

REPÚBLICA DE CUBA

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ

FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**EVALUACIÓN DE PELIGROS DE
DESLIZAMIENTOS Y LICUEFACCIÓN DE SUELOS,
INDUCIDOS POR LA ACTIVIDAD SÍSMICA, EN
CUBA SURORIENTAL**

**Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias
Geológicas**

MSc. Sandra Yanetsy Rosabal Domínguez

Moa, Holguín

2018

REPÚBLICA DE CUBA

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ

FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**EVALUACIÓN DE PELIGROS DE DESLIZAMIENTOS Y
LICUEFACCIÓN DE SUELOS, INDUCIDOS POR LA
ACTIVIDAD SÍSMICA, EN CUBA SURORIENTAL**

Tesis presentada en opción al Grado Científico de
Doctor en Ciencias Geológicas

Autor: **MSc. SANDRA YANETSY ROSABAL DOMÍNGUEZ**

Tutores: Dra. Alina Rodríguez Infante

Dr. José Alejandro Zapata Balanqué

Moa, Holguín

2018

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, mi más profundo agradecimiento a mis tutores, los doctores Alina Rodríguez Infante y José Alejandro Zapata Balanqué. Muchas gracias por confiar en mí y darme la oportunidad de llevar a cabo esta investigación. Gracias por el tiempo invertido, los consejos y apoyos concedidos sin reservas.

Agradezco al Instituto Superior Minero Metalúrgico Dr. Antonio Núñez Jiménez (ISMM), donde me formé como profesional, y al colectivo de profesores de la Facultad de Geología y Minas (doctores Carlos Leyva, Rafael Guardado y Nicolás Muñoz; así como a los másteres Yurisley Valdés y Liuska Fernández) por la ayuda brindada. A Teresa Hernández, por guiarme en la tramitación del doctorado, sus consejos y sugerencias.

Doy gracias a mi compañero Ing. Ricardo Oliva Álvarez, por su voluntad de apoyarme durante el trabajo de campo, con muestras de gran empeño y dedicación. Mis agradecimientos al Dr. Tomás Chuy Rodríguez, que apoyó el trabajo de campo en Guamá y II Frente.

Gracias al técnico Silvio Rodríguez Albear, por la ayuda brindada. A los investigadores Eberto Hernández y Nicolás Vega, por su valiosa ayuda e información necesaria para la culminación de esta investigación. A los doctores Antonio Salgado y Darío Candebat, por su apoyo y empeño para que terminara la investigación. También agradezco de corazón a todos mis compañeros, que de una u otra forma me apoyaron en la realización de este trabajo.

Asimismo, a los oponentes, doctores Liber Galbán Rodríguez, José Rueda, Enrique Arango Arias, Carlos Pérez Pérez, Fernando Guasch Hechavarría, José Fernando

Alcaide Orpi y al especialista Eric Escobar Pérez; a todos, muchas gracias por sus sugerencias, revisión formal de la tesis, comentarios y señalamientos oportunos.

Quiero dar las gracias al Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais), por formarme como investigadora. Al Dr. Bladimir Moreno Toirac (actual director) y al Consejo Científico, por fortalecer la investigación a través de la asignación del número de oponentes.

Gracias, Yordan Infante y Alberto Beiris, por su valiosa ayuda en el manejo de los SIG. Agradezco a la Dra. Ingrid Vidau, por su apoyo en la realización de esta tesis.

Doy gracias al Dr. Guillermo Riveaux, la MSc. Melek Campos Sofía, la Lic. Ena Tauler Marañón y la Dra. Elizabeth Isaac Alemán del Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA). Agradezco al MSc. Rafael Chagman por su ayuda incondicional.

Finalmente, gracias a mi madre y mi tía Miriam, que desde el comienzo de mis estudios me apoyaron en todo y fueron las que me inculcaron los deseos de llegar a ser una profesional de este país. A mi hija y esposo, por tolerarme durante estos años. Al Dr. Amauris Domínguez, por sus ánimos y porque desde la distancia siempre estuvo pendiente del desarrollo de la investigación.

¡A todos, gracias de corazón!

DEDICATORIA

A mi familia,
por su cariño y apoyo incondicional

SÍNTESIS

Los movimientos telúricos de gran intensidad traen consigo la manifestación de fenómenos geológicos secundarios, entre estos los principales son los deslizamientos, la amplificación y la licuefacción de suelos; por tanto, su estudio y consideración en la prevención de desastres es importante. La presente investigación tiene como objetivo evaluar en Cuba suroriental la susceptibilidad a los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por actividad sísmica, a partir de la integración de los métodos morfométricos, la tectónica activa y el análisis sismológico.

La aplicación de estos métodos integrados en los sectores elegidos (Guamá, Santiago de Cuba y Guantánamo) permitió obtener la caracterización de nueve bloques morfotectónicos, donde predominan los deslizamientos en los bloques en ascenso y prevalece la licuefacción en los bloques en descenso relativo. Se obtuvo además la zonación de la susceptibilidad a la licuefacción y a los deslizamientos en estos territorios; el análisis del carácter activo de las principales fallas, así como su clasificación de acuerdo con estos criterios.

Palabras claves: deslizamientos, licuefacción de suelos, morfotectónica, susceptibilidad.

ABSTRACT

High-intensity telluric movements bring with them the manifestation of secondary geological phenomena, the main being the landslides, the amplification, and liquefaction of soils; as their study and consideration in disaster prevention is important. The present research aims to evaluate in Southeast Cuba the susceptibility to the hazards of landslides and liquefaction of soils induced by seismic activity, through the integration the morphometric methods, the active tectonics and the seismological analysis.

The application of these integrated methods in the sectors the study (Guamá, Santiago de Cuba and Guantánamo) allowed to obtain the characterization of nine morphotectonic blocks, where landslides predominate in the rising blocks and liquefaction prevails in the blocks in relative descent. The zonation of the susceptibility to liquefaction and landslides in these territories; the analysis of the active nature of the main faults, as well as their classification according to these criteria.

Keywords: landslides, liquefaction of soils, morphotectonic, susceptibility

| | Págs. |
|---|-------|
| ÍNDICE | |
| SÍNTESIS | |
| ABSTRACT | |
| INTRODUCCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO 1. DESLIZAMIENTOS Y LICUEFACCIÓN COMO PELIGROS GEOLÓGICOS INDUCIDOS POR LA ACTIVIDAD SÍSMICA | 11 |
| 1.1 Introducción | 11 |
| 1.2 Licuefacción y deslizamientos inducidos por sismos | 11 |
| 1.2.1 Caracterización de la peligrosidad por deslizamientos | 12 |
| 1.2. 2 Caracterización de la peligrosidad por licuefacción de suelos inducida por sismos | 17 |
| 1.3 Estudios de peligro por licuefacción y deslizamientos inducidos por sismos, situación internacional y nacional | 18 |
| 1.4 Metodologías empleadas en la evaluación de la susceptibilidad a licuefacción y deslizamientos inducidos por sismos | 28 |
| 1.5 Condiciones ingeniero-geológicas y sismotectónicas de Cuba suroriental | 31 |
| 1.6 Conclusiones | 39 |
| CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LOS PELIGROS DE DESLIZAMIENTOS Y LICUEFACCIÓN DE SUELOS, INDUCIDOS POR LA ACTIVIDAD SÍSMICA | 40 |

| ÍNDICE | Págs. |
|--|-------|
| 2.1 Introducción | 40 |
| 2.2 Metodología de la investigación | 40 |
| 2.3 Metodología para la evaluación de la susceptibilidad a los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por actividad sísmica | 41 |
| 2.3.1 Caracterización geológica | 42 |
| 2.3.2 Factores antrópicos | 42 |
| 2.3.3 Caracterización morfotectónica | 42 |
| 2.3.3.1 Definición de estructuras tectónicas | 42 |
| 2.3.3.2. Realización del análisis geomorfológico | 45 |
| 2.3.3.3 Revaluación de estructuras tectónicas regionales o límites de bloques morfotectónicos | 45 |
| 2.4. Evaluación sismológica | 47 |
| 2.4.1 Ejecución de análisis de los catálogos del Servicio Sismológico Nacional (SSN) | 47 |
| 2.4.2 Realización de análisis de la información macrosísmica existente | 48 |
| 2.4.3 Obtención de las máximas aceleraciones esperadas | 48 |
| 2.4.4 Aplicación del Criterio Magnitud-Distancia | 48 |
| 2.5. Peligros inducidos por actividad sísmica | 49 |
| 2.5.1 Evaluación de la susceptibilidad a la licuefacción de suelos inducida por sismos | 49 |

| | |
|--|-------|
| ÍNDICE | Págs. |
| 2.5.1.1 Criterio geológico-geomorfológico | 50 |
| 2.5.1.2 Criterio si/no se caracterizan los suelos a licuar | 52 |
| 2.5.2 Evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos inducidos por sismos | 53 |
| 2.5.2.1 Método zonación pasiva | 53 |
| 2.5.2.2 Comprobación directa | 56 |
| 2.6 Conclusiones | 56 |
| CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LOS PELIGROS DE DESLIZAMIENTOS Y LICUEFACCIÓN DE SUELOS, INDUCIDOS POR ACTIVIDAD SÍSMICA, EN TRES SECTORES DE CUBA SURORIENTAL | 57 |
| 3.1 Introducción | 57 |
| 3.2 Ubicación y caracterización general de los tres sectores de Cuba suroriental | 57 |
| 3.3 Evaluación de los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos, inducidos por la actividad sísmica, en el sector Guamá | 59 |
| 3.3.1 Caracterización geológica | 59 |
| 3.3.2 Factores antrópicos | 60 |
| 3.3.3 Caracterización morfotectónica | 61 |
| 3.3.4 Definición de estructuras tectónicas | 61 |

| ÍNDICE | Págs. |
|---|-------|
| 3.3.5 Realización del análisis geomorfológico | 65 |
| 3.3.6 Revaluación de estructuras tectónicas regionales o límites de bloques morfotectónicos | 66 |
| 3.3.7 Evaluación sismológica | 69 |
| 3.3.8 Peligros inducidos por la actividad sísmica | 69 |
| 3.4. Evaluación de los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos, inducidos por la actividad sísmica, en el sector Santiago de Cuba | 72 |
| 3.4.1 Caracterización geológica | 72 |
| 3.4.2 Factores antrópicos | 74 |
| 3.4.3 Caracterización morfotectónica | 75 |
| 3.4.4 Definición de estructuras tectónicas | 75 |
| 3.4.5 Realización del análisis geomorfológico | 79 |
| 3.4.6 Revaluación de estructuras tectónicas regionales o límites de bloques morfotectónicos | 80 |
| 3.4.7 Evaluación sismológica | 83 |
| 3.4.8 Peligros inducidos por la actividad sísmica | 84 |
| 3.5. Evaluación de los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos, inducidos por la actividad sísmica, en el sector Guantánamo | 86 |
| 3.5.1 Caracterización geológica | 87 |
| 3.5.2 Factores antrópicos | 88 |
| 3.5.3 Caracterización morfotectónica | 89 |

| | |
|---|-------|
| ÍNDICE | Págs. |
| 3.5.4 Definición de estructuras tectónicas | 89 |
| 3.5.5 Realización del análisis geomorfológico | 92 |
| 3.5.6 Revaluación de estructuras tectónicas regionales o límites de bloques morfotectónicos | 93 |
| 3.5.7 Evaluación sismológica | 95 |
| 3.5.8 Peligros inducidos por la actividad sísmica | 96 |
| 3.6 Conclusiones | 97 |
| CONCLUSIONES | 99 |
| RECOMENDACIONES | 100 |
| BIBLIOGRAFÍA | 101 |
| ANEXO | |



INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Los terremotos son fenómenos geológicos devastadores, que causan cada año pérdidas de vidas humanas y materiales. En el período 2010-2017 han ocurrido en el mundo 11 terremotos fuertes (Japón 2011, Chile 2010, 2014, 2015 y 2016; Indonesia 2012, Rusia 2013, Ecuador 2016, México e Irak 2017), de acuerdo con los datos del servicio geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey (USGS) en el 2017, con magnitudes superiores a los 7,1 grados en la escala Richter; de estos el sismo de Japón fue el más devastador y el que mayor número de víctimas humanas provocó.

Los movimientos telúricos de gran intensidad traen consigo la manifestación de fenómenos geológicos secundarios. Entre los principales se encuentran los deslizamientos, la amplificación y licuefacción de los suelos; por tanto, su estudio y consideración en la prevención de desastres es importante.

En el caso de Cuba, el área geográfica de mayor peligrosidad sísmica es la región oriental debido a su cercanía al contacto tectónico entre las placas Norteamérica y la del Caribe (zona de falla Bartlett-Caimán u Oriente). Asociadas a los terremotos de mayor magnitud de esta región se han reportado manifestaciones de licuefacción de suelos y deslizamientos.

En el caso de la licuefacción de suelos existen dos reportes en Cuba Oriental, uno en 1551 en las localidades de Bayamo, Yara, Cauto Embarcadero y Niquero (Cotilla y Córdoba, 2010) y el otro en 1932; proceso este último que afectó las zonas bajas cercanas a la bahía de Santiago de Cuba, donde existen sedimentos aluviales de baja compactación, compuestos por arcillas orgánicas, limo orgánico y arcilla muy plástica, según Fernández *et al.*, (2016).

En cambio, los deslizamientos inducidos por sismos fueron reportados en varias ocasiones: 1852 en la sierra de La Gran Piedra, 1930 en Maffo y Puerto Moya, 1947 en la loma del Kake en Santiago de Cuba y 1976 en la costa sur, cerca de la Sierra Maestra, entre los municipios Guamá y Pión (Chuy y Pino, 1982).

El Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais) dirige los estudios sismológicos del país. Esta institución tiene identificadas las zonas sismogeneradoras principales (Chuy *et al.*, 1997), así como otras caracterizaciones específicas relacionadas con la manifestación de los sismos y el peligro que generan. Sin embargo, los fenómenos secundarios que estos inducen (deslizamientos y licuefacción de suelos) son pocos tratados y se encuentran caracterizados a través de diferentes métodos.

En el caso de los deslizamientos, a nivel regional están los resultados obtenidos por Castellanos E. (2008), así como los alcanzados para las provincias de Santiago de Cuba (Villalón *et al.*, 2012; Galbán y Guardado, 2016), Guantánamo (Savón *et al.*, 2017) y Holguín (Colectivo de autores, 2011); la mayoría de ellos realizados para los estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgos (PVR); dirigidos por la Agencia Nacional de Medio Ambiente (AMA) y la Defensa Civil, en cumplimiento de las indicaciones de la Directiva 1/2010.

Estos estudios, específicamente los referidos a la temática de los deslizamientos, consideran de conjunto elementos sísmicos y ambientales, así como los catalizadores de estos fenómenos: lluvias y aceleración pico, mediante metodologías propias diseñadas a tales efectos. En la actualidad los mismos sirven de guía a nivel nacional y territorial para la toma de decisiones en situaciones de desastres por parte de la Defensa Civil, los Centros de Gestión y Reducción de Riesgos (CGRR), Planificación Física y otras entidades del estado. A propósito de la licuefacción de suelos, existen estudios detallados específicos en distintas partes de Cuba Oriental, como en la ciudad de Santiago de Cuba (García *et al.*, 2002; Márquez *et al.*, 2002; Heredia y Calderín, 2004; Chuy *et al.*, 2015b; Fernández *et al.*, 2016), en Guantánamo (Fernández *et al.*, 2017) y en Holguín (Zapata *et al.*, 2013). Estos también han sido entregados a las autoridades locales para su empleo en la toma de decisiones ante posibles desastres.

Independientemente de lo expresado con anterioridad, en el caso de los deslizamientos estos estudios no evalúan los elementos morfométricos, sismológicos y la tectónica activa de forma integrada; ya abordados parcialmente por varios autores en diferentes partes del mundo (Everard y Savigny, 1994; Vargas, 2002; Aristizábal y Yokota, 2006; Flores y Hernández, 2012).

Los métodos morfométricos y geomorfológicos ayudan a precisar los peligros inducidos por sismos y tienen como ventajas:

1. Permiten la caracterización y cartografiado del fallamiento con énfasis en las estructuras activas.
2. El estudio de las condiciones morfotectónicas a escala detallada.

3. Elevan el conocimiento para la zonación de la susceptibilidad a los deslizamientos y licuefacción de suelos.

En Cuba varias investigaciones se han enfocado en la elaboración de mapas de zonas sismogeneradoras (Orbera, 1985; González *et al.*, 1991; Cotilla, 1998, 1999, 2001; Cotilla *et al.*, 1997; Cotilla y Álvarez, 1998; Chuy *et al.*, 1997; Pérez *et al.*, 2008; Cabrera *et al.*, 2011; Arango, 2014), pero no se ha concebido la zonación de la susceptibilidad a deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por sismos, mediante el empleo integrado de métodos morfométricos, la tectónica activa y el análisis sismológico, incorporados a los métodos tradicionales que evalúan estos peligros geológicos secundarios, lo cual permite identificar las zonas donde deben realizarse estudios de detalle. Estos mapas de susceptibilidad pueden utilizarse como un instrumento en la toma de decisiones por las autoridades, la Defensa Civil y Cenais, entre otras instituciones.

El estudio bibliográfico mostró que existe poca ejecución de estudios morfotectónicos (Lilienberg *et al.*, 1988; Magaz *et al.*, 1991; Hernández *et al.*, 1991; Hernández *et al.*, 1994; Rodríguez, 1998; Zamorano *et al.*, 2000; Rosabal, 2001) que valoren la susceptibilidad a los deslizamientos y licuefacción inducidos por sismos, para que puedan emplearse en el perfeccionamiento de las determinaciones del peligro sísmico de esta región.

El análisis anterior establece como **problema científico** que los estudios de deslizamientos y licuefacción inducidos por actividad sísmica en el territorio de Cuba suroriental no integran los métodos morfométricos, la tectónica activa y el análisis sismológico, hecho que limita la evaluación de sus manifestaciones.

A partir de ese problema se define como **objetivo general** evaluar en Cuba suroriental la susceptibilidad a los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos, inducidos por actividad sísmica, a partir de la integración de los métodos morfométricos, la tectónica activa y el análisis sismológico.

El **objeto de estudio** está constituido por los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por actividad sísmica.

Y como **campo de acción** se establece la evaluación de la susceptibilidad a los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos, inducidos por actividad sísmica, en Cuba suroriental.

Se elaboraron los siguientes **objetivos específicos**

1. Evaluar conceptual y contextualmente los deslizamientos y la licuefacción como peligros geológicos inducidos por la actividad sísmica.
2. Aplicar los métodos morfométricos, la tectónica activa y el análisis sismológico, apoyados en herramientas del Sistema de Información Geográfica (SIG), en el área de investigación.
3. Evaluar la susceptibilidad a los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por actividad sísmica en tres sectores de Cuba suroriental.

Se plantea como **hipótesis** que, si se determinan las características morfométricas y geomorfológicas, sismológicas y tectónicas de un territorio, entonces se podrán definir las zonas de mayor susceptibilidad a los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos, inducidos por la actividad sísmica, lo que permitirá mejorar la estimación de la peligrosidad ante estos fenómenos.

Para cumplir con los objetivos propuestos en esta investigación fue necesario desarrollar varias **tareas**:

1. Valoración de la bibliografía existente relacionada con los deslizamientos y licuefacción de suelos como peligros geológicos inducidos por actividad sísmica.
2. Aplicación de los métodos morfométricos, el análisis sismológico y la tectónica activa en el área de investigación, apoyados en herramientas del Sistema de Información Geográfica (SIG).
3. Determinación de las posibles alineaciones y parámetros que indican movimientos tectónicos en los sectores de estudio de Cuba suroriental.
4. Realización del análisis geomorfológico, la caracterización geológica y antrópica de los sectores de estudio de Cuba suroriental.
5. Revaluación de las estructuras tectónicas regionales o límites de bloques morfotectónicos.
6. Definición de los bloques morfotectónicos de cada sector de investigación.
7. Caracterización de la sismicidad de la región de Cuba suroriental y los sectores de estudio.
8. Valoración de la susceptibilidad a los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por la actividad sísmica en los sectores de estudio de Cuba suroriental.

En la región de Cuba suroriental se seleccionaron tres sectores de estudio, bajo los siguientes criterios:

- Áreas que poseen suficiente grado de estudio que permiten verificar los resultados.
- Ciudades o asentamientos humanos ubicados en zonas de alta peligrosidad sísmica.

- Cercanía a las zonas de falla Oriente, la más importante de la región.

La **novedad científica** de este trabajo se basa en la integración de un conjunto de métodos morfométricos, el análisis sismológico y la tectónica activa para determinar los niveles de susceptibilidad a los deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por actividad sísmica, lo cual permite estimar la peligrosidad ante estos fenómenos. Las ventajas de su aplicación pueden resumirse en:

- Se elabora una metodología para evaluar los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos, inducidos por la actividad sísmica.
- Se obtienen nuevos mapas de susceptibilidad a los deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por actividad sísmica, para los sectores Guamá, Santiago de Cuba y Guantánamo, en todos los casos comprobados en el campo.
- Se establecen las fallas principales que cortan los sectores de estudios.
- Se caracterizan nueve bloques morfotectónicos entre los tres sectores de Cuba suroriental; de ellos, siete en ascenso y dos en descenso relativo.

La **actualidad de la investigación** está en correspondencia con los objetivos priorizados de la Defensa Civil Nacional, establecidos en la *Directiva No.1/2010* del presidente del Consejo de Defensa Nacional *Para la organización, planificación y preparación del país para situaciones de desastres*; con los objetivos estratégicos nacionales del Citma y con los *Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido Comunista de Cuba*, aprobados por el 7mo Congreso.

