

MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA

**POSIBILIDAD DE OCURRENCIA DEL FENOMENO DE LICUACIÓN EN LA
CUENCA DE SANTIAGO DE CUBA CATALIZADO POR TERREMOTOS
FUERTES**



**TEMA PRESENTADO EN OPCIÓN AL GRADO ACADÉMICO DE MASTER EN
GEOLOGÍA.**

MENCIÓN : “ *Geotecnia*”.

AUTOR : Ing. Bárbara Fernández Melian

TUTOR(S): Dr. Rafael Guardado Lacava

Dr. José A. Zapata Balanqué

Moa, Marzo del 2000

“A MIS HIJOS”.

Agradecimientos.

- A mis padres, por todo el apoyo brindado durante la realización de mis estudios y en la parte final de la tesis.
- A mi esposo y compañero Angel, por su amor y comprensión.
- A los Doctores José A. Zapata y Rafael Guardado, tutores del trabajo por sus orientaciones, críticas y sugerencias sobre el trabajo y la confianza demostrada en todo momento por los resultados obtenidos.
- A mis compañeras, Zulima, Griselda, y Carmen con las cuales compartí siempre todos los momentos difíciles y alegres.
- A todos los que me ayudaron en la realización de mi trabajo y siempre confiaron en mí y para aquellos que no tienen, nunca han tenido, ni tendrán fe en los hombres.

Indice

Resumen

Introducción.	1
Capitulo 1: Generalidades.	3
1.1 Antecedentes.	
1.2. Objetivos.	8
1.3. Justificación.	
Capitulo 2: Características geólogo tectónico y sismológicas del área de estudio.	10
2.1 Características físico geográfica.	
2.1.1 Condiciones geomorfológicas.	
2.1.2 Características hidrogeológicas generales.	11
2.2 Características geólogo-tectónica.	12
2.2.1 Estratigrafía.	
2.2.2 Tectónica.	17
2.3.1 Sismicidad de la región de Santiago de Cuba.	18
2.3.2 Peligro Sísmico de la región.	25
2.3.3 Análisis de la sismicidad de fondo.	27
2.3.4 Evaluación de los efectos sísmicos.	28
Capitulo 3: Metodología de ejecución y procesamiento.	30
3.1 Descripción del fenómeno estudiado.	
3.2. Metodología de procesamiento.	32
3.2.1. Susceptibilidad de licuación.	
3.2.2. Correlación geológica.	33
3.2.3. Criterio magnitud distancia.	37
3.2.4. Criterio Intensidad.	38
3.3. Niveles de estudio y variables utilizadas.	
3.4 Categorización de la riesgo geológico.	43
Capitulo 4: Posibilidad de ocurrencia de licuación en la cuenca de Santiago de Cuba inducido por terremotos fuertes.	46
4.1. Pronóstico de riesgo geológico en Santiago de Cuba	
4.2. Categorización de la respuesta de los suelos.	48
4.3. Aplicación de los métodos.	49
4.4. Instalaciones que pueden ser afectadas por este fenómeno.	59

Conclusiones.	61
Recomendaciones.	62
Bibliografía.	63

Resumen

La necesidad de evaluación de fenómenos físico-geológicos en la ciudad de Santiago de Cuba parte de un estudio profundo de la respuesta de los suelos en caso de sismos moderados y fuertes, la misma esta sometida a un alto nivel de peligrosidad sísmica por su cercanía a la zona sismogénica de Bartlett-Caiman, en particular el sector conocido como Oriente 1.

Las características de los diferentes tipos constructivos de Santiago de Cuba la hacen una ciudad vulnerable, por lo que es la zona urbana de mayor riesgo sísmico de Cuba. Eso obliga a profundizar en la evaluación de los posibles desastres y trabajar en la mitigación de los mismos.

Los efectos de estos terremotos fuertes, en el área donde se encuentra ubicada la ciudad, desde el punto de vista de la intensidad sísmica, no han sido homogéneos y en gran medida han dependido de los siguientes factores: tipos constructivos, estado técnico en que se encuentran y las condiciones ingeniero-geológicas donde se asientan las construcciones.

Con ese fin se han realizado un gran número de estudios con vistas a evaluar la respuesta dinámica de los suelos, entre ellos están la evaluación del peligro sísmico y la amenaza geológica, los de efecto, microzonación y vulnerabilidad sísmica, validación de los resultados por efectos de terremotos fuertes, ejecución de mediciones de las oscilaciones libres de los suelos y edificios en diferentes etapas y tecnologías.

En nuestro trabajo tenemos como objetivo fundamental hacer una valoración ingeniero geológica de la ciudad de Santiago de Cuba y sus alrededores, utilizando un conjunto de métodos geológicos, sismológicos y geomorfológicos novedosos propuestos en La Norma Japonesa (1992), los cuales nos permitirá dar como resultado un mapa de posibilidad de ocurrencia del fenómeno de licuación en el área de estudio; así como evaluar la extensión de las áreas susceptibles y valorar los posibles daños y efectos provocados por este fenómeno, este resultado permite lograr una mejor ubicación y planificación de las obras así como valorar los posibles efectos y daños que serán provocados por este fenómeno.

El trabajo realizado forma parte de una Tarea Técnica aprobada por nuestro Ministerio, en la que se orientó realizar trabajos de Riesgo Sísmico de la Cuenca de Santiago de Cuba, tarea en la que trabajan varias entidades y organismos en el marco del Programa Nacional de la Defensa, todo lo cual permitirá la adopción de una serie de medidas que ayuden a minimizar las pérdidas de recursos, tanto materiales como humanos, en caso de ocurrir un sismo de gran intensidad.

Introducción.

La ciudad de Santiago de Cuba cercana a la zona sísmica más activa del país, esta ubicada en una cuenca pequeña de 400 km², es cruzada por incontables estructuras tectónicas activas y en ella convive una población de mas de 430 000 habitantes con una densidad poblacional de 280 a 300 personas por hectárea, en 86189 viviendas de las cuales 37061 están en estado de regular a malo (Ivonet et al,1995 y Mas,1995). Por ello se hace mas critica la evaluación de los efectos que puedan aparecer durante la ocurrencia de un terremoto moderado o fuerte y mucho más necesarios los estudios que apoyen al planeamiento urbanístico.

Los trabajos investigativos realizados en estos años ha permitido profundizar en el conocimiento de las causas que provoca el fenómeno a estudiar el cual puede afectar la ciudad de Santiago de Cuba, así como trabajar en el conocimiento del efecto sísmico para su utilización en decisiones de localización, proyectos, confección y actualización de planes contra sismos de gran intensidad en sitios de interés económico y social en la región de estudio.

Para la realización de nuestro trabajo se utilizaron un complejo de métodos que permitieron investigar la esencia y dinámica del fenómeno estudiado, así como las causas y los parámetros cualitativos y/o cuantitativos que le dan lugar y lo condicionan. En los análisis de los estimados de peligrosidad sísmica se parte de los catálogos de sismos históricos donde aparecen los terremotos de épocas pasadas evaluados por la intensidad de sus efectos principales en las áreas de afectaciones, lo que permite valorar determinística y probabilísticamente la periodicidad de ocurrencia de eventos destructores en un área cercana a una zona de origen de terremotos determinada. La información geológica permite conocer los parámetros tales como espesor y profundidad de las capas litosféricas, la extensión y la tipología de los estratos; mientras que la sismológica nos informa sobre las coordenadas, distancia y magnitud de los eventos.

Es necesario reconocer la necesidad de estas investigaciones, porque la ocurrencia de un

sismo es impredecible y poderlo predecir con certeza permitiría salvar vidas humanas y medios materiales, reduciendo las pérdidas. Este es el principal problema de la Sismología en la actualidad aún no resuelto, por lo cual los más importantes esfuerzos están dedicados a los trabajos de prevención y mitigación de los efectos de los terremotos, conjuntamente con los del conocimiento claro de las posibles respuestas de los suelos ante la ocurrencia de un fenómeno y la proyección, diseño y construcción de edificaciones que sean capaces de soportar daños severos ante la ocurrencia de sismos destructores. Para ello interactúan un conjunto de ciencias, las cuales permiten dar soluciones prácticas, así como profundizar en el conocimiento de las posibles respuestas de los suelos.

En este trabajo se exponen resultados utilizables por ingenieros, proyectistas, planificadores y organismos de gobierno de la ciudad de Santiago de Cuba, para la toma de decisiones en el planeamiento urbanístico e industrial de esta ciudad así como tomar medidas que se deben tener en cuenta para mejorar las obras construidas afectadas y con posibilidad de afectaciones.

Como hipótesis de trabajo partimos del conocimiento de la ocurrencia de terremotos fuertes en el área de estudio y del reporte de posible ocurrencia del fenómeno a estudiar durante el terremoto del 3 de Febrero de 1932 así como del conocimiento de las características de los suelos, su análisis complejo, profundidad de las aguas subterráneas, características geomorfológicas y el uso de sistemas avanzados de sistemas de computo (SURFER), que nos permitan predecir el comportamiento del suelo ante eventos sísmicos fuertes y catastróficos.

Por lo tanto los resultados que se obtendrán darán respuesta a:

Necesidades del gobierno y organismos planificadores para la proyección del uso de suelos.

Etapas de investigaciones de la respuesta del suelo dentro del Proyecto Mapa de Riesgo Sísmico de la ciudad de Santiago de Cuba.

Capítulo 1: Generalidades.

1.1 Antecedentes.

Nuestra intención principal es marcar el nivel de conocimiento actual en Cuba y las tendencias de mayor desarrollo en el mundo, por lo que nos planteamos hacer una breve reseña sobre las nuevas técnicas en investigaciones sobre riesgo geológico.

Para cumplir con los objetivos planteados se propone una caracterización de los suelos para sismos mayores o igual a 7 grados en la escala M.S.K. teniendo en cuenta la ocurrencia del fenómeno físico de licuefacción en la ciudad de Santiago de Cuba y sus alrededores.

Para la ciudad de Santiago de Cuba se presentó un proyecto de investigaciones complejas fundamentadas en trabajos geológicos, tectónicos, ingeniero geológicos y geotectónicos y de fenómenos físico-geológicos inducidos, donde Heredia et al. (1982) publican un esquema a escala 1: 25 000 con cinco categorías de variaciones de la intensidad, en función de las propiedades ingeniero geológico de las rocas y nivel de las aguas subterráneas, además proponen como suelo patrón las rocas de la formación La Cruz. Consideramos que los valores de intensidad que proponen están sobrestimadas porque los valores que utilizan tiene en cuenta como suelo patrón al granito.

Chuy et al (1982) presentan un esquema a escala 1:25 000 de zonación de los niveles freáticos de la cuenca de Santiago de Cuba; también González et al (1984) presentan el esquema fotogeológico a escala 1:37000, esquemas a escala 1:25 000 de tipos básicos de suelos, potencia de sedimentos superficiales, variaciones de intensidad, similaridad de los espectros CHISS y velocidades de los microsismos.

Este último al igual que Heredia et al (1982) tiene como limitante la poca información sismológica y los valores de variación de la intensidad sísmica que se tienen en cuenta no se ajusta con la información sismológica existente y publicada en esa época (Alvarez y

Menéndez, 1969; Alvarez, 1970; Alvarez, et al., 1970 y Chuy, 1980) que proponían VIII grados de intensidad para Santiago de Cuba.

González et al (1984) presentan un Esquema de Analogías Ingeniero-Geológicas para Santiago de Cuba, donde definen cuatro zonas de variación de intensidad:

- *disminución de un grado* (basaltos, andesitas, aglomerados volcánicos poco agrietados y alterados, tobas de composición media y básica, calizas duras, porfiritas basálticas y andesíticas y areniscas tobáceas donde el nivel freático se encuentra a más de 10 metros de profundidad.)
- *sin variación de intensidad* (calizas duras, porfiritas basálticas y andesíticas y areniscas tobáceas areniscas tobáceas tufitas, margas, calizas alteradas y agrietadas blandas con el nivel freático entre 6 y 8 metros de profundidad).
- *aumento de un grado* (areniscas tobáceas, tufitas, margas, calizas alteradas y agrietadas blandas, arenas, arcillas y suelos gravosos, con el nivel freático entre 4 y 6 metros de profundidad)
- *aumento de más de un grado* (depósitos cuaternarios no consolidados, terrenos de deposición y rellenos artificiales con nivel freático menor de 4 metros de profundidad).

Las características ingeniero-geológicas de Santiago de Cuba están presentadas en los trabajos precedentes. Además se tuvo en cuenta el nivel de las aguas freáticas, el grado base de partida considerado es de 8 grados. (Chuy et al, 1983).

Guardado (1988) realizó un estudio titulado "Clasificación de los procesos y fenómenos geológicos que tienen lugar en la Ciudad de Santiago de Cuba", donde el autor relaciona estrechamente los procesos y fenómenos geológicos con las condiciones tectónicas generales, los movimientos actuales de la corteza terrestre que traen como consecuencia el desarrollo de variados procesos geológicos, señalando en gran medida los fenómenos sísmicos.

González (1991) presenta una zonación empleando los cortes típicos cuyas áreas no difieren en gran medida de la obtenida en 1984 por el método de las analogías ingeniero-geológicas. En el caso de la microzonación sísmica, presentó además los resultados de los efectos sísmicos en Santiago de Cuba a partir de la misma información instrumental obtenida en 1984. Dentro del trabajo realizó la evaluación del esquema de analogías con el método de las condiciones ingeniero-geológicas típicas, donde obtuvo ocho tipos de perfiles típicos que son comparables con las cuatro zonas obtenidas anteriormente. El esquema corrobora el anterior presentado en 1984.

Orbera y Ramírez (1994) presentan y confirman por evaluaciones de neotectónica reciente a escala 1:50000, la posibilidad de ocurrencia de fenómenos físico-geológicos en la cuenca en caso de sismos fuertes. Rueda et al (1994) categorizan por mediciones geodésicas de alta precisión el nivel de actividad de las diferentes estructuras tectónicas. Arango et al (1994) condicionan la confección del esquema de riesgo geológico a escala 1:25 000, a la actividad geodinámica reciente de las estructuras locales, la cual puede ser determinada por mediciones geodésicas de alta precisión y evaluaciones geomorfológicas. Consideramos que contra ello conspira la imposibilidad de mediciones absolutas en la cuenca por falta de amarre mareográfico.

Fernández B. et al (1995) presentan un Esquema pronóstico de fenómenos físico-geológico de la cuenca de Santiago de Cuba, donde proponen la posibilidad de ocurrencia de deslizamientos, derrumbes y licuefacción en varios sectores teniendo en cuenta los tipos de suelo profundidad de las aguas subterráneas y topografía.

Arango (1996) en "Geodinámica de la región de Santiago de Cuba en el límite de las placas Caribeña y Norteamericana," hace énfasis en las principales etapas de la evolución tectónica y en la sismicidad asociada al sistema de fallas transformantes Bartlett-Caiman; también hace una caracterización geodinámica de la Cuenca Santiago de Cuba.

Lorente (Comunicación Personal, 1999) tiene un estudio bibliográfico sobre la ciudad de Santiago de Cuba y sus alrededores, donde en varios esquemas del área que datan desde el

año 1751 aparecen representadas lagunas (Espanta Sueño, de Don Pepé, de San Juan) y zonas de relleno (Carretera del Morro y Calle 9, Zona Portuaria y La Playita) que antiguamente existían en la ciudad, los que servirán de mucha importancia en el trabajo. En estas zonas existen construcciones importantes para la actividad económica y social de la ciudad.

Zapata (1997) en su Tesis de Doctorado propone un esquema pronóstico de fenómenos físico-geológicos para sismos con intensidades mayores de 7 y 8 grados utilizan como herramienta de procesamiento un sistema de información geográfica con cuadrículas de 200 * 200 metros cuadrados y evalúan parámetros de relieve, ingeniero-geológicos, tectónicos y de microzonación sísmica a escalas 1:10 000 y 1:25 000. El procesamiento es realizado con el sistema PC-GEO (Viña et al, 1994) lo que permitió realizar las categorizaciones, clasificaciones y la confección de mapas para diferentes variables, al unísono, con apoyo del análisis estadístico multivariado. Este es el trabajo más reciente donde el autor propone zonas con posibilidad de ocurrencia de deslizamientos, derrumbes y licuación.

Como limitante consideramos que se utilizan las características geológicas, profundidad de las aguas subterráneas y grados de pendientes para las categorías y no tiene en cuenta las características ingeniero geológicas de la cuenca de Santiago de Cuba, las cuales se encuentran resumidas actualmente en una base de datos creada en formato DBF, donde aparecen resumidas las propiedades físico mecánicas de los diferentes suelos, estos datos cubren prácticamente la mayor parte del área de trabajo. En la Figura 1.1.1 se puede observar la distribución espacial de estas obras las cuales constituyen un instrumento importante en la caracterización de las áreas. Otra limitante es que no se realiza un estudio detallado de la actividad sísmica de la región asociada a la posibilidad de licuación de los suelos.

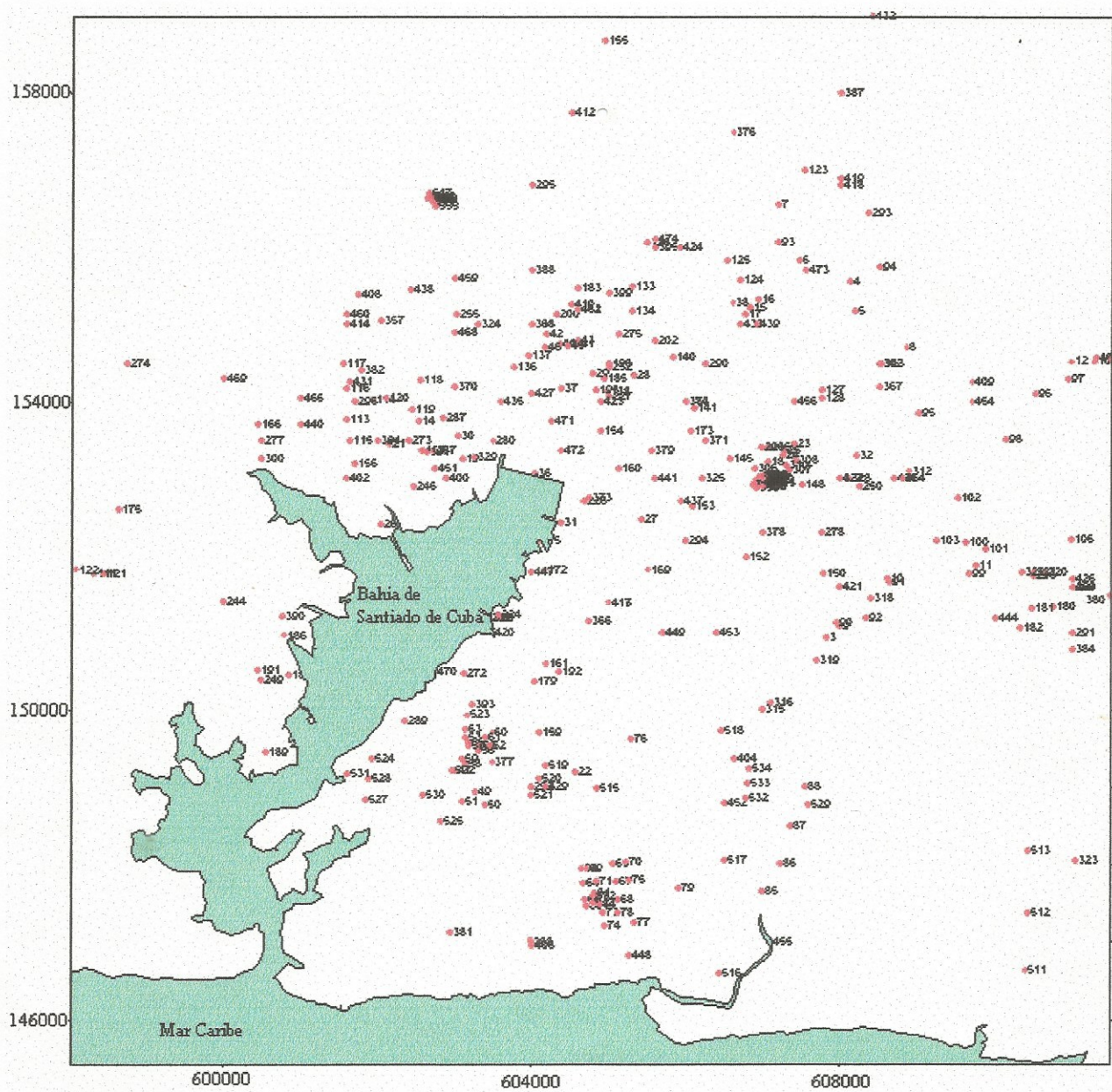


Figura 1.1.1: Representación espacial de los datos ingeniero geológicos del área de estudio.

