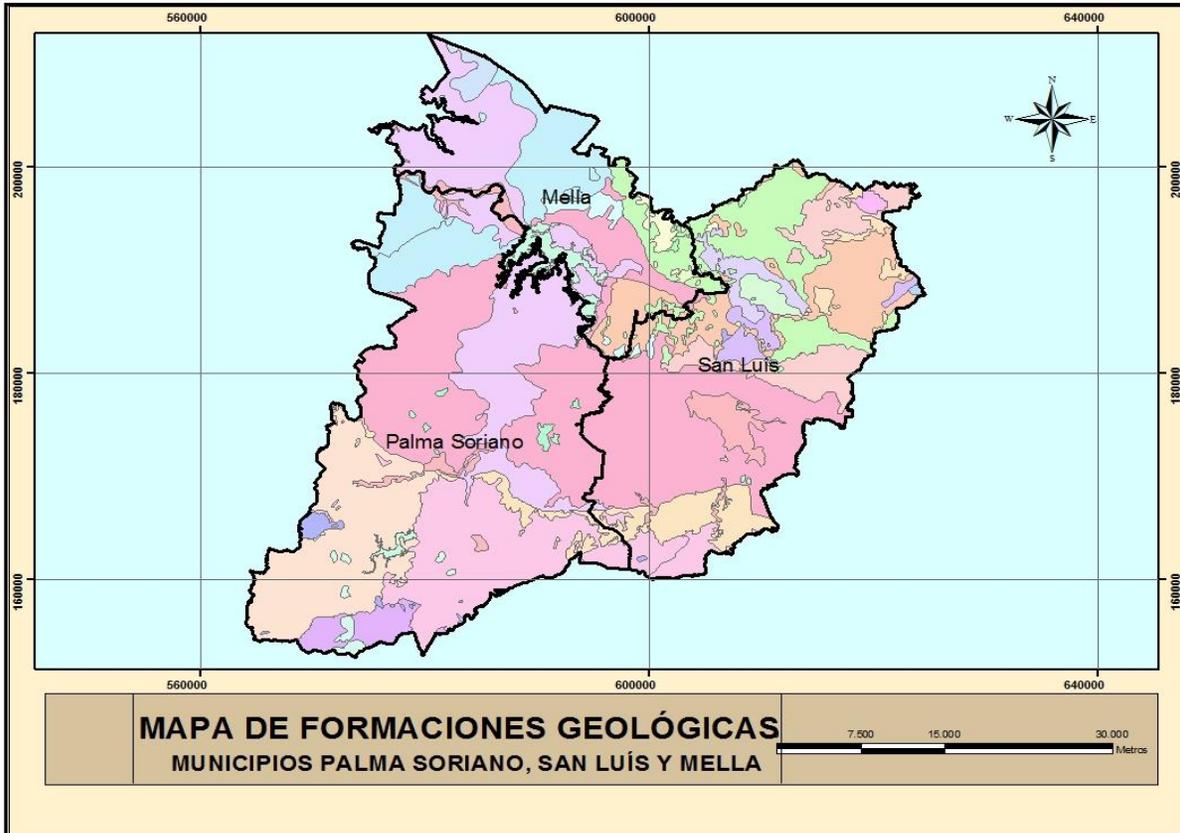


Figura 1.3 Mapa de Formaciones Geológicas de los municipios San Luis, Julio A. Mella y Palma Soriano. Fuente: GeoCuba Guantánamo.

1.6 Sismicidad

La sismicidad en la región oriental de Cuba presenta una característica significativa que, al mismo tiempo, hace compleja su evaluación en algunas áreas; ello está dado en el hecho de que se manifiestan dos tipos de sismos: de entre placas y de interior de placa, destacándose en el primer tipo de sismicidad la parte sudoriental, por la frecuencia de ocurrencia de terremotos y por los altos valores

de magnitud e intensidad alcanzados histórica-mente. Esto hace que el territorio sea considerado el de mayor peligrosidad sísmica del país. El extremo oriental de Cuba también es afectado por la sismicidad que se genera en la falla conocida como Norte de la Española, la cual es la continuidad de la zona de subducción de las Antillas Menores y es la responsable de la sismicidad que se genera al norte de República Dominicana, Haití y el Archipiélago Cubano. (Parellada Reyes, 2016).

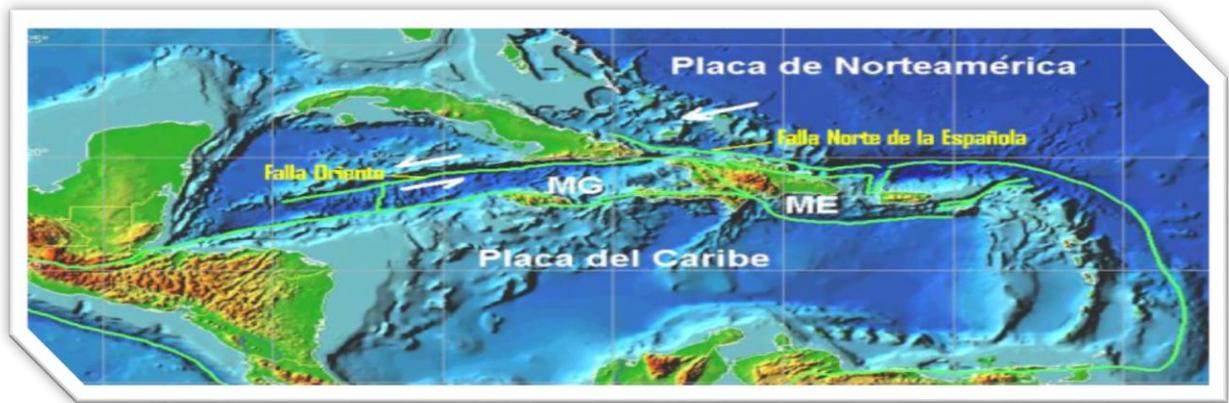


Figura 1.4. Zona Sismogeneradora que influye en el archipiélago Cubano. Fuente: Chuy 2010

Más del 60% de los sismos perceptibles y fuertes reportados en el país han tenido su epicentro en esta provincia, registrándose 20 reportes de sismos fuertes (Intensidad $I \geq 7.0$ MSK) en el sector comprendido entre las localidades de Chivirico a Baconao, siendo sacudida por más de 1000 sismos perceptibles desde el año 1528 hasta la fecha (*ver figuras 1.5 y 1.6*). A tales efectos se recuerdan los grandes terremotos ocurridos el 3 de febrero de 1932 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, 1999). Es de especial interés significar que dos de los sismos fuertes ocurridos en Santiago de Cuba, produjeron intensidad $I=9.0$ MSK en 1766 y 1852, reportándose en ambos considerables daños en toda la región oriental, identificándose áreas con intensidad entre 7.5 y 8.5 en la escala de intensidad sísmica MSK. (Galván, 2014)

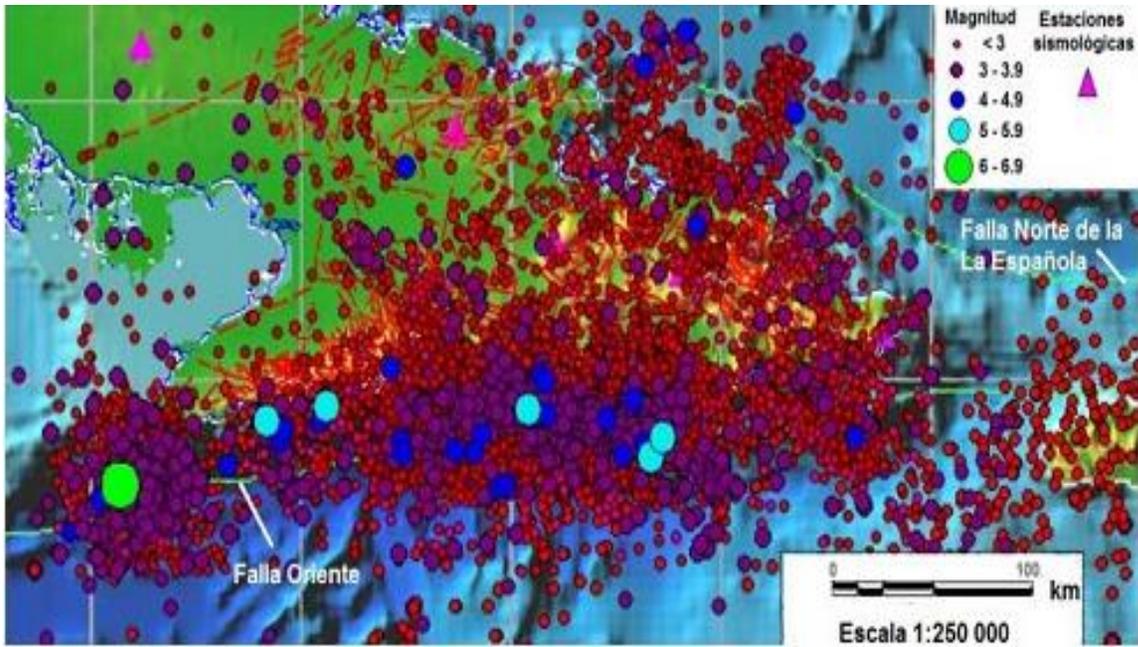


Figura (1.5) Imagen del mapa de intensidades máximas reportadas en Cuba en el período de 1502-2009. (Chuy, 2010)