La reducción de riesgo de desastres naturales en Cuba es una prioridad. Como parte del DIRDN (Decenio Internacional para la Reducción de Desastres

Naturales), el gobierno, apoyado en un marco legal internacional (*Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático, El Marco de Sendai 2015-2030 para la Reducción del Riesgo de Desastres (MSRRD), Cumbre de Desarrollo Sostenible*) y nacional (*Ley 75 de la Defensa Nacional, Ley 81 del Medio Ambiente, Decreto Ley 170/97 del Sistema de Medidas de Defensa Civil, Decreto 262/99 de la Compatibilización del Desarrollo Económico Social del País con los Intereses de la Defensa, Resolución No.6/2002*) a través de la Defensa Civil y el Cenais, ha desarrollado instrumentos y herramientas que permiten determinar el peligro, la vulnerabilidad y el riesgo sísmico; accionar en su prevención y dar una respuesta eficaz.

Además, complementa los estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgo de los territorios estudiados; el ordenamiento territorial, los proyectos constructivos y las medidas de defensa civil.

El **aporte teórico** reside en que la metodología utilizada en la investigación permite integrar los métodos morfométricos, el análisis sismológico y la tectónica activa para la evaluación de la susceptibilidad a los peligros geológicos inducidos por la actividad sísmica y mejora el rigor de las evaluaciones que se realicen; asimismo, permite profundizar el conocimiento geológico de los sectores de estudio.

El **aporte práctico** es la determinación de los niveles de susceptibilidad a los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por actividad sísmica en los sectores seleccionados de Cuba suroriental, a partir de la integración de métodos morfométricos, el análisis sismológico y la tectónica

activa; así como la caracterización de las fallas activas y la elaboración de los mapas morfotectónicos de estos sectores.

Los resultados que se alcancen en la investigación se podrán insertar dentro de las acciones estratégicas relacionadas con la planificación y desarrollo de las zonas costeras y constituirán una base informativa para los estudios del programa del estado cubano para *El enfrentamiento al Cambio Climático* denominado Tarea Vida, teniendo en cuenta la alta susceptibilidad del territorio estudiado a los cambios de la dinámica global.

El **impacto social y ambiental** es el incremento en la precisión de la zonación de la susceptibilidad a los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por sismos, a través de la integración de los métodos morfométricos, el análisis sismológico y la tectónica activa; además será posible mejorar la estimación de la peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo ante estos fenómenos. Estos resultados tienen mayor incidencia en las áreas urbanizadas de las ciudades de Santiago de Cuba, Guantánamo y el poblado de Chivirico.

El **impacto económico** establece que, al contar con zonas inestables por peligros geológicos inducidos por actividad sísmica, se ofrece la posibilidad de planificar físicamente el espacio y diseñar y ejecutar proyectos de construcción económicamente sustentables. Además, se incrementa la precisión de los estudios de PVR de los sectores estudiados y sus asentamientos humanos.

En cuanto a los métodos de investigación, se emplearon métodos teóricos (histórico-lógico, hipotético-deductivo, inducción-deducción, análisis-síntesis y modelación), empíricos (documental o bibliográfico y estudio de caso) y el estadístico.

La presente investigación define como **estructura de la tesis** la introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

El primer capítulo consta de introducción, epígrafes enfocados en los peligros geológicos inducidos por sismos, situación internacional y nacional; así como una caracterización ingeniero–geológica y sismotectónica de Cuba suroriental.

En el Capítulo 2 se explica la metodología seguida en la investigación, la cual se desarrolló en tres etapas: preliminar, experimental y gabinete. Se diseña y se desarrolla una metodología que integra los métodos morfométricos, el análisis sismológico y la tectónica activa para obtener la zonación de la susceptibilidad a los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos, con el apoyo de herramientas del SIG.

En el Capítulo 3 se presentan los resultados de la aplicación de la metodología en los sectores seleccionados de Cuba suroriental. Se obtiene la caracterización de bloques morfotectónicos, el fallamiento activo y la zonación de la susceptibilidad a los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por sismos.



CAPÍTULO 1.

DESLIZAMIENTOS Y LICUEFACCIÓN COMO PELIGROS GEOLÓGICOS INDUCIDOS POR LA ACTIVIDAD SÍSMICA

CAPÍTULO 1. DESLIZAMIENTOS Y LICUEFACCIÓN COMO PELIGROS GEOLÓGICOS INDUCIDOS POR LA ACTIVIDAD SÍSMICA

1.1 Introducción

En este capítulo se establece el basamento teórico de la investigación. Su objetivo es realizar una valoración de las principales amenazas geológicas inducidas por la actividad sísmica, los deslizamientos y la licuefacción de suelos; su evaluación y situación internacional y nacional.

1.2 Licuefacción y deslizamientos inducidos por sismos

Un sismo, terremoto, movimiento telúrico o temblor de tierra es un fenómeno geológico de carácter repentino, que ocurre por una liberación súbita de energía en un punto de la corteza terrestre; este movimiento causa ondas sísmicas, que se propagan desde el punto de origen y viajan a través de la tierra.

De forma general, los sismos pueden producirse por varias causas, tales como: el choque de las placas tectónicas de la tierra, los deslizamientos de tierra, el ascenso del magma volcánico, los colapsos de rocas inducidos por el llenado rápido de los embalses, el choque de meteoritos y la acción antrópica.

Los terremotos se caracterizan por cuatro parámetros: tiempo de origen, foco o hipocentro, epicentro, magnitud e intensidad.

Los efectos de un terremoto pueden ser varios: movimiento y ruptura del suelo, deslizamientos de tierra, incendios, licuefacción de suelos, tsunamis, inundaciones y lesiones o pérdidas de vidas humanas; además de daños en las carreteras, puentes y en general en los bienes.

1.2.1 Caracterización de la peligrosidad por deslizamientos

Los deslizamientos son fenómenos que contribuyen significativamente a la evolución del relieve y el paisaje en numerosas regiones de la superficie terrestre, modifican más o menos bruscamente las condiciones ambientales y están entre los peligros de origen geológico que causan los daños más extendidos en el mundo.

Para que ocurra un deslizamiento es necesario, como condición, la existencia de un talud o ladera, que posea pendiente o cambios de altura significativos (Suárez, 1998). Los elementos morfométricos de un talud o ladera son:

- **Altura.** Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza. Se presenta claramente definida en taludes artificiales, pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados.
- **Pie.** Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.
- **Cabeza o escarpe.** Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.
- **Altura de nivel freático.** Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.

- Pendiente. Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, porcentaje o relación $m/1$; en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical (ver figura 1).

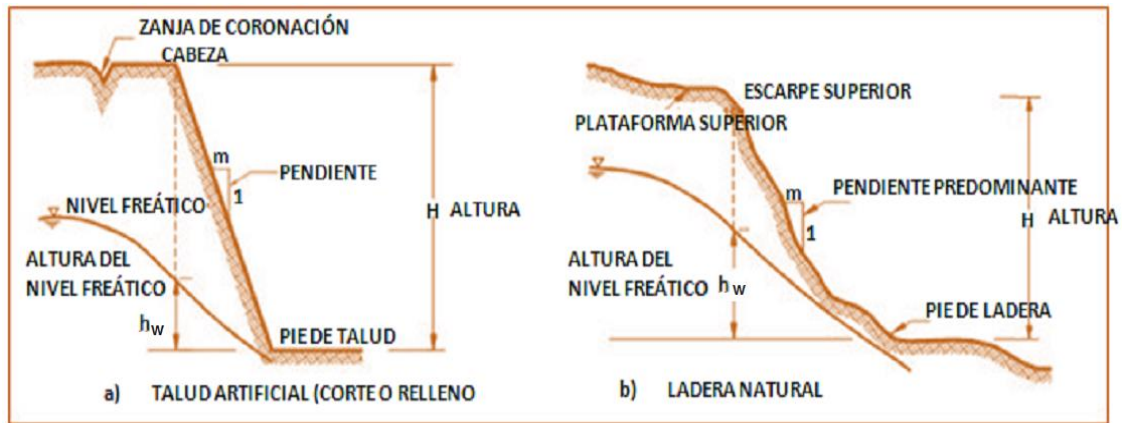


Figura 1. Nomenclatura de taludes y laderas. Fuente: Suárez, (1998). Existen, además, otros factores topográficos, como son: longitud, convexidad (vertical), curvatura (horizontal) y área de cuenca de drenaje; los cuales pueden tener influencia sobre el comportamiento geotécnico del talud.

Un deslizamiento puede ser descrito por las características geomorfológicas de la masa desplazada y del terreno alrededor del movimiento. Estas características definen un cierto número de elementos morfológicos, que han sido descritos por Varnes (1978):

- Corona. Sector de la ladera que no ha fallado, se localiza en la parte más alta de la zona desplazada. En ocasiones presenta grietas, llamadas grietas de la corona.
- Escarpe principal. Superficie de la pendiente muy fuerte, localizada en el límite del deslizamiento y originada por el material desplazado de la ladera. Si este escarpe se proyecta bajo el material desplazado, se obtiene la superficie de ruptura.

- Escarpe menor. Superficie de pendiente muy fuerte en el material desplazado, producida por el movimiento diferencial dentro de este material.
- Punta de la superficie de ruptura. Intercepción (algunas veces cubierta) entre la parte baja de la superficie de ruptura y la superficie original del terreno.
- Cabeza. Parte superior del material desplazado a lo largo de su contacto con el escarpe principal.
- Tope. Punto más alto de contacto entre el material desplazado y el escarpe principal.
- Cuerpo principal. Parte del material desplazado sobre el que yace la superficie de ruptura localizada entre el escarpe principal y la punta de la superficie de ruptura.
- Flanco. Lado del deslizamiento.
- Pie. Porción del material desplazado que descansa ladera abajo desde la punta de la superficie de ruptura.
- Dedo. Margen del material desplazado más distante del escarpe principal.
- Punta. Punto en el pie más distante del tope del deslizamiento (figura 2).

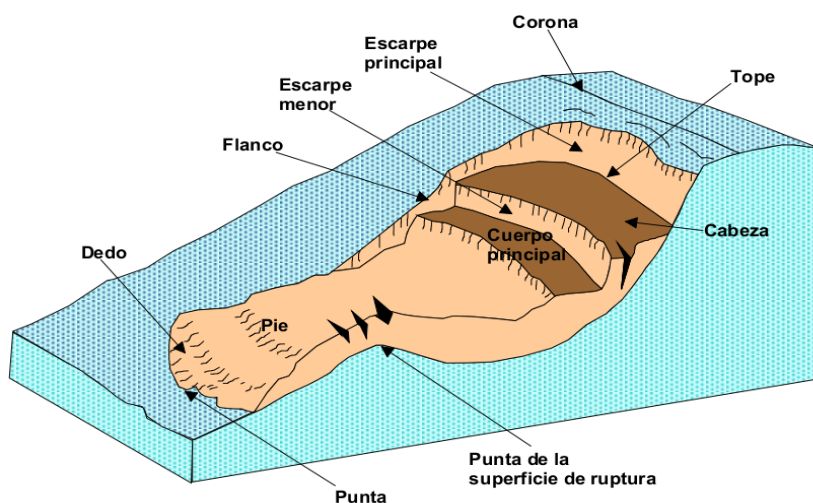


Figura 2. Elementos estructurales de un deslizamiento. Fuente: Varnes, (1978).

Según un colectivo de autores (2011), los factores condicionantes en la formación de deslizamientos en un territorio son:

- La estructura y composición geológica de las laderas y taludes.
- Las particularidades de las propiedades físico-mecánicas de las rocas y suelos.
- Las condiciones de actividad de las aguas subterráneas cercanas a la superficie.
- Las condiciones de actividad de las aguas superficiales.
- La presencia de vegetación.
- Las particularidades climáticas de la región.
- El régimen hidrológico de las cuencas, sus arroyos y ríos con sus tramos deslizables.
- El relieve del terreno.
- Los movimientos neotectónicos y los fenómenos sísmicos a ellos asociados.

En términos generales, la inestabilidad de las laderas, inducida por sismos, incluye una variedad de fenómenos que pueden ser clasificados, según Keefer and Wilson (1989), en tres principales categorías.

- Categoría I: caídas de rocas o suelos, deslizamiento de suelos o rocas, deslizamiento translacional a lo largo de una superficie debilitada, aludes de roca y suelo.
- Categoría II: deslizamiento rotacional de suelos o masas de rocas, flujos de tierra lentos.
- Categoría III: propagación lateral, flujos de tierra rápidos.

Según Keefer (1984), existe posibilidad de deslizamientos causados por sismos con magnitud de 4,0 (caídas de roca, deslizamientos de roca, caídas de suelo y alteración de masas de suelo), 4,5 (deslizamiento de traslación, rotación y bloques de suelo), 5,0 (flujos de suelo, esparcimientos laterales, deslizamientos subacuáticos), 6,0 (avalanchas de roca) y 6,5 Richter (avalanchas de suelo).

La susceptibilidad a los deslizamientos puede definirse como la posibilidad de que una zona sea afectada o genere un determinado fenómeno de deslizamiento, en función de los factores que controlan o condicionan la ocurrencia de estos procesos; pueden ser intrínsecos a los propios materiales geológicos o externos.

Los mapas de susceptibilidad se realizan a partir de datos cartográficos de tipos topográficos, geomorfológicos, litológicos, estructurales, uso del suelo y otros. Estos parten del análisis de las condiciones actuales existentes de los deslizamientos para, extrapolando los resultados de dicho análisis, confeccionar el mapa de susceptibilidad (Obregón y Lara, 2014).

Para evaluar la peligrosidad por deslizamientos se emplean en la actualidad los SIG. Estos se han convertido en una herramienta útil para identificar, cartografiar y evaluar el riesgo asociado (Bathrellos *et al.*, 2009), ya que permiten la extracción, almacenamiento y procesamiento rápido de la información (Guzzetti *et al.*, 2006). Del mismo modo, integran y modelan espacialmente los datos de fuentes diversas y exploran las relaciones entre causa-efecto (Van Westen y Soeters, 2000).

Según Van Westen (1993), las ventajas del uso del SIG para evaluar la susceptibilidad a los deslizamientos son varias, como la velocidad de cálculo, que permite realizar un número de cruces de mapas y cálculos de tablas; la posibilidad

de mejorar modelos mediante la evaluación de sus resultados y el ajuste de las variables de entrada; además de la actualización de mapas derivados de observaciones de campo.

1.2. 2 Caracterización de la peligrosidad por licuefacción de suelos inducida por sismos

La licuefacción de suelos es un fenómeno donde la rigidez y la resistencia de los suelos se reducen o se pierden, como consecuencia de movimientos dinámicos producidos durante los terremotos u otros esfuerzos dinámicos o rápidos. Esto se debe a la facilidad que tiene un suelo de aumentar su presión de poros, de manera que se pueda producir la pérdida total de su resistencia efectiva, por lo cual pasaría a comportarse como un fluido (Pierre–Yves, 2005).

Los daños por licuefacción pueden ser dramáticos: se desestabilizan las construcciones, pudiendo generar su caída; se produce agrietamiento y propagación lateral (figura 3), colapso de puentes (figura 4), averías en tuberías, cables eléctricos y conexiones de gas. El incremento de la presión de poros, provocado por la licuefacción, puede formar chorros de agua y aire mezclados con sedimentos finos, que cuando son expulsados sobre la superficie del terreno crean volcanes de arena y agua (figura 5).

La licuefacción depende de los factores intensidad, duración del sismo y material susceptible (Technical committee for earthquake geotechnical engineering (TC4) of the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE), 1999). El resultado de la combinación de esos elementos en un sitio se considera como peligro o potencial de licuefacción (Pierre–Yves, 2005).



Figura 3. Agrietamiento y propagación lateral en Chile. Fuente: Falcón y Ramírez, 2012.



Figura 4. Colapso de puentes y daños por grietas en Chile. Fuente: Falcón y Ramírez, 2012.



Figura 5. Volcanes de arena. Chile. Fuente: Falcón y Ramírez, 2012.

La estimación del potencial de licuefacción 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 a partir de la intensidad máxima o la aceleración (máximas, efectivas, espectrales).

Lo anterior permite evaluar la posibilidad real de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en una ciudad de alta densidad poblacional y gran volumen de industrias, en las cuales puede provocar afectaciones económico-sociales incalculables.

Según Kramer (1996), los suelos susceptibles son los materiales uniformes, granulares sueltos y saturados, tales como los depósitos fluviales, coluviales y eólicos; así como los rellenos y suelos reclamados al mar. Este fenómeno se ha observado en abanicos aluviales, playas y otros depósitos. Los suelos de edad Holoceno son más susceptibles que los del Pleistoceno.

Los suelos no plásticos son muy susceptibles, especialmente los limos, las arenas finas y algunas arcillas, de acuerdo con sus propiedades, según Wang (1979).

1.3 Estudios de peligros por licuefacción y deslizamientos inducidos por sismos, situación internacional y nacional

A nivel internacional la licuefacción es la causante del agravamiento de los escenarios que han sido afectados por fuertes terremotos, como en los siguientes casos:

Chile, 2010, la licuefacción se extendió entre La Calera y el Lago Llanquihue. Los daños incluyeron la formación de grietas, asentamientos, desplazamiento lateral del suelo y formación de volcanes de arenas. Las estructuras afectadas fueron

viviendas, puentes, pasos a desnivel, puertos, muelles, tranques de relaves y estructuras enterradas (González y Verdugo, 2014).

En Chile, 1965, fallaron 8 presas de relave; dos de estas arrasaron con el pueblo El Cobre, donde murieron más de 200 personas (Verdugo, 2009).

En correspondencia con lo anterior, la comunidad científica ha incrementado su preocupación por la licuefacción, en aras de su prevención; sin embargo, en Cuba solo se han desarrollado estos estudios de forma puntual, lo cual influye en el ordenamiento territorial del país; particularmente en Cuba Oriental los estudios realizados corresponden a las ciudades de Santiago de Cuba, Holguín y el municipio Caimanera, Guantánamo. A continuación, se mencionan algunos de los trabajos precedentes:

Zapata (1995) presentó las zonas con posibilidades de desarrollo urbano, teniendo en cuenta variantes metodológicas para la licuefacción, deslizamientos y derrumbes en la cuenca Santiago de Cuba. Para la evaluación de la licuefacción el autor no tuvo en cuenta los suelos susceptibles y sus características.

Fernández (2000) elaboró el mapa de licuefacción de suelos de la ciudad de Santiago de Cuba a escala 1:25 000, basado en características geólogo-geomorfológicas, profundidad de niveles freáticos, entre otros factores; además, valoró el sismo como catalizador, con diferentes magnitudes y distancia de los terremotos fuertes ocurridos. Pero la autora excluye los suelos susceptibles y sus características para la evaluación de la licuefacción.

Fernández *et al.* (2000) determinaron la posibilidad de ocurrencia de licuefacción inducida por sismos a través de comprobaciones en el terreno, la evaluación de los suelos, profundidad de las aguas subterráneas, topografía y los terremotos

como catalizadores. Sin embargo, no valoraron los elementos geológicos y geomorfológicos, así como las características de los suelos susceptibles que influyen en la licuefacción.

García *et al.* (2002) obtuvieron el mapa de riesgo sísmico de Santiago de Cuba a escala 1:25 000, con la evaluación de la licuefacción de suelos como consecuencia de sismos de gran intensidad; determinaron la vulnerabilidad sísmica para la ciudad de Santiago de Cuba y establecieron la distancia a la tectónica activa. Pero debieron apreciar los criterios geológicos y geomorfológicos que influyen en la licuefacción.

Heredia y Calderín (2004) determinaron a través del factor de seguridad que la licuefacción solo ocurre en aislados puntos: en los suelos donde se ubican el Hospital Militar y el tanque de succión anexo al mismo, el muelle Malecón 620, el ramal de ferrocarril y el patio de la refinería, la remodelación Punta Gorda, Almacenes Cimex (Santiago In Bond). Sin embargo, no valoraron los suelos susceptibles y sus características.

Zapata *et al.* (2013) lograron determinar la susceptibilidad a la licuefacción de suelos en la presa de cola de la fábrica Ernesto Guevara de Moa, Holguín, a través de la identificación de los suelos susceptibles, mediante la valoración de las propiedades físico–mecánicas, tales como índice de plasticidad (IP), límite líquido (LL), contenido de agua, tamaño del grano y grado de saturación; además, aplicaron el criterio chino para la evaluación de la licuefacción.

Chuy *et al.* (2015b), a partir de las propiedades físico–mecánicas de los suelos en una pequeña área de la costa oeste de la bahía de Santiago de Cuba, donde se ubica la terminal portuaria multipropósito, determinaron que en ese sitio no existen

condiciones para que ocurra la licuefacción de suelos. Establecieron como problemas geotécnicos la subsidencia, asentamientos y grietas en el terreno.

Fernández *et al.* (2016) obtuvieron la zonación del potencial de licuefacción de suelos para el Consejo Popular Guillermón Moncada, Santiago de Cuba, mediante la evaluación de las condiciones ingeniero-geológicas, el nivel freático y los resultados del cálculo del factor de seguridad. Como resultado propusieron un esquema de susceptibilidad y demostraron que los sectores más susceptibles ante sismos de magnitudes entre 7,0 y 8,0 Richter se ubican hacia el centro-este de esta área, donde predominan suelos areno–arcillosos.