1.2.- Objetivos.

Sobre la base de lo antes expuesto, nos proponemos los siguientes objetivos:

- 1.- Realizar la valoración de la posibilidad de ocurrencia del fenómeno de licuación en la ciudad de Santiago de Cuba y sus alrededores y sobre la base de las características ingeniero-geológicas y geomorfológicas de la cuenca, profundidad de las aguas subterráneas, así como una valoración de la actividad sísmica del área.
- 2.- Dar como resultado un esquema de Probabilidad de ocurrencia de licuación en la región de estudio.

1.3.- Justificación.

Como consecuencia de esta situación, las Naciones Unidas el 11 de Diciembre de 1987, en su Resolución 42/169, declara el decenio de 1990 al 2000 como un "Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales" (DIRDN), cuyo objetivo fundamental está dado en reducir, especialmente en los países en desarrollo, la pérdida de vidas, los daños materiales y las perturbaciones sociales y económicas causadas por desastres naturales como terremotos, deslizamientos, etc.

En el Segundo Período Ordinario de Sesiones de las Naciones Unidas de 1989, en el informe presentado por el Secretario General de la ONU, sobre el DIRDN, se establecen como meta a lograr, la elaboración de medidas para la evaluación, predicción, prevención y mitigación de los desastres naturales, mediante programas de asistencia técnica y transferencia tecnológica, proyectos de ensayo y actividades de educación y formación, adaptadas al tipo de riesgo y al lugar que se trate.

Por su parte el grupo de expertos creado para el DIRDN, propone la creación de programas nacionales, dirigidos a la determinación de las zonas expuestas a riesgos y la evaluación de los mismos sobre la base de estudios científicos de los fenómenos naturales potencialmente destructivos, de manera que permitan conocer su causa para minimizar sus consecuencias.

Cuba, país que se encuentra en vías de desarrollo, no está ajeno a los efectos de los fenómenos naturales, como es el caso de los sísmicos y los meteorológicos, catalizadores a su vez de fenómenos secundarios. Como parte del DIRDN, el Gobierno, por medio de la Defensa Civil y el Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI S), desarrolla un programa integral, dirigido a la reducción y mitigación de los desastres ocasionados por los terremotos en las zonas de alto riesgo sísmico.

La Sismicidad Histórica demuestra que la actividad sísmica se reporta en todo el territorio cubano. Sin embargo, la mayor peligrosidad se encuentra en la región sur oriental, por su ubicación en las proximidades del contacto entre las placas de Norteamérica y del Caribe, que genera todo un movimiento diferencial que convierte a este sistema de fallas transformantes en la principal zona Sismogénica del país.

La ciudad de Santiago de Cuba ha sido sacudida por más de 1000 sismos desde el año 1528 (Chuy, 1999) entre los que se encuentran 20 con potencialidad a catalizar fenómenos como el que pretendemos estudiar: 13 de 7; 5 de 8 y 2 de 9 grados, lo que hace de esta ciudad la de más alto peligro sísmico de territorio cubano.

Al tener estas experiencias históricas, es obvio la necesidad de evaluar la potencialidad de ocurrencia de fenómenos físico-geológicos inducidos por terremotos moderados y fuertes. Estos fenómenos que suelen ocurrir por inestabilidad de los estratos rocosos y cambios bruscos, que se catalizan por la ocurrencia de terremotos es importante conocerlos y prevenirlos, y así minimizar sus efectos.

Capítulo 2: Características geológico tectónico y sismológicas del área de estudio.

2.1 Características físico geográfica.

La ciudad de Santiago de Cuba se encuentra ubicada en la costa sur-oriental de la isla de Cuba, limita al Sur por las aguas del mar Caribe, al Norte por las elevaciones de la sierra de Puerto Pelado y Boniato, al Este por el macizo montañoso de la Gran Piedra, al Oeste con la parte centro occidental de la sierra maestra. Las coordenadas geográficas del área de estudio correspondiente en el sistema Lambert son:

X: 598031 - 611189

Y: 145426 - 160100

2.1.1 Condiciones geomorfológicas.

La cuenca de Santiago de Cuba se caracteriza por un relieve subordinado a varios factores tales como:

- Litología.
- Erosión (fluvial y marina).
- Tectónica (plicativa y disyuntiva).
- Meteorización.

En la zona costera pueden observarse 4 escalones de terrazas marinas bien definidos, surgidos de la combinación de un escarpe de falla costero y la abrasión marina. Inmediatamente después de la costa se observa un relieve de meseta, compuesto en su parte superior por calizas coralina dura, recristalizada con yacencia casi horizontal, debajo de esta aparece una caliza margosa o una marga compacta que es precedida en profundidad por una arcilla margosa muy blanda y fácilmente erosionable, este es la razón por la que al sobrepasar la erosión la capa de caliza recristalizada se forman grandes barrancos y las laderas de estas mesetas sean muy abruptas.

Hacia el N del área, donde comienza a aparecer el grupo El Cobre existe un relieve de cresta y de cuesta en dependencia de la yacencia de las rocas. Se observa además como las fallas desplazan las cuestas crestas horizontalmente rompiendo la continuidad de las líneas divisorias que forman las mismas. Las alturas mayores (100-231 m) están formado por tobas de diferentes granulometrías y cuerpos intrusivos y las zonas mas bajas están formadas por una porfirita basáltica que es fácilmente meteorizada y erosionada.

Toda el área se complica con una serie de escalones de fallas abrasivas y erosivas donde se producen los principales derrumbes de rocas. La tectónica plicativa juega un papel en el modelado del relieve, observándose como las zonas elevadas coinciden con pliegues anticlinales y las zonas llanas con sinclinales (Autopista y carretera de Marimón El Cobre). Se desarrollan hacia la parte sur del área un tipo de carso, muy joven en las rocas carbonatadas de la Formación Jaimanitas y Maya más acentuado en esta última, alcanzando las cavernas dimensiones considerables (Aguadores, El Morro). Al mismo tiempo hay desarrollo de otras formas cársticas como: furnias, casimbas, lapiez, etc.

2.1.2 Características hidrogeológicas generales.

Desde el punto de vista hidrogeológico de las aguas subterráneas en el área se aprecian a diferentes complejos y horizontes acuíferos. En tal sentido se pueden diferenciar complejos relacionados con las formaciones pre-neogénicas, neogénas y cuaternarias.

Las aguas de la formación El Cobre se caracterizan por ser aguas de fisuras o grietas, filoneanas de su corteza de intemperismo; la profundidad de estas es variable dependiendo de la morfología que presenta en el área esta formación, pudiendo presentarse como caso general mayor que 10 m. estas aguas se alimentan a través de las precipitaciones fundamentalmente y por las aguas fluviales a través de las grietas.

Las aguas que contienen las formaciones neogénicas ocupan la mayor parte del territorio estudiado, prácticamente todo el borde S al E de la bahía. Por sus características ingeniero

geológicas la permeabilidad es baja, siendo algo mayor en algunos puntos donde se localizan las calizas organógenas y cavernosas que subyacen a los sedimentos impermeables margosos o arcilloso. Estas aguas se pueden asociar con aguas estratofisurales, de fisura o grietas o también cársicas, la profundidad es variable, pero directamente en las rocas margosas y calcáreas de la formación La Cruz supera los 10m.

Las aguas subterráneas de los sedimentos cuaternarios resultan las mas ampliamente distribuida en el área de trabajo. A ella están asociadas todas las rocas subterráneas dentro del espesor del material terrígeno con diferentes propiedades, en la totalidad del área los niveles son menores a los 10m. Estos sedimentos están representados por depósitos aluviales, eluviales, marinos, artificiales y transiciones fundamentalmente con granulometría variada.

En el área no existe una red hidrográfica desarrollada, escasas corrientes fluviales la atraviesan y por lo general son de carácter intermitente, desapareciendo casi totalmente durante los periodos secos. Entre los ríos más importantes se citan los ríos San Juan, Sardinero entre otros que corren al este de la ciudad de Santiago de Cuba y desembocan en la costa sur, los ríos Los Guaos, Yarayó y Paradas (Cobre), que corren al oeste de Santiago de Cuba y vierten sus aguas en la bahía.

2.2 Características geólogo-tectónicas.

2.2.1. Estratigrafía.

Se cartografiaron las diferentes variedades litológicas que se observan en el área de estudio, haciendo énfasis fundamentalmente en las de edad Neógeno-Cuaternario, por ser las secuencias donde se asienta la ciudad de Santiago de Cuba.

La región oriental de Cuba posee una estratigrafía muy compleja debido a su variedad litológica, en este sentido se han realizado numerosos trabajos con diferentes criterios, de los

cuales utilizamos los empleados por Campos y Quintas (1972) y la Comisión Nacional del Léxico estratigráfico de la A.C.C (1997). A continuación daremos una breve descripción acerca de las formaciones presentes en el área de estudio propuestas por Pérez, N. (1983).

1. Paleógeno

Grupo El Cobre (P_1 - P_2^2): Compuesto por las formaciones Pílon y Caney, mientras que el volumen mayor de rocas que lo componen se ha subdividido en tres secuencias: inferior, media y superior (Pérez et al 1994). La Formación Pílon no se extiende en el área de los trabajos, por lo que aquí prescindimos de su descripción.

En esta área se desarrollan las tres secuencias del grupo El Cobre. La secuencia inferior (P_1) con un espesor variable entre 250 y 800 metros, se extiende hacia el sur del bloque El Cobre y la pendiente meridional del bloque Gran Piedra. Está constituida por diferentes tipos de rocas vulcanógenas y vulcanógeno-sedimentarias en distintas correlaciones y combinaciones alternantes, muy variables, tanto en sentido vertical como lateral.

Las transiciones entre ellas a veces son bruscas y otras graduales y en muchos casos es prácticamente imposible establecer delimitaciones entre ellas. Las rocas más abundantes son: tobas, tobas aglomeráticas, lavas y lavas aglomeráticas de composición andesítica, andesidacítica y dacítica, raramente riolítica, riodacítica y basáltica. Con estas rocas se intercalan tufitas y calizas; además, se asocian a este complejo vulcanógeno-sedimentario cuerpos hipabisales y diques de diversa composición. En su composición también participan tobas cineríticas, tufitas, tobas calcáreas, calizas tobáceas, areniscas polimícticas y vulcanomícticas y grauvacas.

El vulcanismo, de composición fundamentalmente andesito-basáltica y carácter tholeítico, fue intenso y explosivo en condiciones submarinas.

La secuencia media (P_2^1): tiene un espesor de 3500-4400 metros y está compuesta predominantemente por tobas pefito-aglomeráticas y aglomeráticas de composición

andesítica con intercalaciones de tobas finas, así como por clasto-lavas y aglomerados, rocas sedimentarias y efusivas desde basaltos hasta riolacitas, se debe destacar que aunque proporcionalmente los efusivos están subordinados, representan un volumen mucho mayor que el de las secuencias inferior y superior.

La secuencia superior (P_2^1 - P_2^2): tiene un espesor máximo de 3150 metros y está compuesta por tobas de andesitas y andesito-basaltos, lavas y rocas sedimentarias subordinadas. En la parte superior ocurren localmente tobas ácidas. En la región de El Cobre y Gran Piedra, la composición general de las rocas es más ácida que en el resto de la Sierra Maestra culminando el corte vulcanógeno y vulcanógeno-sedimentario, en esta área se desarrolla la Fm. Caney una secuencia Flyshoide compuesta por conglomerados, areniscas tobáceas, gravelitas, tobas, tufitas y calizas con escasos mantos de lava andesito-basáltica. Las tobas varían su composición desde media hasta ácida. La edad de esta formación es (P_2^2) y su espesor es de unos 1000 metros.

Más arriba, sobreyaciendo a la Fm. Caney del área se presenta la Fm. Puerto Boniato. Su espesor es reducido (no más de 20 m en el área) y su edad (P_2^2) parte media. Su litología más característica son calizas blancasaporcelanadas finamente estratificadas con intercalaciones de silicitas negro-parduscas y calizas biodetríticas subordinadas.

2. Neógeno

Formación La Cruz (N_1^1 - N_2^{1-b})

Según Pérez, N. (1983) se distribuye alrededor de la bahía de Santiago de Cuba, extendiéndose al Oeste en la zona de la Socapa y Ensenada de Cabañas, hasta las proximidades de Mar Verde formando una franja estrecha y sinuosa. Estos sedimentos parecen haberse depositado en una Cuenca muy local, formada por la subsidencia de un bloque durante un intervalo que se inicia en algún momento del Mioceno, que dio lugar a la Bahía de Santiago de Cuba.

Esta formación sobreyace a las secuencias del Grupo El Cobre en la cuenca de Santiago de Cuba, cubriendo la mayor parte del área de ésta. Su espesor no debe sobrepasar los 100 metros y está conformada por tres miembros:

1. **Miembro Quintero (qt) N_1^2 .** (Campos, 1972). Se desarrolla solamente en los alrededores de la ciudad de Santiago de Cuba, formado por conglomerados polimícticos de calizas y vulcanitas con matriz margosa o arenítica con cemento calcáreo más o menos desarrollado. De acuerdo con el Léxico Estratigráfico, el miembro Quintero esta cubierto concordantemente por el miembro Tejar que yace discordantemente sobre el Grupo El Cobre, cuestión ésta que no compartimos y que a continuación exponemos.
2. **Miembro Tejar (tj) N_1^3 - N_2^{1a} .** Se desarrolla en los alrededores de la Bahía de Santiago de Cuba, prolongándose en forma discontinua hacia el. Se observa una alternancia de calizas biodetríticas, calizas limosas y limoso- arcillosas, calcarenitas de matriz margosa, margas, aleurolitas y más subordinadamente arcillas conglomerados y areniscas polimícticas con cemento calcáreo, formadas principalmente por vulcanitas. Colores crema en los carbonatos, y gris verdoso y parduzco abigarrado en los sedimentos terrígenos. Yace concordantemente sobre el Miembro Quintero. Es cubierta concordantemente por el Miembro Santiago. Parece haberse depositado en condiciones de bahía, con un rosario de lagunas costeras con manglares. Las alternancias de materiales carbonáticos y terrígenos parece estar relacionada con periodos alternos de emersión y subsidencia. Se espesor no ha sido determinado con exactitud. Es probable que no alcance los 100 m.
3. **Miembro Santiago. (stg) N_2^{1b} .** Se desarrolla muy localmente en la provincia de Santiago de Cuba, son depósitos regresivos compuesta por argilitas calcáreas, limoso- arenáceas plásticas con interestratificaciones de aleurolitas polimícticas areno- arcillosas que contienen Ostrea y otros moluscos y calcilutitas laminares, a veces nodulosas. Yace concordantemente sobre el Miembro Quintero y discordantemente sobre el Grupo El Cobre. Es cubierta discordantemente por suelos pardos y aluvios del Cuaternario. Parece sobrepasar los 10 m.

Formaciones Cuaternarias

Las formaciones cuaternarias mapeadas en el área fueron las siguientes :

1. **Formación Río Maya (Rm) N_2-Q_1 .** Sus depósitos corresponden a episodios de desarrollo arrecifal que alternan con episodios de intenso aporte de materiales clásticos terrígenos, predominando los de desarrollo arrecifal. Está compuesta fundamentalmente por calizas biohémicas algáceas y coralinas muy duras de matriz micrítica, frecuentemente aporcelanadas conteniendo Corales en posición de crecimiento y fragmentarios, así como subordinamente moldes y valvas de moluscos, todos muy recristalizados, siendo abundante el coral *Acropora prolifera*. Las calizas se encuentran frecuentemente dolomitizadas. El contenido de arcilla es muy variable. Contiene intercalaciones de clastos terrígenos de variada granulometría. El color es blanco, amarillento, rosado o grisáceo. Su espesor oscila entre 30 y 80 m. Yace discordantemente sobre la Formación La Cruz. Es cubierta discordantemente por la Fm. Jaimanitas.
2. **Formación Jaimanitas (Js) Q_{111} .** La formación bordea todo el territorio insular Cubano, constituida por calizas biodetríticas masivas cársicas y fosilíferas, calcarenitas y a veces margas, yace discordantemente sobre la formación Río Maya. El espesor medio de esta formación parece ser de 8 a 10 mts aunque es probable que sea mayor. Su posición estratigráfica sobre sedimentos pliocénicos o pleistocénicos y el alto grado de preservación de su fauna equivalente a la actual apoyan una edad Pleistoceno superior, presenta marcadas formas de carso superficial de tipo lapiés. Sobreyace discordantemente a la formación Maya y la Cruz es sobre yacida discordantemente por la formación Camaroncito en la zona de Aguadores.
3. **Formación Camaroncito (Crt) Q_{111} .** Se desarrolla en forma discontinua, en pequeñas áreas, en la Santiago de Cuba. Compuesta por calcarenitas laminares de grano medio a grueso, bien cementadas, con diseminaciones de gravas polimícticas predominantemente finas. La coloración es abigarrada. Su subyacente no se ha observado. Es cubierta por la Fm. Jaimanitas, no se conoce el carácter del contacto. Su espesor oscila entre 3 y 4 m aunque en ocasiones puede ser mayor. Es posible que esta unidad forme parte de la Fm.

Río Maya, aunque su definitiva ubicación requiere estudios. Tiene la misma edad que la Formación Jaimanitas .

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

2.2.2. Tectónica.

El área de estudio forma parte del ala norte del Anticlinorium Sierra Maestra, cuyo flanco sur se encuentra hundido bajo el mar. La zona se encuentra situada dentro de la influencia que ejerce el sistema de fallas transformantes Bartlett-Caiman el cual constituye la frontera de contacto entre la placa del Caribe y la de Norteamérica, donde se registran los principales sismos de la región. Relevante importancia cobran las estructuras plicativas y disyuntivas, donde se pueden observar un gran número de fallas y pliegues que son detectados en el campo y nítidamente en las fotos aéreas gracias a su reflejo en el relieve actual, lo que afirma que esta zona es tectónica y sísmicamente activa.

Según algunos autores la Bahía de Santiago de Cuba se inicia en algún intervalo del Eoceno medio producto de la subsidencia de un bloque. Probablemente a fines del Plioceno ó durante el Pleistoceno, una falla submeridional cortó la depresión o graben de Santiago, elevando su borde izquierdo y rotándolo unos 45 grados hacía el sur, a juzgar por el corte existente en el margen occidental de la Bahía frente a la ensenada de Cabañitas.

Voughan (1919) observó certeramente los estrechos escalones abrasionales y la juventud de sus planos de fallas, lo cual subraya la idea de que el fallamiento latitudinal está asociado a los movimientos neotectónicos que demarcaron la Cuenca de Santiago de Cuba. Esta actividad se refleja igualmente en las terrazas marinas emergidas, de las cuales Kimball (1884) describe tres (165 mts, 175 mts y 350 mts).

En el relieve de tierra firme de Cuba oriental, el sistema de fallamiento neotectónico de

dirección Noreste se refleja en la configuración de la costa, los escarpes tectónicos, el diseño de la red fluvial, alineación de cadenas de alturas, orientación de terrazas fluvio - marinas y distribución de las formas cárnicas.

2.3.1 Sismicidad de la región de Santiago de Cuba.

La ocurrencia de terremotos en Cuba data del siglo XVI, pero no es hasta 1855 que Andrés Poey muestra con su Catálogo de sismos históricos que el archipiélago Cubano está sometido a un Peligro Sísmico Potencial. A partir de este momento son muchas las investigaciones sismológicas que se realizan hasta la fecha, teniendo como principal objetivo establecer los diferentes niveles de peligro sísmico en el país.