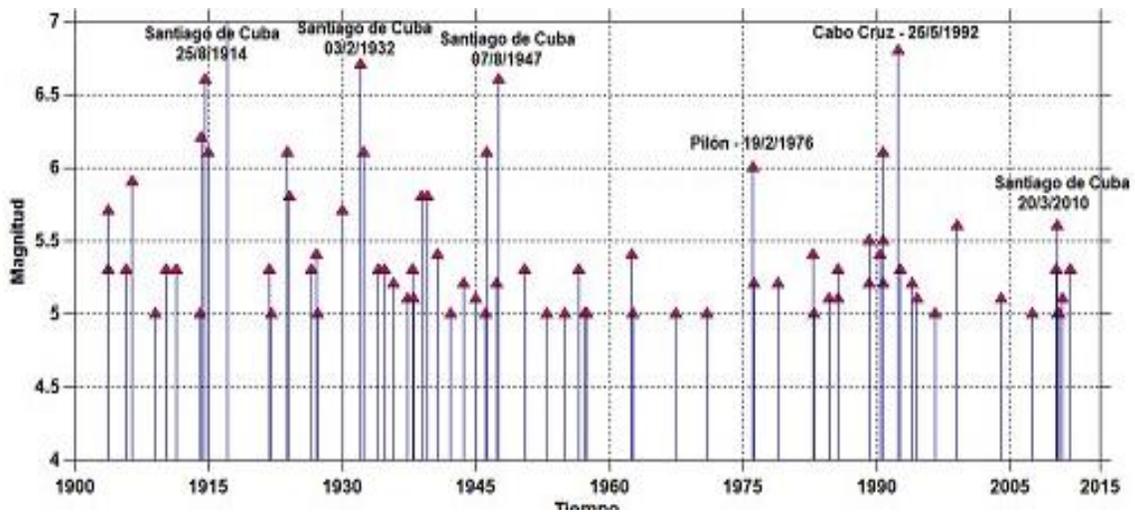
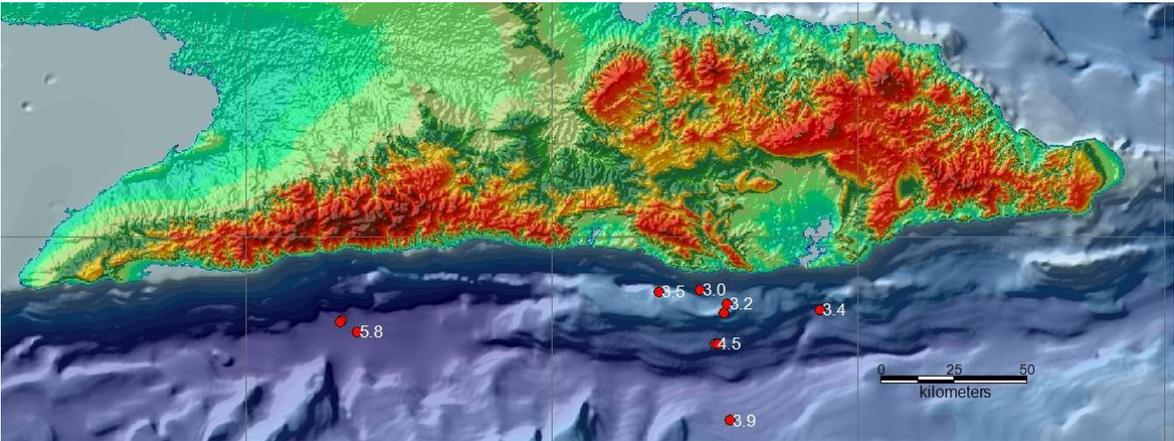
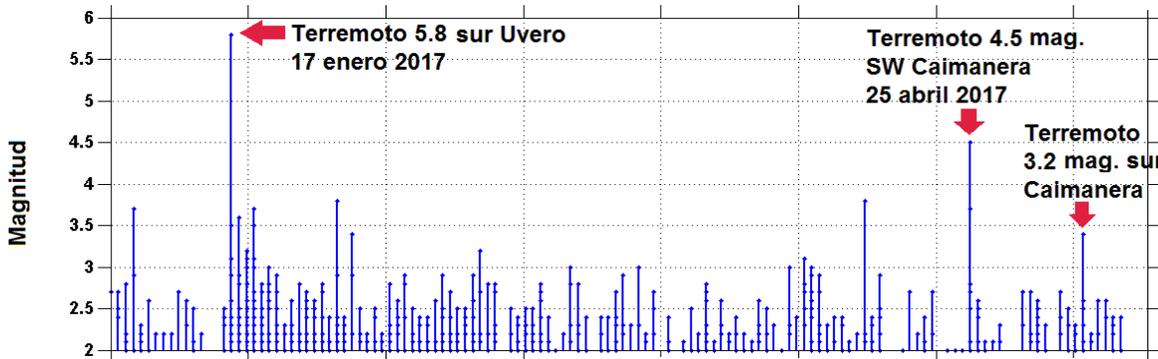


Figura (1.6) Terremotos registrados por el Servicio Sismológico Nacional de Cuba. (CENAI, 2013)

La mayor sismicidad en el transcurso del actual año hasta el mes de mayo ha estado relacionada a la zona de Pílon - Chivirico, posterior al sismo de 5.8 de magnitud registrado el 17 de enero al sur de la localidad de Uvero, a 85 kilómetros al suroeste de Chivirico, municipio de Guamá. (Ver figuras 1.7 y 1.8)



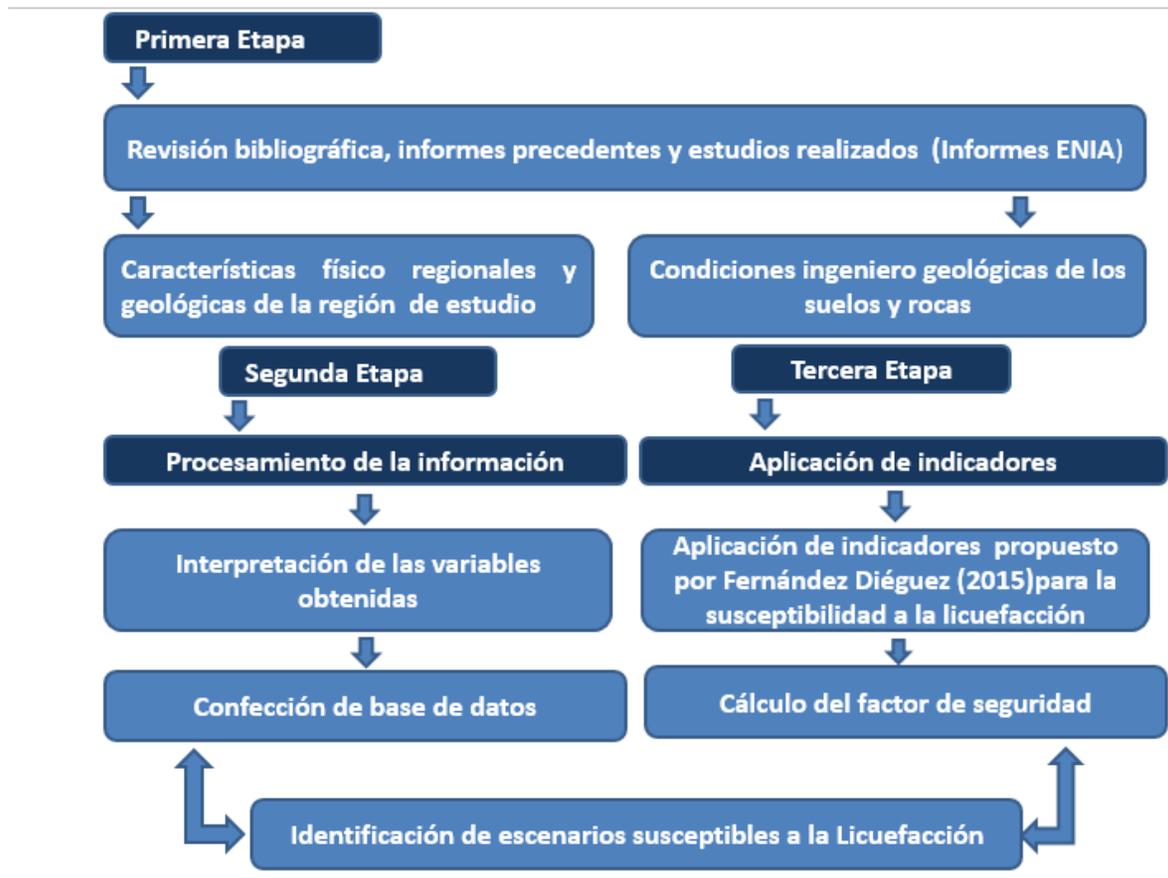
(Figura 1.7) Epicentros de los terremotos perceptibles durante el 2017. CENAI 2017



(Figura 1.8) Comportamiento de la sismicidad durante el año 2017. CENAI 2017

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN GENERADA POR SISMOS DE GRAN MAGNITUD EN LOS MUNICIPIOS DE SAN LUIS, JULIO A. MELLA Y PALMA SORIANO.

A continuación, se relaciona la metodología para estudiar el potencial de licuefacción en el área de referencia, teniendo en cuenta las condiciones ingeniero geológicas y la sismología del medio.



2.1.1 Primera etapa de la investigación. Búsqueda bibliográfica

En esta primera etapa se consultó toda la información posible acerca del tema haciendo uso de artículos de internet, tesis de maestría, ingeniería y doctorado, así como los informes de los resultados de la construcción de diferentes obras hecha por la Unidad de investigaciones para la construcción (INVESCONS) perteneciente a la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) sede Santiago de Cuba. Se obtuvo en un marco más amplio información acerca de las

características físico geográficas de las áreas de estudio y la geología de las mismas. Es necesario acotar que en los trabajos de perforación realizados para obtener los resultados plasmados en los informes se utilizaron las máquinas perforadoras Mark VI de fabricación inglesa, las cuales trabajan a percusión con Martillo de 136 Kg de peso, caída del martillo: Caída libre de 0,46 m con Varillas 0.40, 1.50 y 3.00 m, y a rotación con avance hidráulico, según las características del subsuelo. El muestreador que se usó fue la norma conocida como Cuchara Cubana o tubo dividido, con un diámetro interior de 57 mm y el exterior de 73 mm, con la que se obtienen muestras semi-alteradas para efectuarles los ensayos de compresión simple y todos los ensayos físicos. Los valores utilizados para la corrección del SPT del campo fueron los de la cuchara Cubana. El método seguido fue el Método Histórico lógico y análisis y síntesis.

2.1.2 Segunda etapa de la investigación

En una segunda etapa la investigación fue dividida en dos direcciones principales, una primera donde se realizó el Procesamiento de la información para la cual se interpretaron todas las variables obtenidas con las que se confeccionó una base de datos, es necesario apuntar que estas calas fueron realizadas años atrás por lo que no se presenciaron en el campo lo cual no impidió que la información obtenida fuera correctamente interpretada.

2.1.3 Tercera etapa de la investigación

En esta etapa se aplicó la información gestionada donde se llevó a cabo el Sistema de indicadores propuestos por Fernández Diéguez en 2015 para el estudio de la susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en la región oriental de Cuba, se calculó el factor de seguridad, se identificaron las formaciones que pudieran experimentar licuefacción de los suelos en el mapa geológico y como resultado final se evaluaron las condiciones ingeniero geológicas y se delimitaron las zonas susceptibles al fenómeno.

2.2. Metodología aplicada para determinar los escenarios susceptibles a la licuefacción en las áreas de estudio.

La evaluación del potencial de licuefacción se llevó a cabo mediante un sistema de indicadores en el cual se unifican los parámetros propuestos por diversos autores (Seed & Idress, 1971, 1982); (Wang, 1979) y requisitos obtenidos de la revisión de análisis de casos, donde se propuso con un orden lógico los parámetros que deben cumplirse para que un suelo sea potencialmente licuable. Se hizo difícil determinar los parámetros debido a los diferentes criterios y diferentes factores que se proponían. Después de una exhaustiva revisión de las metodologías propuestas por los autores antes mencionados, se elaboró una propuesta que brindó un orden lógico y permite cuantificar el fenómeno a partir de todo lo antes expuesto se propone analizar las condiciones siguientes (Fernández-Diéguez, 2015):

2.2.1 Análisis de las condiciones geológicas

La primera condición que debe cumplir un suelo para que sea licuable es que corresponda a depósitos jóvenes (menos de 10.000 años) a las que pertenecen las formaciones del Cuaternario (Holoceno). Debe cumplir además que la relación entre el estrato licuable y el no licuable sea menor que 1 m de espesor. Coincidiendo también que el estrato de suelo no licuable encima del licuable debe ser menor de 8 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. (Fernández Diéguez,2015)

2.2.2 Análisis del comportamiento de la Sismicidad en el área de estudio

Se analiza la cercanía del Área de estudio con una zona generadora de sismos fuertes o de magnitud mayor de 5,5 y las aceleraciones de las partículas lleguen a ser iguales o superior $0,2g/cm^2$.