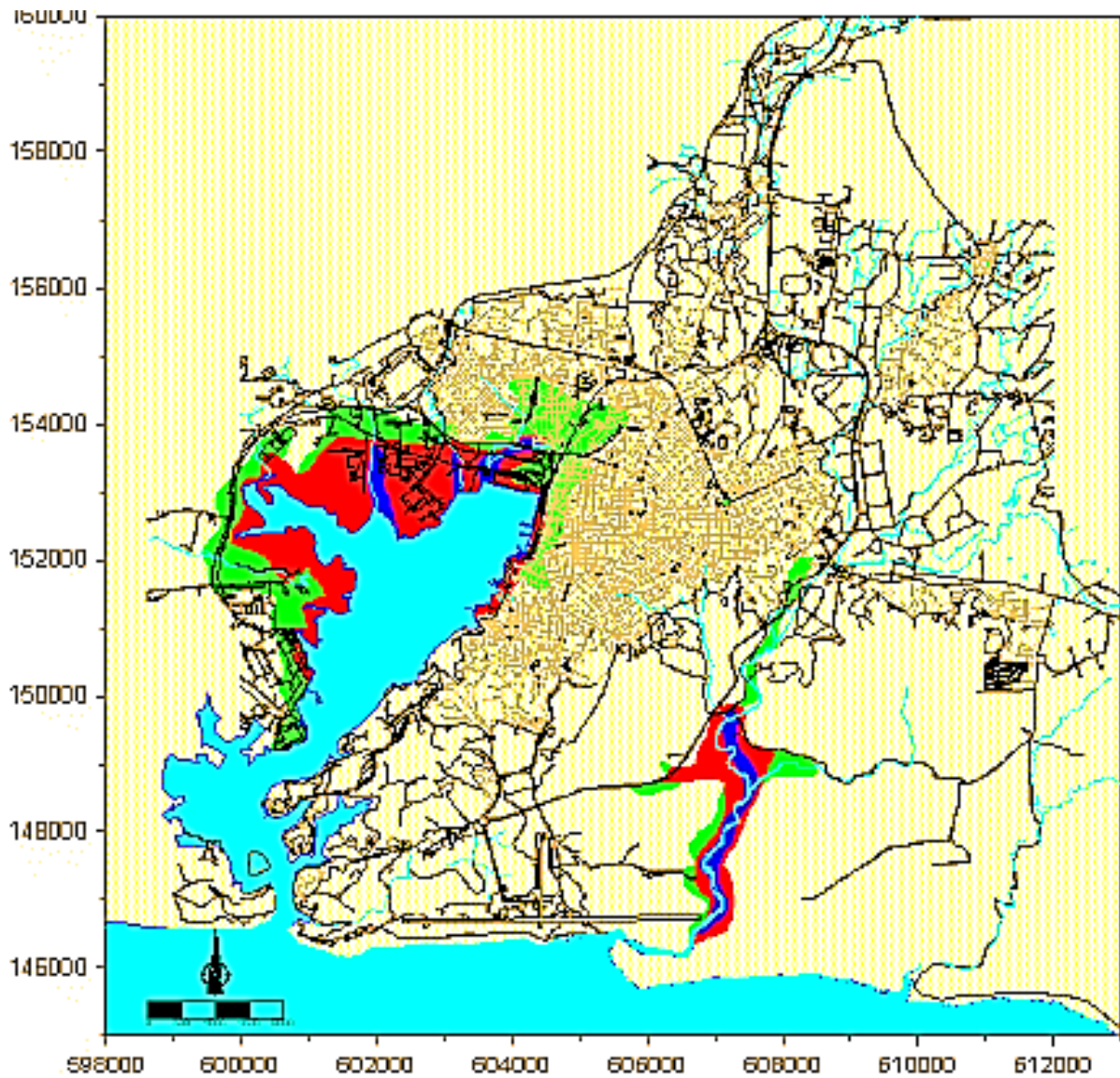
Fernández *et al.* (2017) obtuvieron el esquema del potencial de licuefacción del municipio Caimanera a escala 1:50 000, con cuatro niveles de susceptibilidad, alto, medio, bajo y sin datos; mediante la evaluación de las condiciones ingeniero–geológicas de los suelos y el cálculo del factor de seguridad.

La tabla 1 muestra la comparación de resultados precedentes de licuefacción de suelos inducida por actividad sísmica con los resultados alcanzados para los tres sectores de Cuba suroriental; la misma refleja las diferencias existentes (figura 6), desde las escalas de trabajo, métodos o metodologías empleados y los resultados obtenidos.

La mayoría de estos resultados han sido introducidos en la práctica social por instituciones como el Cenais, la Universidad de Oriente (UO) y el Instituto Minero Metalúrgico de Moa (ISMM); lo cual influye en la toma de decisiones de los inversionistas, ya que deben aplicar medidas para mitigar sus efectos y evitar los suelos susceptibles a licuefacción, tales como construir estructuras resistentes con cimentaciones superficiales y pilotes (NC46:99).

Tabla 1. Resultados de la comparación de trabajos precedentes de licuefacción de suelos con el estudio actual realizado para los tres sectores de Cuba suroriental. Fuente: Autora

| Autor | Métodos o Metodologías empleadas para evaluar la licuefacción de suelos | Escala | Resultados | Resultados alcanzados para los sectores Guamá, Santiago de Cuba y Guantánamo |
|--|--|-------------------|--|---|
| Zapata, J. 1995 | Variante metodológica para la licuefacción | | Zona de mayor susceptibilidad a licuefacción de suelos (bahía, zona industrial y portuaria, cuencas de los ríos San Juan, Gascón y antiguos ríos que corrían por Yarayó y Trocha | <ul style="list-style-type: none"> • Obtención de nuevos mapas de susceptibilidad a licuefacción de suelos inducidos por actividad sísmica, a partir de la integración de métodos morfométricos y el análisis sísmológico en los sectores Guamá (que incluye las desembocaduras de los ríos Jibacoa, Palma Mocha, El Naranjo, Potrerillo, Ocuja, El Muerto, Turquino, Peladero, Babujal, Uvero, Avispero, Bayamita, Grande y Guamá), Santiago de Cuba (actual cauce del río Cobre, alrededores de las bahías Cabañas y Santiago de Cuba, cuencas de los ríos San Juan, Sardinero y Santa Ana) y Guantánamo (actual cauce de los ríos Guaso, Jaibo, Guantánamo y los alrededores de la bahía homóloga y el poblado Caimanera). • Se establecieron las fallas principales que cortan a los sectores de estudios. • Se caracterizaron nueve bloques morfotectónicos entre los tres sectores; de ellos, siete en ascenso con gran susceptibilidad a deslizamientos y dos bloques en descenso relativo con las mayores áreas susceptibles a la licuefacción de suelos. |
| Fernández <i>et al.</i> , 2000 | Análisis de profundidad de niveles freáticos; tipología y propiedades de los suelos; estructuras tectónicas locales; pendiente del terreno | 1:200 000 | Esquema de ocurrencia de fenómenos físico-geológicos en la ciudad de Santiago de Cuba. | |
| Fernández, 2000 García <i>et al.</i> , 2002 | Evaluación de las condiciones ingeniero-geológicas, el análisis del nivel freático; topografía; edad de los suelos; magnitud y distancia de los terremotos; distribución de licuefacción durante terremotos pasados comparados con las curvas propuestas por Youd, Perkin y Ambrasey y reportes históricos (Figura 6). | 1:25 000 | Mapa pronóstico de ocurrencia del fenómeno de licuefacción inducido por sismos con aceleraciones igual o mayor a 0,3 g e intensidades mayores o iguales que 8,5 grados MSK, para la cuenca Santiago de Cuba. | |
| Heredia, N y Calderín, F. 2004 | Calculan el factor de seguridad | Escala de detalle | Determinan que la licuefacción puede aparecer en los suelos del Hospital Militar y el tanque de succión anexo al mismo, en el muelle Malecón 620, en el ramal de ferrocarril y el patio de la refinería, en la remodelación Punta Gorda, Almacenes CIMEX (Santiago In Bond). | |
| Galbán, L. 2014 | La modelación de los niveles freáticos y su combinación con la susceptibilidad litológica dio como resultado que las áreas más susceptibles a la ocurrencia de la licuefacción corresponden a las zonas bajas cercanas a la costa donde los ríos depositan sedimentos aluviales de baja compactación (formaciones Maya, La Cruz, Río Macío, El Caney, Jutía y depósitos aluviales asociados a formaciones del grupo El Cobre). | 1:50 000 | Mapa de riesgo a la licuefacción de suelos de la provincia Santiago de Cuba | |



LEYENDA

Niveles de susceptibilidad a la licuefacción



Figura 6. Mapa de susceptibilidad a la licuefacción de suelos de la cuenca Santiago de Cuba. Escala 1:25 000. Área=216 km². Fuente: García *et al.*, 2002.

A partir de experiencias locales y reportes históricos, es recomendable realizar la zonación de la susceptibilidad a la licuefacción en áreas donde estén presentes los factores condicionantes y desencadenantes.

Por otra parte, los deslizamientos son considerados entre los principales causantes de desastres naturales que producen daños significativos a las vidas humanas, las propiedades y proyectos de ingeniería en las áreas montañosas del mundo (Marta *et al.*, 2010). En 1960 un terremoto de magnitud 9,5 Richter azotó las costas del centro sur de Chile y causó deslizamientos profundos y cientos de deslizamientos superficiales (Davis y Karzulovic, 1963; Weischet, 1963).

A nivel mundial los grandes terremotos han detonado una variedad de deslizamientos y de erosión, lo que ha afectado la estabilidad de taludes; lo anterior ha sido documentado en numerosos estudios (Keefer, 1984; Denier *et al.*, 1991; Vargas, 2002; Keefer, 2002; Meunier *et al.*, 2007; Laffaille *et al.*, 2010).

También otros autores, como Ouimet (2011), Parker *et al.* (2011) y Schulz *et al.* (2012) documentaron deslizamientos en el mundo. Estos fenómenos han causado cientos de miles de muertos, billones de dólares de pérdidas económicas; asimismo, han denudado miles de km² de suelo (Keefer, 1984). La mayoría de los procesos han ocurrido a lo largo de fallas y en laderas de montañas escarpadas con grandes desniveles topográficos (Denier *et al.*, 1991; Laffaille *et al.*, 2010).

Keefer (1984) presentó una recopilación de casos históricos de deslizamientos inducidos por sismos, con el fin de establecer la relación general entre la extensión de los deslizamientos y los parámetros sísmicos como herramienta preliminar de zonificación de riesgos.

Everard y Savigny (1994) estudiaron los efectos neotectónicos en la distribución de deslizamientos para el área de Yukón, Canadá. Determinaron la relación entre la litología de los deslizamientos y los epicentros de los sismos por medio de un inventario de deslizamientos. Las rocas con discontinuidades penetrantes y orientaciones que faciliten los deslizamientos son más susceptibles a las fallas sísmicas, debido a que el desplazamiento crítico es mínimo.

Mora (1997a) presentó una compilación de los sismos más fuertes de Costa Rica, que detonaron deslizamientos con magnitudes mayores a 5,2 Richter, y mostró que la extensión y distribución de los deslizamientos dependen de las condiciones climáticas.

Tossati *et al.* (2008) presentaron una compilación de 18 deslizamientos inducidos por sismos con magnitudes entre 3,6 y 6,5 Richter en la zona norte de la cadena montañosa de los Alpes italianos, los cuales reflejan la máxima distancia al epicentro.

Delgado *et al.* (2011) recopilaron información de aproximadamente 17 sismos que indujeron terremotos en la Cordillera Bética, España, entre magnitudes de 4,2 a 6,9 Richter, y realizaron la comparación de la relación entre magnitud y la distancia epicentral y/o área afectada.

Caballero (2011) desarrolló un formato de recopilación de datos de deslizamientos inducidos por sismos en Colombia, a partir de 760 eventos compilados, que incluye tipo de mecanismo, material, distancia epicentral, volumen de sedimentos ocasionados por cada deslizamiento; así como notas que permiten sintetizar la información y elaborar análisis estadísticos.

Si bien en los últimos años a nivel mundial ha aumentado la preocupación por la evaluación de este peligro y la valoración de sus daños, en Cuba aún no ha adquirido la importancia apropiada, pues se detectan como insuficiencias la inexistencia de un inventario de deslizamientos inducidos por sismos y solo se tienen reportes, sin coordenadas para su ubicación; lo cual dificulta la aplicación de las metodologías antes mencionadas.

En Cuba los deslizamientos mayormente estudiados están relacionados con el paso de huracanes, tormentas tropicales y con prolongados períodos de intensas lluvias (Castellanos, 2008). A continuación, se mencionan algunos de los trabajos precedentes que han evaluado esta amenaza en la región de Cuba Oriental.

Reyes (2001) presentó el mapa de peligro geológico por deslizamientos en la ciudad de Santiago de Cuba y sus alrededores a escala 1:25 000 y evaluó los factores condicionantes y los catalizadores. Sin embargo, no consideró la acción antrópica, los aspectos ingeniero-geológicos y la tipología de deslizamientos presentes, así como los requerimientos por grados de zonación sísmica según escala de trabajo.

Del Puerto y Ulloa (2003) identificaron los peligros geólogo-geomorfológicos de la cuenca Santiago de Cuba a escala 1:25 000, con morfometría, y obtuvieron mapas tipológicos de peligros y su distribución espacial. En este estudio se suprimió la evaluación del sismo como detonante de los deslizamientos según la escala de trabajo.

Almaguer (2005), con el empleo de un mapa de inventario, determinó para el yacimiento Punta Gorda la susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos; igualmente, evaluó la influencia de los factores condicionantes y

obtuvo la caracterización de los mecanismos y tipologías de deslizamientos. En este caso debió evaluarse la acción sísmica.

Reyes *et al.* (2005), a través de la zonación de deslizamientos, basada en la combinación de la evaluación de factores pasivos y activos (sismo y lluvia) y la aplicación de métodos de Grado 1, determinaron el nivel de peligro geológico de la red vial de las provincias orientales para casos de sismos de gran intensidad. Pero los autores no valoraron la acción antrópica.

Morejón *et al.* (2006) realizaron estudios de vulnerabilidad ante la ocurrencia de eventos naturales en las carreteras de interés nacional de la provincia Santiago de Cuba y caracterizaron los peligros geológicos a partir de la topografía, propiedades físico-mecánicas de los suelos y rocas; además, analizaron los posibles incrementos de la amenaza sísmica, así como la influencia de la tectónica. Los autores consideraron los requerimientos de la zonación sísmica según escala de trabajo.

Castellanos (2008), con el uso de varios métodos, realizó la evaluación multiescala del riesgo por deslizamientos del terreno en toda Cuba, desde los niveles nacional, provincial, municipal y local. Para el primer caso empleó modelos semicuantitativos con 10 indicadores estandarizados. En el segundo combinó métodos heurísticos, estadísticos y elementos en riesgo. En el tercer caso utilizó métodos heurísticos con pesos asignados por expertos. Y en el último empleó modelos runout en el escarpe de Caujerí, a escala 1:25 000. Sin embargo, la zonación obtenida para las caídas de rocas de la provincia Guantánamo debió incluir otras áreas con susceptibilidad donde existen condiciones para su ocurrencia.

Rosabal *et al.* (2009) determinaron la incidencia de la geomorfología en los deslizamientos de la carretera de Beltrán, Guantánamo, a través de las variables disección vertical, máximas alturas y clasificación del relieve; se contrastaron los resultados con los materiales obtenidos de los recorridos de campo. Se identificaron zonas con similares parámetros, proclives al fenómeno, y se aplicaron métodos de Grado 1 de zonación sísmica. Se debieron considerar los aspectos ingeniero–geológicos de las formaciones presentes.

AMA (2012) propone la guía metodológica para el estudio de peligro, vulnerabilidad y riesgo (PVR) por deslizamientos de terreno a nivel municipal con 4 fases (identificación de escenarios susceptibles, cálculo de peligro y vulnerabilidad, así como la estimación del riesgo). Esta metodología es implementada en diferentes partes de Cuba y ha arrojado resultados importantes para la toma de decisiones a diferentes niveles; sin embargo, no incluye los aspectos ingeniero–geológicos de las formaciones presentes para determinar la susceptibilidad litológica.

Savón *et al.* (2017) realizaron la evaluación del peligro que generan los movimientos gravitacionales en la provincia Guantánamo. Emplearon una metodología de PVR mediante el método de suma ponderada de factores y el mapa isoyético de lluvias máximas de 60 años para obtener un modelo digital de lluvias máximas hiperanual. La metodología empleada excluye los aspectos ingeniero–geológicos de las formaciones presentes, no integra los elementos morfométricos, la tectónica activa y el análisis sismológico; así como excluye la influencia de la acción antrópica.

Galbán y Guardado (2016) desarrollaron una metodología basada en los niveles de importancia de las variables que influyen en la manifestación de los deslizamientos y propusieron la formulación matemática para su determinación mediante un SIG. En este caso se considera que la susceptibilidad litológica debe integrar los aspectos ingeniero-geológicos, tales como la alternancia de rocas duras con débiles, la estratificación y rocas intemperizadas. Además, los investigadores no concibieron la comprobación directa en el terreno para corroborar sus resultados, aunque emplearon otros métodos indirectos.

En la tabla 2 se muestran los resultados de la comparación de trabajos precedentes de deslizamientos inducidos por actividad sísmica con los resultados alcanzados para los tres sectores de Cuba suroriental. La misma refleja diferencias existentes desde las escalas de trabajo, métodos o metodologías empleados (figuras 7, 8 y 9) y los resultados obtenidos.

En Cuba Oriental son insuficientes los trabajos que evalúan los deslizamientos inducidos por sismos ni existe su inventario; los aspectos ingeniero-geológicos no son considerados en la susceptibilidad litológica y son escasos los estudios que declaran la existencia de caídas y desprendimientos de rocas; así como tampoco la valoración de la acción antrópica, la comprobación directa en el terreno de los resultados y las exigencias de la zonación sísmica por escala de trabajo.

Tabla 2. Resultados de la comparación de trabajos precedentes de deslizamientos inducidos por actividad sísmica, con el estudio actual realizado para los tres sectores de Cuba suroriental. Fuente: Autora

| Autor | Métodos o Metodologías empleadas para evaluar los deslizamientos | Escala | Resultados | Resultados alcanzados para los sectores Guamá, Santiago de Cuba y Guantánamo |
|-------------------------------|---|-------------|--|---|
| García, <i>et al</i> 2002 | Método propuesto por Mora y Varshon que incluye el análisis de la susceptibilidad por relieve (disección vertical) susceptibilidad por geología (profundidad del nivel freático, litología predominante, grado de intemperismo y grado de fracturación); susceptibilidad por humedad del suelo (precipitaciones mensuales promedio); y disparadores como lluvia (lluvia máxima) y sismos (intensidad sísmica) . | 1:25 000 | Esquema de ocurrencia de fenómenos físico-geológicos en la ciudad de Santiago de Cuba. | Obtención de nuevos mapas de susceptibilidad a los deslizamientos inducidos por actividad sísmica, a partir de la integración de métodos morfométricos, el análisis sísmológico y la tectónica activa en los sectores Guamá (alta susceptibilidad a caídas, desprendimientos y deslizamientos en gran parte del sector al norte), Santiago de Cuba (deslizamientos al norte en las cercanías del escarpe de Boniato y al este de la bahía de Santiago de Cuba, donde también pueden aparecer desprendimientos y caídas de rocas, así como en el asentamiento Aguadores, ubicado al sureste de la bahía de Santiago de Cuba en la zona costera, deslizamientos en la sierra de la Gran Piedra) y Guantánamo (caídas y desprendimientos de rocas en las colinas montañosas, en la meseta de Santa María del Loreto, alta susceptibilidad a deslizamientos rotacionales en la sierra del Maquey). |
| Castellanos, E 2008 | Modelos semicuantitativos con 10 indicadores estandarizados | 1:1 000 000 | Mapa índice de riesgos por deslizamientos para Cuba | Se establecieron las fallas principales que cortan a los sectores de estudios. Se caracterizaron nueve bloques morfotectónicos entre los tres sectores; de ellos, siete en ascenso con gran susceptibilidad a deslizamientos y dos bloques en descenso relativo con las mayores áreas susceptibles a la licuefacción de suelos. |
| | Análisis heurísticos, estadísticos (modelos de pesos y evidencias) red artificial neuronal y elementos en riesgo | 1:100 000 | Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos, (que incluye flujos de detritos, grandes deslizamientos de rocas, caídas de rocas, volcamientos y deslizamientos) de la provincia Guantánamo. Mapa de peligro, vulnerabilidad y riesgo a deslizamientos (Figura 7) | |
| | Empleo de otros métodos a escala local en Jagüeyes y Caujerí (modelos runout) | 1:25 000 | Mapa de riesgo a deslizamientos | |
| AMA 2012 | Guía metodológica para el estudio de peligro, vulnerabilidad y riesgo (PVR) por deslizamientos de terreno a nivel municipal con 4 fases (identificación de escenarios susceptibles, cálculo de peligro y vulnerabilidad, así como la estimación del riesgo) | 1:100 000 | Mapa de susceptibilidad, peligro, vulnerabilidad y riesgo a los deslizamientos | |
| Villalón <i>et al.</i> , 2012 | Guía metodológica para el estudio de peligro, vulnerabilidad y riesgo por deslizamientos (Variante A-método heurístico) | 100 000 | Mapa de susceptibilidad, peligro, vulnerabilidad y riesgo a los deslizamientos de la provincia Santiago de Cuba (Figura 8) | |
| Galbán y Guardado 2016 | Metodología basada en los niveles de importancia de las variables que influyen en la manifestación de los deslizamientos y su formulación matemática para su determinación mediante un SIG. | 50 000 | Modelo de deslizamientos por sismos en el municipio Santiago de Cuba (Figura 9) | |