Toda la información sismológica tiene gran importancia para el análisis del comportamiento sísmico de un territorio dado, aunque debe ser utilizada teniendo en cuenta las características específicas del sitio en el momento de ocurrir el terremoto (infraestructura económica social).

La actividad sísmica de Cuba está determinada por dos formas de origen: de interior de placas y de entre placas, lo que hace que su estudio sea muy complejo en algunas áreas. En el primer tipo se destaca la Región Suroriental por la frecuencia con que históricamente ocurren terremotos de alta magnitud, lo que implica que sea considerada como la de mayor peligrosidad sísmica del país y se corresponde con la Zona Sismogénica de Bartlett-Caimán, donde se han reportado 22 terremotos fuertes, de ellos 20 en la provincia de Santiago de Cuba y 2, los más recientes en la provincia de Granma (Chuy, 1999).

Nos referiremos específicamente a la sismicidad de la región de Santiago de Cuba por ser el área de estudio. De los 961 sismos perceptibles del país (Chuy, 1999), 537 tuvieron epicentro en la provincia de Santiago de Cuba; esta ciudad desde su fundación en 1514 hasta nuestros días ha sido total o parcialmente afectada por terremotos fuertes.

Es bueno significar que de estos sismos fuertes con origen en la estructura señalada, cercanos a la ciudad de Santiago, 2 de ellos produjeron intensidad (I) de 9.0 MSK en 1766 con magnitud $M_s=7.6$ Richter y en 1852 con magnitud $M_s=7.3$ Richter respectivamente (Chuy, 1999). Se reportaron daños considerables en toda la región oriental y en el caso de la ciudad de Santiago se produjeron varias afectaciones; por ejemplo el terremoto del 20 de Agosto de 1852, el más fuerte reportado durante el siglo XIX en nuestro país provocó el deslizamiento general de grandes piedras en la zona de la Sierra Maestra, el secado de arroyos y manantiales, así como largas y anchas grietas en terrenos secos y húmedos. Cabe señalar que las mayores destrucciones descritas en edificaciones ese entonces, fueron ubicadas en la ciudad de Santiago de Cuba, principalmente en las iglesias y locales de la administración pública. (Chuy, 1999).

Otros terremotos que recientemente han afectado a esta ciudad, pero con menor fuerza se reportan en 1932 ($M_s=6.75$; $I=8.0$) y en 1947 ($M_s=6.75$; $I=7.0$), (Chuy, 1999). En el primero fueron afectadas el 80 % de las edificaciones de la ciudad y sus alrededores; además se reportaron alteraciones batimétricas frente a la costa, tanto de emersión (al Este de la bahía de Santiago de Cuba) como de inmersión (oeste de la bahía).

Además de estos sismos fuertes ocurridos en la estructura señalada, cercanos a la ciudad de Santiago de Cuba, son de considerar otros sismos fuertes con epicentro en la prolongación de esta Zona Sismogénica de Bartlett-Caimán, localizados en zonas activas al Norte y Sur de La Española, donde históricamente también se reportan sismos de magnitudes grandes (Chuy, Álvarez, 1988), incluyendo uno de magnitud $M=8.2$ en 1842, cuya área de perceptibilidad cubrió toda nuestra región oriental, señalándose incluso en el área de esta provincia reportes de 7 grados de intensidad MSK. Otros sismos que podemos mencionar de estas características son los ocurridos en 1770 ($M_s=7.9$), en 1887 ($M_s=7.9$) y en 1946 ($M_s = 8.1$).

Sin embargo, a pesar de presentar una menor frecuencia la ocurrencia de terremotos en las zonas con sismicidad de interior de placa, su ubicación cercana a las costas en los casos de que se localicen en las acuatorias o bien en el interior del territorio, así como la poca

profundidad de los hipocentros de los sismos que se generan en ellas, hacen que en ocasiones los efectos de sismos de menor magnitud reporten afectaciones significativas.

Los ejemplos más significativos de esta actividad sísmica de interior de placa, son los terremotos ocurridos en octubre de 1905 con epicentro en Songo, el 27 de Enero de 1922 en Guantánamo y el del 5 de marzo de 1927 en Santiago de Cuba y Guantánamo, (Chuy et al, 1988).

De lo anterior expuesto podemos inferir que el valor estimado de la intensidad a esperar en la región de estudio depende de la ubicación del epicentro, por tanto la influencia de Zonas Sismogénicas regionales es de obligatoria observación, porque en muchas ocasiones el mayor peligro sísmico a que una región está sometida no proviene de Zonas Sismogénicas localizadas en ella, sino de zonas vecinas en las que sus condiciones sismotectónicas le imponen una marcada peligrosidad.

La Figura 2.3.1 representa las *Zonas de Origen de Terremotos (ZOT) para la Región Oriental*, (Comisión Ad-hoc, 1991) las cuales influyen directamente en la ocurrencia de terremotos en la región Oriental. A cada zona se le asocia una magnitud determinada y en dependencia del valor que se le asocia se categorizan. Al Sur con Categoría 1 tenemos la zona Bartlett–Caimán; con Categoría 2 tenemos a la zona Cauto-Nipe y Baconao, y con Categoría 3 tenemos a Cauto Norte, Bayamo y Purial.

Los niveles de actividad sísmica de estas Zonas Sismogénicas en la provincia se representan en la Figura 2.3.2, donde se observan los terremotos ocurridos en la Provincia de Santiago de Cuba (Long. 75.20-77.20 W y Lat. 19.50-20.50 N) en el período de 1968 - 1999. Es importante conocer que se toman todos los terremotos con $M \geq 2$ porque estos valores se consideran dentro del umbral de perceptibilidad. En la Figura 2.3.3 se representan todos los terremotos con $M \geq 2$; en la Figura 2.3.4 se representan solo los terremotos de $M \geq 3$ y en la Figura 2.3.5 aparecen cartografiados los epicentros de los terremotos con $M \geq 4$. Se evidencia en estos mapas que la mayor actividad se asocia a la ZOT Oriente 1.

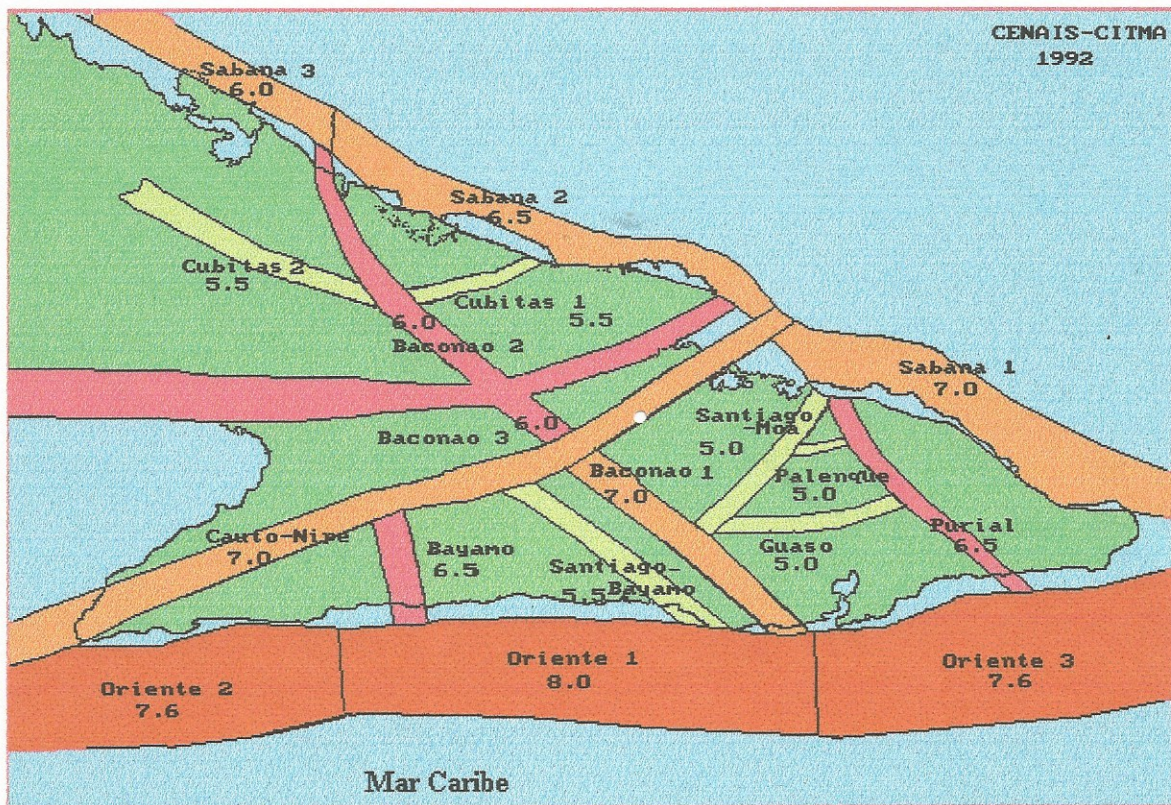


Figura 2.3.1: Esquema de Zonas de Origen de Terremotos de la Region Oriental

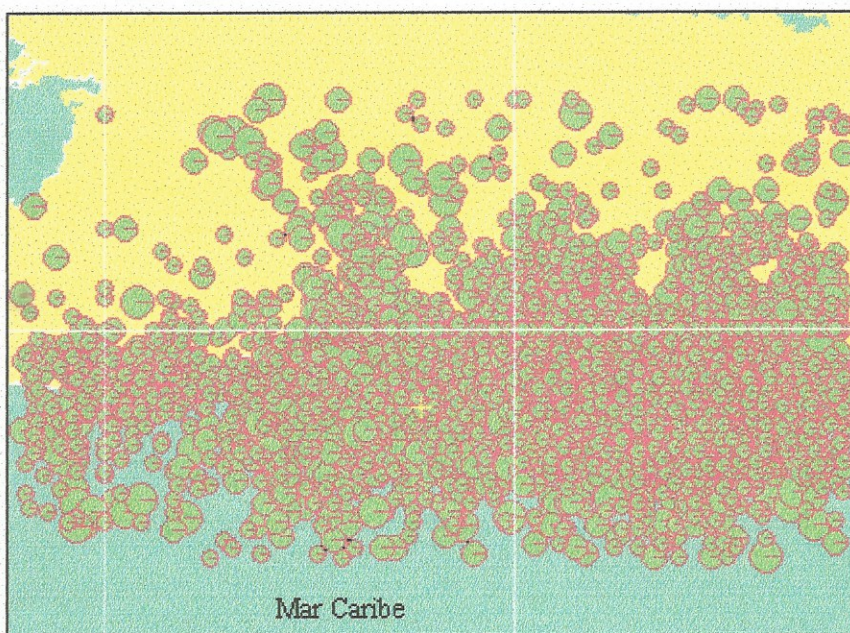


Figura 2.3.2: Representación de todos los terremotos ocurridos en la provincia de Santiago de Cuba desde 1968-1999 con $M \geq 2$.

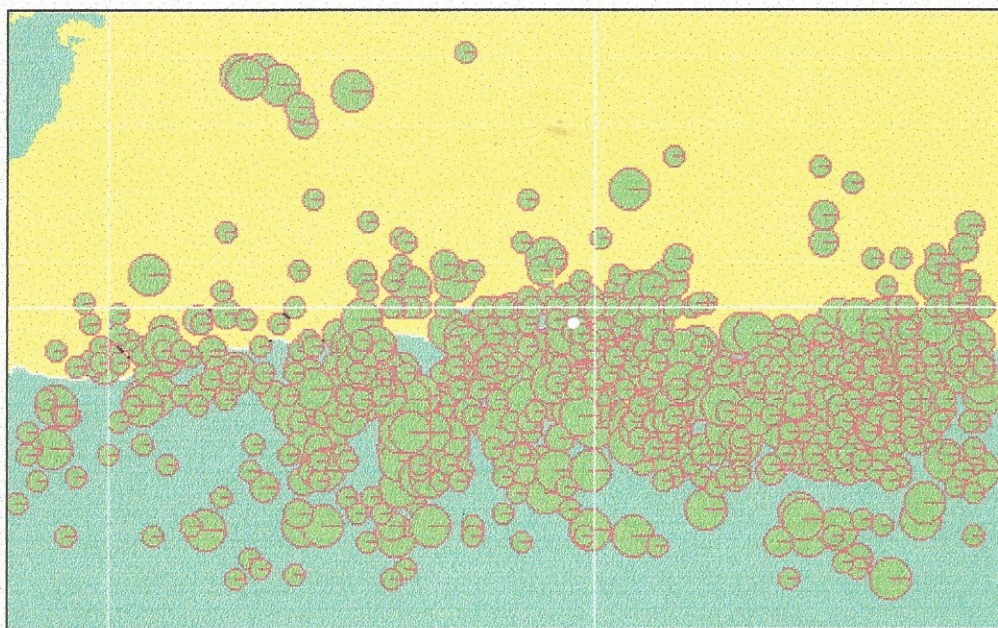


Figura 2.3.3: Representación de los terremotos con $M \geq 2$ en el período de 1969-1999

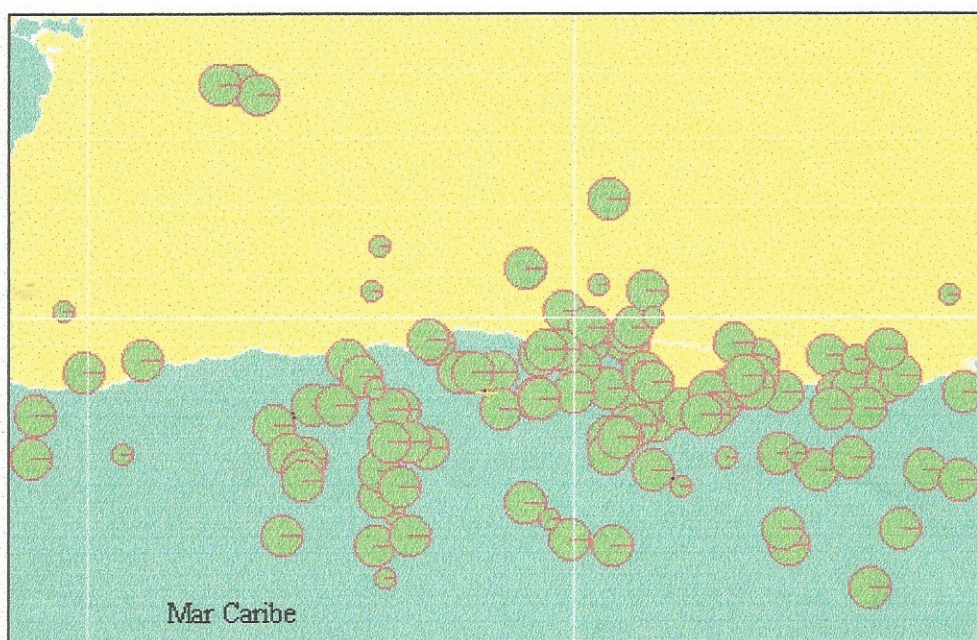


Figura 2.3.4: Representación de todos los terremotos con $M \geq 3$ ocurridos en el período desde 1968-1999.

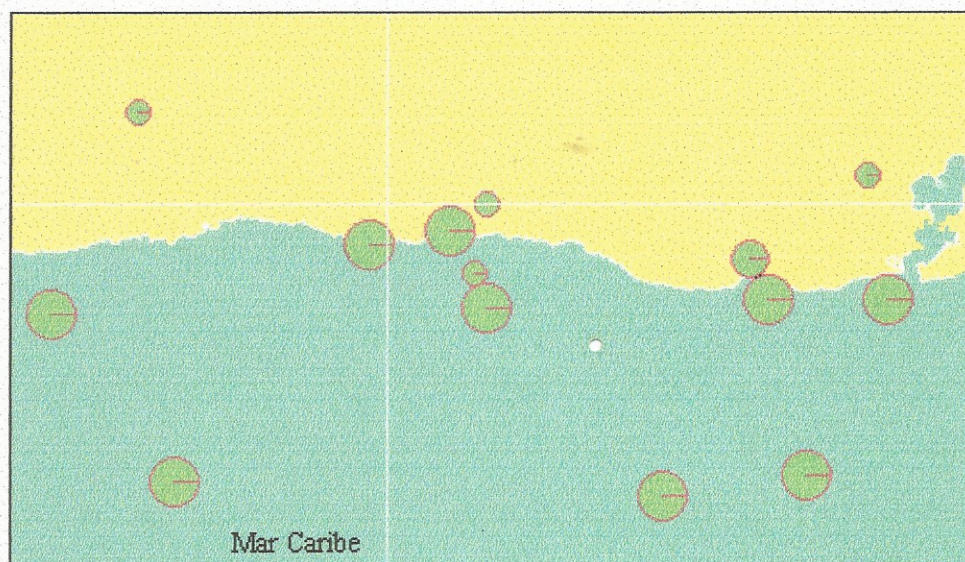


Figura 2.3.5: Representación de todos los terremotos con $M > 4$ ocurridos en el período desde 1968-1999.

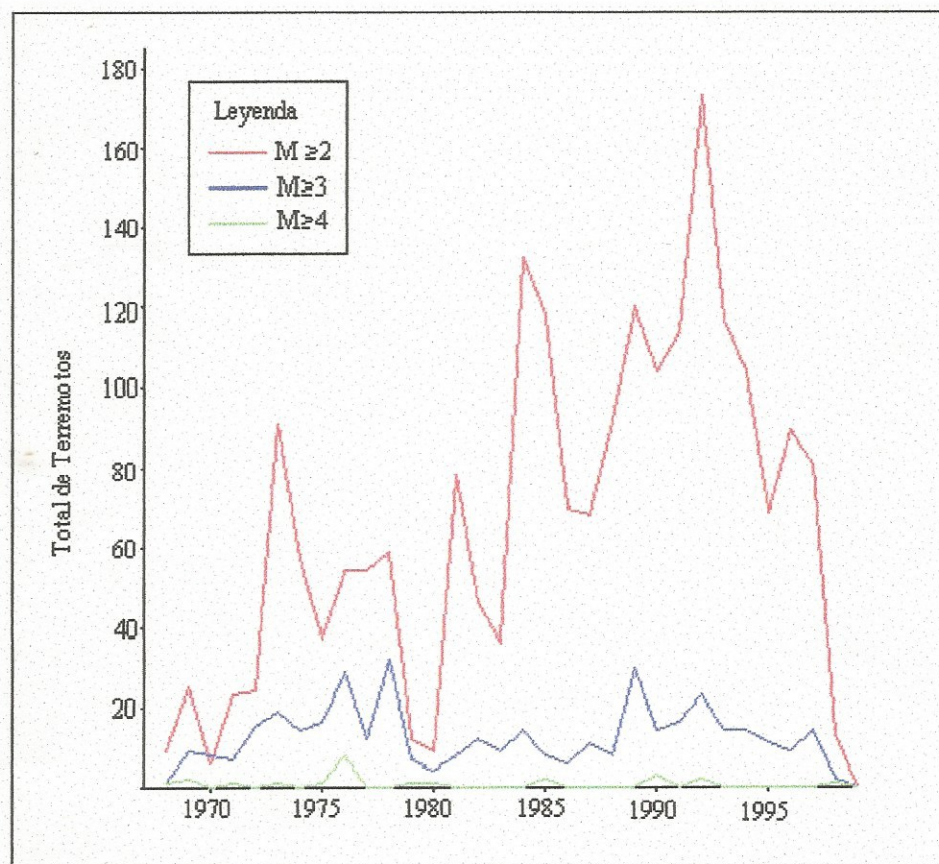


Figura 2.3.6: Distribución por años de todos los terremotos ocurridos en el período desde 1968-1999.