Para llegar a las conclusiones de este indicador se revisó la norma para construcciones sismo resistententes, requisitos básicos para el diseño y

construcción. Dentro de esta se revisó el capítulo 4 donde se describen las zonas sísmicas del territorio nacional y se tomó la descripción de los municipios en estudio. (Ver figura 2.1.1)

No.	Provincia	Municipio	c_mun	S ₀ (g)	S _s (g)	S ₁ (g)	TL(s)	Zona
150	Santiago de Cuba	Contramaestre	1301	0.280	0.538	0.214	8.0	4
151	Santiago de Cuba	Mella	1302	0.277	0.514	0.203	8.0	4
152	Santiago de Cuba	San Luís	1303	0.316	0.619	0.257	7.0	4
153	Santiago de Cuba	Il Frente	1304	0.241	0.472	0.200	8.0	3
154	Santiago de Cuba	Songo-La Maya	1305	0.352	0.806	0.321	7.0	5
155	Santiago de Cuba	Santiago de Cuba	1306	0.513	1.035	0.428	6.0	5
156	Santiago de Cuba	Palma	1307	0.335	0.662	0.267	7.0	4
157	Santiago de Cuba	III Frente	1308	0.324	0.634	0.248	7.0	4
158	Santiago de Cuba	Guamá	1309	0.376	0.867	0.328	7.0	5

Figura (2.1.1) Esquema donde se muestra el peligro sísmico en los diferentes municipios de la provincia Santiago de Cuba. Señalados en rojo los municipios de interés para la investigación. (Oficina Nacional de Normalización, 2013)

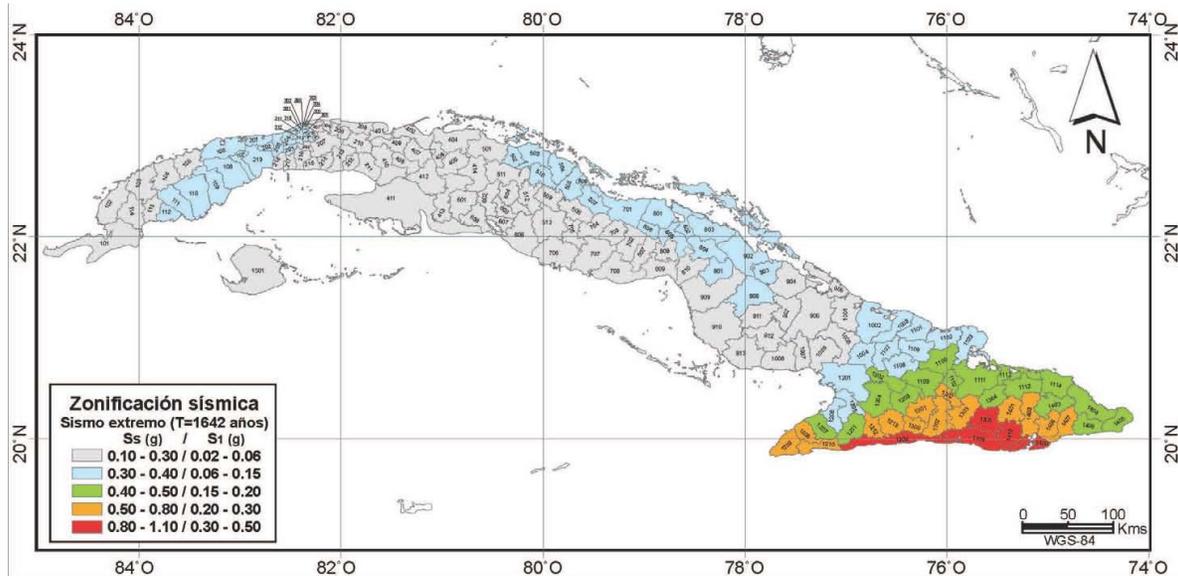


Figura (2.1.2) Mapa de zonificación sísmica para la República de Cuba

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

Otra de las condiciones necesarias para que tenga lugar este modo de comportamiento del suelo es la posición del nivel freático cerca de superficie. 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. Para que los suelos granulares experimenten el fenómeno de licuación este debe estar ubicado por debajo el nivel freático, lo cual le confiere la condición de ser un sedimento saturado.

Según los datos recogidos de los informes de la E.N.I.A, las perforaciones para los sondeos hidrogeológicos y en forma general para la investigación se realizaron con máquina de tipo MARK-VI y SKV-4 sobre patín, por el método de perforación vertical a percusión con selección de testigos en suelos friables cohesivos y semi rocas y a rotación en rocas, además se usaron otros métodos tales como rotación con avance hidráulico e inyección de agua y vertimiento express.

2.2.4 Análisis de las condiciones ingeniero geológicas

Los suelos más susceptibles a la licuefacción son aquellos formados por depósitos jóvenes de arenas y sedimentos de tamaños de partículas similares, en capas de por lo menos más de un metro de espesor, y con un alto contenido de agua. Estos depósitos por lo general se presentan en los lechos, ríos, playas, dunas y áreas donde se han acumulado arenas y sedimentos arrastrados por el viento y/o cursos de agua.

Entre los datos obtenidos de los informes geológicos facilitados por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (E.N.I.A) Santiago de Cuba, se trabajó con los parámetros necesarios para que un suelo sea licuable tales como (Límite Líquido, Límite Plástico, Índice de Plasticidad, humedad natural, densidad húmeda y densidad seca, por ciento de partículas finas, por ciento de gravas, saturación y compactación del suelo a partir del N de SPT) con lo cual se confeccionó una base de datos usando la herramienta hoja de cálculo Excel, del paquete Office.

Se tuvo en cuenta:

- Por ciento de partículas finas ≤ 15
- Límite Líquido $\leq 35 \%$
- Forma de las partículas. Principalmente redondas
- N de SPT < 20 golpes

- Compacidad relativa (Cr) < 75%

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.

2.2.5 Cálculo del factor de seguridad para la licuefacción (FSL)

El FSL se calcula a partir de 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.

- La relación de esfuerzo cíclico (CSR) y la relación de la resistencia cíclica (CRR)

Para evaluar la resistencia por licuación de suelo es necesario calcular dos variables:

1. La demanda sísmica que se espera en las capas de suelo durante un sismo de diseño, expresada en términos de resistencia CSR (cyclic stress ratio).
2. La resistencia de suelo para oponerse a la licuación, expresado con CRR (*cyclic resistance ratio*). (Fernández Diéguez, 2015).

- **Coeficiente de esfuerzo cíclico (CSR)**

Es un principio generalmente aceptado que el potencial de licuefacción de estratos arenosos puede evaluarse utilizando correlaciones entre datos de resistencia a la penetración, tales como ensayos de penetración estándar (SPT) y ensayos de penetración con cono (CPT) y la resistencia cíclica del material movilizado durante una fuerte de excitación vibratoria. En este enfoque, la resistencia cíclica es caracterizada por la relación de esfuerzo cíclico (CSR). Básicamente, la CSR se define como el esfuerzo cortante promedio (ζ_{avg}) actuante en un estrato, normalizado por el esfuerzo efectivo de sobrecarga (σ'_{vo}). En la mayoría de las técnicas empíricas, el valor promedio de la relación de esfuerzos cortantes cíclicos (CSR) inducidos por el sismo se obtiene de los análisis de la respuesta dinámica del subsuelo.

- **Coeficiente de resistencia cíclica: (CRR)**

Para ello, Seed y Idriss (1971), Tokimatsu y Yoshimi (1983), Liao y Whitman (1989), entre otros investigadores, han elaborado, a partir de datos obtenidos en campo mediante ensayos de penetración estándar (SPT, por sus siglas en inglés), gráficas sobre la relación entre dos parámetros físicos que participan en la licuefacción de los suelos; estos son el coeficiente resistencia cíclica (CRR, siglas en inglés) y (N1)₆₀ es decir el número de golpes suministrado al terreno, representado también por la letra N en las fórmulas.

Evaluación de CSR

Seed e Idriss (1971) formulan la ecuación para el cálculo de la relación de esfuerzos cíclicos (CSR, cyclic stress ratio):

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

a_{max} = máxima aceleración de la superficie de suelo generada por un sismo de diseño,

g = aceleración de gravedad,

(σ_{vo}) = esfuerzo normal vertical total, referido a la superficie de suelo

(σ'_{vo}) = esfuerzo normal vertical efectivo, referido a la superficie de suelo,

r_d = coeficiente de reducción de esfuerzos, que toma en cuenta la deformabilidad del perfil de subsuelo.

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

z = profundidad por debajo de la superficie de suelo, m ,

Para $z \leq 9.15 m$,

$$r_d := 1.0 - 0.00765 \cdot z \quad (1a)$$

Para $9.15m < z \leq 23m$

$$r_d := 1.174 - 0.0267z \quad (1b)$$

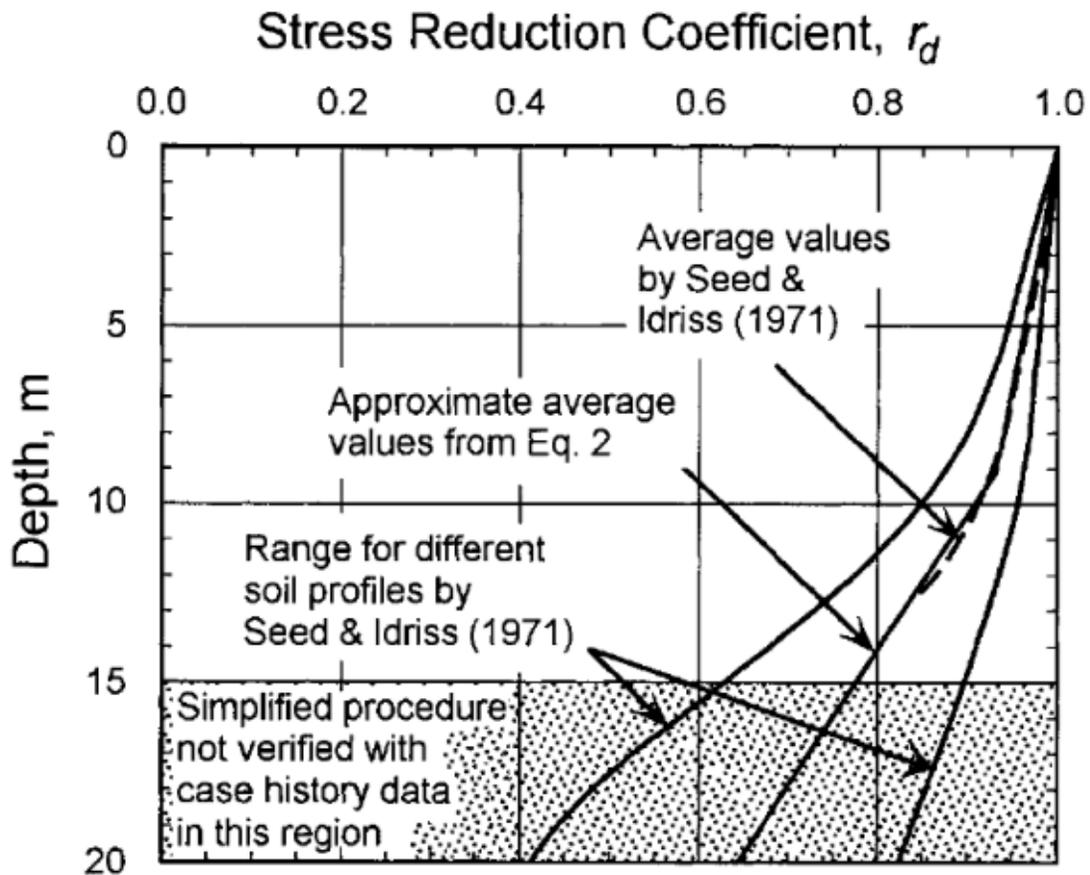


Figura (2.2) Las curvas de relación de r_d y profundidad, desarrolladas por Seed e Idriss (1971)

A partir de las propiedades físico-mecánicas de los suelos y rocas se calcula el CSR y se plotan 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 11 y se comprueba si es un estrato licuable o no.