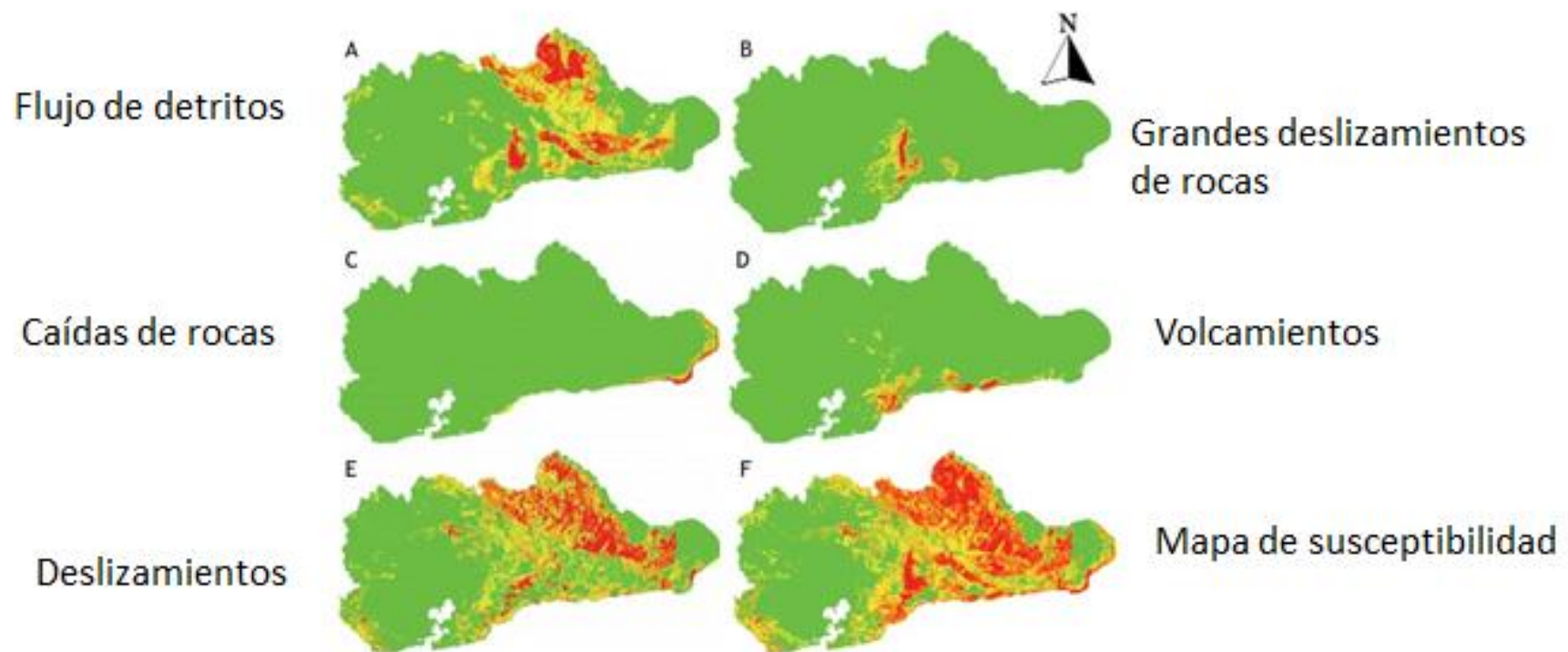


Figura 7. Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos de la provincia Guantánamo. Escala 1:100 000. Fuente: Castellanos, 2008.

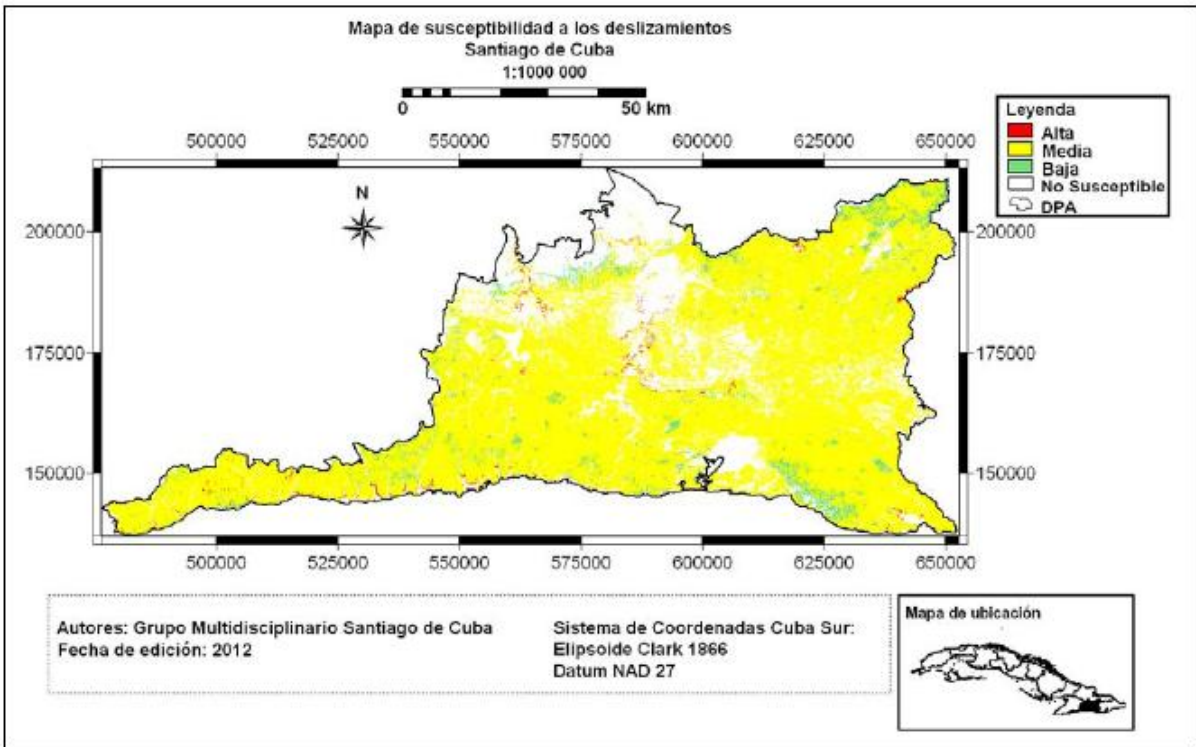


Figura 8. Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos de la provincia Santiago de Cuba, resultado de los estudios PVR. Escala:100 000. Fuente: Villalón *et al.*, 2012.

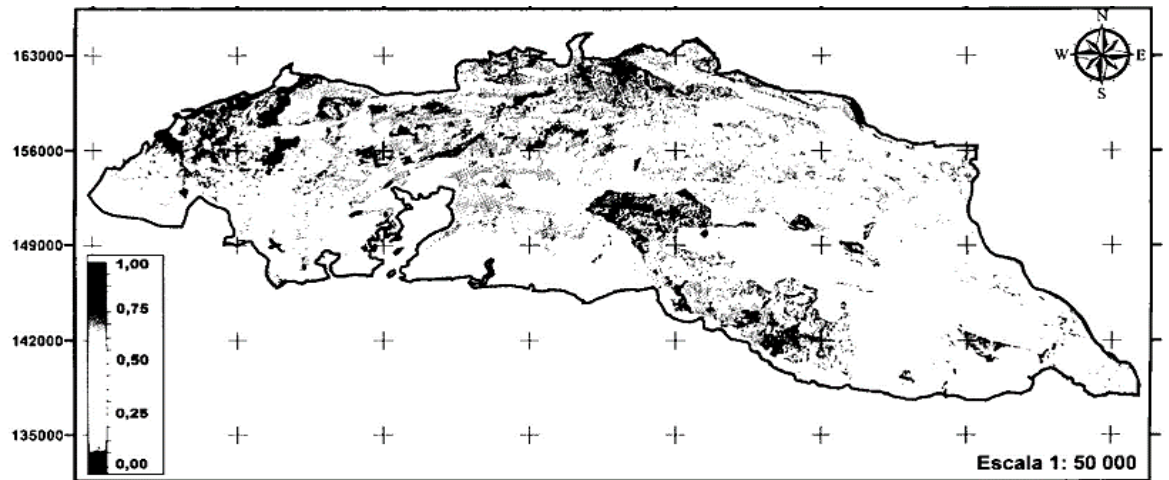


Figura 9. Modelo de deslizamientos por sismos, en el municipio Santiago de Cuba. Escala 1:50 000. Fuente: Galbán y Guardado 2016.

1.4 Metodologías empleadas en la evaluación de la susceptibilidad a licuefacción y deslizamientos inducidos por sismos

A nivel internacional existen diversas metodologías para evaluar el potencial de licuefacción, tales como Seed and Idriss (1971), Seed *et al.* (1983), Seed *et al.* (1985), Tokimatsu and Yoshimi (1983), Seed and De Alba (1986), Ishihara (1985), Shibata and Teeparaksa (1988) (citados por TC4, 1999).

Así como los diferentes métodos desarrollados en el manual de zonación sísmica japonés, conocido como TC4 (1999), en función de los grados o nivel de estudio y la escala correspondiente.

Los métodos más empleados tienen dos vertientes:

Métodos empíricos. Se basan en observaciones *in situ* o en laboratorios del comportamiento de depósitos tipo arena durante movimientos sísmicos anteriores.

Las pruebas *in situ* más empleadas para la valoración de la licuefacción son: los ensayos de penetración estándar, Standard Penetration Test, en inglés (SPT) y los ensayos de penetración de cono, Cone Penetration Test, en inglés (CPT).

Métodos analíticos. Basados en la determinación en laboratorio de las características de resistencia a la licuefacción de muestras no alteradas y el uso de análisis de respuestas dinámicas del predio, para determinar la magnitud de las tensiones de corte inducidas por los movimientos sísmicos.

En los últimos años estas metodologías fueron implementadas en Cuba de forma integral, parcial o combinada; esto se puede notar en los trabajos de Ordaz *et al.* (2013), Fernández (2000), Márquez *et al.* (2002), García *et al.* (2002), Heredia y Calderín (2004), Zapata *et al.* (2013), Chuy *et al.* (2015b), Fernández *et al.* (2016), Fernández *et al.* (2017).

Existen otros métodos para predecir el potencial de licuefacción, tales como:

- Métodos de Grado I. Criterio geológico-geomorfológico (TC4, 1999).

En función de las unidades geomorfológicas (tabla 3) y geológicas se clasifican los territorios donde existe probabilidad para la licuefacción de suelos (TC4, 1999).

- Métodos de Grado 2. Criterio geológico y geomorfológico para la evaluación del potencial de licuefacción.

En función de las unidades geológicas (tabla 4) y condiciones geomorfológicas específicas (tabla 5) se identifican áreas de alto potencial a la licuefacción de suelos (TC4, 1999).

Por otra parte, para los deslizamientos existen diferentes formas de realizar el cartografiado de la susceptibilidad a través de métodos estadísticos, heurísticos y determinísticos (Van Westen *et al.*, 1999; Guzzetti *et al.*, 1999).

El método heurístico, según Van Westen *et al.* (1997), es el más subjetivo de todos, ya que un especialista es el que decide el tipo o grado de riesgo para una zona en cuestión, mediante la asignación directa o indirecta. Así, dos tipos de análisis heurísticos pueden distinguirse: (1) el análisis geomorfológico y (2) la combinación cualitativa de mapas.

Mediante el análisis geomorfológico, conocido como método de cartografía directa, el grado de susceptibilidad del terreno es determinado directamente en el campo, sobre la base del conocimiento y la experiencia del investigador. Por lo tanto, los criterios aplicados son difíciles de definir, ya que varían según el sitio estudiado.

Tabla 3. Susceptibilidad de unidades geomorfológicas a la licuefacción, Grado I. Fuente: Iwasaki *et al.*, 1982 (citados por TC4, 1999)

| Categoría | Topografía | Potencial de licuefacción |
|-----------|--|---------------------------|
| A | Actual cauce del río, viejo cauce del río, pantano, tierras reclamadas, tierras bajas. | Probable licuefacción |
| B | Abanico, arenas de dunas, llanura de inundación, playas y otras llanuras. | Posible licuefacción |
| C | Terrazas marinas, colinas y montañas. | No probable licuefacción |

Tabla 4. Unidades geológicas (resumidas) susceptibles a la licuefacción durante una fuerte sacudida. Fuente: Youd and Perkins, 1978 (citados por TC4, 1999)

| Tipos de depósitos | Probabilidad de que los sedimentos cohesivos, saturados, sean susceptibles a la licuefacción por la edad del depósito | | | |
|---------------------------|---|----------|-------------|-----------------|
| | < 500 años | Holoceno | Pleistoceno | Pre-Pleistoceno |
| Canal del río | Muy alta | Alta | Baja | Muy baja |
| Llanura de inundación | Alta | Moderada | Baja | Muy baja |
| Abanico y llanura aluvial | ----- | Baja | Muy baja | Muy baja |
| Terrazas marinas | Moderada | Baja | Baja | Muy baja |
| Coluviales | Alta | Moderada | Baja | Muy baja |

Tabla 5. Susceptibilidad de unidades geomorfológicas a la licuefacción sometidas a una sacudida de VIII grados M.M (Mercali Modificada). Fuente: Wakamatsu, 1992 (citado por TC4, 1999)

| Condiciones geomorfológicas | | Potencial de licuefacción |
|-----------------------------|--|---------------------------|
| Clasificación | Condiciones específicas | |
| Llanura del valle | Llanura del valle que contiene grava o adoquines | No probable |
| | Llanura del valle que contiene suelos arenosos | Posible |
| Pantano y ciénagas | ----- | Posible |
| Canal de río abandonado | ----- | Probable |
| Antiguo estanque | ----- | Probable |
| Canal de río seco | Canal de río seco que contiene grava o adoquines | No Probable |
| | Canal de río seco que contiene suelos arenosos | Probable |

La combinación cualitativa de mapas, busca superar los criterios ocultos del análisis geomorfológico. Con este método el científico usa su criterio experto para asignar pesos (valores que representan un determinado grado de importancia) a una serie de mapas parámetro. Tales factores se suman de acuerdo con estos pesos, dando como resultado valores de susceptibilidad que pueden ser agrupados en categorías o clases.

El método determinístico tiene como base los modelos hidrológicos y de estabilidad, que consideran la información detallada de las pendientes, fundamentada en la mecánica de suelos. Este método elimina la subjetividad mediante la cuantificación de los grados de riesgo en valores absolutos, como por ejemplo, a través del factor de seguridad (Barredo *et al.*, 2002). Una ventaja de este método es el alto grado de simplificación para cartografiado de escala media y regional, debido a la gran variedad de los parámetros geotécnicos. De esta forma, el desempeño del método depende totalmente de la calidad y cantidad de los datos colectados (Dai *et al.*, 2002).

El método estadístico, según Carrara *et al.* (1995) y Guzzetti *et al.* (1999), tiene como principio la búsqueda de relaciones entre los factores condicionantes de inestabilidad (litología, cobertura vegetal, uso del suelo, pendientes, entre otros) y la distribución de los deslizamientos recientes. A partir de la combinación estadística de estos factores se determinan los grados de riesgo, asumiendo que los factores que causan inestabilidad para determinadas áreas serán los mismos que podrían generar movimientos futuros (Dai *et al.*, 2002).

Esta técnica está compuesta por el análisis multivariado (considera para cada unidad, polígono o pixel la presencia o ausencia de movimientos de laderas; lo

cual genera una matriz de datos que es analizada en un soporte estadístico mediante regresión múltiple, análisis discriminante, entre otros) y el análisis bivariado (considera el peso de cada clase y de cada parámetro de análisis mediante el uso de técnicas de inferencia como: Lógica difusa o Fuzzy e Inferencia Bayesiana); según Carrara *et al.* (1995) y Dai and Lee (2002), la confiabilidad del método depende de la calidad y cantidad de los datos.

Las metodologías descritas con anterioridad, así como otras empleadas en Cuba por colectivo de autores (2011), Castellanos (2008), Villalón *et al.* (2012), Savón *et al.* (2017), entre otras, tienen como deficiencia la falta de integración en los análisis de los peligros de deslizamientos y licuefacción inducidos por sismos, ya que no integran los aspectos ingeniero-geológicos y no aplican los métodos morfométricos, el análisis sísmológico y la tectónica activa. Los criterios referidos con anterioridad hacen necesario la introducción de estos métodos.

1.5 Condiciones ingeniero-geológicas y sismotectónicas de Cuba suroriental

El área de estudio se ubica al sur del extremo este de Cuba, entre los 74.133° y 77.752° de longitud oeste y los 19.831° a 20.317° de latitud norte (figura 10). Abarca parte de la zona emergida de Cuba Oriental y cubre un área aproximada de 11 632.2 km². Dentro de sus límites geográficos se encuentran la parte sur de las provincias de Santiago de Cuba, Guantánamo y Granma.

Relieve. El relieve de Cuba suroriental es variado, abarca las categorías morfológicas de montañas, alturas y llanuras (Hernández *et al.*, 1994, ajustado para Cuba por Moreno *et al.*, 2017). Hacia el sur y noreste se encuentran las dos primeras clases, representadas por los dos grandes sistemas montañosos:

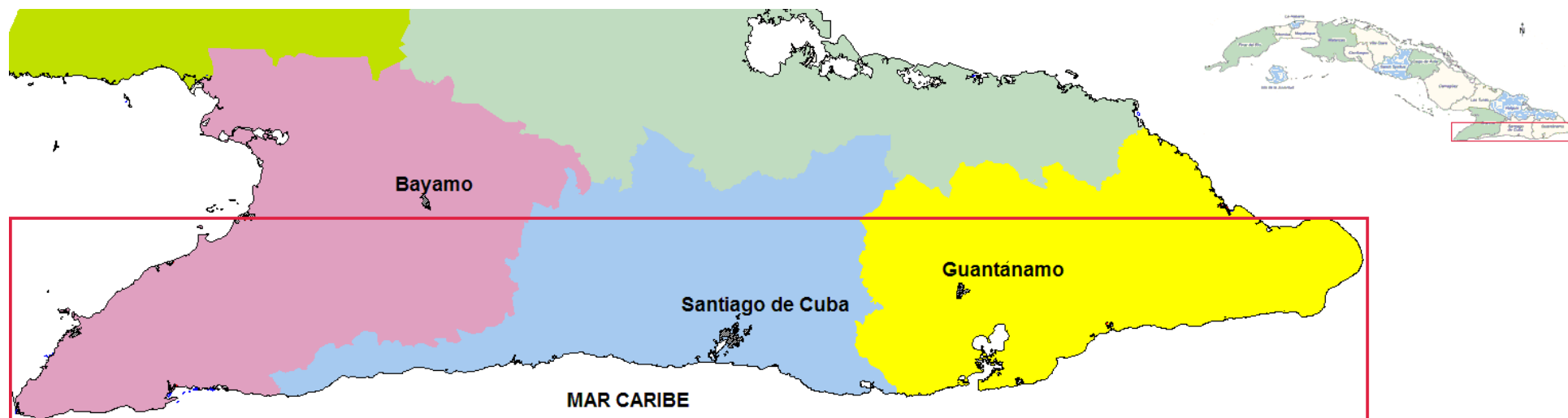


Figura 10. Ubicación geográfica de Cuba suroriental (rectángulo rojo), con las ciudades Santiago de Cuba y Guantánamo como cabeceras de provincias. Fuente: Autora.

la Sierra Maestra y la parte meridional de las sierras de Nipe-Cristal-Sagua-Moa-Baracoa y Purial y de mayor manifestación en el área de estudio las dos últimas sierras (figura 11).

En la Sierra Maestra las mayores alturas corresponden a los picos Turquino (1 970 m), Cuba (1 872 m), Suecia (1 734 m) y loma de la Gran Piedra (1 225 m), que se clasifican como montañas medias (Moreno *et al.*, 2017). Las pendientes se caracterizan por ser de moderadas a muy altas.

En las sierras de Nipe-Cristal-Sagua-Moa-Baracoa y Purial se acentúan las zonas elevadas tales como la superficie de Pinares de Mayarí (500-700 m), restos de la pendiente meridional de la Sierra del Cristal (700-800 m), de la Loma de Mulas, entre los ríos Mayarí y Levisa (700-800 m), y otras más elevadas como las de la Loma de La Mensura, Pico Cristal, La Calinga y Guaso, entre otras, (con alturas de 900-1000 m, 1100-1200 m, 860-1000 m y 840-900 m, respectivamente). Magaz 2017.

En las sierras Nipe-Cristal-Sagua-Moa-Baracoa y Purial las pendientes oscilan entre 7°-15°, en ocasiones mayores; se corresponden con las zonas de montañas.

Las llanuras se localizan a lo largo de las costas sur, norte y oeste. En la primera dirección, próximas a la zona costera y con distribución de este a oeste, están las llanuras fluviales, que se sitúan perpendiculares a la línea costera.

En las llanuras fluviales prevalecen los procesos acumulativos sobre los erosivos. Las pendientes oscilan entre 0° y 7°. En esta categoría se ubican los alrededores de la laguna de Baconao, los entornos de las bahías de Santiago de Cuba, Cabañas y Guantánamo y el valle Caujerí.