En la Figura 2.3.6 podemos ver la distribución de los terremotos en Cuba Oriental con magnitudes $M \geq 2$, 3 y 4 por año y considerando el modelo de relajación de esfuerzos en la generación de los terremotos, es evidente que en esta región y durante períodos de tiempo, el número de terremotos pequeños es mucho mayor que el de los grandes. En ellos se significa que los años con mayor actividad de sismos corresponden a 1973 - 1980 y de 1987-1993, en el primer caso se asocia la gran cantidad de sismos a la gran cantidad de réplicas que acompañó al terremoto de Pílon en 1976 ($M_s=5.7$) y en el segundo a la ocurrencia de 2 sismos ocurridos uno el 22 de marzo y otro el 4 de septiembre de 1990 en Santiago de Cuba.

2.3.2. Peligro Sísmico de la región.

Para definir la Peligrosidad Sísmica de una región determinada se toman en cuenta tres aspectos fundamentales:

- El modelo estadístico de la ocurrencia de terremotos y sus efectos.
- Las Zonas Sismogénicas localizadas en la región y sus zonas cercanas con sus correspondientes parámetros del Régimen Sísmico.
- La Ley de Atenuación de la intensidad sísmica, para cuantificar los efectos y afectaciones de los terremotos con sus características regionales, transformando luego sus valores en términos de la intensidad sísmica y de la aceleración horizontal.

Con relación a las características del proceso de ocurrencia de los terremotos fuertes en el tiempo, puede decirse que en esta región se observan períodos de actividad y períodos de prolongada calma sísmica; que en el caso de los sismos perceptibles, esto puede estar relacionado con falta de información macrosísmica, ya sea debido a la poca importancia prestada a estos sismos o por no estar muy pobladas las regiones donde estos terremotos se reportaron.

Chuy y Alvarez, (1995) para obtener los mapas de intensidad sísmica (I) y aceleración horizontal máxima (A_h-m) de Cuba, procesaron la información existente macrosísmica e

instrumental; considerando suelos medios del tipo de perfiles de suelo S2 (depósitos estables de suelos no cohesivos o arcillas duras cuando su profundidad hasta la base rocosa excede los 60 m) y una probabilidad de ocurrencia del parámetro de amenaza sísmica del 15 % con tiempos de vida útil de las instalaciones de 50 años. En los mapas detallados, que se presentan en las Figuras 2.3.7 y 2.3.8, (Chuy et al, 1992) se evidencia que las zonas de mayor peligrosidad en la región de estudio se localizan al Sur de la misma.

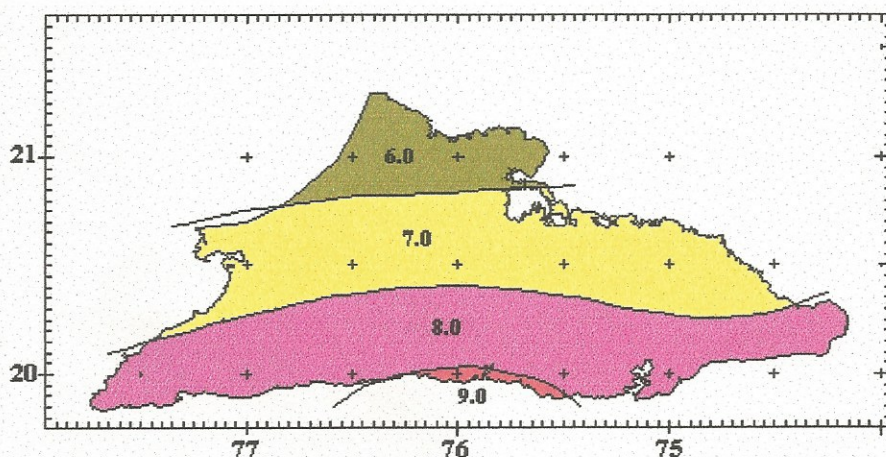


Figura 2.3.7: Mapa de Intensidades Máximas para Tiempos de Vida Útil $t=50$ años y Probabilidad de ocurrencia del 15 % de la Región Oriental. Escala Original 1:1 000 000. Tomado de Chuy et al, 1992.

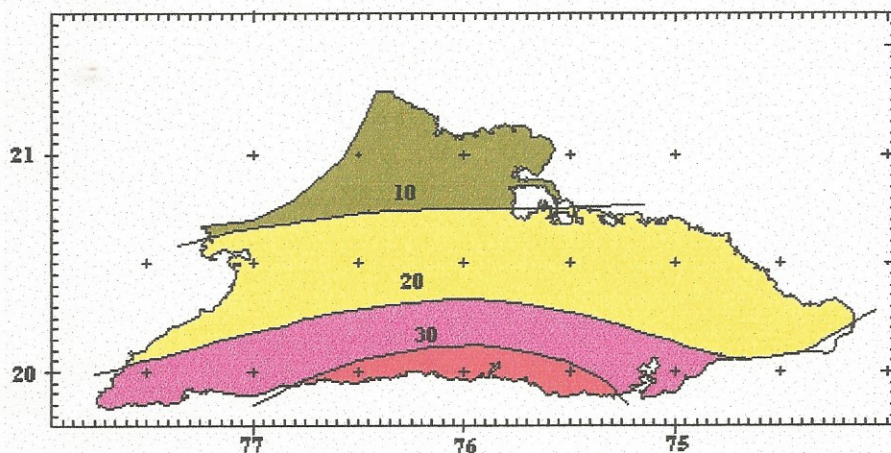


Figura 2.3.8: Mapa de aceleraciones horizontales máximas A_h (%g) para tiempos de vida útil $t=50$ años y Probabilidad de ocurrencia del 15% de la región Oriental. Escala Original 1:1 000 000. Tomado de Chuy et al, 1992.

Los mapas de peligrosidad, los valores obtenidos para cada franja o zona pueden sufrir modificaciones (incrementos o decrementos) en dependencia del punto particular en que se localice, así como de las condiciones ingeniero-geológicas y tipos de los suelos en que estos se encuentren.

Teniendo en cuenta la posibilidad de ocurrencia de vibraciones tales que produzcan el fenómeno objeto de nuestro estudio, hace que tenga mayor peso la necesidad de esta investigación. Todo ello permite presentar y evaluar las características de la respuesta de los suelos ante sismos en esta ciudad y sus alrededores, con el objetivo de validar el pronóstico de los posibles daños.

Para obras de menor importancia sin requerimientos sismorresistentes pueden utilizarse los valores propuestos en la nueva Norma Sísmica Cubana que para Santiago de Cuba propone un valor de aceleración de 0.3 g que coincide con los valores de VIII grados de intensidad de la norma vigente. (Chuy y Alvarez, 1995).

Conociendo las características ingeniero-geológicas del área podemos decir que el valor de aceleración crítica de la ciudad de Santiago de Cuba para que se produzca el fenómeno de licuación, está en el orden de 0.3 g debido a que los suelos no son típicamente arenosos, ni están totalmente saturados de agua y que para las zonas donde se hizo el cálculo de aceleración efectiva puede producirse el fenómeno. Por tal razón a la hora de construir cualquier obra sería importante tener en cuenta.

2.3.3. Análisis de la sismicidad de fondo.

En zonas como la estudiada, donde está demostrado la existencia de fallas activas de menor orden (Ruedas et al., 1994) es importante analizar la sismicidad de fondo, la cual es utilizada en el análisis estructural y la evaluación de los posibles efectos causados por sismos de baja energía, asociados a zonas tectónicas cercanas, Zapata (1997) se determinó los efectos máximos para magnitudes de 3.0, 3.5 y 4.0 grados a una distancia hipocentral de 10 Kms y determina que los efectos para sismos de baja energía no producirán daños

considerables, lo cual garantiza las estructuras. Los cálculos de estos sismos tienen la misma influencia para toda la cuenca y consideramos puede ser generado por cualquiera de las estructuras locales existentes en el área.

2.3.4 Evaluación de los efectos sísmicos.

Para determinar los valores de aceleración horizontal efectiva de las zonas más susceptibles al fenómeno de licuefacción, se determinaron éstos en los puntos centrales de las mismas por corresponder en cada caso a su área de influencia, teniendo en cuenta su representatividad en las zonas propuestas. En la Figura 2.3.9 aparecen los valores calculados de aceleración horizontal efectiva de las áreas de mayor peligro, por corresponder a perfiles de suelo S3 y S4, según la Nueva Norma Sísmica Cubana, luego de su correlación por relaciones empíricas entre los diferentes parámetros dinámicos (Chuy, Comunicación personal). El conocimiento y utilización de estos valores son fundamentales para la prevención de daños, al poder diseñar los edificios y estructuras de acuerdo con las intensidades máximas que se espera alcanzar en sus lugares de ubicación.

Según los reportes de los daños de los terremotos históricos que han afectado a la ciudad, no aparecen reportes de ocurrencia de licuación. Nosotros con el objetivo de asociar daños reportados al fenómeno que se pretende estudiar, hacemos una búsqueda bibliográfica de los terremotos más importantes y donde se reportan serios daños de las estructuras, partiendo de las características de esos terremotos, características ingeniero geológicas del lugar y profundidad de las aguas subterráneas. Podemos inferir que la pérdida de sustentación del suelo en la Alameda en el muelle, en la zona de desembarque, durante el terremoto del 3 de Febrero de 1932, (Figura 2.3.10) puede ser producto de la ocurrencia de licuación del suelo. En el terremoto del 7 de Agosto de 1947 y el del 20 de Agosto de 1952 hubo varios edificios con pérdida de sustentación en la zona portuaria. Teniendo en cuenta que en los lugares que estamos señalando se han producido incrementos significativos de los valores de intensidad durante estos terremotos por encima del valor de intensidad asignado a ellos; podemos plantearnos como hipótesis que estos incrementos estén relacionados al fenómeno de licuación y por tal motivo proponemos que en lo sucesivo se

hagan muestreos de estos sectores.

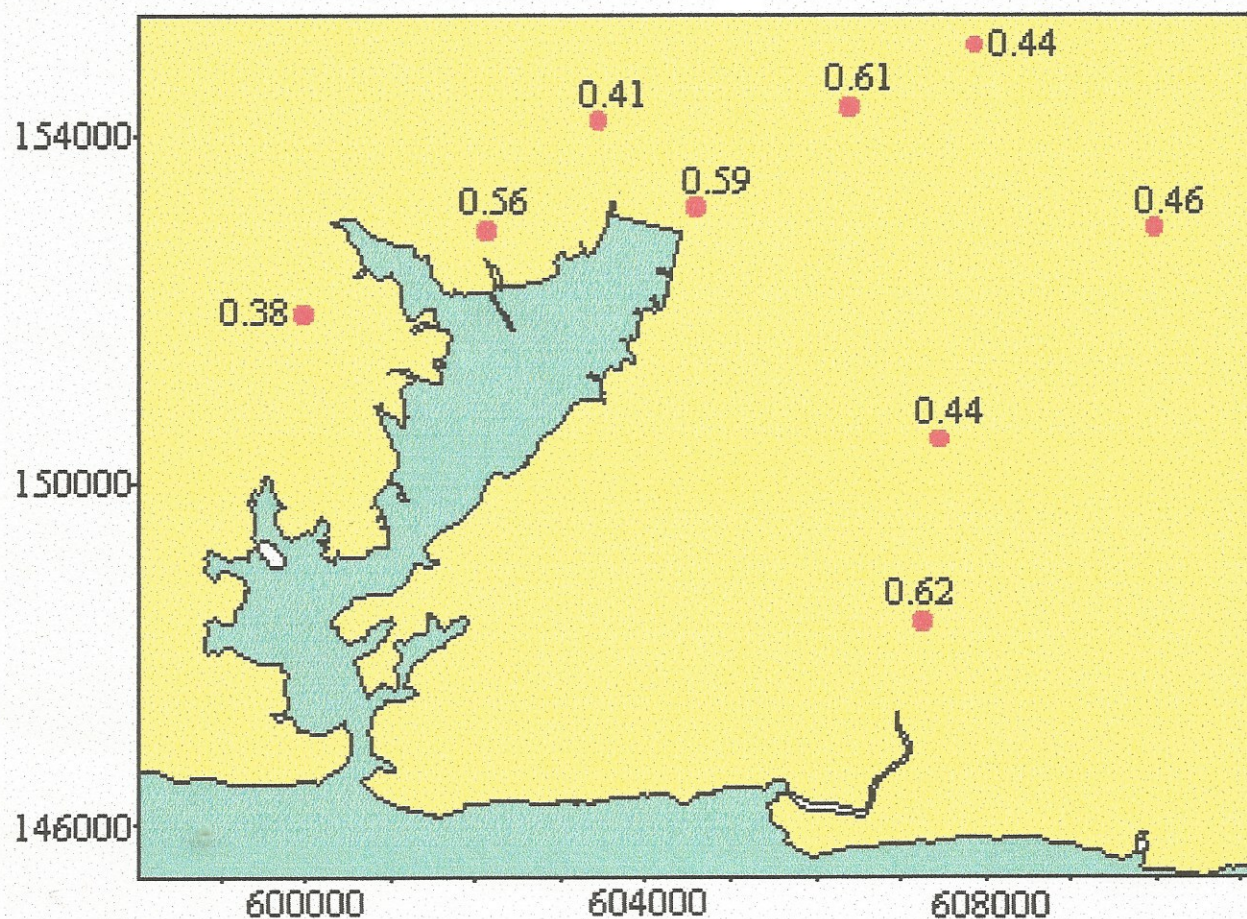


Figura 2.3.9: Valores de Aceleración Efectiva de las áreas de mayor peligro.

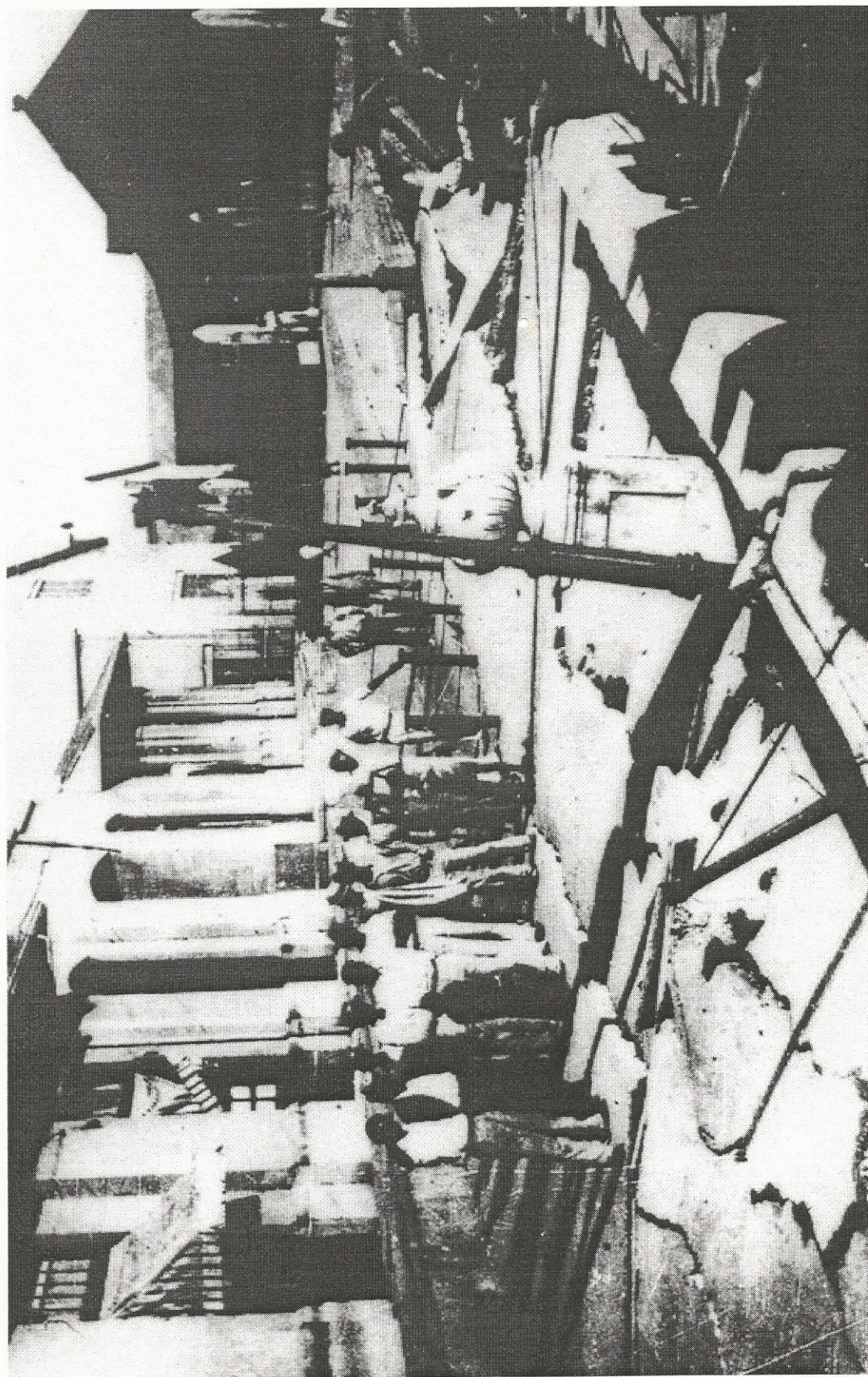


Figura 2.3.10: Daño producido en la zona de la Alameda durante el Terremoto del 3 de Febrero de 1932

Capítulo 3: Metodología de ejecución y procesamiento.

3.1 Descripción del fenómeno estudiado.

Los fenómenos físico-geológicos inducidos que pueden aparecer como consecuencia de intensas lluvias y/o sismos moderados y fuertes permiten ser evaluados con vistas a una zonación en caso de ocurrencia de sismos moderados y fuertes en Santiago de Cuba y sus alrededores, por lo que los definiremos conceptualmente de acuerdo a los estudios de Soloviev (1980) y Lomtatze (1986).

A fin de evaluar la susceptibilidad de licuación en los suelos, es necesario estimar la posible aceleración y la profundidad a la cual se encuentra la capa concreta del suelo cuyas propiedades dinámicas se determinan en las pruebas de laboratorio. La exactitud con que se delimite el área de licuación dependerá en gran parte de la cantidad de datos de superficie y de la fiabilidad de los mismos.

También, Soloviev propone que las estructuras ubicadas encima de la masa deslizante generalmente no sufren daños de importancia, pero las ubicadas en la zona deprimida están sujetas a tan grandes presiones diferenciales, que a menudo quedan totalmente destruidas; así mismo, aquellas estructuras ubicadas en las inmediaciones de la base del área deslizada pueden ser levantadas o sobreempujadas por el corrimiento lateral.

La licuación de los suelos es un fenómeno físico caracterizado por la completa pérdida de resistencia al corte. Es el resultado del aumento de la presión de poros causado por una deformación cíclica: cuando un material granular de suelo, tales como las arenas, son sacudidas y estas son sometidas a una rápida compactación del suelo, estando además saturado, el resultado de esta compactación da un rápido aumento de la presión de poros (u). En consecuencia como la resistencia de corte (S) se relaciona de forma simple y con la tensión efectiva $\sigma' = \sigma - u$, especialmente en suelos cohesionados, la licuación de los suelos puede ocurrir cuando el aumento de la presión de poros conduce a desaparecer la fuerza efectiva.

Como consecuencia de este fenómeno físico, las estructuras geológicas principales con riesgo son las estructuras jóvenes, como son los depósitos pobremente consolidados, tales como formaciones aluviales y litorales, también tierras de relleno construidas por el hombre.

Las principales consecuencias causadas por la licuación son dos: la pérdida de la capacidad de presión de los suelos bajo las cimentaciones (como es el caso de Niigata, Japón 1964) y el desplazamiento subhorizontal ocurrido sobre la superficie del plano (bancos de ríos por ejemplo como fue en 1960 (Chile) (Figura 3.1).