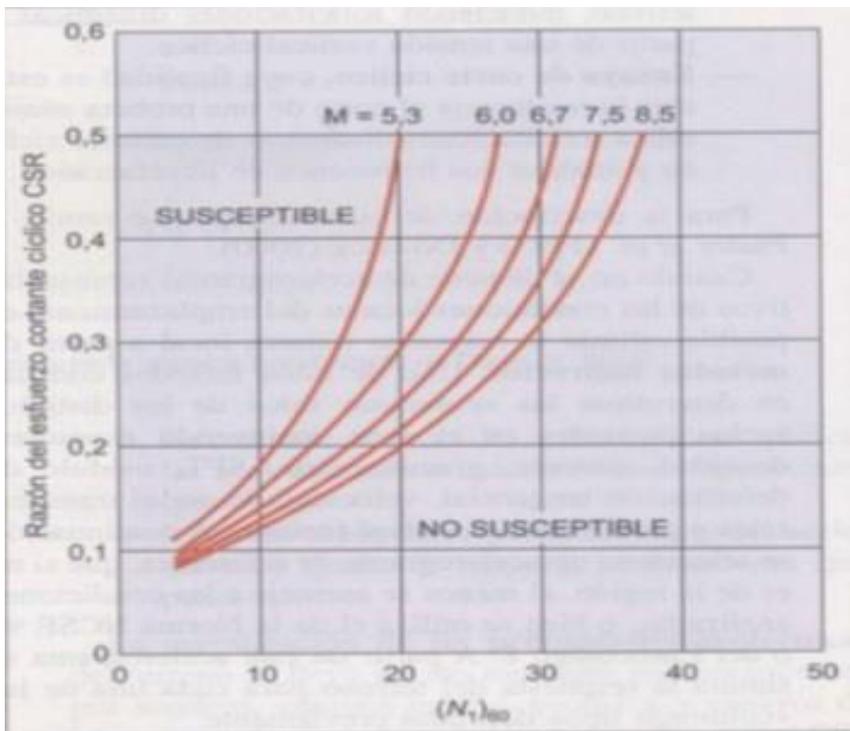


Figura (2.3): Susceptibilidad a la licuefacción de un suelo en función de (N1) 60 y la razón del esfuerzo cortante cíclico CSR (González, 2002)

Evaluación de 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.

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

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

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

$$N_1 = N \times C_N$$

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

Dónde:

C N = factor de corrección para una tensión efectiva de sobrecarga de 1ton/pie² σ ,
v = tensión efectiva vertical en atmósferas

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

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

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

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

Tabla 2.1: Correcciones a SPT (Skempton, 1986)

Prueba de SPT: El criterio de evaluación de la resistencia por licuación basada en SPT es confiable, ya que se lleva aplicando alargo de varios decenios. Estos criterios involucran la gráfica de la relación de CSR con $(N1)_{60}$. El $(N1)_{60}$ representa el número de golpes normalizado al esfuerzo vertical de 100kPa y a la energía del martillo con eficiencia de 60%.

La influencia del contenido de finos

Seed (1985) observa el incremento en CRR en función de incremento de finos. No es claro si esto se debe al incremento de la resistencia a licuación o al decremento de la resistencia a la penetración. Basados en los datos empíricos disponibles, Seed et al., desarrollaron curvas de CRR para varios contenidos de finos. La plasticidad de suelo, todavía, no se había investigado. Por lo tanto las correcciones basadas en la cantidad de finos deben usarse con precaución. (Tanasijevic, 2011)

FC = contenido de finos,

Para $FC \leq 5\%$

$$\alpha = 0 \quad (5a)$$

Para $5\% < FC < 35\%$

$$\alpha := e^{\left(1.76 - \left(\frac{190}{FC^2}\right)\right)} \quad (5b)$$

Para $FC \geq 35\%$

$$\alpha = 5.0 \quad (5c)$$

Para $FC \leq 5\%$

$$\beta = 1.0 \quad (6a)$$

Para $5\% < FC < 35\%$

$$\beta := \left(0.99 + \left(\frac{FC^2}{1000}\right)\right) \quad (6b)$$

Para $FC \geq 35\%$

$$\beta = 1.2 \quad (6c)$$

$$N_{160cs} = (N_t)_{60cs}$$

$$N_{160cs} := \alpha + \beta \cdot N_{160} \quad (7)$$

- **Cálculo del factor de seguridad corregido:**

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

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

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

Mw: Magnitud del sismo de diseño

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

Magnitud del sismo	MSF
6	1,76
7	1,19
8	0,84

CAPITULO III: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Valoración general de los sistemas de indicadores aplicados a la investigación:

Condiciones geológicas: Se tuvo en cuenta las Formaciones presentes en cada uno de los territorios con sus la litologías características y como se manifiestan localmente, haciendo énfasis en aspectos como la granulometría, grado de intemperismo, así como el origen de la sedimentación.

Sismicidad: Se trabajó con la norma NC 46 del 2013, plasmando en la investigación la zona sísmica a la que pertenecen las áreas de estudio y la descripción de acuerdo al riesgo sísmico que estas presentan. Se mencionan algunas particularidades en la tectónica regional de algunos territorios.

Características Hidrogeológicas: Se tuvo en cuenta los promedios entre los que oscila la estabilización del nivel freático en cada uno de los territorios, así como los suelos en los que se encuentran, además se hace alusión en algunos casos a variables tales como coeficiente de permeabilidad del suelo, capacidad acuífera e hinchamiento del suelo.

Condiciones ingeniero-geológicas: Se confeccionó una base de datos en formato Libro Excel donde se recogen los valores correspondientes a propiedades físico mecánica de los suelos tales como: Límite Líquido (LL), Límite plástico (LP), Índice de plasticidad (IP), % de humedad natural (W_n), densidad húmeda (γ_f), densidad seca (γ_d), % de saturación (S), Compresibilidad (C), Número de Golpes (N_{spt}), % finos, % grava, % arena.

Cálculo del factor de Seguridad: Luego de aplicar el cálculo siempre que las obras contenían la información necesaria, se hizo un análisis de los resultados obtenidos, teniendo en cuenta que este se realiza siempre en estratos saturados, se valoró cuales estratos tipo presentaban mayor probabilidad de licuar y se determinó bajo qué condiciones ingeniero-geológicas ocurre el fenómeno, estos

resultados aportan un índice valioso a la hora de identificar estratos susceptibles a la licuefacción.

3.2 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio Julio A. Mella.

3.2.1 Condiciones Geológicas

La formación San Luis de forma general es la que predomina en la región, (se extiende por la parte meridional de las provincias orientales) caracterizado por una gran variedad de rocas clásticas, de granulometrías variadas que influyen desde arcillas hasta conglomerados polimícticos aunque la presencia de arenisca de grano fino a medio y las aleurolitas carbonatadas en conjunto constituyen casi un 90 % de la estratigrafía. La formación presenta areniscas intemperizadas y lutitas calcáreas también con diferentes grados de intemperismo, existen además aleurolitas calcáreas, aleurolitas arcillosas y arenosas. Otras características de esta formación en la región es la presencia de calizas laminares de capas gruesas, margas de color crema o amarillento y en menor cuantía calizas margosas además de algunos conglomerados costeros. El material de los fragmentos se deriva del grupo El Cobre. Las condiciones geológicas para la ocurrencia de la licuefacción son poco favorables. La formación Cauto se manifiesta con arenas arcillosas y arenas cascajosas, con intercalaciones de limos, gravas y conglomerados con capas de color gris, gris parduzco y amarillo grisáceo. Las arenas están mal seleccionadas y casi siempre contienen arcillas. El porcentaje de arcilla varía de 2 % hasta 90 % (arcilla arenosa) estas capas generalmente poseen cascajos cuyo diámetro varía de 0,5 cm hasta 2.0 a 3.0 cm, su material es vulcanógeno. La facie de estos depósitos es aluvial, a veces con influencia fluvio marina (intercalaciones de arcilla y arena arcillosa). Estos suelos por sus características pueden licuar perfectamente. (Léxico estratigráfico de Cuba, 2013)

Charco Redondo es otra formación presente en el territorio, constituida por calizas compactas órgano detrítico fosilífero de color muy variable. Predomina la textura

órgano-detritica, en menor proporción es aporcelanada y oolítica, en la parte inferior de las secuencias son frecuentes las capas brechosas (brechas intraformacionales), en su parte basal se observan algunas capas de materiales del grupo El Cobre. En algunos sectores del territorio predomina la caliza blanca con estratificación gruesa. En la parte superior de la secuencia predomina la estratificación más fina, los colores de tono parduzco y la textura aún más órgano-detritica (se observan capas constituidas por foraminíferos grandes exclusivamente) la potencia de la formación varía entre 50 m y 200 m. La formación Charco Redondo yace discordantemente sobre las rocas más antiguas: gabros, ultramafitas, formaciones Picota, cobre y vigía. Su edad según su contenido faunal es Eoceno Medio. Es muy poco probable la ocurrencia del fenómeno de licuefacción en estos suelos. (ENIA, Informe geológico, Fiscalía Municipal, 2013)

3.2.2 Sismicidad

Según la norma NC 46: 2013 que establece los requisitos básicos para construcción de obras sismo resistentes, El municipio Julio A. Mella se encuentra dentro de la zona sísmica cuatro de seis determinadas, la cual se describe como de riesgo sísmico alto que puede ocasionar daños significativos en las construcciones debiéndose tomar medidas sismo resistentes en las estructuras y obras en función de la categoría ocupacional de las mismas y el nivel de protección definido según la probabilidad de exceder un sismo de diseño. Los valores de la aceleración espectral horizontal máxima del terreno para el cálculo S_a estarán entre 0,5 y 0,8 para períodos cortos S_s y entre 0,2 y 0,3(g) para períodos largos S_1 . Tales consideraciones establecidas en la norma antes mencionada se tomaron en cuenta para la presente investigación. (Oficina Nacional de Normalización, 2013)

3.2.3 Características hidrogeológicas

De la realización de las pruebas hidrogeológicas (Vertimiento Libre Express) se obtuvo que los suelos existentes en el área, tales como la arcilla presentan coeficiente de permeabilidad del suelo (3) 0,001 – 0,01 cm/s y una velocidad de infiltración cercana a cero. Las aguas superficiales en período de lluvia escurren de norte a sur. Las condiciones de drenaje del terreno no son buenas, se observa acumulación de aguas pluviales, lo que provoca empantanamientos. En algunos sectores el manto freático es a presión cantonado en el aluvio de edad cuaternaria perteneciente a la formación Cauto y en la zona meteorizada de la formación San Luis y lutita alterada y cuya estabilización piezométrica fluctúa entre 0,30 y 2,83m de profundidad en función de la posición de la cala. En general los valores promedios del nivel freático obtenidos en las investigaciones consultadas y en otros casos recurriendo a herramientas tales como el mapa hidrogeológico de Cuba fluctúa entre 1 y 6 m, dicha profundidad está enmarcada entre las muy probables para que ocurra licuefacción.