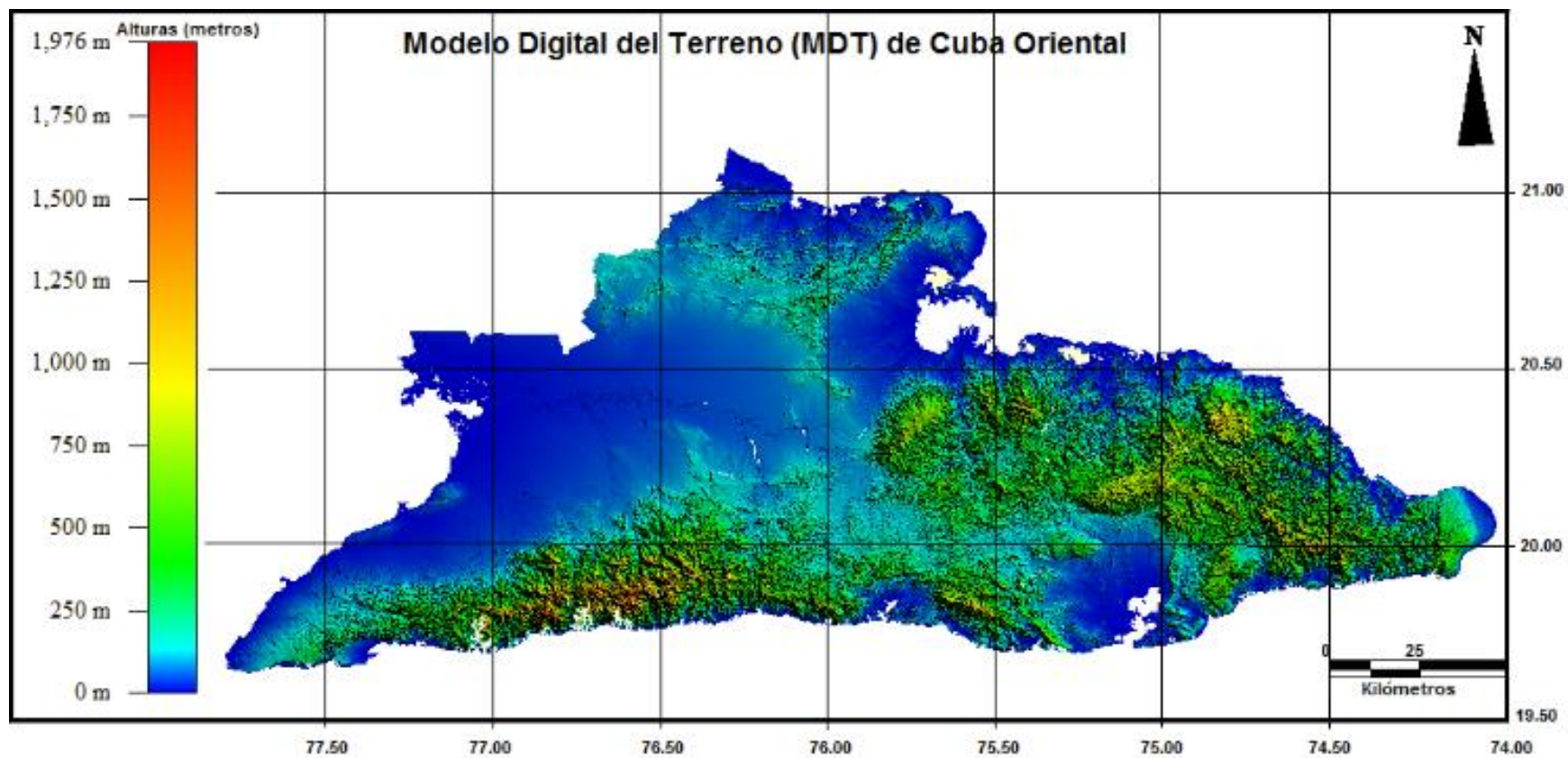


Figura 11. Modelo Digital del Terreno (MDT) de la región Cuba oriental. Escala 1:25 000. Fuente: Geocuba, (2006).

Asimismo, en esta costa, de este a oeste, se desarrollan las terrazas marinas escalonadas de Cabo Cruz, Pilón, Siboney, Baconao y Maisí; surgidas de la combinación de un escarpe de falla costero y la abrasión marina. En estas predominan las formaciones cársicas; además estas terrazas se encuentran falladas y deformadas (Pérez *et al.*, 1994).

En cambio, en la costa oeste las llanuras están asociadas al litoral que se desarrolla a lo largo del golfo de Guacanayabo, donde se ubica la bahía de Niquero. La costa norte se caracteriza por ser abrasiva. Al norte del sistema montañoso de la Sierra Maestra se localiza una parte de la amplia llanura aluvial del río Cauto.

Hidrografía. La hidrografía de Cuba suroriental se comporta de forma diferente. Hacia la costa sur se encuentran los ríos jóvenes, de cortos recorridos y gran poder erosivo, los cuales transitan por cañones y no permiten el desarrollo de terrazas fluviales. Entre los ríos más importantes se citan el Chivirico, Sevilla, San Juan, Sardinero y Baconao. Igualmente, se destacan importantes cuencas hidrográficas, como la del Guaso, que tiene un número grande de afluentes y desemboca en la ensenada de Manatí, bahía de Guantánamo.

El río más extenso de Cuba es el Cauto, su nacimiento se ubica dentro del área de estudio y sus afluentes más importantes son Contramaestre, Cautillo, Bayamo y Salado.

El grupo montañoso de Sagua-Moa-Baracoa da origen a potentes ríos, como el Toa, el más caudaloso; Yateras, entre otros (Arcia *et al.*, 1997).

Índice de los ríos. En la vertiente sur de la Sierra Maestra los ríos La Mula, Guamá, Sevilla, San Juan, Sardinero, Hondo, Cañas, Sabanalamar, Imías y Jojo

poseen quinto orden. El río Guantánamo tiene sexto orden (Cotilla *et al.*, 2003). Los ríos de mayor orden en la costa norte son Tana, Duaba y Yurumí; con quinto orden; Yara y Toa, con sexto orden (Cotilla *et al.*, 2003).

Densidad de la red hidrográfica. La mayor densidad de la red fluvial de Cuba está localizada en la región bahía de Santiago de Cuba-Pinares de Mayarí-Moa-bahía de Guantánamo. Sin embargo, al este del Turquino se aprecia una considerable densidad, reflejo de la influencia neotectónica (Cotilla *et al.*, 2003).

En Cuba suroriental los valores de la densidad fluvial y las pendientes de los ríos son mayores que en el resto de Cuba. Existe un predominio de costas dentadas, abrasivas y erosivo-tectónicas; vinculadas a montañas y alturas diseccionadas y con terrazas marinas. Los primeros órdenes (2do-3er) de la red fluvial se encuentran concentrados en las zonas elevadas, montañosas; por consiguiente, son más intensos los procesos neotectónicos y existe erosión (Cotilla *et al.*, 2003).

Geología. Se han realizados números trabajos para esclarecer la composición litológica del territorio cubano, una de las más complejas de toda la región del Caribe. De acuerdo con el modelo planteado por Iturralde (1998), se pueden reconocer dos niveles estructurales principales: el substrato plegado y el neoa autóctono. El substrato plegado está constituido por distintos tipos de terrenos, de naturaleza continental y oceánica, propios de las Placas de Norteamérica, del Caribe y probablemente del Pacífico; incluidas rocas que datan desde el Proterozoico (940-1000 Ma) hasta el Eoceno Superior temprano (42 Ma). El neoa autóctono está representado por las rocas y estructuras originadas a partir del Eoceno Superior, que se desarrollaron básicamente en el mismo lugar que

hoy ocupa el territorio de Cuba, ya formando parte del margen pasivo meridional de la placa de Norteamérica.

Del substrato plegado en la región de Cuba suroriental se encuentran unidades de naturaleza continental (secuencias sedimentarias del Protocaribe y plataforma de Bahamas) y unidades de naturaleza oceánica (ofiolitas septentrionales, arcos volcánicos, cuencas de antepaís, cuencas posvolcánicas y transportadas (piggy back)).

La tabla 6 representa las principales litologías que reflejan la existencia de los niveles estructurales, el substrato plegado y el neoaútóctono en la región de Cuba suroriental.

La sismicidad de Cuba suroriental posee dos formas de origen de terremotos: de entre placas y de interior de placa. El primer tipo incide sobre la región suroriental por la frecuencia de ocurrencia de sismos de alta magnitud, asociados a la zona sismogénica Bartlett-Caimán (Oriente). La segunda, asociada a fallas activas de tipo regional y local, se caracteriza por la baja frecuencia, focos someros y magnitud baja a moderada de sus eventos.

La información macrosísmica (1528-2010) del Servicio Sismológico Nacional Cubano (SSNC) muestra que en la zona de falla Oriente se reportaron 22 terremotos fuertes, de ellos 20 en la provincia de Santiago de Cuba y 2 (1976 y 1992) en la provincia de Granma, con intensidad de 8 y 7 grados (Chuy, 1999). Sobre la estructura Oriente y cercanos a la ciudad de Santiago de Cuba, se reportaron 2 sismos que produjeron intensidad de 9 MSK con magnitud de 7,6 (1766) y 7,3 Richter (1852).

Tabla 6. Litologías presentes en el área de Cuba suroriental. Fuente: Iturralde Vinent, 1998

| Litología | Elementos Estructurales (Iturralde-Vinent, 1998) | | |
|---|---|------------------------------------|-------------------|
| Formación geológica: Sierra Verde | Secuencias sedimentarias del protocaribe | Unidades de naturaleza continental | Substrato plegado |
| Formación geológica: Chafarina | Plataforma de Bahamas | | |
| Rocas ultrabásicas serpentinizadas y complejo básico | Ofiolitas septentrionales | Unidades oceánicas | |
| Güira de Jauco, metavulcanitas cretácicas del Purial. Formaciones geológicas como: Santo Domingo, Palma Mocha Miembros como: Guásimas y Perucho. Macizo del Turquino | Arco volcánico Albiense-Campaniense | | |
| Formaciones geológicas como: Mícara, La Picota, Gran Tierra y Manacal | <i>Cuencas piggy-back</i> 1 ^{era} generación | | |
| Grupo El Cobre. Formaciones geológicas como: Sabaneta, Pilón y El Caney | Arco de islas del Paleógeno | | |
| Formaciones geológicas como: Charco Redondo, Puerto Boniato, San Luis y Camarones | <i>Cuencas piggy-back</i> 2 ^{da} generación | | |
| Formaciones geológicas como: Maquey, Yateras, Cabo Cruz, Manzanillo, Sevilla Arriba, La Cruz, Río Maya, Río Macío, Jaimanitas, Jamaica, Camaroncito, Yateras, Cauto, Bayamo, Dátil, Jutía Miembros como: Quintero, Tejar y Santiago Depósitos Cuaternarios. | Neoautóctono | | |

Otros terremotos fuertes afectaron la ciudad de Santiago de Cuba, tales como el de 1932 (M=6,75 Richter; I=8 MSK) y el de 1947 (M=6,75 Richter; I = 7,0 MSK). El primer sismo afectó el 80 % de las edificaciones de la ciudad, de las cuales el 5 % quedó colapsado totalmente (Chuy y Pino, 1982; Magazine Las Noticias, 1932, y Montoulieu, 1933 (citados por Chuy, 1999).

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 el mar o 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 (Álvarez *et al.*, 1999; SSNC, 2015).

Los ejemplos más reveladores de esta actividad sísmica de interior de placa son los terremotos ocurridos en octubre de 1905, con epicentro en Songo; el del 27 de enero de 1922 en Guantánamo y el del 5 de marzo de 1927 en Santiago de Cuba y Guantánamo.

De lo anteriormente expuesto se infiere que el valor estimado de la intensidad a esperar depende de la ubicación del epicentro; por tanto, la influencia de zonas sismogénicas regionales es de obligatoria observación, porque en ocasiones el mayor peligro sísmico al que está sometida una región no proviene de zonas sismogénicas localizadas en ella, sino de zonas vecinas, donde sus condiciones sismotectónicas les imponen una marcada peligrosidad (Chuy *et al.*, 2015a).

Para el caso de la región suroriental, Oriente es la estructura sismogénica principal y bajo la cual se realizan todas las consideraciones relacionadas con la

peligrosidad sísmica. Desde este punto de vista las estructuras de interior de placa para las ciudades de esta región se relegan a un segundo término.

Del análisis de la información instrumental (período de 1998-2017), la red de estaciones del Servicio Sismológico Nacional (SSN) del Cenais registró entre los años 2000-2015 alrededor de 20 000 eventos sísmicos; de ellos, la mayoría en la falla Oriente, en particular en el sector Santiago-Baconao. Durante el año 2014 se registraron 6 872 terremotos; de estos, 5 799 se localizaron en el archipiélago cubano. De los 1 073 que se reconocieron fuera del territorio nacional, 794 corresponden al área del Caribe y 279 al resto del mundo. En 2017 se reportaron un total de 4 567 terremotos en el área de Cuba y la zona más activa del año fue Pílon-Chivirico con 1 824 eventos.

En la figura 12 se muestran los epicentros localizados en el área de estudio durante el período 2000-2017, nótese la concentración de eventos en este espacio.

En relación con los sismos perceptibles, los más significativos se reportaron el 15 y el 20 de marzo de 2010, con una magnitud Richter de $M=4,2$ y $5,5$ Richter. Por ser posteriores al sismo de Haití del 12 de enero de 2010, produjeron estrés en la población de Santiago de Cuba y Guantánamo. El 17 de enero de 2016 se destacó la serie anómala de terremotos al sur de la playa de Caletón, con sismos de $4,8$ y $5,0$ Richter como máximas magnitudes, perceptibles en gran parte del oriente cubano. Y el 17 de enero de 2017 se desató otra serie al sur de Uvero, con un sismo de máxima magnitud de $5,8$ Richter, sentido en Cuba Oriental.

En el contexto geodinámico Cuba suroriental presenta la mayor peligrosidad sísmica de país por su proximidad al sistema de fallas Oriente.

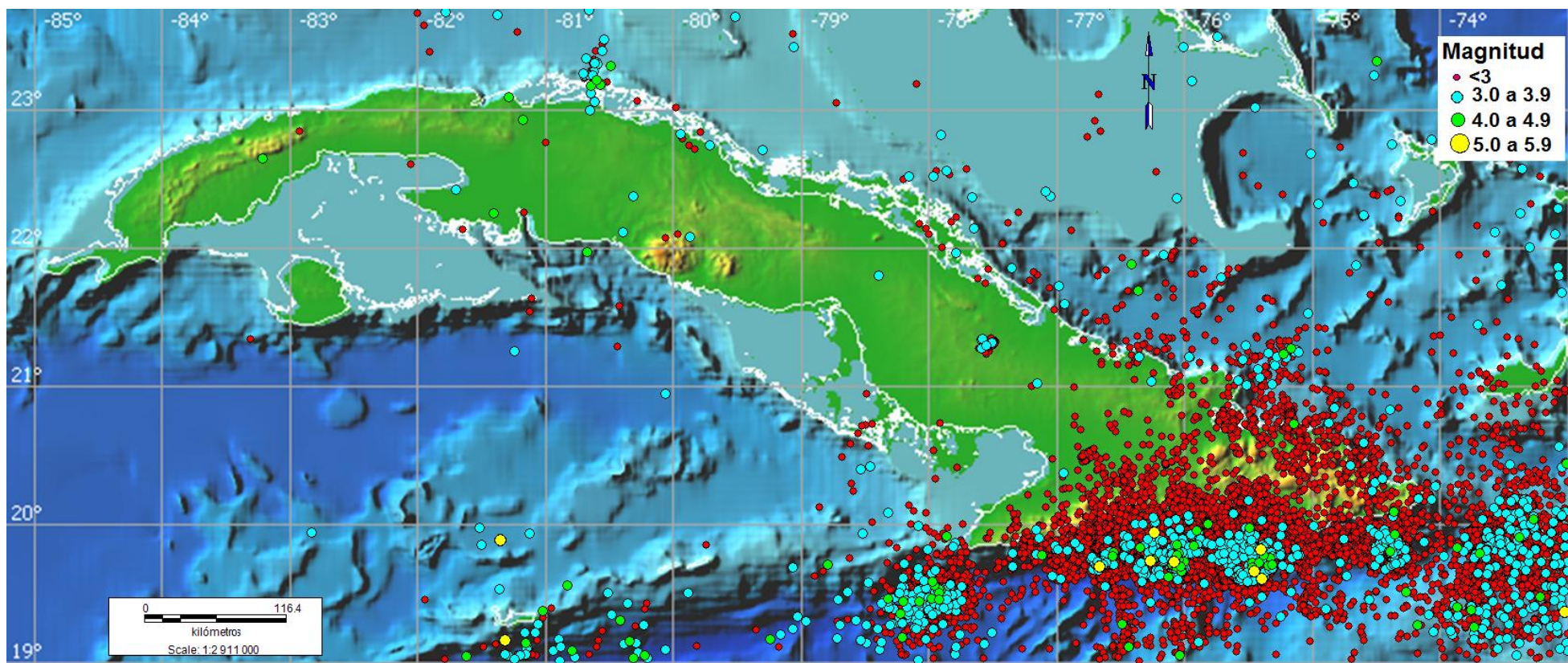


Figura 12. Mapa de epicentros de Cuba, período de 2000-2017. Fuente: SSNC, 2017.

Esta estructura (Oriente) es capaz de generar terremotos de hasta 8,0 Richter. A lo largo de su trazado se pueden encontrar diferentes procesos geodinámicos (Calais and Lépinay, 1991): al oeste se ubica el centro de generación de corteza Caimán, con expansión tectónica característica de las dorsales ultralentas (Lépinay and Rangún, 2011).

Al este se ubica la depresión de Cabo Cruz, interpretada como una cuenca de pull-apart donde ocurre la transtención. En el propio margen al este de la cuenca de Cabo Cruz se ubica la Fosa de Oriente, donde ocurre la extensión de este a oeste. A lo largo de la falla de deslizamiento, por el rumbo, se han desarrollado dos pequeñas cuencas de pull-apart, Chivirico y Batiquirí; al sur, entre estas cuencas, está el cinturón deformado de Santiago, con un régimen tectónico caracterizado por la transpresión.

Estudios recientes sobre esta zona del Caribe proponen la existencia de la Microplaca de Gonave (Mann *et al.*, 2002; Demets & Wiggins-Grandison, 2007; Rosencrantz & Mann, 1991). Asimismo, nuevos estudios llevados a cabo en la parte norte de La Española y Puerto Rico (Mann *et al.*, 2004) demuestran la existencia de una falla al norte de la Española, que es una continuidad de la zona de subducción de las Antillas Menores; se conoce como Falla Norte de La Española. Calais & Lépinay (1989), a partir de los resultados de la campaña oceanográfica SEA CARIB II, descubrieron elementos que suponen la no continuidad de la falla Oriente hacia el este con la zona de subducción que bordea las Antillas Menores. Estos autores propusieron al norte de la Española una doble zona de falla: la falla norte de la Española y la falla Septentrional; esta última es la continuación hacia el este de la falla Oriente en territorio dominicano.

En Cuba suroriental existen condiciones para que se originen deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por la actividad sísmica, debido a la existencia de reportes históricos de estos peligros, condiciones del relieve, valores de pendientes, geología, densidad de la red hidrográfica; zona sismogeneradora principal, altos valores de aceleración horizontal efectiva e intensidad sísmica a esperar y presencia de suelos aluviales de edad Holoceno, ubicados en los canales y desembocaduras de los ríos.

1.6 Conclusiones

1. Del análisis de las metodologías para evaluar los deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por sismos, a nivel internacional y nacional, se concluye que en la gran mayoría se emplean elementos relacionados con la sísmica y tectónica; sin embargo, para los deslizamientos no se integran los elementos morfométricos y la tectónica activa; la susceptibilidad litológica no contiene los aspectos ingeniero–geológicos.
2. En la región de Cuba suroriental no existe un inventario de deslizamientos inducidos por sismos y son escasos los estudios que declaran la existencia de caídas y desprendimientos de rocas.
3. Las investigaciones precedentes sobre licuefacción de suelos son pocos, ya que existen reportes históricos en otras partes de Cuba Oriental que demuestran la necesidad de su estudio.



CAPÍTULO 2.

**METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA
SUSCEPTIBILIDAD A LOS PELIGROS DE
DESLIZAMIENTOS Y LICUEFACCIÓN DE SUELOS,
INDUCIDOS POR LA ACTIVIDAD SÍSMICA**

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LOS PELIGROS DE DESLIZAMIENTOS Y LICUEFACCIÓN DE SUELOS, INDUCIDOS POR LA ACTIVIDAD SÍSMICA

2.1 Introducción

En este capítulo se explica la metodología seguida por la investigación y el conjunto de métodos empleados. Posteriormente se presenta la metodología para la evaluación de los peligros inducidos por la actividad sísmica (deslizamientos y licuefacción de suelos), a partir de la integración de criterios morfométricos, el análisis sísmológico y geomorfológico y la tectónica activa.

2.2 Metodología de la investigación

La metodología de la investigación consta de tres etapas: preliminar, experimental y gabinete. A continuación, se explican cada una de ellas:

- Etapa I. Preliminar. En esta etapa se seleccionó el área de Cuba suroriental por ser la zona de mayor peligro sísmico, se realizó el basamento teórico de la investigación, luego se procedió a la revisión, recopilación y valoración de la bibliografía existente relacionada con los deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por actividad sísmica. Y por último, se procedió a la caracterización ingeniero-geológica y sismotectónica del territorio.