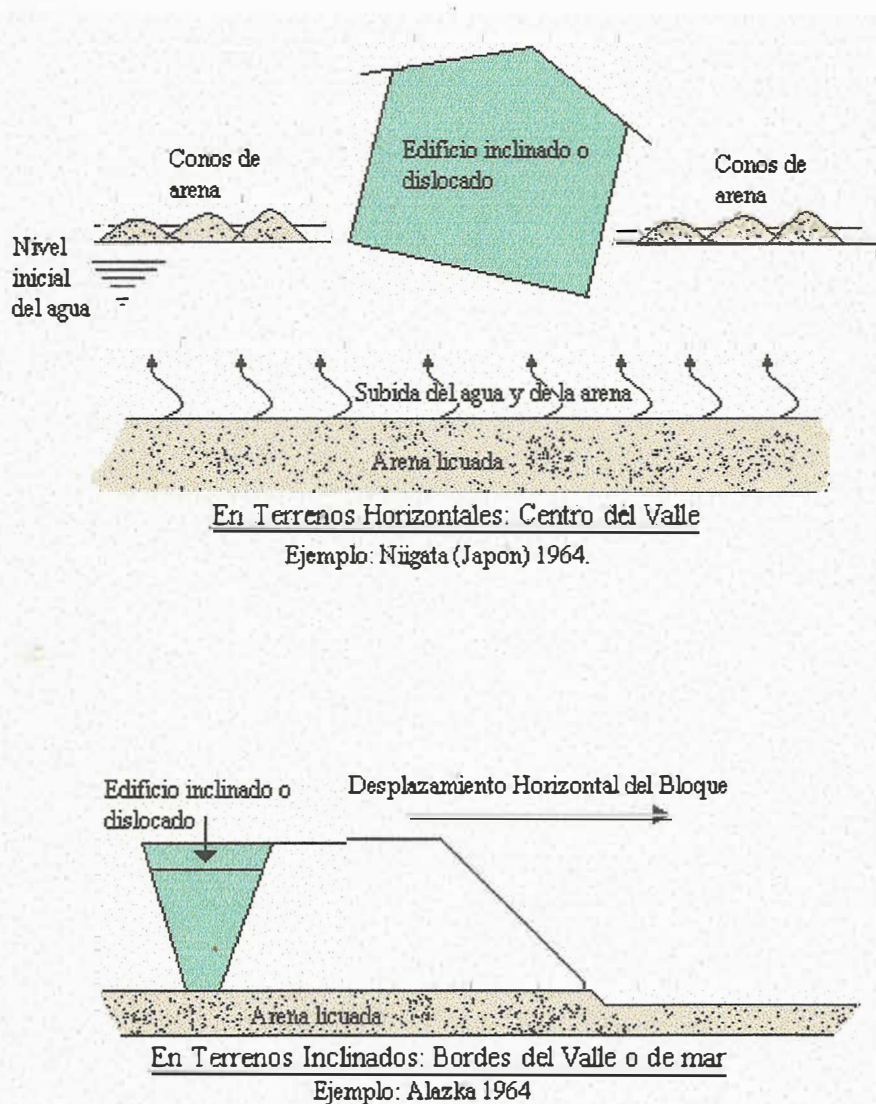


Figura 3.1: Ejemplo de Daños Ocurridos en suelos Licuables.
 Caso de Niigata, Japon 1964.

3.2. Metodología de procesamiento.

Las investigaciones de posibilidad de ocurrencia del fenómeno de licuación aparece recogida en los códigos constructivos (Japan Working Group, 1992 y AFPS, 1993) con la intención de resguardar las estructuras ante las sacudidas sísmicas, lo cual no se soluciona con mapas de zonificación, de aquellas zonas donde pueden aparecer aceleraciones superiores a los 0,3 g (Ishihara, 1985). Durante mucho tiempo estas investigaciones vieron su importancia limitada, pero en la actualidad se revitalizó su empleo con regulaciones para el uso y explotación de los terrenos. La seguridad de los sitios ante los terremotos está determinada por las características del peligro geológico.

En los siguientes acápites se describen los diferentes métodos utilizados en la determinación de las posibles zonas susceptibles a licuar, en algunos casos estos métodos fueron adaptados a nuestras condiciones y características. No contamos con una base de datos lo suficientemente homogénea para hacer el análisis grado 2 con todo detalle por lo que tuvimos que sumar en algunos casos los criterios de una tabla en otra.

La ocurrencia de licuación proviene de la combinación de dos factores:

- Uno interno caracterizado por la tendencia de un suelo dado o sitio a licuar, el cual es llamado susceptibilidad de licuación.
- Otro externo, el cual está caracterizado por la acción de carga en relación con la tierra en movimiento, esto es frecuentemente referido como oportunidad de licuación, y representa la capacidad del terreno a causar la licuación a una distancia dada de la fuente.

La combinación de estos factores dan el sitio actual de riesgo de licuación, lo cual es frecuentemente llamado susceptibilidad de licuación.

3.2.1. Susceptibilidad de licuación.

La estimación de la susceptibilidad de licuación se da generalmente por medio de la comparación de la fuerza inducida por la acción de carga y la resistencia del suelo a licuar.

La acción de carga se puede especificar de diferentes formas intensidad, aceleración máxima del espectro del acelerograma real o artificial; para simplificar nosotros podemos utilizar simplemente un grupo de movimientos caracterizados: intensidad, aceleración máxima, "duración equivalente"

Lo anterior permite evaluar la potencialidad real ocurrencia del fenómeno de licuación en una ciudad de alta densidad poblacional y gran volumen de industrias, trayendo consigo afectaciones económico-sociales incalculables. Apoyamos nuestra investigación con la utilización de varios métodos que aportan información valiosa y de bajo costo.

En años recientes estos trabajos alcanzan un alto reconocimiento de ingenieros, científicos y planificadores, debido a la ocurrencia de grandes desastres producto de efectos físico-geológicos inducidos a gran escala por la aparición reiterada de terremotos fuertes y catastróficos.

En nuestro trabajo valoramos y estudiamos por datos geológicos, geomorfológicos, geotécnicos en menor grado y niveles freáticos la zona de estudio y las clasificamos en tres categorías: licuable, posiblemente licuable y no licuación.

Al analizar en Santiago de Cuba la información ingeniero-geológica (calas y sus propiedades) se encuentra que la profundidad del 80 % de las perforaciones están entre 5 y 10 metros y son realizadas para investigaciones de suelos de proyectos constructivos. Son un instrumento imprescindible para el trabajo, pero no cubren uniformemente toda la ciudad por tal razón nos apoyamos de los trabajos realizados con fines de ingeniería (Heredia et al., 1982). No obstante, las referencias presentadas corroboran que la estrategia presentada para la evaluación y pronóstico de las amenazas geológicas es correcta y las técnicas de procesamiento utilizadas, las empleadas en la actualidad en el mundo.

3.2.2. Correlación geológica.

No obstante a pesar que la información histórica no siempre está disponible siempre es

posible en estas áreas usar una correlación empírica derivada de observaciones pasadas en varios lugares y vincular la ocurrencia de licuación a factores geológicos y geomorfológicos. Tal correlación cualitativa ha sido establecida por varios autores y resumida en las siguientes tablas; las que muestran generalmente los sedimentos que tienen una gran resistencia a la licuación, sedimentos con gran edad y donde los procesos eólicos y fluviales ayudan a clasificar a los sedimentos granulares del suelo en estados relativamente sueltos, lo que es una condición indispensable para una alta susceptibilidad de licuación; adicionando la profundidad de las aguas.

Tabla 3.2.2.1. Unidades geomorfológicas que se tienen en cuenta en la susceptibilidad de licuación (Iwasaki et al 1982.)

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

Tabla 3.2.2.2. Susceptibilidad de licuación de los sedimentos de acuerdo a su edad y profundidad de las aguas subterráneas. (Iwasaki et al 1982.)

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

Tabla 3.2.2.3. Unidad geomorfológica detallada de susceptibilidad de licuación sujeta a un grupo de movimientos de intensidad VIII según la escala de M.M. (Iwasaki et al 1982.)

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

3.2.3. Criterio magnitud distancia.

Si la actividad sísmica de un área es conocida a partir de los datos históricos, la máxima extensión de área susceptible a licuar puede ser estimada a partir de las magnitudes de los eventos a ocurrir en el área. Ambraseys y Younds and Perkins han investigado la ocurrencia de licuación durante terremotos pasados y han planteado la "distancia" R entre el área epicentral y el sitio más lejano licuado en función de la magnitud del terremoto.

Diferentes curvas han sido propuestas, presentaremos unas de las más recientes las que toman en consideración la definición más adecuada de la distancia. La Fig. 3.2 representa las curvas propuestas por Youd y Perkin (1978) y Ambreseys (1988).

Pretendemos demostrar que con la aplicación de este criterio se puede producir el fenómeno de licuación en el área de estudio, analizando las características de magnitud y distancia de los terremotos de gran magnitud que a lo largo de toda la historia han afectado la ciudad y sus alrededores, y que según los autores los terremotos que cumplen con la condición de Magnitud-Distancia pueden producir daños por licuación de los suelos siempre teniendo en cuenta el tipo de suelo que puede ser susceptible.

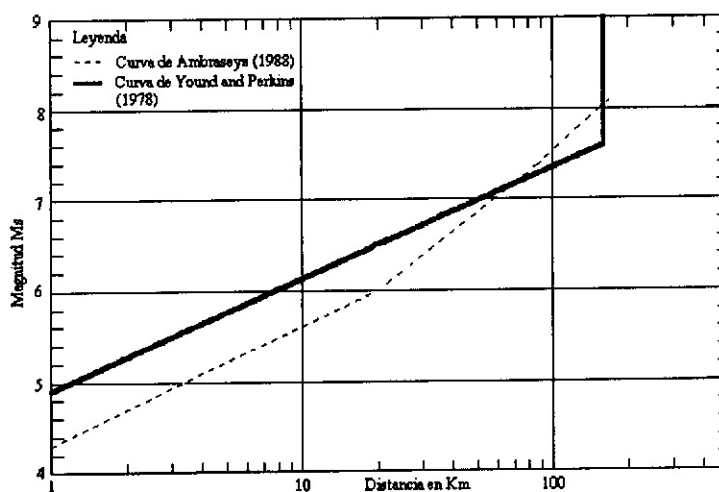


Figura 3.2: Curvas utilizadas en el método de Magnitud/Distancia

3.2.4. Criterio Intensidad.

La máxima extensión de licuación también puede ser groseramente estimada sobre la base de la intensidad sísmica esperada. Investigadores japoneses muestran a partir de observaciones de ocurrencia de licuación e intensidad, que este fenómeno ocurre solo en áreas bajas compuestas por sedimentos del Holoceno que puede ocurrir sólo para intensidades mayor o igual a 8 grados en la escala Mercali Modificada (M.M.); de modo que hay menos posibilidad de ocurrir la licuación cuando la intensidad sea menor. Los grados de intensidad 8 en la escala M.M. equivalente a 5 en la J.M.A. puede por tanto ser usada como la primera intensidad peligrosa para que ocurra el fenómeno; los grados 4 (J.M.A.) ó 6-7 (M.M.) son para la licuación insignificante.

3.3. Niveles de estudio y variables utilizadas.

En el pronóstico de los posibles riesgos inducidos por sismos fuertes presentado por el Japan Working Group (1992) se analiza, generalmente, la seguridad contra la fuerza de los terremotos de dos aspectos:

- las estructuras de las edificaciones;
- los sitios escogidos para instalaciones industriales o sociales.

Ellos estudian parámetros para identificar, evaluar y valorar los peligros geotécnicos, y representar las normas en forma de mapa o inventarios con mayor o menor grado de detalle por las escalas y necesidades de uso. Por lo general, los resultados son presentados como mapas de amenaza potencial con zonas de diferentes niveles o potencialidad de afectación, que se nombran comúnmente mapas de zonificación, peligro, amenaza e impacto. Estos mapas son usados de diversas formas para la evaluación de la mitigación de desastres, de acuerdo con:

- la planificación y uso del suelo;
- la implementación de medidas para la mitigación;
- los códigos o regulaciones constructivas.

El detallamiento de los mapas y el análisis de su nivel de confiabilidad que incluye objetivos de diversa índole, rigurosidad y escala (Japan Working Group, 1992) permite clasificarlos en tres niveles, que presentamos a continuación, haciendo énfasis en cada grado de análisis y de detallamiento, siendo ésta, de las normas consultadas la más exhaustiva, lo que nos hace coincidir con estos criterios. Las investigaciones propuestas son las realizadas en nuestro país en las temáticas de geología, tectónica, geofísica, geomorfología, ingeniería geológica y otras ciencias afines por lo cual su empleo es viable.

Nivel más general de zonación (Grado 1): se utiliza para trabajos de zonación en grandes cuencas, zonas montañosas y áreas extensas. En el se trabaja a escalas desde 1:1000 000 a 1:50000 y se valora:

- la estimación de máxima extensión de un área susceptible a licuar; donde se aplican los métodos antes expuestos se determinan las zonas con mayor susceptibilidad.
- la compilación e interpretación de la información existente en documentos antiguos, reportes u otras fuentes; consultando a residentes locales y haciendo búsquedas bibliográficas.
- los mapas geológicos y geomorfológicos como fuente de información para la investigación de las potencialidades de los suelos; utilizando las tablas resúmenes (3.2.1 a 3.2.3)

Todo lo anteriormente expuesto se resuelve con investigaciones de:

- Sismicidad (se estudia la actividad sísmica del área de trabajo desde 1514 hasta el último terremoto fuerte ocurrido en la ciudad)
- Régimen de lluvias (se determinan los períodos de seca y lluvia así como se hacen observaciones de variación del nivel de aguas subterráneas).
- Características geológicas y geomorfológicas.

Nivel confiable de zonación (Grado 2): Se usa en áreas urbanizadas, sus alrededores y donde se prevé cierto desarrollo urbanístico. Las investigaciones se presentan a escalas

desde 1:100 000 a 1:10 000. Tiene en cuenta además:

- la revisión de mapas geológicos antiguos, como apoyo al mejor conocimiento de la historia del desarrollo geológico y geomorfológicos;
- los estudios locales con investigaciones ingeniero-geológicas detalladas, para mapear con mayor claridad las unidades geológicas locales que influyen en la amplificación de los movimientos del subsuelo, en la susceptibilidad de licuación;
- las encuestas a residentes locales para obtener información histórica sobre fenómenos físico-geológicos;

Lo antes señalado se resuelve con investigaciones de:

- Investigaciones geológicas y geomorfológicas;
- Clasificación de los suelos (tipo de suelo);
- Análisis de la respuesta del suelo.

Nivel más confiable de zonación (Grado 3): Solo para obras especiales como grandes embalses y centrales atómicas, son muy costosas y se presentan a escalas desde 1:25000 a 1:5 000. En el se trabaja además en:

- las investigaciones especiales con un muy alto nivel de detallamiento donde son necesarias perforaciones y toma de muestras testigos para las unidades de suelos;
- la reevaluación de daños de terremotos antiguos;
- la mayor cantidad posible de datos recopilados que permitan tener un conocimiento muy elevado de las características del medio;
- que las investigaciones se ejecutan para obras de especial importancia, son muy costosas y se presentan a escalas desde 1:25 000 a 1:5 000.

Inicialmente, se analiza la posibilidad de realización de investigaciones de este tipo en Santiago de Cuba y sus alrededores, para ello fue necesario definir dentro de la información existente la que permitía realizar evaluaciones más confiables, así como a partir de ellas

determinar el nivel de estudio posible.

Para la cuenca existen estudios fotogeológicos de las estructuras tectónicas y de las unidades geológicas (Monje, 1976; Heredia et al., 1973 y 1982; Barcelo et al., 1984; González et al., 1984 y Rueda et al., 1994), de la historia del desarrollo geológico y geomorfológico (Orbera y Ramírez, 1994), de las estructuras locales con investigaciones ingeniero-geológicas, geofísicas y sismológicas para el análisis del comportamiento de los suelos (Puyada y Díaz, 1973; García, 1981; Heredia et al., 1973 y 1982 y González et al., 1984, 1991). Por el nivel de estudio y de conocimientos alcanzados en las investigaciones de la cuenca de Santiago de Cuba, por la coincidencia del tipo de información con la presentada en la norma es posible realizar evaluaciones sobre las amenazas geológicas que se pueden categorizar como de Grado 2.

De la información recopilada fue posible obtener las variables iniciales para análisis de este tipo dentro de las que tenemos tipología de los suelos, niveles freáticos, estructuras tectónicas, niveles de las aguas freáticas, intensidad, magnitud y distancias de los terremotos.

Las variables de mayor peso en el pronóstico de las zonas son:

- 1.- Tipología y propiedades de los suelos;
- 2.- Profundidad de los niveles freáticos;
- 3.- Topografía del terreno;
4. - Edad de los suelos;
- 5.- Magnitud y distancia de los terremotos.

En la realización de estos trabajos de por sí engorrosos por el uso de múltiples variables y datos procesados es importante conocer de forma detallada las variables empleadas en cada caso. Las variables se dividieron en morfométricas e ingeniero-geológicas.

Para la valoración de la información morfométricas del relieve evaluamos las alturas máximas y mínimas, teniendo en cuenta para nuestro estudio las alturas mínimas (0 a 10).

En sentido general se puede caracterizar el relieve como premontañoso. Las elevaciones máximas tienen entre 50 y 150 metros y las mínimas están entre 0 y 50 metros.

En nuestra opinión las pendientes son un factor importante de riesgo junto a la tipología de los suelos. Observamos que para pendientes entre 0 y 10 grados en suelos arcillosos y arenosos anegados pueden producirse licuación e hinchamiento.

Evaluando las formaciones geológicas, los niveles freáticos y la presencia de estructuras tectónicas. Tenemos que:

Formaciones geológicas y niveles freáticos: En este trabajo utilizamos los esquemas geológico y tectónico presentados por Heredia et al. (1982), así como el de niveles de las aguas subterráneas de Chuy et al. (1982) y los determinados por la información ingeniero geológica existente en base de datos donde se dividen por estratos y tipos de roca y suelo así como la profundidad a que se encuentra el nivel de las aguas. Del mapa esquemático de Heredia et al. (1982) los suelos se presentan agrupados por las formaciones litológicas principales representadas en la cuenca y ellas son las formaciones Cobre (S1), La Cruz (S2), Santiago (S3) y las Cuaternarias (S4). Los suelos S3 y S4 por la similitud de su respuesta dinámica y por las dimensiones del área que ocupa, consideramos factible analizarlas en conjunto.

En la cuenca, de manera general, aparecen los litotipos siguientes: arenas, arcillas, limos, areniscas, aleurolitas, margas, calizas, conglomerados y rocas volcánicas pertenecientes a las formaciones Cuaternarias, Santiago, La Cruz y El Cobre.

En el análisis observamos que la mayor parte del área se corresponde con los niveles freáticos mayores de 10 m. coincidentes con suelos de las formaciones Cobre y La Cruz. El área de niveles entre 0 y 4 m coincide con la zona de las formaciones Cuaternarias y los valores de pendientes más bajos, condiciones estas que posibilitan en caso de sismos fuertes la aparición de los fenómenos de licuefacción (arenas) e hinchamiento (arcillas). La categorización que se presenta a continuación permite el uso de la información presentada para la evaluación y el pronóstico de las amenazas geológicas.

3.4. Categorización del riesgo geológico.

De acuerdo con el U.S. GEOLOGICAL SURVEY (1977) en *Peligro Geológico* es "una condición geológica, proceso o suceso potencial que supone una amenaza para la salud, seguridad o bienestar de un grupo de ciudadanos o para las funciones o economía de una comunidad o entidad gubernamental mayor". La "condición geológica", puede ser una llanura de inundación de un río habitada; el "proceso", sería la tormenta; el "suceso", la inundación. De acuerdo con esto, un terremoto o deslizamiento en un área desértica, no es Peligro Geológico.