3.2.4 Condiciones ingeniero-geológicas

De un total de 37 informes consultados pertenecientes a investigaciones llevadas a cabo por la ENIA Santiago de Cuba, se escogieron 29 para realizar la interpretación y procesamiento de la información contable, los restantes carecían de variables correspondientes a varias propiedades físico mecánicas de los suelos. (Ver Anexo 3)

3.2.5 Cálculo del factor de seguridad para la licuefacción

De los 29 informes escogidos para analizar las propiedades físico mecánicas de los suelos del territorio de Mella, solo a 8 se les pudo realizar el cálculo FSL, los cuales contenían datos imprescindibles tales como (N_{spt} , Y_d , Y_f , Nivel Freático)

Tabla 3.1 Resultados del Cálculo de Factor de seguridad. Municipio Julio A. Mella

Obras	FSL Mw= 6	Licuable	FSL Mw= 7	Licuable	FSL Mw= 8	Licuable	Fm	Estrato	Prof.
50 viviendas	2,26467766	No	1,53123091	no	1,08086888	si	Cauto	GC	2,6 m
Policlínico bloque 3	4,69735153	No	3,17605018	no	2,24191777	no	San Luis	CH	4 m
Círculo Infantil	19,19418398	No	12,97788576	no	9,160860538	no	San Luis	CH-CL	4m
Taller ferroviario	3,586066093	No	2,424669688	no	1,711531544	no	San Luis	GW	3m
Hospital Municipal	1,906781121	No	1,289244054	no	0,910054626	si	Cauto	CH	3,7 m
Viviendas (casco histórico)	10,71894864	no	7,247470957	no	5,115861852	no	San Luis	GC	6 m
Laguna Facultativa, ESBU Pinalito	1,74573015	no	1,080351637	si	0,83318939	si	Cauto	SC	3 m
Escuela Paquito González Cueto.	1,462636005	no	0,98894139	si	0,698076275	si	San Luis	GC	3,1 m

3.2.6 Conclusiones Parciales para Julio A. Mella

Los suelos del territorio son en su mayoría del Eoceno y Pleistoceno, predominando los sedimentos de origen aluvial de la formación San Luis y la formación Cauto, así como los sedimentos de origen sub litoral de la formación Charco Redondo, estos suelos, según la clasificación del SUCS, están en el orden de las arcillas de alta plasticidad (CH), Arcillas de baja Plasticidad (CL), Gravas arcillosas (GC) y las gravas limosas (GM). Aunque estos suelos presentan valores de Límite Líquido (LL entre 32 y 66) y por ciento de granos finos (28-96) algo elevados según las condiciones de Wang (1979) y Seed and Idriss (1982), donde se encontró el nivel freático este oscila entre 1 y 6 m y la aceleración máxima del suelo de 0,277 condiciones estas que le confieren una posibilidad de licuar. De ahí que en 4 de las 8 obras donde se realizaron los cálculos FSL resultaran licuables estos suelos para sismos entre magnitudes 7 y 8. El caso de 50 viviendas construidas en el casco histórico del territorio situada sobre suelo de tipo GC (grava arcillosa) y el hospital Mella (CH) resultaron licuables para sismos con magnitud 8 con valores de (1,080868884) y (0,910054626) respectivamente según el cálculo de FSL, asociados a la formación Cauto y San Luis respectivamente. En el caso de la laguna facultativa de la ESBU Pinalito resultó licuable para sismos de magnitud 7 (1,080351637) y 8 (0,83318939), la misma está situada sobre material areno arcilloso con gravas de la formación Cauto. La escuela Paquito González Cueto fue otro sector emplazado sobre suelos que licuables para sismos de magnitud 7 (0,98894139) y 8 (0,698076275), la misma está situada sobre arena limosa con grava. Teniendo en cuenta la cercanía del nivel freático (entre 1 y 6m), el estado semi-saturado de los suelos del territorio, la presencia de sedimentos del Cuaternario de origen fluvio marino en algunos sectores, los valores de aceleración de partículas (0,277) establecidas en el orden de las condiciones necesarias para que ocurra licuefacción (Sismos con magnitud igual o superior a 5,5 con aceleraciones superiores o iguales a 0,2g para una probabilidad del 10 % en un período de retorno de 475 años) la presencia de suelos con condiciones ingeniero-geológicas favorables para la ocurrencia de

licuefacción según el SUCS y los resultados del cálculo del factor de seguridad (FSL) se evaluó al municipio Julio A. Mella con condiciones favorables para que ocurra la licuefacción para magnitudes entre 7 y 8, siendo los estratos con presencia de Gravas arcillosas (GC) los más susceptibles al fenómeno.

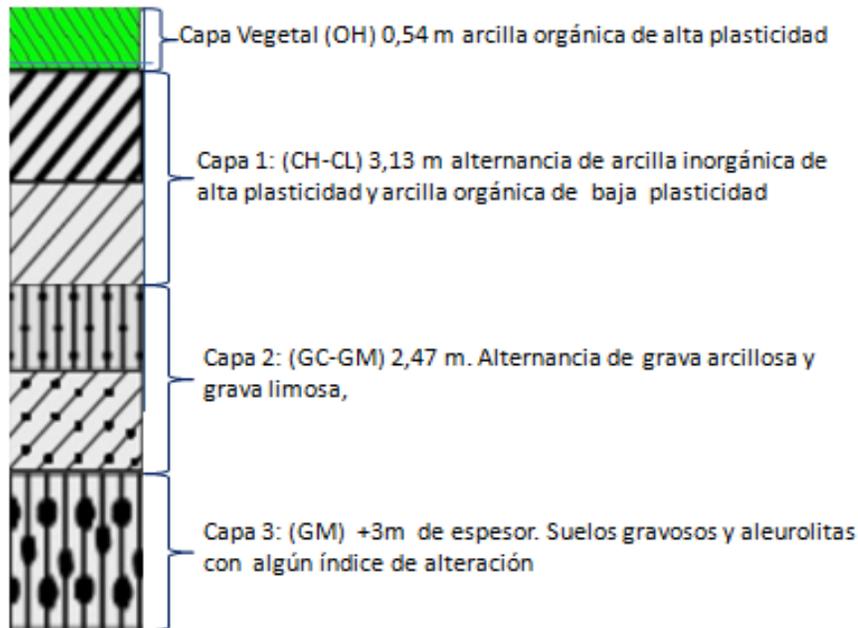


Figura 3.1 Columna litoestratigráfica esquemática municipio Julio A. Mella

3.3. Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio San Luis.

3.3.1 Condiciones geológicas

La estratigrafía del territorio está caracterizada por la presencia de la Formación San Luis (eoceno), representada por una gran variedad de rocas clásticas, terrígenas carbonatadas, de granulometría variada que va desde arcilla hasta conglomerados. Predominan las litofacies carbonatadas compuestas por arenisca de grano fino a medio y la aleurolita carbonatada. Las aleurolitas en general son arcillosas y calcáreas y en algunas partes arenosas, el color de la roca fresca es gris, y el de las meteorizadas “*beige*” a castaño. En el área están representados dos tipos litológicos de esta formación caracterizados desde el punto de vista ingeniero-geológico: además del relleno que las cubre, material antropogénico

vertido. En otros sectores se observan lutitas calcáreas con arenisca de color crema amarillento y algunos conglomerados costeros con matriz calcárea. Además se observan margas suaves y fácilmente erosionables, las calizas son en parte finamente estratificadas y parte areniscas, estas últimas llevan abundante fauna de foraminíferos orbitoidales y mucho residuo de algas calcáreas. Las areniscas son de color gris parduzco y pardo, bien estratificadas la cual en ocasiones se encuentra cubierta en su parte superior por un apreciable espesor de arcilla de alta plasticidad de profundidad variable. La formación San Luis se interdigita con la Fm Camarones hacia la parte Norte y noroeste de la Gran piedra. Sus depósitos se encuentran bien plegados a ligeramente plegados.

Los sedimentos de La formación Cauto también está representada en el territorio por arcillas, limos, arenas, gravas polimícticas y conglomerados polimícticos, con estratificación horizontal y cruzada, poseen coloración abigarrada, edad pleistoceno, su espesor promedio es de 25 m.

Algunos sectores en el territorio se caracterizan por la homogeneidad en cuanto a composición litológica, presentándose como suelo predominante una arcilla limo arenosa color carmelita a veces con vetas grises, apareciendo además lentes o bolsones de arenas de granos medios con gravas y pequeños cantos.

3.3.2 Sismicidad

Según la norma NC 46: 2013 que establece los requisitos básicos para construcción de obras sismo resistentes, El municipio San Luis se encuentra dentro de la zona sísmica cuatro de seis determinadas, la cual se describe como de riesgo sísmico alto que puede ocasionar daños significativos en las construcciones debiéndose tomar medidas sismo resistentes en las estructuras y obras en función de la categoría ocupacional de las mismas y el nivel de protección definido según la probabilidad de exceder un sismo de diseño. Los valores de la aceleración espectral horizontal máxima del terreno para el cálculo S_a estarán entre 0,5 y 0,8 para períodos cortos S_s y entre 0,2 y 0,3(g) para períodos largos S_1 . Tales consideraciones establecidas en la norma antes

mencionada se tomaron en cuenta para la presente investigación. (Oficina Nacional de Normalización, 2013)

3.3.3 Características hidrogeológicas

Para la complementación de los estudios de suelo se realizaron ensayos de hinchamiento tanto libre como axial, estos ensayos arrojaron a profundidades entre 4 y 8.05 m, valores aproximados al 3.15 %, lo que se puede catalogar como hinchamiento bajo. En casi la totalidad del territorio de San Luis, las aguas subterráneas yacen a profundidades mayores de 10 m, por lo que es normal que en muchas investigaciones realizadas en el área, no apareciera el nivel freático. Corresponden al estrato tipo fisurales y de poros, con capacidad acuífera menor a 1 litro x segundo, según el mapa hidrogeológico de Cuba.

En algunos sectores de la región los niveles de las aguas subterráneas están relacionados a la cuenca del río Guaninicum hacia donde drenan, estos niveles oscilan entre 6 y 8m

3.3.4 Condiciones ingeniero-geológicas

De un total de 51 informes consultados pertenecientes a investigaciones llevadas a cabo por la ENIA Santiago de Cuba, se escogieron 32 para realizar la interpretación y procesamiento de la información contable, los restantes carecían de variables correspondientes a varias propiedades físico mecánicas de los suelos. (Ver anexo 2)

3.3.5 Cálculo de factor de seguridad para la licuefacción.

De los 32 informes escogidos para analizar las propiedades físico mecánicas de los suelos del territorio de San Luis, solo a 4 se les pudo realizar el cálculo FSL, los cuales contenían datos imprescindibles tales como (N_{spt} , Y_d , Y_f , Nivel Freático).

Tabla 3.2 Resultados del Cálculo de Factor de seguridad. Municipio San Luis.