- Etapa II. Experimental. Se diseñó la metodología para la evaluación de la susceptibilidad a los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por la actividad sísmica, integrando un conjunto de métodos como los morfométricos, el análisis sísmológico y geomorfológico y la tectónica activa. Luego se aplicaron los procedimientos y técnicas experimentales (laboratorio y campo). La escala de trabajo para el uso de la metodología depende de la escala de la información base con la que se trabaja. En este caso se partió del mapa geológico digital de Cuba Oriental a escala 1: 100 000, que se corresponde con la zonación sísmica de Grado 1.
- Etapa III. Gabinete. Se realizó el análisis de los resultados, se elaboraron los mapas morfotectónicos y de susceptibilidad a los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos de los sectores de Cuba suroriental. También se obtuvo la caracterización de la tectónica activa y se alcanzaron las principales conclusiones y recomendaciones.

2.3 Metodología para la evaluación de la susceptibilidad a los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por actividad sísmica

En la evaluación de la susceptibilidad a los peligros geológicos secundarios se utiliza un conjunto de métodos tradicionales, a lo cual se sumará el análisis morfométrico, las condiciones geológicas, antrópicas, geomorfológicas y sísmológicas, que facilitarán y precisarán las diferentes áreas susceptibles a deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por la actividad sísmica. A continuación, se realiza la descripción de cada uno de estos pasos

2.3.1 Caracterización geológica

Se realiza la caracterización geológica del territorio con la ayuda del mapa geológico digital de Cuba Oriental escala 1:100 000 (Instituto de Geología y Paleontología (IGP), 2003) y el léxico estratigráfico (Colectivo de autores, 2013). Se obtienen las formaciones geológicas de mayor susceptibilidad a los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos. En el caso de los deslizamientos se incluyen los aspectos ingeniero-geológicos, valorados a partir de la revisión bibliográfica y observación directa en el campo durante la actividad investigativa. Se logra una evaluación cualitativa a partir de los datos obtenidos.

2.3.2 Factores antrópicos

Al identificar los principales elementos antropizados del territorio que conducen a la ocurrencia de deslizamientos y licuefacción de suelos, se obtiene una caracterización de los factores antrópicos.

2.3.3 Caracterización morfotectónica

La caracterización morfotectónica incluye varias tareas: la definición de las estructuras tectónicas, el análisis geomorfológico y la revaluación de las estructuras regionales o límites de bloques morfotectónicos. A continuación, se realiza la descripción de cada uno de estas tareas.

2.3.3.1 Definición de estructuras tectónicas

Para definir las estructuras tectónicas se aplican los métodos morfométricos, los cuales ofrecen información acerca de las medidas de las formas del relieve, como se muestra a continuación:

- Mapa de red fluvial: para su confección se parte del sistema de ríos y tributarios, representados en el mapa topográfico, tanto sus cauces

permanentes como temporales; después de lo cual se procede al trazado de todas las cárcavas y afluentes, que quedan inferidos por las curvas de nivel hasta llegar a los extremos más elevados de la red fluvial, tanto en su cabecera como en los márgenes de la cuenca (Rodríguez, 2000).

- Jerarquización de la red del drenaje: para su elaboración los distintos cursos de agua que integran la red de drenaje superficial se subdividen en segmentos de cauce, clasificados en función del orden de magnitud de los mismos, según el método de Horton (1945).
- Densidad de drenaje: según Horton (1945), se define como el cociente entre la longitud total de los cauces que conforman el sistema fluvial de la cuenca y el área total de la cuenca. Dada por la ecuación 1:

$$D = L_t/A \quad (1)$$

donde:

L_t : longitud total de todos los canales de agua en km;

A: área en km^2

El resultado debe interpretarse como el número de cauces existentes por Km^2 .

- Mapas de isobasitas: estos mapas marcarán los niveles de base de erosión de los ríos de un determinado orden, el cual está dado por el tiempo de su formación. Se denominan de primer orden los ríos más jóvenes o de última formación, sucesivamente serán más viejos a medida que el orden sea mayor. Después de confeccionado el mapa de órdenes, se superpone el mismo al mapa topográfico; posteriormente, se buscan los puntos de intersección de los ríos de un orden determinado con las curvas de nivel y se ponen en esos puntos los valores de la cota topográfica. Después de

marcados todos los puntos, se unen con líneas rectas o curvas los puntos de igual valor (Rodríguez, 2000).

- Mapa de pendientes: consiste en la representación areal de la variación de los valores de pendiente de un sector de la superficie. Para la confección del mapa se parte del criterio de que áreas con separación similar de las curvas de nivel presentan iguales valores de inclinación; por lo cual la primera tarea consiste en separar los sectores del mapa con comportamiento similar de estas curvas, determinando para cada sector los valores de pendiente que le corresponden en dependencia del espaciamiento entre curvas. Según Rodríguez (2000) se determina a través de la ecuación 2:

$$\text{Tan}\alpha = \Delta h/e \quad (2)$$

donde:

α : ángulo de pendiente;

Δh : desnivel o separación vertical entre curvas;

e : espaciamiento horizontal entre curvas.

- Disección vertical: es un parámetro morfométrico que representa la amplitud del relieve (altura relativa) por unidad de área y se expresa en m/km^2 (Mora & Vahrson, 1993; Priego *et al.*, 2008). Sirve principalmente para definir algunos tipos de relieve (montañas, planicies acolinadas, etc.) y ofrece datos sobre la energía del relieve. Se determina a través de la ecuación 3:

$$Dv = H_{\max} - H_{\min}/A \quad (3)$$

donde

Dv: disección vertical;

Hmáx: altura máxima en metros;

Hmín: altura mínima en metros;

A: área en kilómetros cuadrados (km²)

Deben considerarse los valores (Mora & Vahrson, 1993) que influyen en la inestabilidad de las laderas.

Como resultado se obtienen los esquemas correspondientes a cada método morfométrico aplicado, apoyados en herramientas SIG.

Luego se identifican los principales alineamientos y se confecciona el mapa de superposición gráfica de los mismos; finalmente, con la aplicación de criterios de identificación se obtienen las estructuras, su caracterización y esquema tectónico.

2.3.3.2. Realización del análisis geomorfológico

Para el análisis geomorfológico se considera la clasificación morfológica del relieve (Moreno *et al.*, 2017), se obtienen las categorías de montañas, alturas y llanuras; así como las subcategorías asociadas a estas. Se resaltan, además, los criterios de identificación del fallamiento activo, tales como: encajamiento de valles fluviales, valores morfométricos marcadamente diferentes sobre igual litología a ambos lados de la falla, formación de escarpes rectilíneos con pendientes mayores de 30° en contacto con pendientes suaves, alineación y desplazamiento de la línea de costa actual, entre otros.

2.3.3.3 Revaluación de estructuras tectónicas regionales o límites de bloques morfotectónicos

Se realiza la revaluación de estructuras tectónicas regionales o límites de bloques morfotectónicos a través del método de Haller *et al.* (1993), que plantea que las

fallas pueden clasificarse por sus características como: simple falla, definida por una edad única de ruptura; con secciones, que puede o no ser de una edad o estilo estructural simple; segmentada, presenta segmentos estructurales con comportamiento sísmico propio o que actúan independientemente uno de otro.

Como resultado se obtiene el fallamiento activo.

La metodología específica que las fallas segmentadas deben de contar con trincheras paleosísmicas en cada uno de sus segmentos, así como datos geomorfológicos y geológicos (escarpe morfológico, control estratigráfico sobre el tiempo de fallamiento y la estructura geológica puede tener control físico de la segmentación, etc).

Si el dato por segmentos independientes no es convincente (definido solamente por datos geomorfológicos), se debe describir la falla como con secciones. Los criterios para la sección son menos rigurosos. Las secciones pueden ser definidas sobre la base del criterio de la edad relativa, por geometría de falla, la presencia y preservación del escarpe, una sola trinchera o desde otro dato geológico (estructura, etc.); si ninguno de esos datos existe, se debe caracterizar la falla como una simple estructura.

Además, explica que el compilador está forzado a seleccionar un desplazamiento y una edad incluso cuando no existen datos. En el caso de que se desconozca el desplazamiento se debe elegir el término desconocido.

La aplicación de esta metodología permite identificar las fallas activas, pero existen insuficiencias a pesar de la modernización de la red sísmica cubana que ha mejorado la calidad de la determinación y precisión de los parámetros sismológicos de los terremotos (Diez *et al.*, 2014), que dificultan la realización de

estudios detallados, así como la determinación del potencial sismogénico de la tectónica activa expresada por morfometría. Sin embargo, los métodos morfométricos demuestran la existencia de zonas de levantamientos y descensos relativos, lo que indica que existen fallas activas que provocan el desplazamiento de bloques, pero no es posible determinar su sismicidad asociada.

Asimismo, las manifestaciones de deslizamientos dependen del fallamiento activo, aunque existen deslizamientos no relacionados con fallas activas y catalizadas por intensas lluvias y la actividad antrópica.

Como resultado final se obtiene el mapa morfotectónico y la caracterización de sus bloques, el fallamiento activo, las estructuras tectónicas, su caracterización y el esquema tectónico.

2.4. Evaluación sismológica

La evaluación sismológica incluye varias tareas, tales como: ejecución de análisis de los catálogos del Servicio Sismológico Nacional, realización de análisis de la información macrosísmica existente, obtención de las máximas aceleraciones esperadas, aplicación del Criterio Magnitud-Distancia. A continuación, se describen cada una de ellas:

2.4.1 Ejecución de análisis de los catálogos del Servicio Sismológico Nacional (SSN)

Se analizará el catálogo de terremotos y se considerarán los eventos con magnitud mayor o igual a 4,0 Richter; a partir de esta magnitud se aprecian las manifestaciones de deslizamientos (Keefer, 1984). Se obtendrán los niveles de actividad sísmica y epicentros reportados, las principales zonas

sismogeneradoras que afectan la región o área de estudio, así como los criterios de fallamiento activo.

2.4.2 Realización de análisis de la información macrosísmica existente

Se analiza la información macrosísmica y se valoran los reportes históricos de peligros geológicos inducidos por sismos, a través de la documentación histórica o entrevistas a residentes que puedan proveer información histórica sobre la ocurrencia de deslizamientos o licuefacción durante pasados terremotos y los daños causados por estos. Estas zonas constituyen áreas de peligro porque bajo condiciones similares puede volver a ocurrir el fenómeno (TC4, 1999). También se obtiene la cantidad de terremotos fuertes ocurridos en la región.

2.4.3 Obtención de las máximas aceleraciones esperadas

Al usar los resultados precedentes de Chuy y Álvarez (1995) y la NC: 46-99 (Cuba. Oficina Nacional de Normalización, 1999), esta información permite ubicar el área de estudio en las zonas sísmicas de Cuba y obtener los valores de la aceleración horizontal máxima del terreno e intensidad sísmica. Según los criterios de Seed *et al.* (1985) (citado por TC4, 1999), los rangos de la intensidad (VII-IX) y los valores de la aceleración (0,10g – 0,40g) influyen en la ocurrencia de la licuefacción.

2.4.4 Aplicación del Criterio Magnitud-Distancia

Este criterio establece que la proporción del fallo de los taludes disminuye proporcionalmente con el aumento de la distancia de la fuente sísmica (TC4, 1999). Como resultado se obtiene la máxima distancia epicentral de fallo destructivo de taludes (Clase 1) y la máxima distancia epicentral de fallo de

taludes (Clase 2); esta relación entre la magnitud y la distancia epicentral de fallo de taludes (figura 13) fue necesaria ajustarla para las condiciones cubanas.

Para la aplicación de este criterio se consideró un país húmedo (Clase 1 representado por la ecuación 4; y Clase 2, representado por la ecuación 5) y los terremotos históricos con peligros geológicos asociados.

$$Y=0,0203e^{0,9771X} \quad (4)$$

$$Y=0,3051e^{0,8533X} \quad (5)$$

donde:

Y: máxima distancia epicentral;

x: magnitud

2.5. Peligros inducidos por actividad sísmica

Luego de obtener la caracterización geológica, antrópica, morfotectónica y la evaluación sismológica del territorio, se evalúan la licuefacción de suelos y los deslizamientos inducidos por sismos, como se describe a continuación:

2.5.1 Evaluación de la susceptibilidad a la licuefacción de suelos inducida por sismos

Los principales efectos de la licuefacción de suelos son la pérdida de la capacidad de presión del suelo debajo de las fundaciones y la expansión lateral, (lateral spreading en inglés), que ocurren sobre superficies casi llanas sin continuidad lateral, en las orillas de los ríos (Pierre–Yves, 2005) en las llanuras con rellenos granulares de origen antrópico, deltaicas y terrazas fluviales, escarpes de riberas fluviales y lacustres y bordes de humedales; todos con pendientes de 0°-3° (Youd, 1977).

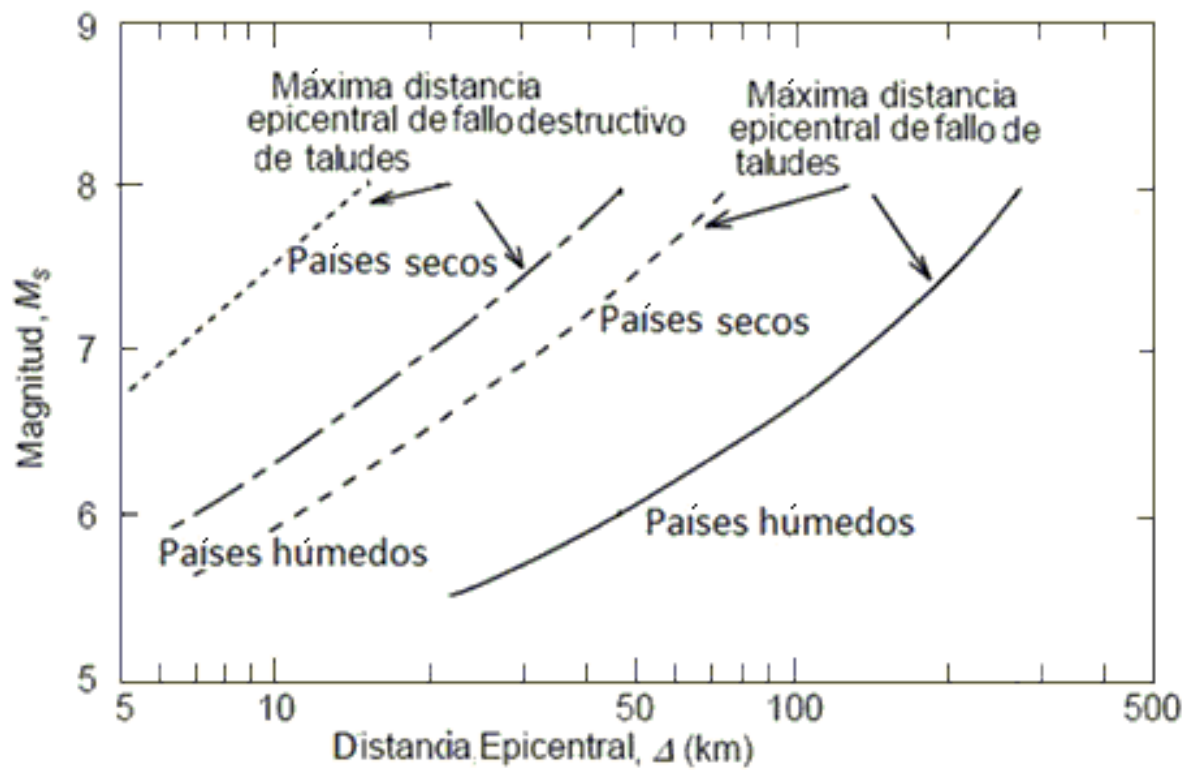


Figura 13. Relación general entre la magnitud y la distancia epicentral de fallo de taludes. Fuente TC4, (1999).

Es un movimiento lateral traslacional de terrenos, sobre una zona basal de sedimentos y suelos de composición limosa, areno-limosa y arena suelta de grano fino, licuefaccionada; debido a la posición relativamente superficial del techo de la capa freática. En la corona de los taludes se forman grietas por la baja resistencia del suelo a los esfuerzos de tensión asociados a la onda sísmica. La falta de confinamiento lateral al borde de un talud puede inducir esfuerzos de tensión en el suelo y posterior deslizamiento hacia el borde de la cara libre. Si el suelo está saturado pierde su capacidad de soporte (Rauch, 1997; Rauch y Martin, 2000).

2.5.1.1 Criterio geológico-geomorfológico

Se aplica el criterio geológico-geomorfológico en función de la información existente (mapas a escala 1:100 000). Se seleccionan las unidades geomorfológicas (tabla 3) y geológicas susceptibles (tabla 4); además, se incluye la edad de los mismos. Asimismo, se determinan las condiciones geomorfológicas específicas (tabla 5) para la ocurrencia de este peligro (TC4, 1999).

Suelos susceptibles. Pueden determinarse por el criterio si/no se caracterizan los suelos a la licuefacción; así como formaciones jóvenes, depósitos palustres, marinos, biogénicos; sedimentos aluviales de edad Holoceno; estos suelos poseen alta susceptibilidad al proceso (Youd and Perkins, 1978; Galbán *et al.*, 2012; Pierre-Yves Bard, 2005; TC4, 1999).

En correspondencia con lo anterior, los depósitos aluviales en Cuba suroriental incluyen una potente secuencia de bloques, cantos rodados, gravas, arenas limosas (según la NC: 59-2000 (Cuba. Oficina Nacional de Normalización, 2000) se clasifica como SM) y arcillas derivadas de la erosión fluvial y regional.

La tabla 7 muestra la clasificación de estos suelos en función de su granulometría (Peñalver *et al.*, 2008) y su perfil de suelo según la NC: 46-99.

Estos depósitos aluviales se distribuyen en cauces, valles fluviales, llanuras y abanicos aluviales, terrazas y paleocauces; presentan un nivel freático alto (González de Vallejo *et al.*, 2002). Las arenas finas y flojas y las arenas y limos mal graduados son susceptibles a este fenómeno, ya que poseen bajo grado de compactación; es decir, con valores N de ensayo de penetración estándar (Standard Penetration Test en inglés, SPT) inferiores a 10 golpes para profundidades menores de 10 metros y N menor de 20 golpes para profundidades mayores de 10 metros (González de Vallejo *et al.*, 2002).

También se consideraron la intensidad sísmica, aceleración horizontal (los sectores de estudio abarcan las zonas 2A con 0,15 g, 2B con 0,20 g y 3 con 0,30 g, según la NC 46:1999) y la topografía (no se consideran montañas, colinas, terrazas marinas, pues en estos lugares no ocurre o existe baja licuefacción) (TC4, 1999).

La carencia de información justifica la aplicación del método mencionado, que pertenece al Nivel o Grado I de Zonación (TC4, 1999). A lo anterior se suma la poca información ingeniero-geológica para los sectores seleccionados de Cuba suroriental, la falta de información requerida sobre los mapas de suelos cuaternarios a escala 1:250 000 (IGP, 2008), la información a escalas pequeñas y la falta de datos (límite líquido, índice de plasticidad, profundidad del nivel freático) en las calas realizadas por diversas instituciones con diversos fines; lo cual impide realizar una evaluación a escala local de esta amenaza.

Tabla 7. Clasificación de los suelos y su granulometría. Fuente: Autora

| Clasificación de los suelos | Nombre del suelo y símbolo del grupo | Granulometría (mm) | Clasificación del perfil de suelos |
|------------------------------------|---|---|---|
| Suelos de granos gruesos | Arenas (S), Arena limosa (SM), Gravas (G) | Arenas < 1,5 mm gravas 10 mm -1,0 mm | S4 |
| Suelos de granos finos | Limos (M) y Arcillas (C) Arcilla y Limo orgánico (O) | limos finos 0,1 mm - 0,05 mm limo grueso 0,05 - 0,1 mm arcillas < 0,01 mm | S4 |
| Suelos altamente orgánicos | Turba (PT) | - | S4 |

Respecto a la licuefacción, es necesario esclarecer que este proceso depende de la respuesta de los suelos poco consolidados ante los sismos; sin embargo, no es directamente dependiente al fallamiento activo local; por lo tanto, este aspecto no fue valorado.

2.5.1.2 Criterio si/no se caracterizan los suelos a licuar

Según Pierre–Yves (2005), son susceptibles a licuar:

Cieno y arenas que presenten las siguientes características:

- Grado de saturación al 100 %
- Granulometría uniforme con tamaño del grano al 50 %, (D_{50}), en el intervalo de 0,05 mm y 1,5 mm

Arcillas que presenten las siguientes características:

- Tamaño del grano al 15 %, (D_{15}) mayor que 0,005 mm
- Límite líquido menor que 35 %
- Contenido de agua mayor que $0,90W_L$
- Índice de plasticidad menor que 0,73 ($W_L - 20$)

No son susceptibles a licuar en ningún caso:

- a) Gravas con D_{10} mayor que 2 mm
- b) Arcillas que presenten las siguientes características:
 - Tamaño del grano al 70 %, (D_{70}) menor que 74 μm
 - Índice de plasticidad mayor que 10 %

Para la aplicación de este criterio se consultó la base de calas disponible (Méndez *et al.*, 2003). Como resultado se obtienen los suelos susceptibles a la licuefacción.

2.5.2 Evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos inducidos por sismos

Para la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos se emplea el método de la zonación pasiva, que permite clasificar la amenaza por deslizamientos en áreas tropicales con alta sismicidad. Incluye 5 factores (3 intrínsecos o de susceptibilidad) y 2 factores externos o de disparo. A continuación, se explica este método.