En cuanto al *Riesgo*, ha sido definido por Rowe (1977) como el producto de la Probabilidad de ocurrencia de un peligro, por el Valor. El Riesgo, por tanto, se mide en unidades monetarias. El U.S. GEOLOGICAL SURVEY (MARK Y STUART-ALEXANDER, 1977), ha usado la Ecuación del Riesgo o el Valor Esperado para analizar riesgos del fallo de presas.

$$R = P_c C(v)$$

El uso de estos dos conceptos, puede justificarse cuando se hacen valoraciones económicas de daños esperados, como se ha hecho puntualmente en USA. En la mayor parte de los países y estudios, sin embargo, no suelen hacerse valoraciones económicas, por ejemplo en paralelo con los Mapas de Riesgo (de Peligrosidad de acuerdo con los conceptos arriba expuestos). Esta ausencia de valoraciones, problemáticas en cuanto a metodología, ejecución y costos de la misma, seguramente seguirá facilitando el uso del término Riesgo con un significado igual al de Peligrosidad.

El *Riesgo Geológico* puede definirse como todo proceso o situación o suceso en el medio geológico, natural, inducida o mixta, que puede generar un daño económico o social para alguna comunidad, o en cuya predicción, prevención o corrección han de emplearse criterios geológicos. Se pueden denominar tres grupos de riesgos geológicos clasificados de acuerdo a su origen: los naturales, los inducidos y los mixtos.

Los riesgos geológicos internos se originan en el interior de la tierra y entran en el grupo de los riesgos naturales. Con incidencia práctica, debe considerarse sobre todo volcanes, terremotos y diapiros. A muy largo plazo (centenares de miles a decenas de millones de años), el movimiento relativo entre las diversas Placas tectónicas que forman la corteza terrestre, obviamente sin incidencia práctica.

Los *Terremotos*, son producidos por la liberación súbita de enormes cantidades de energía tectónica en forma de ondas sísmicas. Estas ondas se generan en el hipocentro y alcanzan la superficie en primer lugar en el epicentro. Uno y otro, pueden ser localizados rápidamente a partir de las redes de vigilancia instrumentales, que permiten así el comienzo del trabajo de Protección Civil y los equipos científicos asesores.

Los terremotos se clasifican con dos escalas:

- a) De intensidad (máxima 7, escala de MERCALLI Modificada y en la MSK) que se clasifican en función de los daños observables.
- b) De magnitud (máxima medida en la escala RICHTER 8 y 9), que se determina en función de lectura de lecturas instrumentales de las ondas sísmicas.

Los terremotos se producen en zonas en general bien conocidas, asociadas a menudo con áreas volcánicas y cadenas montañosas jóvenes; la mayor parte se producen en los bordes de las placas tectónicas.

El pronóstico de los fenómenos físico-geológicos inducidos en función de las etapas de investigaciones ingeniero-geológicas puede ser cualitativa y cuantitativa (Lomtatze, 1986): la cualitativa se basa en el estudio, descripción y análisis de las condiciones ingeniero-geológicas de las vertientes, su escarpadura y altura, particularidades del relieve, condiciones de estratificación de las rocas, su composición, estado físico, propiedades y grado de irrigación, procesos y fenómenos geológicos acompañantes; esta evaluación como regla general se puede utilizar para la planificación, pero no para el diseño. En la cuantitativa se aplican métodos como los de simulación y de cálculos numéricos de la estabilidad de las

pendientes.

Para nuestro trabajo utilizaremos métodos cualitativos los que nos permitirán obtener resultados de calidad y bajo costo. Los resultados obtenidos del nivel de grado de estudio nos obligan a categorizar y clasificar las áreas a partir de los parámetros de mayor peso informativo, es por ello, que las variables las dividimos en factores geotécnicos y de amenaza. Dentro de los primeros y a los que les damos mayor peso valoramos los tipos de suelos y los niveles del manto freático, y dentro de los segundos los rangos de pendientes y los efectos físico-geológicos probables.

En la categorización se incluye de forma diferenciada la influencia de la fuerza de los terremotos en los efectos físico-geológicos catalizados, los mismos pueden comenzar a aparecer con sismos que produzcan aceleraciones mayores de 0,3 % de g, intensidad entre 8-9. A medida que aumenta la fuerza del terremoto los efectos se incrementaran en las zonas de efectos a menores aceleraciones.

Integrando los resultados de los diferentes criterios explicados anteriormente se obtiene un mapa de susceptibilidad a la licuación el cual lo categorizamos en zonas: Alta, Moderada y Baja, lo cual consideramos de vital importancia en la determinación de las zonas propuestas como susceptibles a licuar.

Capítulo 4: Posibilidad de ocurrencia de licuación en la cuenca de Santiago de Cuba inducido por terremotos fuertes.

En Santiago de Cuba se han enfocado trabajos de evaluación de los fenómenos físico-geológicos inducidos por sismos (amenaza geológica) por varias vías (Zapata, 1995), pero siempre como resultado secundario de investigaciones ingeniero-geológicas o de otro tipo.

Como el objetivo fundamental de nuestro trabajo es proponer zonas con susceptibilidad a la ocurrencia del fenómeno de licuación que tenga como agente catalizador un terremoto fuerte. Pretendemos exponer los métodos utilizados para el procesamiento de toda la información ingeniero-geológica existente, los cuales son considerados novedosos y de bajo costo.

Para realizar nuestro trabajo fue necesario combinar los métodos independientemente del nivel de estudio, como explicamos anteriormente, no existe homogeneidad en la información existente y para poder solucionar el problema fue necesario adaptar la metodología a nuestras condiciones.

4.1. Pronóstico de riesgo geológico en Santiago de Cuba

En la actualidad, se brinda especial atención, tanto al diseño estructural, como a la elección y conocimiento del sitio de construcción para la delimitación correcta de la relación suelo-estructura y el análisis de la respuesta dinámica de la edificación. Se trata que las edificaciones sean capaces de soportar grandes solicitaciones. En este sentido tiene primordial importancia el conocimiento detallado de las condiciones geotécnicas del asentamiento y de las estructuras tectónicas locales, las cuales se valoran en los mapas de pronóstico de riesgo para las ciudades de alta densidad poblacional. Estos generalmente se presentan como mapas de peligrosidad potencial de ocurrencia donde se localizan zonas con diferentes niveles de amenaza; estos mapas pronósticos son confeccionados de diferentes modos y usados para diversos fines.

Al analizar la información ingeniero-geológica existente de Santiago de Cuba la cual fue

obtenida a partir de la recopilación de las investigaciones aplicadas realizadas por la ENIA No 2 (calas y propiedades físico-mecánicas de los suelos) se encuentra que la profundidad del 80 % de las perforaciones están entre 5 y 10 metros, esto no influye en nuestro trabajo porque los estudios de susceptibilidad de licuación se realizan hasta esa profundidad.

Se analizaron las diferentes variedades litológicas haciendo énfasis en los suelos de edad Neogéno-Cuaternario, dada su importancia y porque alrededor del 20 % de las industrias de la ciudad se encuentran asentadas en este tipo de suelo así como la mayor parte de la ciudad.

Antes de iniciar el procesamiento y evaluación de esta información, se realizó un análisis estadístico primario que permitió la codificación posterior de las variables a utilizar.

Estas variables aportan información sobre:

- las características morfométricas del relieve;
- la influencia de los factores de riesgo;
- los parámetros que se tienen en cuenta para la ocurrencia de la licuación.

Consideramos entonces, que poseemos la información necesaria para la conformación del mapa pronóstico de ocurrencia del fenómeno de licuación inducido por sismos con aceleraciones igual o mayor a 0,3 g e intensidades mayores o iguales que 8-9 grados MSK. Esta categorización permite clasificar las áreas de amenaza en:

- licuable, (nivel freático entre 0 y 3 m, son depósitos de arcillas blandas y arenas con espesores 10 m o más, pueden ser tierras reclamadas, zonas de relleno natural o artificial, curso actual o abandonado de los ríos, pendientes suaves, sedimentos jóvenes, etc., sus períodos serán mayores a 1.2seg)
- probablemente licuable (nivel freático entre 3 y 10 m, son depósitos estables de suelos no cohesivos o arcillas duras, pueden ser playas, dunas de arenas, suelos planos, sedimentos jóvenes, etc., sus períodos están comprendidos entre 0.8 y 1.2 seg.)
- no ocurre (nunca ocurrirá el fenómeno puesto que son rocas de cualquier tipo

sedimentaria o cristalina es decir suelos rígidos donde sus períodos están comprendidos entre 0.3 y 0.5 seg.)

Haciendo el análisis de todos los datos existentes y de las variables analizadas, proponemos estas categorías las cuales nos permitieron pronosticar las áreas con susceptibilidad a la licuación durante un terremoto grande. Determinar estas zonas es de vital importancia para planificadores urbanísticos y gobierno de la provincia pues permite trazar nuevas estrategias de planeamiento y toma de medidas para minimizar los posibles daños.

Las zonas propuestas coinciden fundamentalmente con los sedimentos cuaternarios que poseen gran humedad; están menos compactadas y se encuentran fundamentalmente distribuidos en la parte norte, noreste y noroeste de la bahía de Santiago de Cuba; así como en la zona de la cuenca del río San Juan.

4.2. Categorización de la respuesta de los suelos

La evaluación de los trabajos de riesgo realizados hasta el momento no resuelve la problemática real presente en la ciudad y sus alrededores en caso de ocurrencia de terremotos, siendo la principal dificultad la evaluación conjunta de las variables y la presentación de un mapa esquemático resumen que permita su uso para planificación y proyectos urbanísticos.

Dentro de la categorización utilizamos como factores geológicos:

- el tipo de suelo (arenas arcillosas, arcillas muy arenosas, linos arenosos y arenas)
- edad de los sedimentos (sedimentos de edad Cuaternaria o más jóvenes)
- el nivel de las aguas freáticas (alta susceptibilidad para suelos saturados entre 0 y 3 m, y baja susceptibilidad entre 3 y 10 m).

Como factores de riesgo:

- la pendiente del relieve y el efecto físico-geológicos posibles de ocurrir como

consecuencia de los sismos (pendientes suaves y el terremoto con $M_s \geq 4.6$)

- variación de la intensidad sísmica probable de ocurrir en caso de terremotos (zonas de incrementos del valor de la intensidad sísmica a esperar durante un terremoto.)

Se establecen para su mejor comprensión una gradación de categorías condicionadas a la calidad de la respuesta de los suelos y a la potencialidad de su uso en planeamiento de zonas urbanas.

4.3. Aplicación de los métodos.

Toda la información sismológica tiene gran importancia para el análisis del comportamiento sísmico de un territorio dado, aunque debe ser utilizada teniendo en cuenta las características específicas del sitio en el momento de ocurrir el terremoto (infraestructura económica social).

Nos apoyamos en las correlaciones cualitativas establecida por Iwasaki et al 1982, Yound and Perkins (1978) y por Wakamatsu, 1992 resumidas en las tablas (Tablas 3.2.1, 3.2.2 y 3.2.3) para proponer las diferentes zonas a licuar teniendo en cuenta la resistencia de los sedimentos presentes a la licuación partiendo de la edad de estos y los procesos eólicos y fluviales que ayudan a clasificar estos sedimentos granulares del suelo en estados relativamente sueltos, lo que es una condición generadora para una alta susceptibilidad de licuación; sumando la profundidad de las aguas.

Para la elaboración del mapa de posibilidad de ocurrencia del fenómeno de licuación en la cuenca de Santiago de Cuba y sus alrededores, fue necesario realizar una serie^e de pasos que nos ayudaran a cumplir el objetivo trazado, resumiendo lo antes expuesto hacemos una valoración cualitativa.

Lo primero fue revisar la información ingeniero geológico contenida en una base de datos creada con toda la información geotécnica de las obras realizadas en el área la cual contiene 500 calas las cuales se concentran fundamentalmente en la zona estudiada.

Para realizar la interpretación de los datos existentes se realiza la codificación de toda esta información, y con la utilización del SURFER, se confeccionaron varios mapas por estratos y se interpretaron de forma independiente para después correlacionarlos y poder proponer las zonas con susceptibilidad a la licuación.

Se preparó un plano definiendo la presencia de alineación de los cauces de los ríos y arroyos así como determinar los paleocauces tarea muy importante porque pueden coincidir con zonas de alta susceptibilidad a la licuación.

El estudio de los paleocauces presentes en el área de estudio es de vital importancia pues existen reportes en otros países de que en estas zonas se han construido ciudades enteras y obras de importancia económica y estos han sido dañados durante terremotos fuertes como es el caso del terremoto del 16 de Julio de 1990 en la ciudad de Dugupan en Filipinas por la licuación, por tal razón nosotros prestamos gran interés en la búsqueda de antiguas lagunas y ríos que en algún momento existieron y actualmente en estas zonas pueden existir construcciones, las cuales por las características de los suelos donde se asientan pueden ser afectadas por este fenómeno.

Tomando la información de las perforaciones hechas por la ENIA (1975 - 1996), así como los datos de pozos hidrogeológicos se confeccionó un mapa de isolineas de mantos freáticos, el cual nos permite tener una idea de la distribución de las profundidades a que se encuentran las aguas subterráneas, material muy valioso en la interpretación de los resultados, debido a que el agua es un factor determinante en nuestra investigación.

En la Figura 4.1 se presenta un Mapa de ocurrencia de licuación según las características

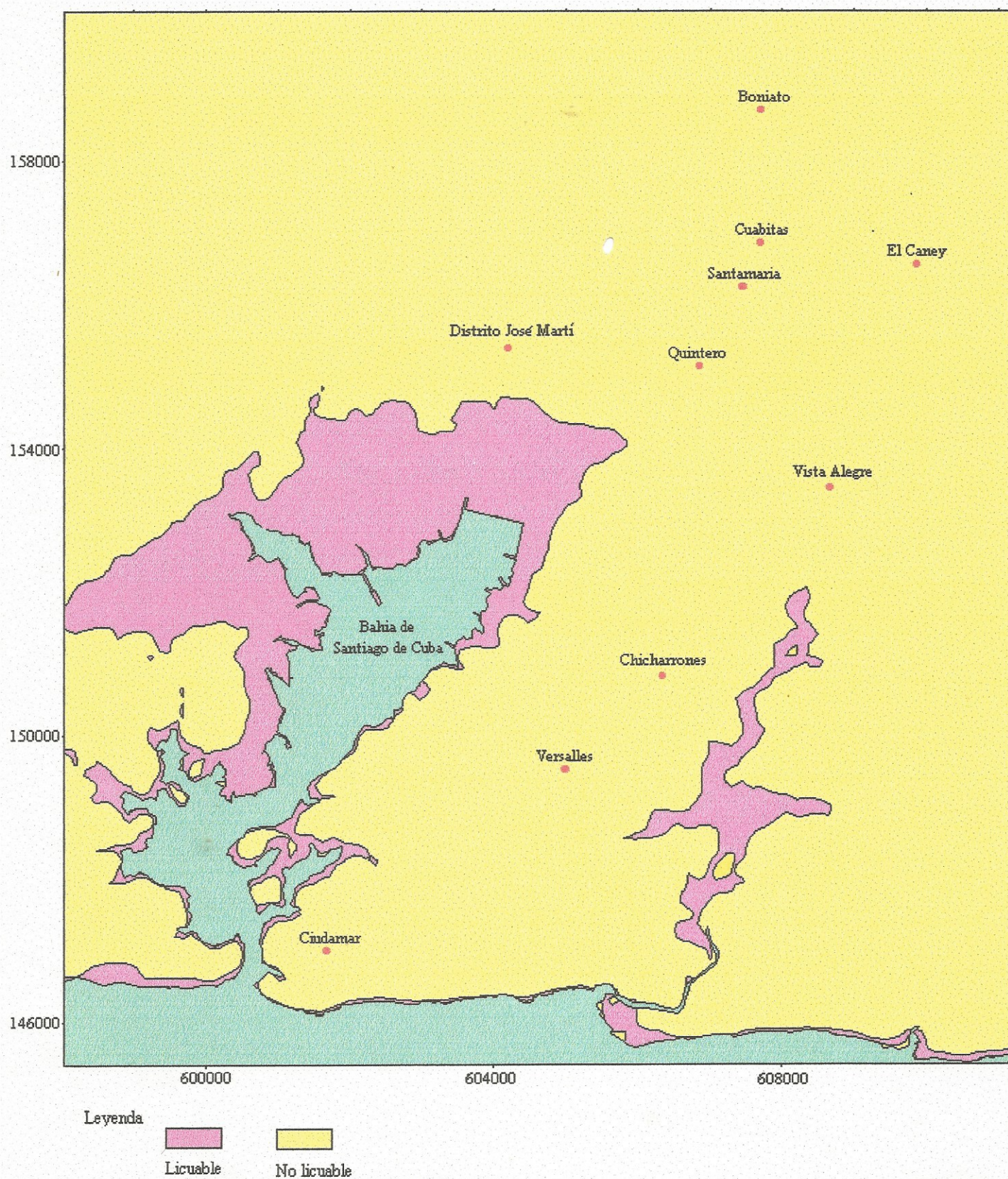


Figura 4.1: Posibilidad de Ocurrencia de Licuación según características Geomorfológicas.

geomorfológicas donde se tienen en cuenta la topografía (grados de pendiente), para la ciudad de Santiago se dan dos categorías: licuable y no licuable, la primera coincide con los grados de pendiente bajos, tierras reclamadas, cause de ríos y lagunas abandonadas, zonas que según los métodos son consideradas con susceptibilidad Alta.

Se presenta en la Figura 4.2 un Mapa de ocurrencia de licuación según las características ingeniero-geológicas, obtenido a partir de la correlación de los suelos hasta la profundidad de 10 m, aquí se codificaron los diferentes tipos litológicos y utilizando en el SURFER el método de kriging, analizamos los diferentes grupos de suelo que pueden aparecer en el área de estudios (arcillas, arenas, rocas, eluvios y deluvios, para las profundidades de 0 a 5 metros, de 5 a 10 metros y de 10 a 15 metros. A este análisis le sumamos la información de la profundidad a que se encuentra las aguas subterráneas; así como a los criterios resumidos en las tablas expuestas en el capítulo anterior y proponemos 3 zonas: licuable, probablemente licuable y que no ocurre.

Evaluando las zonas obtenidas por los métodos anteriores observamos que las mismas, coinciden en ambos casos con los sedimentos de edad cuaternaria, caracterizados por ser depósitos marinos, arenas guijarros de playa y bancos de tormenta, así como con otros depósitos compuestos por lino gris y pardusco, linos arenosos y arcillas arenosas. También coinciden con las zonas donde los niveles freáticos y los grados de pendientes son bajos, por lo tanto se tomo la decisión de superponer todos los resultados y obtener cómo resultado final un mapa (Figura 4.3) de posibilidad de ocurrencia de licuación en la cuenca de Santiago de Cuba en el cual se dan tres categorías de susceptibilidad: Alta; Media y Baja.

Con el objetivo de validar las zonas anteriormente propuestas, el autor en dos de estas áreas las cuales considera se encuentran obras de importancia social y económica para el municipio realizó varios perfiles utilizando la información de la ENIA.