Obras	FSL Mw=6	Licuable	FSL Mw=7	Licuable	FSL Mw=8	Licuable	Fm	Estrato	Prof.
Construcción de la planta eléctrica 1.5 MW CAI Rafael reyes	4,59258325	No	3,10521254	no	2,191956	no	San Luis	ML	4,5 m
Joven Club de Computación Rpto. Raúl Palomo CAI CHILE	6,41596149	No	4,33806487	no	3,06216344	no	San Luis	CH-CL	2,5 m
Batería 12 máquinas Fuel Oil	2,4500766	No	1,65658588	no	1,09935474	no	San Luis	SC	6 m
Servicentro CAI Chile	1,60417526	No	1,08464122	si	0,7656291	si	San Luis	CH-CL	3,9 m

3.3.6 Conclusiones parciales para San Luis

Los suelos del territorio están representados por los conglomerados polimícticos con intercalaciones de areniscas polimícticas de origen marino y fluviomarino, así como sedimentos aluviales de las formaciones Cauto (Pleistoceno) y San Luis (Eoceno Medio) las primeras secuencias estratigráficas están caracterizadas por la presencia de CH-CL (arcillas de alta y baja plasticidad respectivamente) según el SUCS, mientras que también aparecen las arenas arcillosas SC y las arenas limosas SM catalogadas como favorables para la ocurrencia de licuefacción, el nivel de compactación teniendo en cuenta el número de golpes N_{spt} ronda entre 15 y 30. A estos suelos sirven de base las gravas limosas alteradas (GM) como es característico principalmente en la formación San Luis. Los valores de aceleración de partículas (0,316) están dentro de las establecidas en el orden de las condiciones necesarias para que ocurra licuefacción (Sismos con magnitud igual o

superior a 5.5 con aceleraciones superiores o iguales a 0.2g, para una probabilidad del 10 % en un período de retorno de 475 años). Estos suelos por la litología característica podrían licuar, pero se describen secuencias muy bien estratificadas lo que atenta contra la ocurrencia del fenómeno, otro dato importante es que el nivel freático yace a una profundidad de 10 m o más, solo en 5 de los 37 informes se cortó el mismo, oscilando estos entre los 6 y 8m, además presenta el por ciento de granos finos más alto de los tres territorios llegando incluso a sobrepasar varias veces el 90 %, no obstante en dos de las 4 obras a las que se le realizó el cálculo de factor de seguridad se obtuvieron valores que confirman susceptibilidad a la licuefacción, el servicentro en CAI Chile, donde se cortó el nivel freático a los 3,9 m el suelo donde se encuentra emplazado, CL(arcillas de baja plasticidad) resultó licuable para sismos de magnitudes 7(1,08464122) y 8(0,7656291) y la obra Batería 12 máquinas FUEL-OIL, emplazada sobre arenas arcillosas(SC) el resultado del cálculo fue 1,09935474 para magnitud 8, ambas obras ubicadas dentro de la formación San Luis. Teniendo en cuenta los indicadores analizados el territorio se evalúa como poco favorable para la ocurrencia de licuefacción.

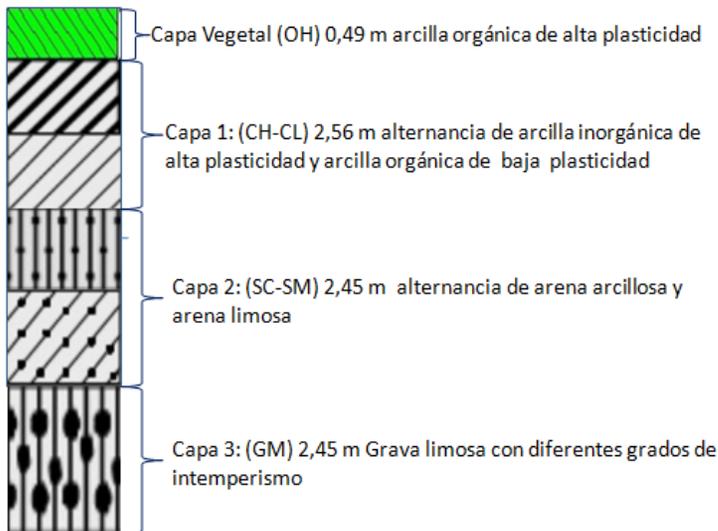


Figura 3.2 Columna litoestratigráfica esquemática municipio San Luis

3.4 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio Palma Soriano.

3.4.1 Condiciones geológicas

En el área de estudio está presente la formación San Luis (Eoceno Medio-Superior), en muchas partes de la ciudad aflora el estrato rocoso, en otras subyace a suelo sedimentario, generalmente aluviales, esta Fm tiene una amplia distribución en el territorio, se interdigita con la Formación Camarones de edad Eoceno Superior (conglomerados polimícticos de cantos sub-redondeados y redondeados, areniscas polimícticas de grano grueso) hacia la parte norte y noroeste de la Gran piedra y está constituida por litofacies carbonatadas, compuestas por areniscas polimícticas, aleurolitas, margas, arcillas, calizas arcillosas órgano-detríticas. Sus depósitos se encuentran bien estratificados, ligeramente plegados propiedad esta que le confiere resistencia al suelo. Hacia la parte alta del corte se observa un aumento del material clástico. Los conglomerados polimícticos están mal seleccionados, macizos, los fragmentos del conglomerado están representados por lavas, rocas piroclásticas y en menor grado ultrabasitas, calizas y rocas metamórficas. Las aleurolitas son calcáreas, son ricos en macrofósiles y forman paquetes de areniscas de grano fino, a veces contienen lentes de conglomerados. La formación San Luis se encuentra cortada por diques y cuerpos de basaltos y está ligeramente plegada, con buzamientos suaves que rara vez alcanzan los 30°.

También está presente la formación Cauto, la cual está representada por sedimentos aluviales, producto de las deposiciones del Río Cauto, de edad Cuaternario. Los sedimentos aluviales, típicos de terrazas aluviales están compuestos por arenas gruesas a finas con gravas, arcillas, limos y gravas, los mismos presentan combinaciones. En muchas ocasiones es muy difícil hacer una correlación litológica de estos suelos ya que estos se depositan generalmente de una forma errática, debido a diversos procesos y fenómenos. La arcilla se presenta en muchos sondeos muy plástica, en otras arenosa o limosa, disminuyendo su plasticidad, la arena se presenta desde un grano muy fino hasta

el grano grueso, en ocasiones aparece casi franca (con muy poco contenido de fino) en otras, arcillosa o limosa. En muchos sondeos aparecen gravas subredondeadas y fragmentos subangulares de rocas de diversos orígenes (areniscas, calizas...) Subyace a todo este suelo una lutita calcárea, la cual está muy intemperizada en su superficie, de dureza muy blanda, disminuyendo con la profundidad el grado de intemperismo de moderada a ligera y aumentando la dureza a blanda.

3.4.2 Sismicidad

Según la norma NC 46: 2013 que establece los requisitos básicos para construcción de obras sismo resistentes, El municipio Palma Soriano se encuentra dentro de la zona sísmica cuatro de seis determinadas, la cual se describe como de riesgo sísmico alto que puede ocasionar daños significativos en las construcciones debiéndose tomar medidas sismo resistentes en las estructuras y obras en función de la categoría ocupacional de las mismas y el nivel de protección definido según la probabilidad de exceder un sismo de diseño. Los valores de la aceleración espectral horizontal máxima del terreno para el cálculo S_a estarán entre 0,5 y 0,8 para períodos cortos S_s y entre 0,2 y 0,3(g) para períodos largos S_1 . Tales consideraciones establecidas en la norma antes mencionada se tomaron en cuenta para la presente investigación. (Oficina Nacional de Normalización, 2013)

La tectónica de la región no aparenta un gran desarrollo de las fallas de superficie, debido al enmascaramiento de los depósitos sedimentarios de la Fm San Luis.

3.4.3 Características hidrogeológicas

Las aguas subterráneas en el territorio de Palma Soriano se encuentran en los sedimentos de la Fm San Luis y la Fm Cauto, específicamente en las margas del Mioceno inferior, rocas de capacidad acuífera de hasta 10 litros x segundo (mapa hidrogeológico de Cuba 1965)

Por las características del relieve y la composición litológica de los suelos, las aguas superficiales partes escurren y el resto se infiltran a través de las coberturas

friables cohesivas y por las grietas y fracturas de los sedimentos bases compuestos por rocas intemperizadas agrietadas y tectonizadas de la Fm San Luis y drenan en dirección a la cuenca del río Cauto. Generalmente Las aguas subterráneas en el territorio de palma Soriano también yacen por debajo de los 10m, generalmente son aguas dulces, hidrocarbonatadas cálcicas.

Los resultados obtenidos mediante varias pruebas Hidrogeológicas realizadas por el método de vertimiento Express y evidenciados en los informes arrojaron que el coeficiente de filtración promedio (K_f) fue de 0,0775 m/días.

3.4.4 Condiciones ingeniero-geológicas

De un total de 54 informes consultados pertenecientes a investigaciones llevadas a cabo por la ENIA Santiago de Cuba, se escogieron 37 para realizar la interpretación y procesamiento de la información contable, los restantes carecían de variables correspondientes a varias propiedades físico mecánicas de los suelos. (Ver anexo 1).

3.3.5 Cálculo de factor de seguridad: para la licuefacción.

De los 37 informes escogidos para analizar las propiedades físico mecánicas de los suelos del territorio de Palma Soriano, solo a 3 se les pudo realizar el cálculo FSL, los cuales contenían datos imprescindibles tales como (N_{spt} , Y_d , Y_f , Nivel Freático)

Tabla 3.3 Resultados del Cálculo de Factor de seguridad. Palma Soriano

Obra	FSL Mw=6	Licuable	FSL Mw=7	Licuable	FSL Mw=8	Licuable	Fm	Estrato	Prof.
Hospital Pediátrico	5,7441427	no	3,883824	no	2,7415227	no	San Luis	CH	4,5 m
Policlínico tipo III	5,2758713	no	3,567208	no	2,5180295	no	San Luis	GM4	5 m
Fiscalía municipal	3,7758462	no	2,552987	no	1,8021084	no	San Luis	CL	4,2 m

3.3.6 Conclusiones parciales para Palma Soriano

Además de las arcillas plásticas (CH) las arcillas arenosas (CL) de menor plasticidad y las arenas limosas (SM), características de las facies carbonatadas de origen aluvial pertenecientes a las formaciones Cauto y San Luis, se puede apreciar un aumento gradual del tamaño de los granos con la aparición de los suelos gravosos (GP, GC) y las areniscas y aleurolitas polimícticas meteorizadas (GM2) (GM3) (GM4). Es importante señalar que el nivel freático yace bajo los 8 y 10m casi en su totalidad, en solo 3 obras se logró cortar el mismo, oscilando entre 4 y 5 m, el grado de compactación de los suelos según el número de golpes N_{spt} es elevado, sobre los 40 golpes, los valores de límite líquido oscilan entre 32 y 90 %, la humedad natural adquiere valores entre 15 y 25 % aproximadamente. Los valores de aceleración de partículas 0,335 están dentro de las establecidas en el orden de las condiciones necesarias para que ocurra licuefacción (Sismos con magnitud igual o superior a 5.5 con aceleraciones superiores o iguales a 0.2g, para una probabilidad del 10 % en un período de retorno de 475 años. Ninguna de las tres obras a las que se les pudo realizar el cálculo de factor de seguridad resultaron licuables a sismos de gran magnitud.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de la aplicación de los indicadores propuestos para la investigación, se evalúa al territorio de Palma Soriano como no susceptible para la licuefacción, excepto aquellos sectores relacionados con la sedimentación de origen fluvial asociada a la cuenca del río Cauto, la cual descansa sobre la formación del mismo nombre, de edad Cuaternario, situada al norte del territorio limitando geográficamente con el municipio Julio A. Mella.