2.5.2.1 Método zonación pasiva

La zonación pasiva se obtiene mediante la combinación de las variables condicionantes, ya que los deslizamientos ocurren cuando una ladera con determinadas litologías, cierto grado de humedad y pendientes específicas alcanza un grado de susceptibilidad. Esos elementos son los denominados elementos pasivos (Mora *et al.*, 1992).

En correspondencia con estos criterios se realizaron modificaciones, tal y como en la susceptibilidad litológica, en la cual se incluyen los aspectos ingeniero-geológicos y las características de los grupos litoestructurales (Nicholson y Hencher, 1997). Además, se sustituye la susceptibilidad por humedad de suelo por la densidad de la red hidrográfica, según los criterios de Aristizábal y Yokota (2006), Flores y Hernández (2012), Vargas (2002) y Castellanos (2008). Este factor determina la intensidad de la erosión; además expresa las características geocológicas del territorio, que están controladas por la litología del sustrato, permeabilidad del suelo y capacidad de infiltración, cobertura vegetal y su tipo. Los rangos de pendientes fueron modificados (Roa y Kamp, 2008). En la figura 14 se muestran las variables condicionantes que conforman la zonación pasiva.

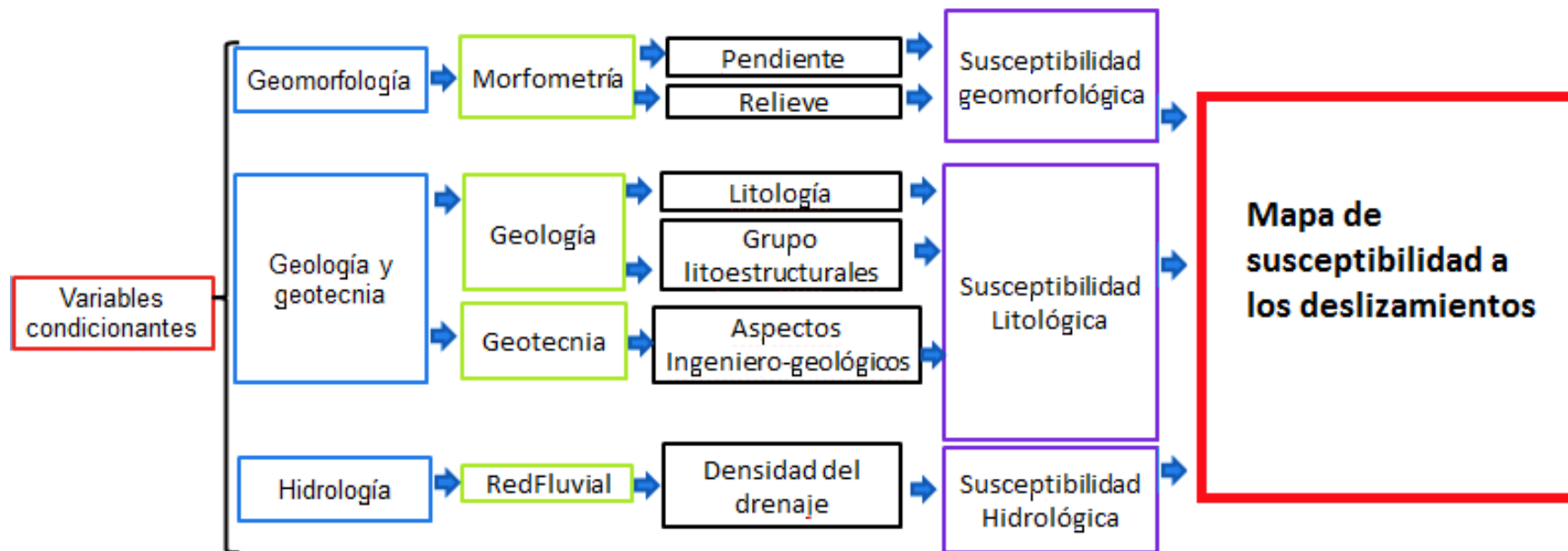


Figura 14. Variables empleadas para la obtención del mapa de susceptibilidad a los deslizamientos a través de la zonación pasiva. Fuente: Autora.

Geomorfología. Se consideran las zonas rocosas o acantilados de fuertes pendientes según los criterios de la *Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo/Apoyo Local para el Análisis y Manejo de los Riesgos Naturales* (COSUDE/ALARN, 2006).

Igualmente, la topografía y la forma del relieve, que constituyen un indicador que es necesario evaluar en los estudios de riesgo geológico (Galbán *et al.*, 2012; Galbán, 2014). Los valores de las pendientes se generan a partir del MDT, para obtener la susceptibilidad geomorfológica.

Geología y Geotecnia. Se valoran los afloramientos rocosos, fuertemente fracturados (COSUDE/ALARN, 2006; Flores, 2003); rocas alteradas, intemperizadas; presencia de estratificación, carsificación, agrietamiento, tectonismo y plegamientos (Pérez, 1976); información geológica (IGP, 2003; Colectivo de autores, 2013) y elementos litológicos (alternancia de estratos de diferente naturaleza). Además, se clasifican las rocas en rocas duras, duras a semiduras, friables incoherentes y blandas coherentes (Lomtadze, 1977 y Abramson, 1996).

Hidrología. La red del drenaje, los efectos del agua en el terreno, los arrastres, la erosión de los materiales que integran el talud o la ladera, la circulación subsuperficial de agua, los cambios en el nivel de base en la escorrentía y las variaciones del nivel freático, entre otros elementos (González de Vallejo *et al.*, 2002). Igualmente, la densidad de la red y los primeros órdenes de los ríos, que indican áreas de erosión.

La tabla 8 muestra los tipos de rocas, sus propiedades físico–mecánicas, los grupos litoestructurales y su susceptibilidad.

Tabla 8. Tipos de rocas, sus propiedades físico-mecánicas y grupos litoestructurales. Fuente: Autora

| Rocas | Grupos litoestructurales | Susceptibilidad del grupo litoestructural | Propiedades físico-mecánicas | | | |
|---|----------------------------------|--|-----------------------------------|---------------|---|-------------------------------|
| | | | Resistencia a la compresión (MPa) | Porosidad (%) | Velocidad de propagación (Vp) de las ondas longitudinales (m/s) | Densidad (Tm/m ³) |
| Granito sano | Roca fuerte masiva | Resistentes a procesos de deterioro de roca y susceptibles a la meteorización, pueden conducir a caídas de bloques. | 78,453-264,779 | 0,5-1,5 | 4 500-6 000 | 2,5 a 2,8 |
| Gabro | | | 147,099-274,586 | 0,1-0,2 | 4 500-6 500 | 2,8 a 3,1 |
| Basaltos | | | 196,133-392,266 | 0,1-2 | 4 500-6 500 | 2,7 a 2,8 |
| Riolita | | | 78,453-156,906 | 4,6 | - | 2,45 a 2,6 |
| Calizas | | | 78,453-147,099 | 5,0-20 | 2 500-6 000 | 1,5 a 2,8 |
| Mármol | | | 78,453-147,099 | 0,3-2 | 3 500-6 000 | 2,6 a 2,8 |
| Dolomitas | Roca fuerte discontinua | Susceptibles a varios modos de deterioro dependiendo del sistema de fractura. Las caídas de rocas y desmoronamiento de los taludes son dominantes con caídas de bloques. | 35,303-549,172 | 0,2-4 | - | 2,2 a 2,9 |
| Conglomerados | | | 137,293 | - | 2 500-5 000 | 2,0 a 2,7 |
| Intercalaciones de estratos duros y blandos, rocas bandeadas o con intrusiones ígneas | Roca compuesta | Susceptibles a la meteorización diferencial que conduce al colapso y caídas de bloques de rocas y de rocas asociadas. | - | - | - | - |
| Areniscas | Roca débil granular | Susceptibles a la meteorización del material y debilitamiento que conduce a la formación de láminas, caídas de granos, lavado de granos, colapso y caídas de bloques. Muy alta porosidad y pueden formar acuíferos | 7,845-196,133 | 5-25 | 1 400-4 200 | 1,6 a 2,9 |
| Margas | | | 3,432-193,191 | - | 1 800-3 200 | 2,6 a 2,7 |
| Calizas débiles | | | - | - | - | - |
| Esquistos | Roca Anisotrópica | Susceptibles a la formación de láminas que pueden colapsar, al lavado superficial y proceso de erosión. | 10,591-225,553 | 3 | - | 2,7 a 2,9 |
| Pizarra | | | 196,133-245,166 | 0,1-1 | 3 500-5 000 | 2,7 a 2,8 |
| La Serpentinita | Rocas debilitadas tectónicamente | Zonas trituradas o cortadas y altamente fracturadas, susceptibles a colapso desmoronamiento, caídas de rocas y bloques. | 9,806-460,912 | 0,1-0,5 | 5 000-6 500 | 2,3 a 2,7 |

Es necesario resaltar la aplicación de métodos y técnicas experimentales (laboratorio y campo) en el área de investigación.

Como parte de este proceso se crea el inventario de deslizamientos, a partir del reconocimiento geológico y compilaciones antecedentes (Villalón *et al.*, 2012; Rosabal *et al.*, 2009; Rosabal, 2012 y 2013) el mismo está relacionado con las intensas lluvias, debido a que no existe un inventario de deslizamientos por sismos para Cuba.

Con el auxilio de herramienta SIG se digitalizan y confeccionan las bases de datos, se generan los mapas que dependen del MDT, se georeferencia la información y se realiza la generalización cartográfica de los mapas bajo análisis.

En el análisis, cada variable condicionante es tratada individualmente en el SIG, mediante clasificaciones. A partir de lo anterior, se crean 4 clases para generar los mapas que expresan su aporte a la susceptibilidad, se realiza el procesamiento de los mapas temáticos a través de consultas al SIG (SQL Select en inglés) a las capas a analizar a través de la operación contiene o entre (contains o within en inglés), como resultado se obtiene una consulta (Query en inglés) que se salva (save as en inglés) y se le otorga un nombre, que corresponde a la capa que se intercepta, con lo cual se obtiene el mapa de susceptibilidad a los deslizamientos.

Se consideraron los criterios de evaluación del peligro por derrumbe, teniendo en cuenta que existe similitud en el tipo de material, las pendientes y la gravedad como agente detonante (tabla 9). Como resultado se obtiene el mapa de susceptibilidad a los deslizamientos (tabla 10) con cuatro niveles de

Tabla 9. Diferentes niveles de peligro por derrumbes y sus efectos. Fuente: COSUDE/ALARN, 2006

| Nivel de peligro | Efectos indicadores visibles |
|------------------|--|
| Bajo | Rocas duras pobremente fracturadas, cono coluvial sin indicios de actividad reciente y cubierto de vegetación |
| Medio | Rocas con alteración moderada, facturación inicial, pero fracturas no muy abiertas o cerradas |
| Alto | Rocas con fuerte alteración y profundidad de alteración Presencia de fracturas abiertas y diaclasadas Alto grado de intemperismo Escorrentía superficial o fuentes de agua Conos coluviales vivos, sin cobertura vegetal y bloques recientes |

Tabla 10. Propuesta de clasificación de la zonación pasiva. Fuente: Autora

| Clasificación | Pendientes | S*. litológica | Relieve | Hidrología | Resultados a esperar |
|-----------------|-----------------------------|----------------|---|---------------------|---|
| Alta | Mayores de 45° y de 35°-45° | Alta | Montañas con elevaciones de más 500 m y entre 200 y 500 m sobre nivel medio del mar | Muy densa y densa | Caídas desprendimientos de rocas, desplomes, volcamientos, deslizamientos |
| Moderada | 25° -35° | Moderada | Zonas elevadas entre 50 y 200 m de altura | Moderadamente densa | Deslizamientos |
| Baja | 15° -25° | Baja | Zonas bajas, llanuras o elevaciones bajas de hasta 50 m de altura | Baja densidad | Baja ocurrencia de deslizamientos |
| Muy baja | 0° - 15° | Baja | Zonas bajas | Baja densidad | No ocurren deslizamientos |

Nota: en la tabla 10. S*. litológica representa la susceptibilidad litológica

susceptibilidad. El mapa obtenido necesita ser validado, a través de la comprobación directa.

2.5.2.2 Comprobación directa

En el terreno se realiza la comprobación directa del modelo de susceptibilidad alcanzado, lo cual permite verificar en el campo el comportamiento del modelo y prever deslizamientos futuros. Se emplean, además, los inventarios y resultados de investigaciones precedentes. Se obtiene la documentación de deslizamientos, lo cual contribuye a fortalecer el mapa de susceptibilidad a los deslizamientos.

Al culminar este último paso de la metodología se obtiene la zonación de la susceptibilidad a la licuefacción de suelos y los deslizamientos inducidos por actividad sísmica; lo cual permitirá una mejor estimación de la peligrosidad a los deslizamientos y la licuefacción. Este resultado es una herramienta muy útil para la toma de decisiones, principalmente en la primera etapa de planificación de un proyecto constructivo.

Las figuras 15, 15a y 15b muestran el diseño del flujograma para la evaluación de la susceptibilidad a los peligros objeto de estudio.

2.6 Conclusiones

1. La metodología que agrupa los métodos morfométricos, conjuntamente con la evaluación sismológica y la tectónica activa, permite la caracterización y cartografiado del fallamiento activo; la caracterización morfotectónica a escala detallada y aporta criterios válidos para la zonación de la susceptibilidad a los deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por la actividad sísmica, así como la comprobación directa en el terreno de los deslizamientos.



Figura 15. Flujograma general de la aplicación de métodos integrados para la evaluación de deslizamientos y licuefacción de suelos, inducidos por la actividad sísmica. Fuente: Autora.

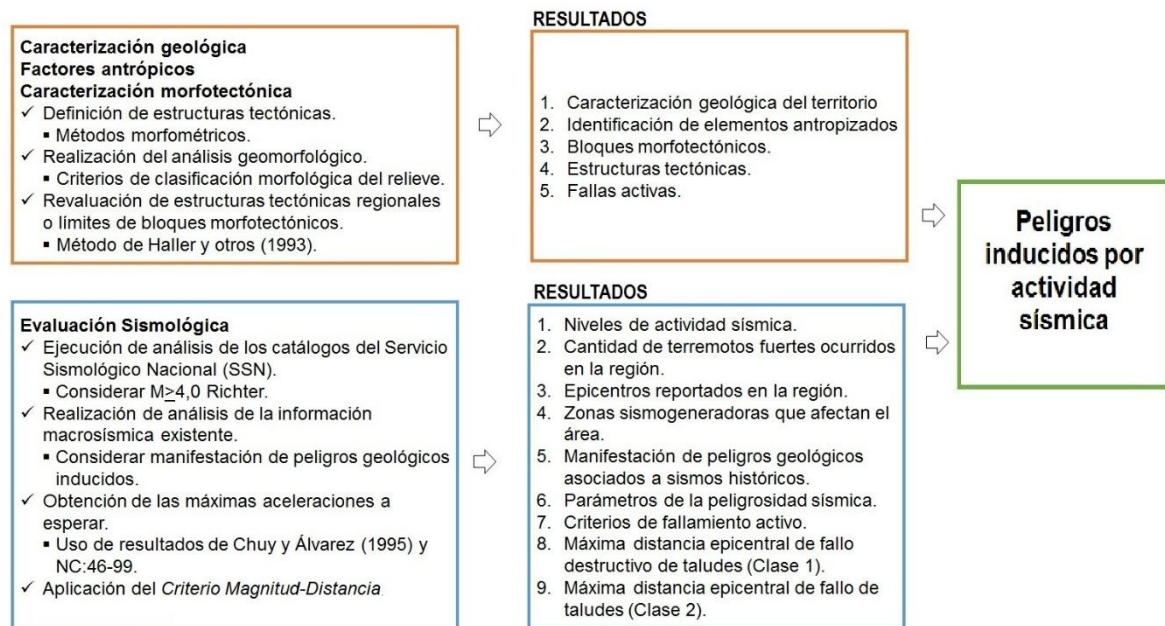


Figura 15a. Representación esquemática detallada del flujograma que muestra la aplicación de métodos integrados para la evaluación de deslizamientos y licuefacción de suelos, inducidos por la actividad sísmica. Fuente: Autora.

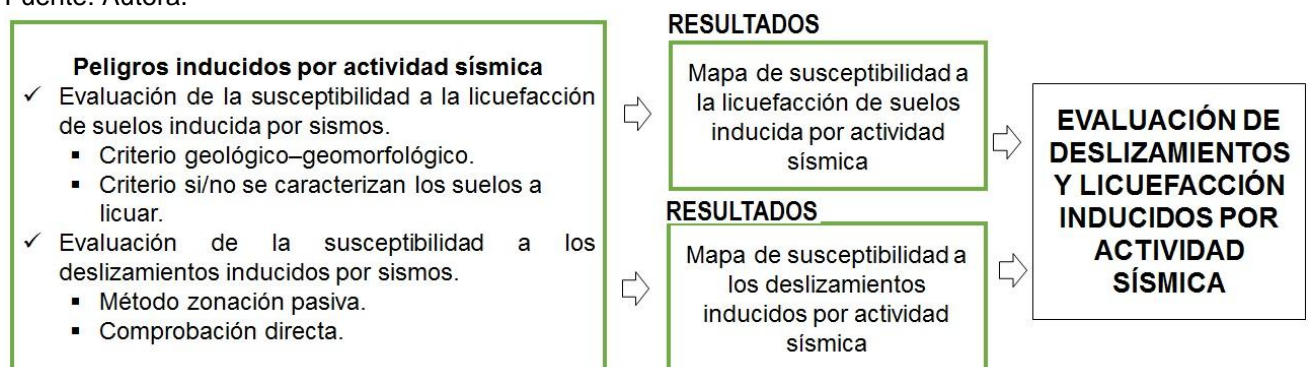
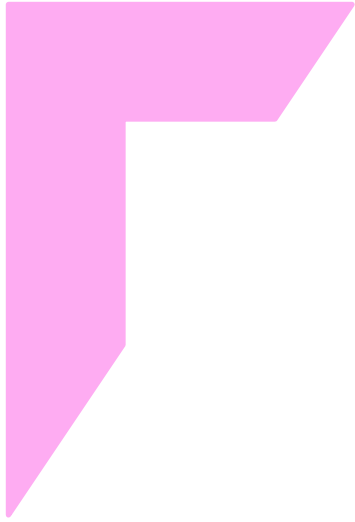


Figura 15b. Representación esquemática del flujograma en detalle. Fuente: Autora.



CAPÍTULO 3.

EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LOS PELIGROS DE DESLIZAMIENTOS Y LICUEFACCIÓN DE SUELOS, INDUCIDOS POR ACTIVIDAD SÍSMICA, EN TRES SECTORES DE CUBA SURORIENTAL

CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LOS PELIGROS DE DESLIZAMIENTOS Y LICUEFACCIÓN DE SUELOS, INDUCIDOS POR ACTIVIDAD SÍSMICA, EN TRES SECTORES DE CUBA SURORIENTAL

3.1 Introducción

El objetivo principal de este capítulo es implementar el conjunto de métodos integrados, de modo que permitan evaluar la susceptibilidad a los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por la actividad sísmica en tres sectores seleccionados de Cuba suroriental

3.2 Ubicación y caracterización general de los tres sectores de Cuba suroriental

Los sectores elegidos para la implementación de la metodología son Guamá, Santiago de Cuba y Guantánamo.

Estos sectores fueron escogidos bajo el criterio de que son áreas que poseen suficiente grado de estudio para verificar los resultados; ciudades o asentamientos humanos ubicados en zonas de alta peligrosidad sísmica y cercanos a la zona de falla activa más importante de la región.

Sector Guamá. Ubicado en la costa sur del municipio de igual nombre en la provincia Santiago de Cuba. Se extiende desde los ríos Guamá, al este, hasta La Plata, al oeste, como límites naturales; al sur limita con las aguas del Mar Caribe. Posee un área aproximada de 593,76 Km². Se extiende por las coordenadas geográficas longitud oeste: 76.908⁰ a 76.408⁰, latitud norte: 19.911⁰ a 20.028⁰ (figura 16).

En el sur del sector se ubica la carretera que conecta las provincias de Santiago de Cuba y Granma, con varios asentamientos humanos, tales como: Uvero, Guamá Abajo, La Uvita, Las Cuevas y La Plata.

Sector Santiago de Cuba. Se localiza en la costa sur del municipio Santiago de Cuba. Consta de dos bahías: Santiago de Cuba y Cabañas. Limita al norte con las elevaciones de sierra Boniato y Puerto Pelado y al sur con el Mar Caribe; se extiende desde las cercanías de Rancho Club, al oeste, hasta las inmediaciones de la localidad de La Estrella, al este (figura 17).

Abarca un área de 612,12 km² aproximadamente, con coordenadas geográficas longitud oeste: 75.971° a 75.684°, latitud norte: 19.941° a 20.121°. El asentamiento poblacional de mayor importancia es la ciudad de Santiago de Cuba, con más de medio millón de habitantes e infraestructura urbana compleja.

Sector Guantánamo. Se sitúa en la costa sur de las provincias Santiago de Cuba y Guantánamo, desde el macizo montañoso de La Gran Piedra y las proximidades del río Duarte, al oeste, hasta Punta Mal Año, ubicada al este de la bahía de Guantánamo. Al sur limita con el Mar Caribe (Figura 18).

Las coordenadas geográficas son longitud oeste: 75.607° a 75.032°, latitud norte: 19.875° a 20.294°.