Se presenta en la Figuras 4.4 la zona del Teatro Heredia, Plaza de La Revolución y sus alrededores y en la Figura 4.5 para la zona de la Terminal de Trenes; dos cortes litológicos típicos de estas áreas compuestas fundamentalmente por sedimentos aluviales, eluvio, deluvio antropogénicos, compuestos en general por materiales arcillo-arenosos en eluvio de

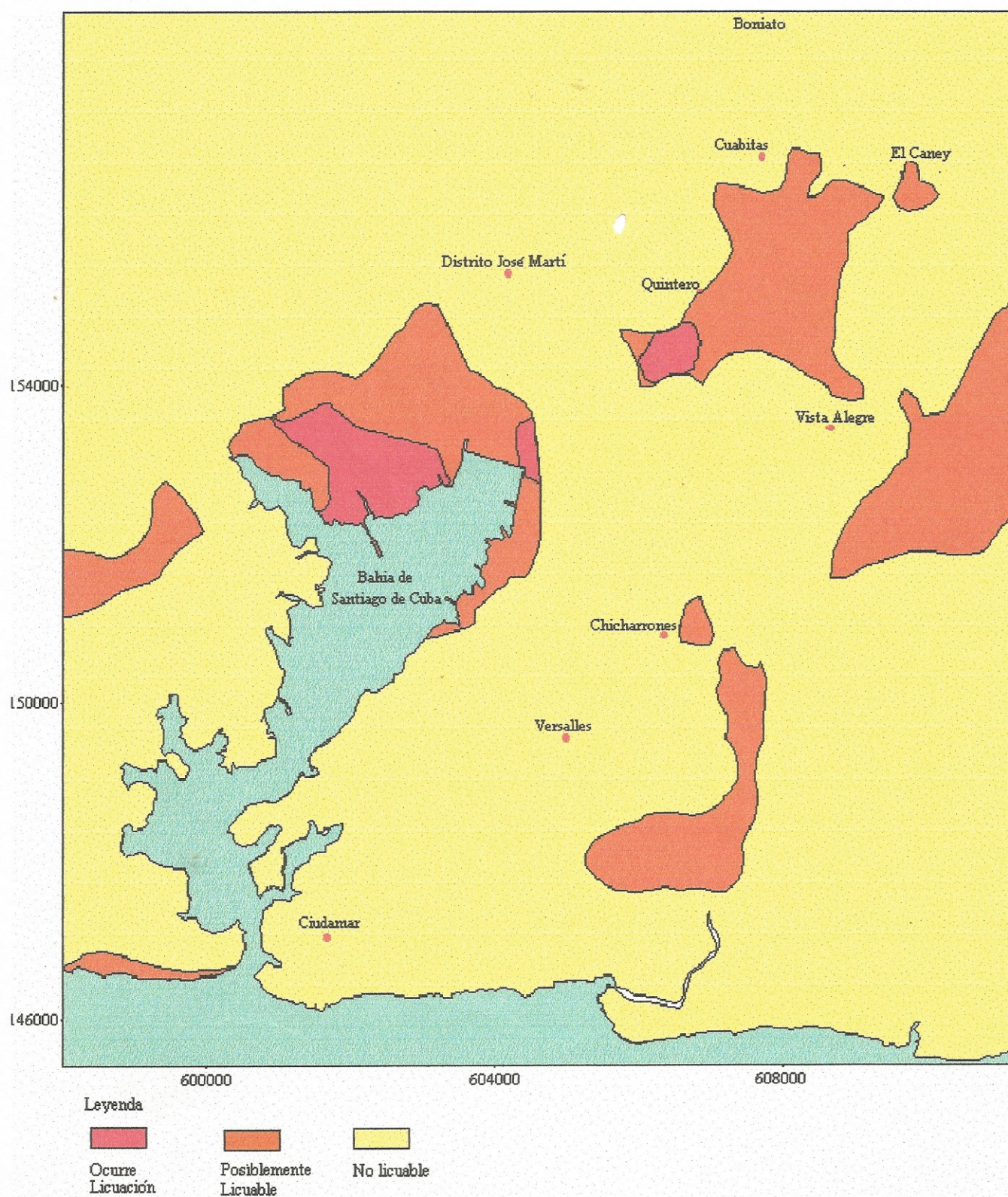


Figura 4.2. Posibilidad de ocurrencia de licuación según características geológicas

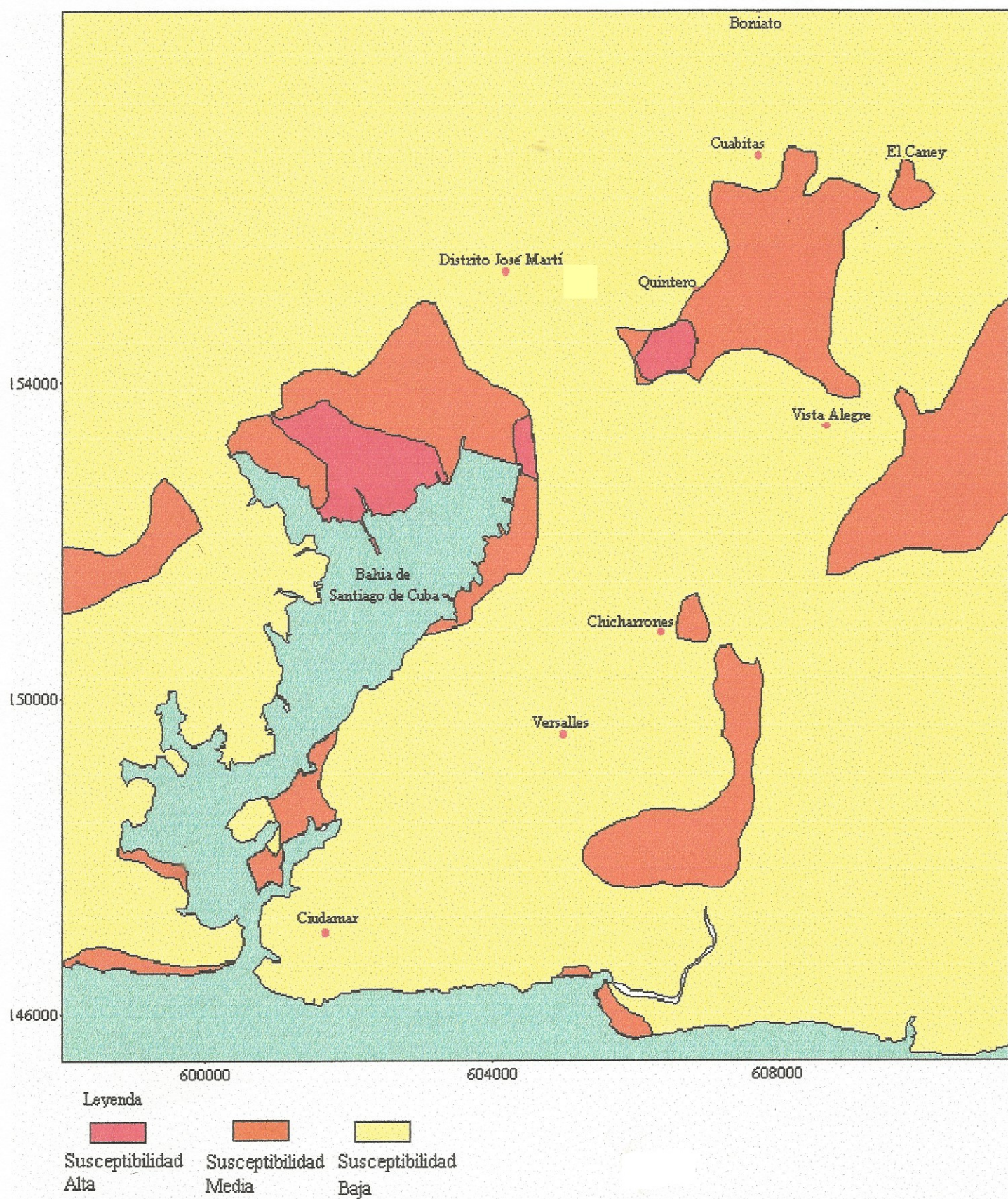


Figura 4.3 Posibilidad de ocurrencia de licuación en la cuenca de Santiago de Cuba

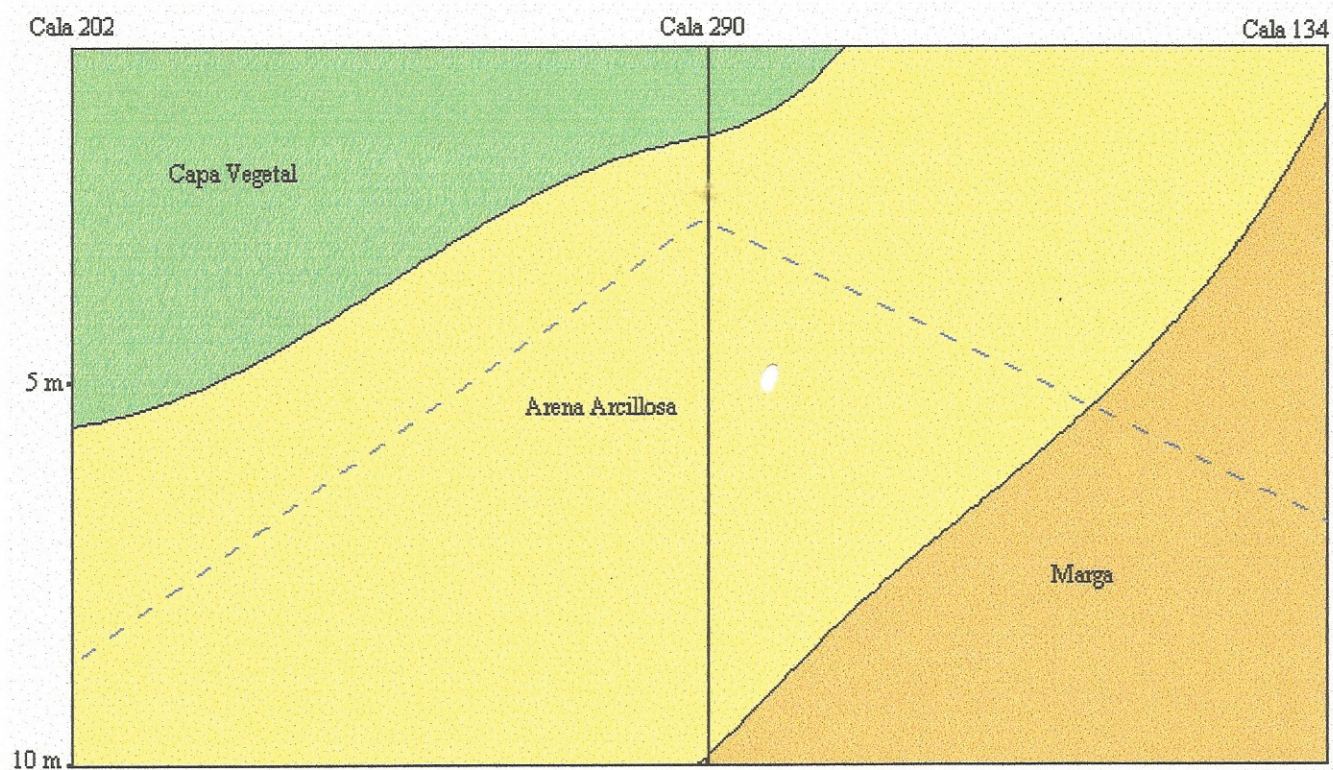


Figura 4.4 Perfil del area del Teatro Heredia

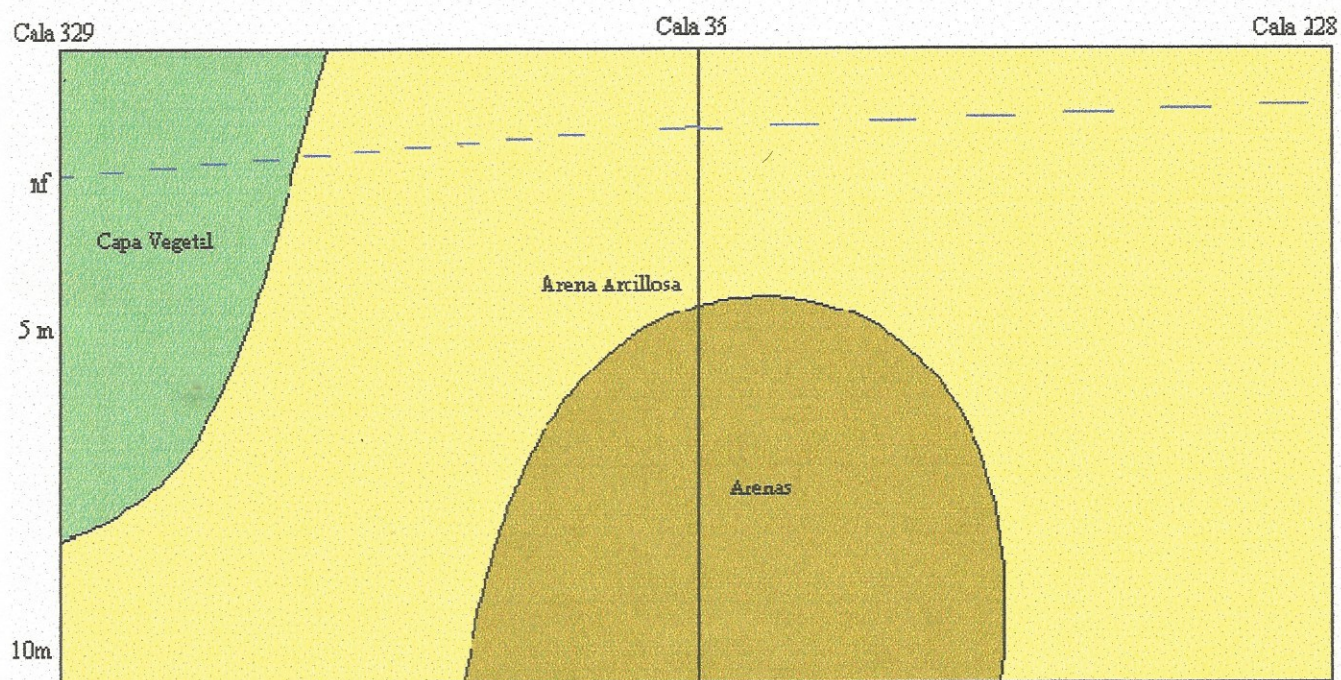


Figura 4.5 Perfil geológico del área de la Terminal de Trenes de Santiago de Cuba

la Formación La Cruz y por arenosos-gravosos con cierto contenido de arcilla de la Fm El Cobre. Los aluviales su granulometría son variables pero predominan las arenas.

Además para validar estas zonas, se tuvo en cuenta informaciónes muy importantes que datan del año 1751 (Lorente, 1999) donde aparecen esquemas que confirman que en la zona donde se encuentra el Teatro Heredia existía La laguna Espanta Sueño, la cual servía de vía de comunicación a través del río Yarayó con la bahía,, según referencias allí existía un embarcadero de azúcar la cual se producía en un central cercano, también en la zona portuaria y zonas bajas de la ciudad eran zonas de inundación en aquella época. Todos estos datos se tuvieron en cuenta para proponer las zonas.

Criterio magnitud distancia.

Para utilizar este criterio fue necesario utilizar el catalogo de terremotos históricos de Cuba así como los reportes gráficos de los daños producidos en la ciudad durante los terremotos estudiados.

La máxima extensión del área susceptible a licuar puede ser estimada a partir de los terremotos a ocurrir en el área, Youd y Perkin (1978) y Ambroseys (1988), han investigado la ocurrencia de licuación durante terremotos pasados y han planteado la "distancia" R entre el área epicentral y el sitio más lejano licuado en función de la magnitud del terremoto.

Teniendo en cuenta los reportes de los daños producidos durante los terremotos más fuertes que han producido afectaciones en la ciudad de Santiago de Cuba y viendo que no existe ningún reporte de ocurrencia del fenómeno de licuación, nosotros analizamos las curvas propuesta por Youd and Perkin y Ambrasey donde ellos plantean una serie de terremotos que han producido grandes afectaciones por licuación de los suelos en diferentes partes del mundo y analizamos su distribución y comparamos estos resultados con 19 terremotos históricos Cubanos con $M_s \geq 4.6$ (Figura 4.6) durante los cuales se reportaron serias afectaciones en el área estudiada y fundamentalmente en las zonas propuesta como de

mayor susceptibilidad a licuación

Analizando exhaustivamente todos los datos de los terremotos históricos cubanos y comparándolos con las características de magnitud, distancia y características ingeniero geológicas de las zonas en que se produjeron estos terremotos podemos decir que pudo ocurrir licuación de los suelos en algunos de los sectores de la ciudad de Santiago de Cuba y fundamentalmente en la zona de La Alameda durante algún terremoto histórico fuerte.

Sería importante señalar que este fenómeno no fue estudiado para ninguno de los terremotos fuertes ocurridos en la ciudad de Santiago de Cuba y sus alrededores, nosotros después de realizar el estudio de sismicidad, características ingeniero geológicas del área;

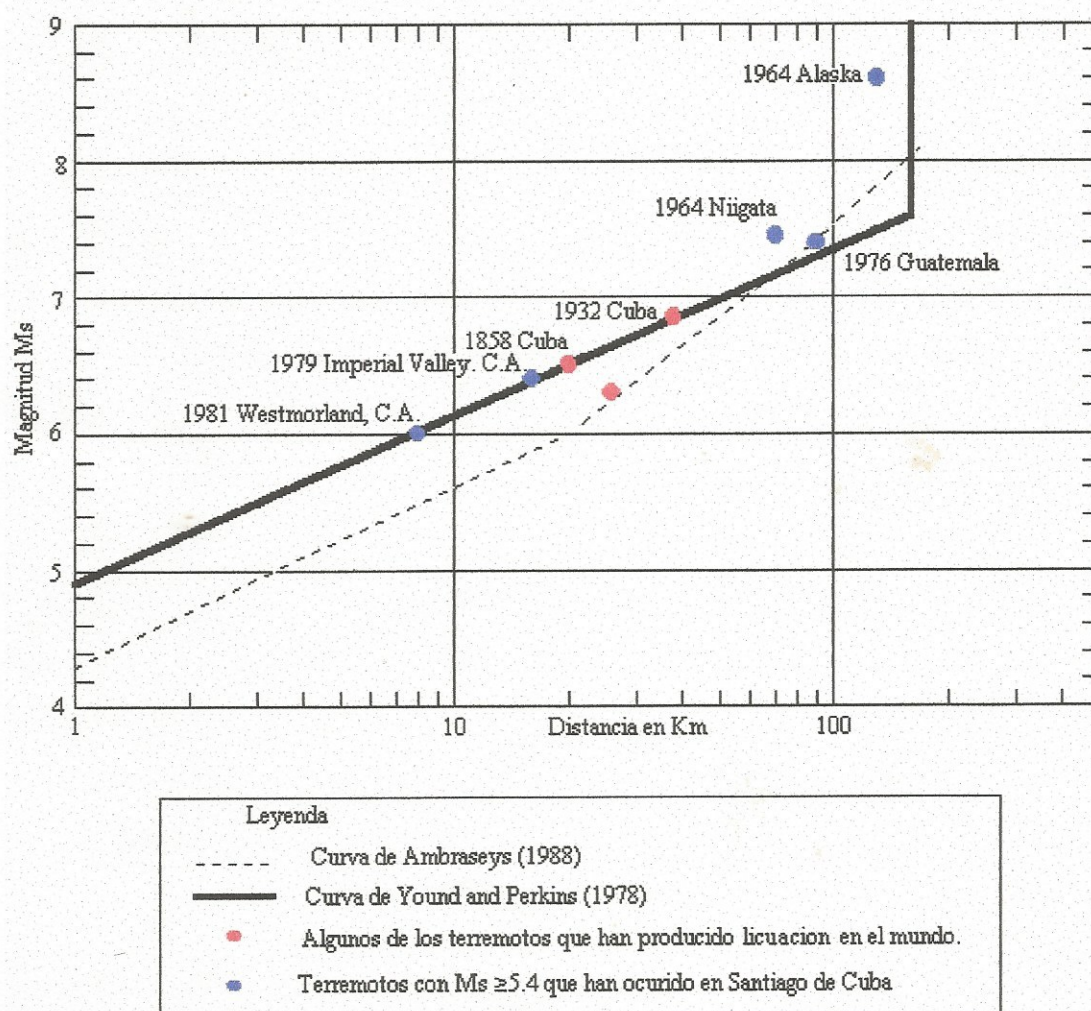


Figura 4.6 Representación de alguno de los terremotos estudiados con $M \geq 6$

así como los lugares donde se reportaron los daños podemos decir que según las crónicas de la época en estos lugares de haberse estudiado el fenómeno como tal existirían los reportes.

Criterio Intensidad.

La máxima extensión de licuación también puede ser groseramente estimada sobre la base de la intensidad sísmica esperada. Investigadores japoneses muestran para la licuación simultanea y observaciones de intensidad, aquella licuación en áreas bajas formada por sedimentos Holoceno donde solo puede ocurrir para intensidades por encima o igual a 8 grados en la escala Mercali Modificada (M.M); de modo que hay menos posibilidad de ocurrir la licuación cuando la intensidad sea menor.