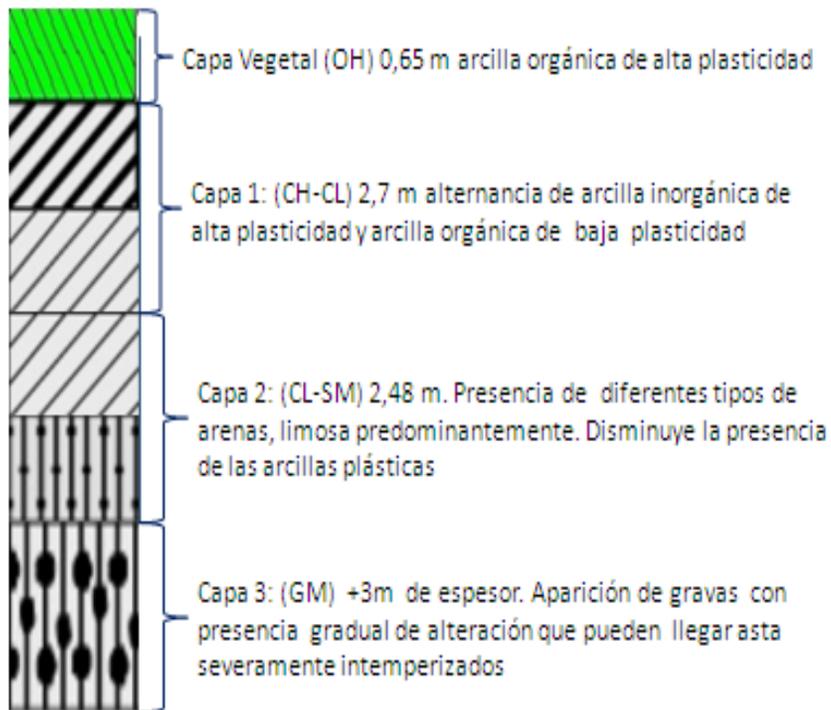


Figura 3.3 Columna litoestratigráfica esquemática municipio Palma Soriano

CONCLUSIONES

- 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 identificar el potencial de licuefacción en los escenarios propuestos.
- El sector de estudio está caracterizado por el predominio de suelos del eoceno y el cuaternario. Los suelos de menor compactación son los de San Luis y Julio A. Mella. El nivel freático yace a profundidades poco favorables para la ocurrencia de licuefacción, excepto en Julio A. Mella que se halla entre 1 a 6 m. En el área de estudio predominan los suelos arcillosos CH-CL y gravosos GC-GM. La presencia de suelos arenosos SC-SM es significativa en San Luis, disminuyendo su representación en Palma Soriano y Julio A. Mella.
- El cálculo del factor de seguridad realizado a los suelos de tipo GC (gravas arcillosas) y SC (arenas arcillosas), CH (Arcilla de alta plasticidad) y CL (arcilla de baja plasticidad) identificados en el área de estudio dieron valores menores y cercanos a 1, por lo que son favorables para la ocurrencia de Licuefacción. Los sismos principalmente de magnitud mayor de 6 son los que pueden provocar la licuefacción del suelo. No se obtuvieron estratos licuables en el municipio Palma Soriano.
- Los municipios San Luis y Julio A. Mella poseen sectores favorables para la ocurrencia de licuefacción, siendo este último el que presenta mayor susceptibilidad al fenómeno. Los estratos de tipo GC (grava arcillosa) y SC (arena arcillosa) enmarcados dentro de la formación San Luis y Cauto fueron identificados como los más propensos a la licuefacción.

RECOMENDACIONES

- Socializar los resultados de la investigación con el propósito de que las comunidades y establecimientos estatales conozcan acerca del tema, principalmente sectores tales como Centros de Gestión para la reducción de riesgos, Consejos de asamblea municipal y demás organismos de administración, para lograr una mejor proyección de ordenamiento territorial.

- Realizar el estudio de vulnerabilidad en los municipios San Luis, Julio A. Mella y Palma Soriano.

- Incluir en los informes de la ENIA parámetros que permitan calcular el Factor de seguridad para la Licuefacción.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, F. A. (2011). Comparación entre la metodología para evaluar el potencial de riesgo de licuefacción y los catastros realizados luego del terremoto del 2010 en Concepción. proyecto de grado en opción al título de Ingeniero Civil.
- Alva H.; & Parra D.; (2011) Evaluación del potencial de licuefacción de suelos. Chimbote, Perú.
- Bodebender. (1894). El terremoto Argentino. Buenos Aires.
- CENAIIS. (2013). Terremotos registrados por el Servicio Sismológico Nacional de Cuba.
- Chuy. R (1999). Sismos Perceptibles en la Provincia de Santiago de Cuba, *Minería y Geología, ISSN 0258 5979*.
- Chuy, R. (2010). Modelo del peligro sísmico de la provincia de Santiago de Cuba. Archivos CENAIIS. Santiago de Cuba.
- Cotilla. (1999). Apuntes necesarios acerca de los acontecimientos sísmicos en Cuba.
- Ecured. (2017). Obtenido de www.ecured.cu
- Elgamal, A. (2013). Liquefaction Evaluation. India.
- ENIA. (2003). Informe geológico, Batería 12 máquinas Fuel Oil. Santiago de Cuba.
- ENIA. (2010). Informa geológico; Laguna Facultativa ESBU Pinalito, Mella.
- ENIA. (2013). Informe geológico, Fiscalía Municipal.
- Fernández Dieguez, L. (2000). Posibilidad de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en la cuenca de Santiago de Cuba por terremotos fuertes. Tesis de maestría

Fernández Diéguez, (2015). Licuefacción de los suelos generada por sismos de gran magnitud. casos de estudio Caimanera y Santiago de Cuba. Moa, tesis de maestría, *Revista Minería y geología.*)

Fernández Diéguez, L; Guardado Lacaba, R; Herrera Delfín,I; Oliva Alvarez,R; Díaz Santo P, Escenarios susceptibles a la licuefacción inducida por sismos de gran magnitud en Santiago de Cuba. *Minería y Geología*, 2016,ISSN 1993 8012) .

Fernández Diéguez, L; Bandera Cuñat, I; Guardado Lacaba R; Oliva Alvarez, R; (2017). Susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en la ciudad de Caimanera, Guantánamo. *Minería y geología.*

Galván Rodríguez, L. (2014). Procedimiento para la gestión y gestión de riesgos geológicos en la provincia de Santiago de Cuba. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Geológicas.

González, L. (2002). Ingeniería Geológica. Pearson education.

Guasch, F & Oliva, R. Análisis de la vulnerabilidad habitacional y los riesgos inducidos en los edificios altos de la ciudad de Santiago de Cuba. CENAIS. Santiago de Cuba. 2014.

Hernández Ordaz, A; Estévez Cruz E; Hernández Santana, J.R; Chuy Rodríguez T.J ,(2014). Modelación de parámetros geotécnicos como contribución a la zonación sísmica local: ciudad de San Cristóbal, Cuba.

Herrera Delfin, I. (2015). — Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el consejo popular Guillermón Moncada del municipio de Santiago de Cuba. Moa.

<http://www.planetacurioso.com/2008/12/16/sabias-que-existen-terremotos-donde-el-suelo-se-comporta-como-liquido/>. (2008). Obtenido de Planeta Curioso.

- Huamán Soto, J. (2010). Evaluación del potencial de licuación basado en el ensayo triaxial cíclico. Civil, (2010).Universidad Nacional de Ingeniería, facultad de ingeniería .Perú
- Kramer, & Stewart. (2004). J. Geotechnical Aspects of Seismic Hazards. Londres.
- Léxico estratigráfico de Cuba, v. d. (2013).
- Leyton. (2011). Geología Superficial, frecuencias predominante de suelos y observaciones de licuefacción en Curicó tras el terremoto de Maule 2010. Chile: Tesis de Diploma.
- Moya Fernández, A. (2009). Inversión de efectos de sitio y factor Q utilizando cocientes espectrales. Estudios geológicos, 67-77.
- Obando. (2009). Estado actual del Conocimiento del proceso cíclico de licuefacción en suelos sujetos a solicitaciones sísmicas. Ejemplos de Casos. .
- Obando. (2009). Metodología y técnicas para la cuantificación del potencial de licuación en suelos sujetos a solicitaciones dinámicas. Ejemplo de casos.
- Oficina Nacional de Normalización, C. (2013). Proyecto de norma NC 46 de 2013 de Construcciones sismo resistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción.
- Parellada Reyes, O. (2016). → Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducidos por terremotos de gran magnitud en la zona sur de la provincia Guantánamo. Moa.
- Perucca, I.; Pérez, A. & Navarro, c. "Fenómenos de licuefacción asociados a terremotos históricos. Su análisis en la evaluación del peligro sísmico en la Argentina". Rev. Asoc. Geol. Argent. v.61 n.4 Buenos Aires oct./dic. 2006
- Reinosa Mercanfety, D. (2016). → Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducidos por terremotos de gran magnitud en los municipios

Baracoa, Yateras, El Salvador, Niceto Pérez de la Provincia Guantánamo.
Moa.

Rosabal. (2011). Zonación preliminar de la licuefacción de los suelos en la región de Cuba Oriental .

Sánchez, N. L. (2013). Licuefacción de suelos. Venezuela.

Seed, & Idriss. (1982). Ground motions and soils liquefaction during Earthquakes.

Seed, B., and Idriss, M. "A Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential", Journal of soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1971. 97, SM9, 1249- 1273.

Soto & Parra. Evaluación del potencial de licuación basado en el ensayo triaxial cíclico. Dinámica de Suelos. Universidad nacional de ingeniería. 1999

Tanasijevic. (2011).

Tokimatsu, K. & Yoshimi Y. "Field Correlation of Soil Liquefaction with SPT and Grain Size", International Conference of Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, University of Missouri-Rolla, 1981. Pp 203-208

Universidad Nacional Autónoma de México, (2012). Determinación del potencial de licuación con el método de microtremores.

Wang. (1979). Some finding in soil liquefaction. Water conservancy and hydroelectric power scientific research institute. Beijing,China.

Anexos

Anexo 1: Condiciones Ingeniero Geológicas. Municipio Palma Soriano

Obra	Capa 1 descripción	Capa 2	N de SPT(golpes/30cm)	LL	% finos	% gravas	% arenas	Wn (%)	(γ_f) (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	C(kPa)
Planta de fabricación de piezas de repuesto	CH	CH	standard	60,8	72	0	28	27,2	19,09	15,01	50
Central Dos Ríos Palma Soriano	CH	ML									
Pre Universitario Caney	Limo	CH		39,4				23,9	18,47	14,87	
Hospital Pediátrico (Sala de terapia intensiva)	CH	SM	26	43,7	33	9	58	20,2	18,3	15,1	
Policlínico Tipo III Palma Soriano	CH	CL	24	44,7	23	55	22	20,4	17,9	14,3	
Sede Universitaria Palma Soriano	CL			35	67	17	16	20,2	19,6	16,3	20
Almacén de Medicamentos palma soriano	CL	CL	34	48	90	3	7	15,3	18,88	16,37	25
Urbanización Calle La O (edificio 4 niveles)	GP	MH									
Urbanización 28 de septiembre	CL	SC	26	43	87	0	13	19,38	18,2	15,25	24
Torres territorio Oriental	MH		17	65	82	1	17	32	18,7	14,17	30
Hogar de ancianos. Palma	CH		49	31,4				15,7	19,3	1,67	20
Taller de confecciones textiles	CH	CH	28	46,7				22,2	19,6	16	40
Fábrica de pienso líquido	CL	CH	44	50,1				21	19,6	16,2	40
Estación de FFCC Palma Soriano	Arcilla Plástica		39	70,4				47,1	19,5	15,3	60
Hogar de impedidos custodiables	MH	GM2	33	32,0	9			1704	19,8	16,9	20
Combinado de servicios CAI Dos Ríos	CL		21	44,3				23,5	19,2	15,5	40
Combinado de servicios CAI Dos Palmas	Relleno	GM4	50	34,5	26	46	28	1602	19,9	17,1	10
Escuela de Retraso Mental	CH	GM2	45	37,1				19,6	18,6	15,6	20
Círculo Infantil en nito ortega	CL	CL	30	35,8				11,7	17	15,2	20
Planta gran panel VI	CH	SM	32	53,9				23,3	19	15,8	29
Círculo infantil CAI Dos Ríos (*)	CH	GM4	15	37,2				22,7	18,9	15,6	50
Hospital municipal Palma	GP	SC									
Subestación 110/13.8 Kv	CL			32	72	3	25	21,5	19,1	15,72	30

Obra	Capa 1 descripción	Capa 2	N de SPT(golpes/30cm)	LL	% finos	% gravas	% arenas	Wn (%)	(Yf kN/m3)	Y'd (kN/m3)	C(kPa)
Policlínico Victoria de girón	CL	CL		36				12	17	15,2	20
Área para refugio Policlínico Ramiro Betancourt	CH	CL		66				28,8	19	14,75	30
Fiscalía Municipal	CL	CL	13	35				15	18,05	15,69	24
Sala de rehabilitación policlínico Sur Palma	CL	SM	19	35	56	0	44	19	19,6	19,47	25
Hospital General palma soriano	CL	CL	19	37,2	83	0	17	17,43	18,06	15,38	28
Remodelación y ampliación policlínico norte	CL	CH	23	36	85	0	15	20	19,6	16,3	30
Asentamiento poblacional. Palmarito. Palma Soriano	CH		7	88				34,74	17,35	12,79	25
Comunidad aserrió	CH	CL		58				22,83	18,91	15,4	
Escuela primaria Salvador Pascual	CH			66				28,8	14,75	19	30
Policlínico Ramiro Betancourt	CH	GM4		66				28,8	19	14,75	30
Almacenes EPAVEP Palma	Suelo Arcillo limoso	SM	34	47				15,3			40
Depósito de Combustible palma soriano	Arena limo-arcillosa		11	37				21,6	19,5	16,1	20

Anexo 2: Condiciones ingeniero geológicas Municipio San Luis

Obra	Capa 1	Capa 2	N de SPT(golpes/30cm)	LL	% finos	% gravas	% arena	Wn (%)	Yf (kN/m3)	Yd (kN/m3)	C(kPa)
Construcción de la planta eléctrica de 1.5 MW CAI R.Reyes	CL	ML	21	49,35	69	0	31	23,44	19,41	15,72	60
Joven Club de Computación Rpto Raúl Palomo	CH		30	80	93	0	7	37,3	18,2	13,25	30
JCCE Rpto Capitán San Luis	CL		50	36	71	0	29	17,4	19,7	16,8	22
Parque Fotovoltaico "Villa Victoria"	CL		25	47	94	0	6	26	18,88	14,09	35
Policlínico "Alberto Fernández Montes de Oca"	CL	SC		36,8				14,65	18,63	16,35	25
Polidínico Dr. Carlos M. Carrera Corría (Pozo de infiltración)	CL		24	36	55	15	30	17,8	18,63	15,11	20
Escuela Primaria "José Martí"	SC			36	49	18	33	17,8	18,63	15,81	15
Policlínico Luis Carrión	CL		22	37				24,72	18	15,42	20
Escuela primaria Franklin Llamo	SC			36	49	18	33	14,65	18,63	16,25	15
Batería 12 máquinas Fuel Oil	CH	SC	15	92	96	0	4	35,95	17,21	12,52	42
Viviendas Dos Caminos	CH	ML		52				24,76	18,07	14,48	60
Viviendas en Rpto Capitán San Luis	GC	SM		36	28	55	17	17,8	18,63	15,61	15
Torres Comunicación CAI "Chile"	CH			98	83		17	36,6	17,91	13,11	40
Torres Comunicación Combinado ferroviario	CH		16	54	30	31	39	38,05	17,95	13	35
Viviendas de Bajo Consumo. Hatillo. Presa Santa Rita	CL			41,2				17,8	18,4	15,62	69
Estación ferroviaria San Luis (Filtraciones de cañadas)	CH	MH		65	78	0	22	31,7	18,6	14,27	45
Almacén de azúcar Dos Caminos	CH	CL		69	94	0	6	25,1	19,6	15,31	
Vía férrea central Paso superior. Km 500 a Km 540	CH	CH	4	84,6	92,8	0	7,2	47,8	17,3	11,71	30
Complejo Ferroviario entre los poblados de San Luis y Dos Caminos	CL	SM	30	45	52,5	0	47,5	27,6	18,8	15,46	
Centro de carga y descarga	MH			61,3	54	12	34	27,9	18,8	14,7	69
Centro de carga y descarga (Viaducto)	MH			48,6	35	30	35	22,7	18,9	15,3	75

Anexo 3: Condiciones ingeniero-geológicas. Municipio Julio A. Mella

Obra	Capa 1	Capa 2	N de SPT	LL	% finos	% gravas	% arenas	Wn (%)	Yf	Yd	C(kPa)
50 viviendas. Mella	CH	GC	6	72	75	12		40	17,36	12,38	81
Asentamiento El Júcaro	ML	CH	35	32	79,2	0	13	13,5	15,3	13,6	20
Sector Militar Mella	CL	CL	40	38,9	96	0	20,8	21,8	26,4	15,4	50
parcelas MININT	CH			79	74	0	4	32,8	13,2	17,5	34
Ampliación Policlínico de urgencias	CH	GC		75,3			26	29,77	18,66	14,38	78
ESBU Antonio Maceo	CL			71					18,2	13,6	4
Policlínico Palmarito. del Cauto	CL			34,8	28	46		18,2	19,5	16,5	25
Policlínico M de Baraguá	GC	CH			97	0	26	15,4	21,95	19,02	
40 viviendas calle Martí	CL		19	81	91	1	21	31	18,55	14,16	50
Policlínico mella bloque 3	CH		18,7	92			8	25,8	18,4	14,38	78
Escuela Primaria Baraguá	MH		26	68	74	0		33	17,35	13,1	75
Hogar de Ancianos	CH	GC		75,3			26	29,77	18,6	14,3	78
Laguna Facultativa, ESBU Pinalito	OH	CH	6	92,5	28	46		42,26	17,43	11,92	
Policlínico Baraguá	GC	CH			78	0	26	15,4	21,95	19,02	
Escuela P. González Cueto	CH	GC	14	70			22	26,6	18,9	14,93	40
Círculo Infantil Mella	CH	CL	13	60,2				32,9	17,5	13,5	
Cine localidad Mella	CH	GC		81				35	17,7	13,1	
Estación de Ferrocarril	CH	GM4		69	28	46		32,7	16,4	13,64	
Comunidad Militar Baraguá	GC	CH			91	1	26	15,4	21,95	19,02	
reconstrucción carretera	CH		23	68,6			8	29	18,8	14,57	
Taller ferroviario Mella	GW	CH	23	58				33	18	13,5	
Proyecto Integral porcino	CH	CL		57				37	17,6	12,9	
IPUEC Baraguá	CH	CH		71,22				33,8	18,2	13,6	
Asentamiento Pinalito	CH			58				28	17,3	15,5	
Comunidad Militar 1973	CH		21	85				29,9	18,3	14,8	

Anexo 4: Cálculo de FSL. Municipio Palma Soriano

OBRAS MUNICIPIO Palma Soriano	N	valor de N1.60	CRR	Yd	H	(σ)encima n.f	Yf	H	(σ)debajo n.f	μ	(σ *)	(σ t)	rd	amax	CSR	FSL para mag 6	FSL para mag 7	FSL para mag 8
Hospital Pediátrico (sala de terapia intensiva)	55	49,5	3,597322	16,2	2,5	40,5	19,5	1	19,5	10	9,5	50	0,96175	0,335	1,10222	5,744142754	3,883823794	2,741522678
Policlínico tipo III	156	140,4	10,38563	16,8	2,15	36,12	19,5	0,25	4,875	2,5	2,375	38,5	0,98164	0,335	3,46458	5,275871362	3,567208477	2,518029513
Fiscalía municipal	9	8,1	0,636759	14,3	0,4	5,704	17,34	2	34,68	20	14,68	20,4	0,98164	0,335	0,29681	3,775846224	2,552986936	1,802108425

Anexo 5: Cálculo de FSL. Municipio San Luis

Obras San Luis	N	valor de N1.60	CRR	Yd	H	(σ)encima n.f	Yf	H	(σ)debajo n.f	μ	(σ *)	(σ t)	rd	amax	CSR	FSL para mag 6	FSL para mag 7	FSL para mag 8
Construcción de la planta eléctrica de 1.5 MW CAI R.Reyes	21	18,9	1,46213831	15,72	1,5	23,58	19,41	1,4	27,174	14	13,17	36,754	0,97782	0,316	0,56033027	4,592583245	3,105212535	2,191914731
Joven Club de Computación Rpto Raúl Palomo	24	21,6	1,67637915	13,25	2,5	33,125	18,2	3	54,6	30	24,6	57,725	0,9541	0,316	0,45985739	6,415961492	4,338064873	3,062163439
Batería 12 máquinas Fuel Oil	15	13,5	1,0453237	12,52	5	62,6	17,21	3	51,63	30	21,63	84,23	0,9388	0,316	0,75090293	2,4500766	1,656585883	1,099354741
Servicentro CAI Chile	16	16,2	1,25234666	15	3,9	58,5	18,93	1,1	20,823	11	9,823	68,323	0,96175	0,316	1,37399584	1,604175256	1,084641224	0,765629099

Anexo 5: Cálculo de FSL. Municipio Julio A. Mella

OBRAS MUNICIPIO JULIO A. MELLA	N	valor de N1.60	CRR	Yd	H	(σ)encima n.f	Yf	H	(σ)debajo n.f	μ	(σ *)	(σ t)	rd	amax	CSR	FSL para mag 6	FSL para mag 7	FSL para mag 8
50 viviendas. Mella	6	5,4	0,435066555	12,38	0,6	7,428	17,36	1,1	19,096	11	8,096	15,524	0,97935	0,277	0,33811308	2,264677661	1,531230919	1,080868884
Policlínico mella bloque 3	18	16,2	1,252346664	14,38	2,1	30,198	18,4	2,1	38,64	21	17,64	47,838	0,96099	0,277	0,46922827	4,697351536	3,176050186	2,241917779
Laguna Facultativa, ESBU Pinalito, Mella	6	5,4	0,435066555	11,92	2,15	25,628	17,43	2,25	39,2175	22,5	16,7175	42,3455	0,96175	0,277	0,43862285	1,745730151	1,080351637	0,83318939
Escuela Paquito González Cueto	14	12,6	0,976772233	12,95	1,4	18,13	18	0,4	7,2	4	3,2	21,33	0,97935	0,277	1,17535677	1,462636005	0,98894139	0,698076275
Círculo Infantil Mella	50	45	3,237628303	15,7	1	15,7	19,4	2,2	42,68	22	20,68	36,38	0,93727	0,277	0,29687252	19,19418398	12,97788576	9,160860538
Taller ferroviario Mella	33	29,7	2,427985621	13,4	4,2	56,28	17,9	1,2	21,48	12	9,48	65,76	0,9541	0,277	1,19162742	3,586066093	2,424669688	1,711531544
Hospital Mella	16	14,4	1,114086812	13,42	3,9	52,338	18,09	1,3	23,517	13	10,517	62,855	0,95563	0,277	1,0283261	1,906781121	1,289244054	0,910054626
Viviendas en Mella	41	36,9	2,383797469	16,83	1,8	30,294	20,13	2,4	48,312	24	24,312	54,606	0,96787	0,277	0,39140812	10,71894864	7,247470957	5,115861852

Anexo 7: Mapa de Formaciones geológicas. Municipios Palma Soriano, San Luis y Julio A. Mella