El conocimiento histórico de terremotos como los del 11 de junio de 1766 y el 20 de agosto de 1852, ambos de 9 grados y de ocho con intensidades de 8 grados como el del 3 de febrero de 1932 del cual se tienen amplias muestras gráficas y teniendo en consideración las características de los sedimentos que se encuentran en el área de estudio podemos esperar que se produzca este fenómeno en las zonas propuestas en el epígrafe anterior las cuales coinciden con zonas de incremento del valor de la intensidad sísmica; otra cosa que corrobora esta hipótesis son los reportes de los daños producidos durante los terremotos más grandes ocurridos en la ciudad.

Los grados de intensidad 8 en la escala M.M. puede por tanto ser usada como la primera intensidad peligrosa para que ocurra el fenómeno; los grados 6-7 (M.M.) son para la licuación insignificante.

En epígrafes anteriores planteamos que para que se produzca el fenómeno de licuación en el área de estudio debe ocurrir un terremoto con una aceleración igual o mayor a 0.3 g que equivale a un terremoto con intensidad entre 8 y 9; aplicando el criterio de intensidad propuesto en la Norma Japonesa vemos que este coincide con el terremoto con las características propuestas por nosotros.

Los resultados de este capítulo son:

- la categorización del peligro geológico establecida en este trabajo puede generalizarse para trabajos posteriores de este tipo.
- el mapa-esquemático del pronóstico de riesgo geológico inducido o catalizado por terremotos de aceleraciones iguales o mayor a 0,3 g e intensidades igual o mayor a VIII grados en la escala MSK puede evaluarse para la planificación del desarrollo industrial y urbanístico prospectivo de la ciudad de Santiago de Cuba que ayudaría en la mitigación de las pérdidas materiales y humanas.
- el mapa-esquemático presentado es básico para el desarrollo de estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico de la ciudad.

4.4. Instalaciones que pueden ser afectadas por este fenómeno.

En nuestro trabajo proponemos tres zonas: licuable, probablemente licuable y donde no ocurre; en la primera zona propuesta se encuentran enclavadas obras de importancia económica y social por tal motivo consideramos importante se realicen estudios Grado 3 en esas zonas con el fin de corroborar las posibles afectaciones que se puedan producir durante un terremoto fuerte en la ciudad de Santiago de Cuba.

Entre las obras que se consideran sean afectadas tenemos (Susceptibilidad Alta):

- Terminal de Trenes, Zona Portuaria Industrial, parte Norte de la bahía: Se encuentra en una zona de relleno o suelos reclamados, compuesta por sedimentos cuaternarios, donde el nivel freático oscila entre 0 y 3 metros de profundidad.
- Teatro Heredia, Plaza de la Revolución, Almacenes del CIMEX, Hospital Infantil Norte: Se encuentran en una zona de inundación donde según datos históricos existía una laguna que servía de embarcadero de azúcar en los años 1751, el nivel freático está aproximadamente entre los 3 y 4 metros y está compuesto por un suelo areno arcilloso.

En la zona con Susceptibilidad Media se encuentran la cuenca del río San Juan, la Presa Parada y sus alrededores, Reparto Agüero, San Pedrito, zona cercana a la Textilera y Nuevo Vista Alegre, zonas aledañas al Hospital Clínico Quirúrgico y la parte Este de la bahía.

La tercera zona es la más amplia (Susceptibilidad Baja) donde no se espera se produzcan afectaciones debido a la licuación durante un terremoto fuerte debido a que son zonas compuesta por suelos pertenecientes a la formación La Cruz que se caracterizan por ser estables.

Conclusiones.

Como conclusiones del trabajo presentado tenemos:

- La metodología de procesamiento por la norma Japonesa permite obtener resultados de calidad con bajo costo. Los sistemas de computo se convierten en una herramienta indispensable para los trabajos geológicos, por su flexibilidad y posibilidades en el manejo de los datos.
- Por primera vez se combinan los criterios geológicos, geomorfológicos y sísmicos para determinar en la ciudad de Santiago de Cuba la susceptibilidad a licuación, utilizando la información ingeniero geológica de forma automatizada.
- Se obtuvo un mapa esquemático de pronóstico de ocurrencia del fenómeno de licuación de la ciudad de Santiago de Cuba catalizado por un terremoto fuerte, sobre bases cualitativamente diferentes a los métodos tradicionales empleados en Cuba, en él especifican tres categorías: Alta, Media y Baja
- Los lugares de mayor susceptibilidad a la licuación de los suelos se encuentran en la parte Norte y noreste de la bahía, la cuenca del río San Juan, un pequeño sector al noroeste y noroeste de la ciudad.

Recomendaciones.

Se presentan las siguientes recomendaciones:

- Este resultado debe ser aplicado por los Organismos del Estado los cuales son los encargados de planificar, decidir, proyectar; además sirve como apoyo para el buen uso del suelo y la mitigación de los efectos de los terremotos en la ciudad de Santiago de Cuba.
- Generalización de los mapas esquemáticos obtenidos para toda el área de la cuenca de Santiago de Cuba.
- Realizar un muestreo ingeniero geológico detallado en las áreas con posibilidad de licuarse para realizar otros procedimientos planteados en la Norma Japonesa que no se realizaron por no estar completa la información existente.

Bibliografía.

- Alvarez, H. y Menendez, L. (1969): Sismicidad de Cuba (en ruso) Fizika Zemli No. 1 pp 74-78.
- Alvarez, H, L S(1970): Intensidad Sísmica de Cuba. Atlas Nacional de Cuba, La Habana pp 20
- Alvarez, H, L hteinberg,V.V., Blanco,P., Medvedev,S.V., Menendez, L.A. (1970): Condiciones sísmicas de la ciudad de Santiago de Cuba (en ruso) Fizika Zemli No. 5 pp 81-86.
- Alvarez, H. (1994): Análisis de la actividad sísmica en la zona de Santiago de Cuba, desde 1568 hasta la actualidad, de terremotos con $M > 5.0$. III Encuentro Nacional de Investigaciones Sismológicas Aplicadas. CENAI, Santiago de Cuba.
- Alvarez, L. y Bune,V.I (1985b): Sismicidad de Cuba Oriental (en ruso). Tesis para la opción por el grado de Candidato a Doctor en Ciencias Físico Matemáticas. Instituto de Física de la Tierra, Moscú,
- Alvarez, L, Chuy,T y Cotilla,M. (1991): Peligrosidad Sísmica de Cuba. Una aproximación a la regionalización sísmica del Territorio Nacional. Revista Geofísica. Instituto Panamericano de Geografía e Historia No. 35 pp 125-150.
- Alvarez, L, (1992): SACUDIDA, versión 2: Un programa para la estimación de la peligrosidad sísmica. Fondos del Centro Nacional de Investigaciones sismológicas (CENAI),ACC.
- Ruiz,J., Chuy,T., Pico,R. y Cotilla,M. (1994): Magnitudes Máximas de los terremotos en la región del Caribe y América Central. III Encuentro Nacional de Investigaciones sismológicas Aplicadas. CENAI, Santiago de Cuba.
- BIOECO (1992): Fondo de datos morfométricos de la zona de Oriental de Cuba. Grupo de Biogeografía.
- Blaquez,R. (1992): Acciones sísmicas. Análisis espectral de acelerogramas. Espectros tipos. Cursos de Especialización en Ingeniería Sísmica, XIV Input Sísmico, Dinámica de Suelos Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja Madrid 36 pp.

- Blaquez,R (1992): Densificación y licuefacción de arenas. Cursos de Especialización en Ingeniería Sísmica, XIV Input Sísmico, Dinámica de Suelos Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja Madrid 44 pp.
- CEN (1985): Norma Cubana "Elaboración de Proyectos de Construcción. Construcciones Sismo Resistentes" NC 53-114, Especificaciones de proyectos y métodos de calculo, 60 pp. La Habana.
- Chuy,T., Rodríguez, M. (1980): La actividad sísmica de Cuba basada en datos históricos. Investigaciones sismológicas en Cuba No. 1 pp 5-17
- Chuy, T, González, B.E., Zapata, J.A. y Milanés, B. (1982): Criterios Sismohidrogeológicos sobre la cuenca de Santiago de Cuba. Investigaciones sismológicas en Cuba No.2, pp 5-19
- Chuy, González y Alvarez (1983) Sobre la peligrosidad sísmica de Cuba. Inv. Sísmico en Cuba, No. 4
- Chuy,T y Alvarez,L. (1984): Catalogo de terremotos fuertes ($I > VII$, MSK1978) de las Antillas Mayores. IV Jornada Científica del IGA. pp77.
- Chuy, T.J. y Alvarez, L. (1988) Sismicidad histórica de La Española. En comunicación científica sobre Geofísica y Astronomía, No 16, La Habana, pp16.
- Chuy,T (1988): Influencia de las condiciones geológicas en la intensidad sísmica de la ciudad de Santiago de Cuba. Movimientos Tectónicos Recientes de Cuba No. 2 pp 46-63.
- Chuy,T, Rubio,M. y Zapata,J.A. (1990): Isosistas del terremoto del 20 de Agosto de 1852; Atlas Provincia de Santiago de Cuba/ACC.
- Chuy,T, y Zapata,J.A. (1990): Intensidad sísmica promedio puntual de la ciudad de Santiago de Cuba; Atlas Provincia de Santiago de Cuba/ACC.
- Chuy, T.J. y Alvarez (1995)"Mapa de peligrosidad sísmica de Cuba con fines de ingeniería. Reportes de Investigación. Fondos del CENAIIS.
- CONCE (en preparación): Proyecto de Nueva Norma Constructiva Cubana "Elaboración de Proyectos de Construcción. Construcciones Sismo Resistentes" Especificaciones de proyectos y métodos de calculo, Santiago de Cuba

- Cotilla,M., Chuy,T. y Arteaga,F. (1988): Características morfométricos y valores anómalos de la intensidad sísmica en la ciudad de Santiago de Cuba. Movimientos Tectónicos Recientes de Cuba No. 2 pp 67-74.
- Dasko,R.E., Shalimov,A.I., Heredia,N. y Romero,J. (1972): Proyecto de las Investigaciones ingeniero-geológicas para la cuenca de Santiago de Cuba con fines de su microregionalización sísmica. Escuela de Geología, Universidad de Oriente 157 pp.
- Escobar,E., Guasch,F., Mondelo, F. y Chuy,T. (1991): Investigaciones geofísicas detalladas para la estimación del riesgo geológico en la cuenca de Santiago de Cuba. IV Jornada de la Sociedad Cubana de Geología. Santiago de Cuba.
- Faccioli,E. y Resendiz,D. (1976): Soil Dynamics: Behavior including liquefaction. En: Seismic Risk and Engineering Decisions. Developments in Geotechnical Engineering Vol 15 (Eds. Lomnitz,C. y Rosenblueth,E.), pp 71-140.
- Fernández B. Rivera,Z., Reyes,C.R. y Zapata,J.A. (1995): Comprobación de áreas de posible aparición de fenómenos físico-geológicos de la ciudad de Santiago de Cuba. Su comportamiento en la construcción de obras de fortificación. X Forum de Ciencia y Técnica del Estado Mayor Provincial Santiago de Cuba y del Ejército Oriental. 15p.
- Fernández B., Rivera,Z., Reyes,C.R (1995): Pronóstico de fenómenos físico-geológicos inducidos por terremotos: su empleo en los planes contra sismos de la ciudad de Santiago de Cuba. X Forum de Ciencia y Técnica de la Defensa Civil Nacional.
- García, S.E. (1981): Criterios acerca de las características de amplitud frecuencia de las oscilaciones de los suelos en el territorio de Santiago de Cuba (Tutores: Chuy, T.J. y J.A. Zapata) Tesis de opción al título de Licenciado en Física, Fac. de Física Matemática, Universidad de Oriente 60 pp.
- Geli,L., Bard,P-Y. y Jullien,B. (1988): The effects of topography on earthquake ground motion a review and new results. BSSA Vol 78-1 pp 42-63.
- Golden software (1998): Sistema automatizado de mapeo SURFER.
- Golden software (1998): Sistema automatizado de ploteo WINGRAP.
- González,B.E., Mirzoev,K., Chuy,T., Golubiatnikov,V., Lyskov,L., Zapata, J.A., Alvarez,H. (1984): Informe Final del tema 31002 "Estudio del Riesgo Sísmico y de la Variación de la Intensidad Sísmica de los Terremotos en el Territorio de la Ciudad de Santiago de Cuba. Archivo Departamento Sismología, IGA-ACC, 150 pp.

- González,B.E., y Vorobiova,E. (1987): Característica dinámicas del efecto sísmico en la ciudad de Santiago de Cuba. I Cong. Intern. Sobre Desastres Naturales, C. de la Habana.
- González,B.E., Mirzoev,K. Chuy,T., Lyskov,L.A., Golubiatnikov,V.L., Kogan,L.A., Zapata,J.A., Alvarez ,H. (1989): microzonificación sísmica de la ciudad de Santiago de Cuba; Comunicaciones Científicas sobre Geofísica y Astronomía No. 15, 25 pp.
- González,B.E., Pérez .L.D., Zapata,J.A., Fernández ,A.I.(1989): Pronostico de las variaciones de la intensidad sísmica asociadas a condiciones geológicas típicas en la ciudad de Santiago de Cuba. V Jornada Científica del Instituto de Geofísica y Astronomía, ACC.
- González,B.E., y Pérez ,L.D. (1989): Estimación de parámetros de las oscilaciones sísmicas máximas en la ciudad de Santiago de Cuba. I Cong. Cubano de Geología, C. de la Habana.
- González,B.E., Pérez, L.D. y Zapata,J.A. (1989): Utilización de los datos ingeniero-geológicos e hidrogeológicos en la microzonificación sísmica de áreas industriales y de asentamientos humanos. I Congreso Cubano de Geología. C. Habana.
- Gonzalez,B.E., (1991): Estimación del efecto sísmico en la ciudad de Santiago de Cuba; Tesis de opción al grado de Candidato a Doctor en Ciencias Físicas, Instituto de Geofísica y Astronomía, ACC, 115 pp.
- Guardado,R. (1983): Los terremotos. Ed. Oriente, 86 pp.
- Heredia,N. Romero, J. y Guardado, R. (1973): Valoración de las condiciones ingeniero-geológicas de Santiago de Cuba con fines de Microrregionalización Sísmica pp 211-227.
- Heredia,N., Seiesdedos,G. y Oliva,R. (1982): Regionalización ingeniero geológica de la cuenca de Santiago de Cuba a escala 1:25 000, ISPJAM- MES.
- Ishihara,K. y Ogawa,K. (1978): Liquefaction susceptibility map downtown Tokyo. Proc. 2nd. Int.Conf. on Microzonation, Vol. 2. pp 897-910.
- Ishihara,K. (1985): Stability of natural deposits during earthquake. Proc. of 11th. Intern. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Fco., Vol 1. pp 321-376.
- Ivonet P.,E.; Salas D.,A.; Lorente D.,R. y Calderin M.,C. (1995): Consideraciones sobre la relacion sismologia-planeamiento territorial. Taller sobre Manejo de Riesgo Sísmico, Santiago de Cuba. VRS-1.

- Iwasaki,T., Tatsuoka,F., Tokida,K. y Yasuda,S. (1982): Microzonation for Soil liquefaction potencial using simplified methods. Proc. 3rd. Int. Conf. on Microzonation. Seattle. Vol. 3. pp 1319-1330.
- Japan Road Ass. (1980): Specification of earthquake resistant during of highway bridges.
- Japan Working Group for TC-4 Committee (1992): Seismic Zoning on Geotechnical Hazards (draft) 114 pp.
- Johnson,J.A., Yee,T. y Duke,C.M. (1987): Preliminar ground motion calculate and site effects at Banco Central. Procc. earthquake Eng.
- Journal of Geotechnical Engeneering. American Society of civil engineers. Geotechnithical Engeneering Division. Vol 116 No. 10 (1990). Level groung soli liquefaction analysis. Using in situ.
- Journal of Geotechnical Engeneering. American Society of civil engineers. Geotechnithical Engeneering Division. Vol 114 No. 7 (1988). Level groung soli liquefaction analysis. Using in situ. Properties I and II.
- Léxico Estratigráfico de la A.C.C.. (1977).
- Mirzoev,K.M. et al. (1990a): Mapas de aceleraciones Máximas A(g) y Velocidades de oscilaciones V (cm/s) de terremotos de Cuba Oriental para magnitudes de 8.0, 7.5, 7.0, 6.5, 6.0 y 5.5 a escala 1:500 000. Fondos del MINBAS.
- Monje, L. (1977): Esquematización ingeniero-geológica de la ciudad de Santiago de Cuba, Tesis de grado de la Facultad de Geología, U.O.
- Orbera,L. y Ramirez,R. (1994): Neotectonica de Santiago de Cuba y su influencia en el riesgo geológico. III Encuentro Nacional de Investigaciones sismológicas Aplicadas, Santiago de Cuba.
- Reynaldo,E. (1975): Condiciones ingeniero-geológicas preliminares de la cuenca de Santiago de Cuba. Trabajo de tesis de la Escuela de Geología. Universidad de Oriente.
- Rodriguez,M. (1975): Estudio ingeniero-geológico de las propiedades fisico-mecanicas los depósitos cuaternarios del norte y noroeste de la bahía de Santiago de Cuba. Trabajo de tesis de la Escuela de Geología. Universidad de Oriente.
- Rueda,J.S., Arango,E.D. y Lobaina,A. (1994): Algunos resultados del estudios de los movimientos recientes de la corteza terrestre en el Polígono Geodinámico Santiago de Cuba. Edit. ORISOL Holguín. 20 pp

- Seed, H.B. e Idriss, I.M. (1969): Influence of soil conditions on ground motion during earthquakes. J. Soil Mech. Found. Div., Procc. ASCE, 95 (SM1): pp 99-137.
- Seed, H.B. e Idriss, I.M. (1988): Earthquake effects on soil-foundations systems. Foundation Engineering Handbook pp 700-732.
- Suvires, G., Pereyra B. Y Varella, S. (1994). "Distribución físico espacial de paleocausas en la planicie aluvial distal del río San Juan a la Latitud de 31°45' Sur y 68°15' Oeste, Argentina.
- Svoboda, B. (1989): Liquefaction of the soil and damage of the building at dynamic stress. Procc. 4th Intern. Symp. Analysis of Seismicity and Seismic Risk. Part 2 Castle of Bechyne, Geophysical Institute. Czechoslovak Academy of Sciences. pp 323-329.
- Pérez, N. (1983): "Aspectos ingeniero-geológicos del levantamiento geológico de Cuba Oriental" en Contribución a la Geología de Cuba Oriental. Editorial Científico-Técnica, La Habana.
- The first International conference on earthquake geotechnical engineering, Tokio, Nov 1994. Vol 3 Countermeasures against liquefaction of sand deposits with structure. Pp1203
- Viña B., N., Viña D., N. y Pons, A. (1994): Programa PC-GEO. BIOECO-ACC. Santiago de Cuba
- Whitman, R.V. y Cornell, C.A. (1976): Design. En: Seismic Risk and Engineering Decisions. Developments in Geotechnical Engineering Vol 15 (Eds. Lomnitz, C. y Rosenblueth, E.) pp 339-380.
- Youd, T.L., Nichols, D.R., Helley, E.J. y Lajoie, K.R. (1975): Liquefaction potential studies for seismic zonation of San Francisco Bay region. Geological Survey Professional Paper 941-A, pp A68-A74.
- Zapata, J.A y Fernández, B. (1994): Análisis de la posible ocurrencia de fenómenos físico-geológicos en Santiago de Cuba. III Encuentro Nac. de Investigaciones sismológicas Aplicadas, CENAI, Santiago de Cuba.
- Zapata, J.A, Fernández, A.I., Fernández, B. y Marisy, J. (1994a): Evaluación de los efectos sísmicos en asentamientos humanos de la región suroriental de Cuba. Aspectos de Sismicidad de Cuba. CENAI-ACC. pp 104 - 115
- Zapata, J.A., Rubio, M., Chuy, T. y Sierra, L.O. (1989a): El Megasismo del 20 de Agosto de 1852; Resúmenes II Congreso Internacional sobre Desastres, Ciudad de la Habana;