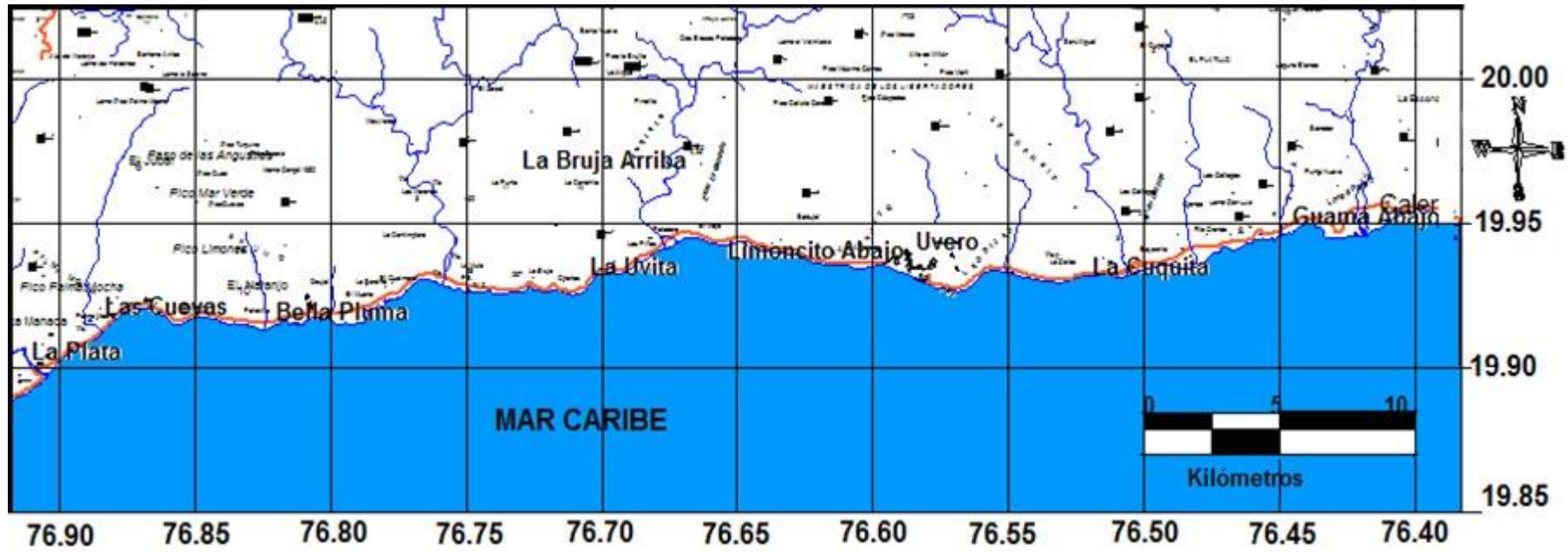


Figura 16. Ubicación geográfica del sector Guamá.

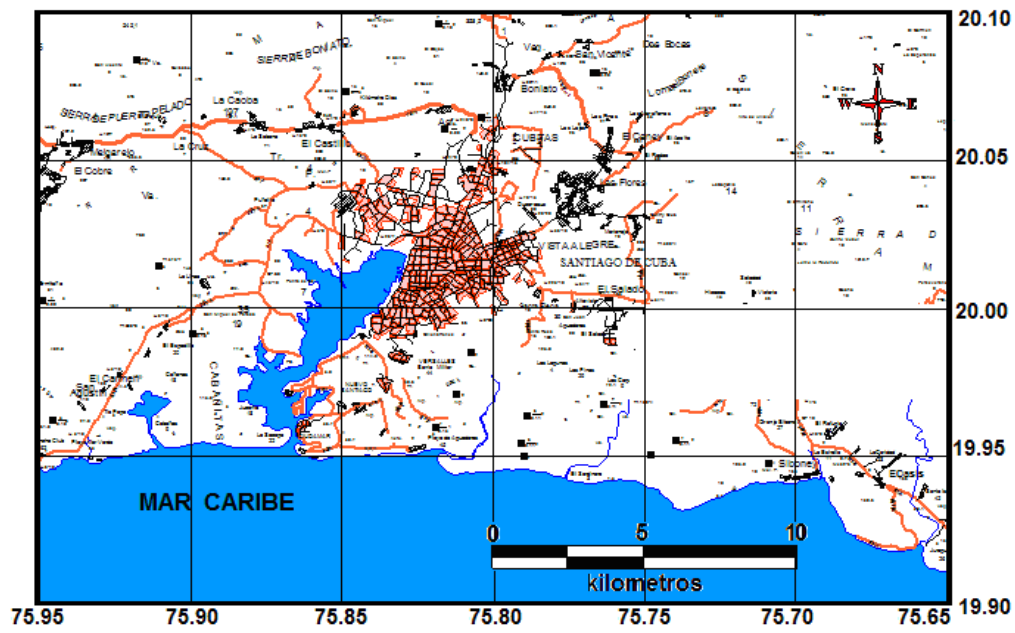


Figura 17. Ubicación geográfica del sector Santiago de Cuba.

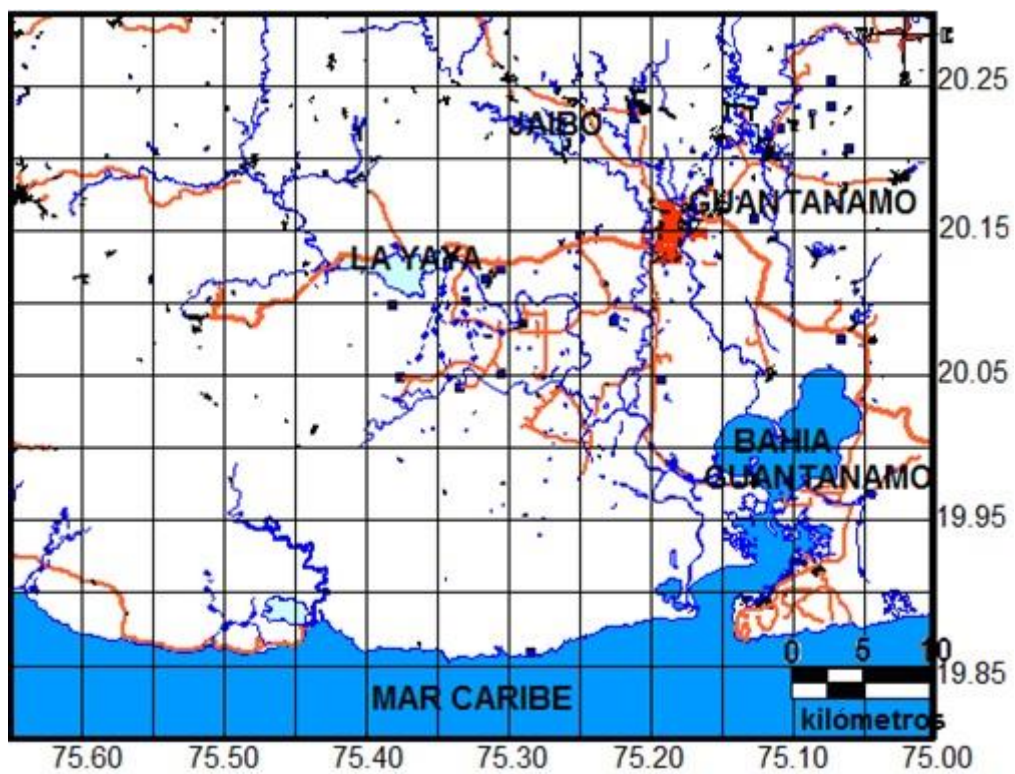


Figura 18. Ubicación geográfica del sector Guantánamo.

El sector Guantánamo abarca un área de 2 674,12 km² aproximadamente. Los asentamientos poblacionales del sector son ciudad Guantánamo, Jamaica, El Salvador, Manuel Tames y Honduras.

3.3 Evaluación de los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos, inducidos por la actividad sísmica, en el sector Guamá

En el sector Guamá se aplica el conjunto de métodos integrados para evaluar la susceptibilidad a los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por la actividad sísmica. Se describen los pasos seguidos.

3.3.1 Caracterización geológica

Desde el punto de vista geológico en el sector Guamá se encuentran formaciones que datan desde el Cretácico hasta el Holoceno. La breve caracterización geológica se realizó a partir del mapa geológico del IGP (2003) y del léxico estratigráfico de Colectivo de autores, (2013).

Formación Palma Mocha (pmc): su litología diagnosticada son rocas terrígeno-clásticas y vulcanógenas, en menor cantidad aparecen calizas; intercalaciones de argilitas, su edad es Cretácico Inferior (Aptiano)-Cretácico Superior (Turoniano).

Formación Manacal (mc): compuesta por areniscas y aleurolitas polimícticas y tobácea, argilitas, calizas, gravelitas, tobas y conglomerados; de edad Cretácico Superior (Campaniano-Maestrichtiano Inferior).

Grupo El Cobre (ec): está constituido por diferentes tipos de rocas vulcanógenas y vulcanógeno-sedimentarias en distintas correlaciones y combinaciones alternantes, muy variables, tanto en sentido vertical como lateral. Edad Paleoceno-Eoceno Medio parte baja (Colectivo de autores, 2013).

Formación Río Macío (río): se caracteriza por poseer litologías como depósitos en valles aluviales de composición y granulometría heterogénea. De edad Cuaternario (Colectivo de autores, 2013).

Formación Jaimanitas (js): su litología diagnosticada es calizas biodetríticas masivas, generalmente carsificadas, muy fosilíferas. Edad Pleistoceno Superior.

Formación Jutía (jut): está constituida por sedimentos no consolidados, friables y fragmentarios, como aleurolita calcárea y órgano detrítico, arena margosa y arcillosa. Su edad es Holoceno (Colectivo de autores, 2013).

En las tablas 11 y 12 se muestran los aspectos ingeniero-geológicos de las rocas y formaciones geológicas presentes en los sectores, así como las formaciones más susceptibles a los deslizamientos, teniendo en cuenta los criterios de Lomtadze (1977), Pérez (1976) y Colectivo de autores (2013). Los suelos aluviales son los susceptibles a la licuefacción.

3.3.2 Factores antrópicos

El sector Guamá presenta condiciones de antropización que conducen a deslizamientos y a daños generados por estos. Estas condiciones son:

- La construcción de la carretera Granma-Santiago de Cuba, principal vial de este sector, expuesta a laderas inclinadas, inestables y donde existen reportes históricos y actuales de deslizamientos, caídas y desprendimientos de rocas.
- Los asentamientos poblaciones poseen una importante población dispersa en las zonas de montañas y serranías, cuyas acciones provocan cortes en las laderas, la deforestación y erosión de los suelos.

Tabla 11. Rocas duras firmes de Cuba oriental y sus aspectos ingeniero-geológicos. Fuente: Autora

| Clasificación de las rocas | Litología | Presencia de estratificación | Presencia de intemperismo | Alternancia o intercalaciones de rocas duras y débiles | Carso | Agrietamiento, tectonismo y plegamiento | Nivel de Susceptibilidad |
|----------------------------|--|------------------------------|--|--|-------|---|--------------------------|
| Rocas duras firmes | Riolitas, Andesitas, Dacitas, Andesitas-dacitas, Basaltos, Porfiro-andesito-basalto, Porfiritas, Porfido-diortico, Cuarzitas, Andesito-basalto | - | - | - | - | - | Baja |
| | Formación Manacal | - | - | - | - | - | Baja |
| | Formación Yaguaneque | - | - | - | - | - | Baja |
| | Formación Güira de Jauco | - | - | - | - | - | Baja |
| | Formación Sierra del Purial | - | - | Basaltos, entre otras rocas duras y areniscas | - | - | Baja |
| | Grabos, Gabrodioritas, Gabrodiabasas Gabroplagio-graníticas Granitos, Dioritas, Dioritas-cuarzíferas, Dolerita, Diabasas, Cuarzo-pofiritas, Sienitas Tonalito-granodiorítico Granodioritas | - | Muy intemperizadas, forman cortezas de 10 a 100 m. Los gabros forman corteza de intemperismo arcillosa de 10 a 15 m de potencia que puede ser mayor en zonas de fallas. El intemperismo arenoso se localiza en áreas de intrusiones granitoides. | - | - | Muy agrietados | Moderado |

Tabla 12. Rocas relativamente duras-semiduras de Cuba oriental y sus aspectos ingeniero-geológicos. Fuente: Autora

| Clasificación de las rocas | Formación geológica | Presencia de estratificación | Presencia de Intemperismo | Alternancia o intercalaciones de rocas duras y débiles | Carso | Agrietamiento, tectonismo y plegamiento | Nivel Susceptibilidad asignado |
|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|---|--|-------|---|--------------------------------|
| Rocas relativamente duras-semiduras | Sevilla Arriba | - | - | Calizas biodetríticas duras, que se interestratifican con argilitas calcáreas y margas limosas | - | - | Moderada |
| | Grupo El Cobre | Estratificación | Cortezas potentes | - | - | Intenso agrietamiento | Muy Alta |
| | El Caney | Estratificación muy fina | - | Alternancia de tobas e intercalaciones de lavas y aglomerados | - | - | Alta |
| | Pilón | - | - | - | - | - | Alta |
| | Santo Domingo | - | - | - | - | - | Moderada |
| | Sabaneta | - | - | Tobas vitroclásticas con intercalaciones de tufita | - | - | Moderada |
| | Gran Tierra | - | - | - | - | - | Moderada |
| | Micara | - | - | - | - | - | Moderada |
| | Sierra Verde | - | - | Intercalaciones de rocas metavulcanógenas básicas con calizas | - | - | Moderada |
| | Ultrabasitas serpentinitas | - | Intemperismo arcilloso y de agrietamiento | - | - | Muy afectadas por el tectonismo | Alta |
| Río Maya | - | - | Intercalaciones de clastos terrígenos | carso | - | Alta | |

Tabla 12. Rocas relativamente duras-semiduras de Cuba oriental y sus aspectos ingeniero-geológicos (continuación). Fuente: Autora

| Clasificación de las rocas | Formación geológica | Presencia de estratificación | Presencia de Intemperismo | Alternancia o intercalaciones de rocas duras y débiles | Carso | Agrietamiento, tectonismo y plegamiento | Nivel Susceptibilidad |
|-------------------------------------|---------------------|---------------------------------|---|--|-------|---|-----------------------|
| Rocas relativamente duras-semiduras | Yateras | Estratificación grosera | Arcilloso y de agrietamiento | - | carso | - | Muy Alta |
| | Jaimanitas | Estratificación fina | - | En ocasiones con margas | carso | - | Muy Alta |
| | Charco Redondo | Estratificación fina y gruesa | - | - | carso | - | Alta |
| | Puerto Boniato | Finamente estratificada | - | Calizas y margas | - | - | Moderada |
| | Palma Mocha | - | - | Intercalaciones de argilitas | - | - | Moderada |
| | Maquey | Estratificación de fina a media | - | Alternancia de areniscas, aleurolitas y arcillas calcáreas y margas | - | - | Alta |
| | Chafarina | - | - | Mármoles y dolomitas intercalaciones de metapedernales y esquistos calcáreos | - | Muy afectada por procesos tectónicos | Moderada |
| | San Luis | Se encuentra bien estratificada | Las margas se encuentran intemperizadas | - | - | - | Alta |
| | Sierra del Capiro | Estratificación gradacional | - | Aleurolitas y margas con intercalaciones de aleurolitas y conglomerados | - | - | Moderada |
| | La Cruz | - | - | Intercalaciones de arcillas | - | - | Moderada |

3.3.3 Caracterización morfotectónica

Se realiza la caracterización morfotectónica del sector Guamá a partir de la aplicación de métodos y criterios que permiten definir las estructuras tectónicas, realizar el análisis geomorfológico y reevaluar las estructuras tectónicas límites de bloques morfotectónicos. A continuación, se explican los pasos dados.

3.3.4 Definición de estructuras tectónicas

Se aplican los métodos morfométricos, tales como red del drenaje y su jerarquización, densidad de la red hidrográfica, nivel base de erosión de segundo y tercer orden, pendiente y disección vertical.

Red del drenaje. En el centro y este del sector se define como paralela y subparalela; mientras que, al oeste, en la zona del Pico Turquino, es radial (figura 19). Los cursos principales de los ríos se disponen paralelos entre sí con orientación NS, NW, NE; en zonas de igual litología se observan tramos rectos y alineados, así como cambios bruscos en el trazado de los cauces fluviales principales; lo cual indica el control tectónico del drenaje.

Jerarquización de la red. En el último tramo de La Mula, situado al oeste, se encuentra el 5to orden (figura 20).

Densidad de la red hidrográfica. La mayor densidad se obtuvo hacia el suroeste, que se corresponde con la zona del Pico Turquino; altos valores ubicados al centro y noreste del sector (figura 21).

Nivel base de erosión de segundo orden. Se obtienen ocho cierres positivos máximos, localizados en el oeste y este. En el contorno de estos sectores el espaciamiento se comporta con un gradiente más elevado que en su interior, lo que indica la existencia de levantamientos con mayor velocidad.

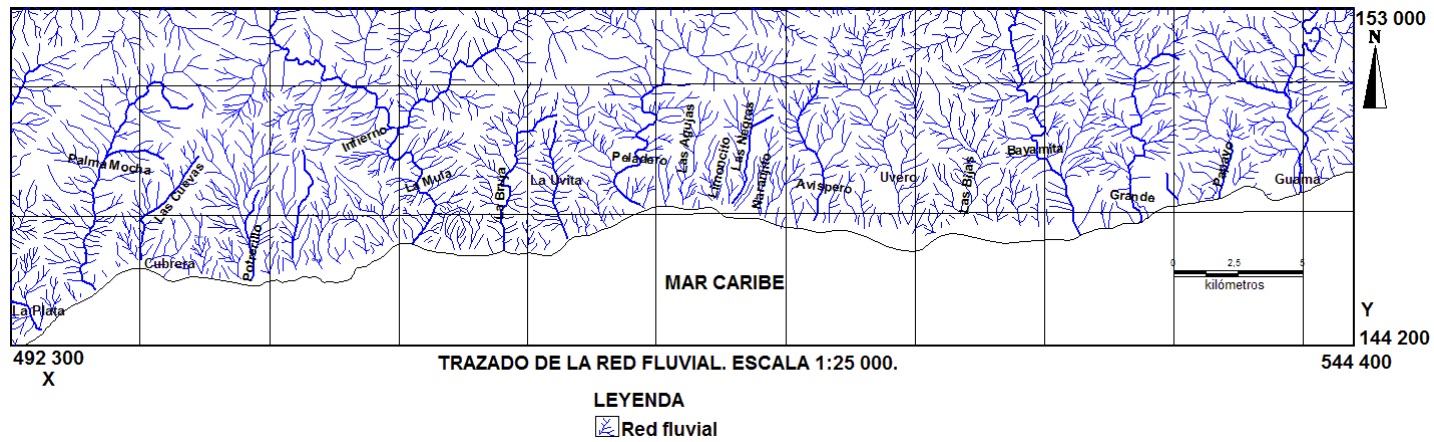


Figura 19. Trazado de la red fluvial del sector Guamá. Escala 1:25 000. Fuente: Autora.

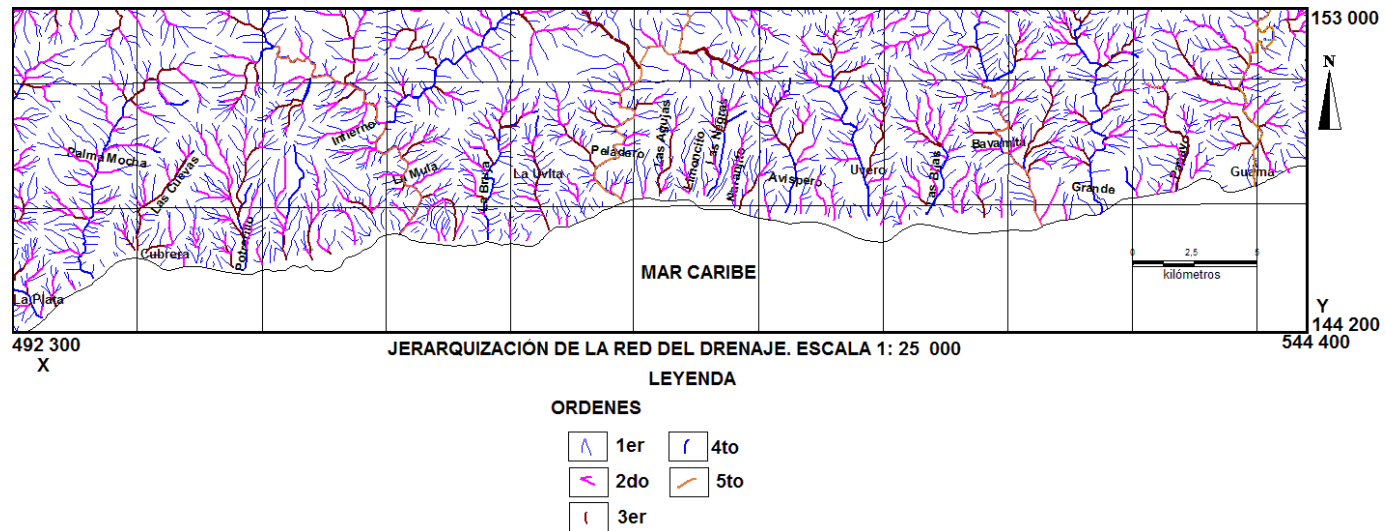


Figura 20. Jerarquización de la red del drenaje del sector Guamá. Escala 1:25 000. Fuente: Autora.

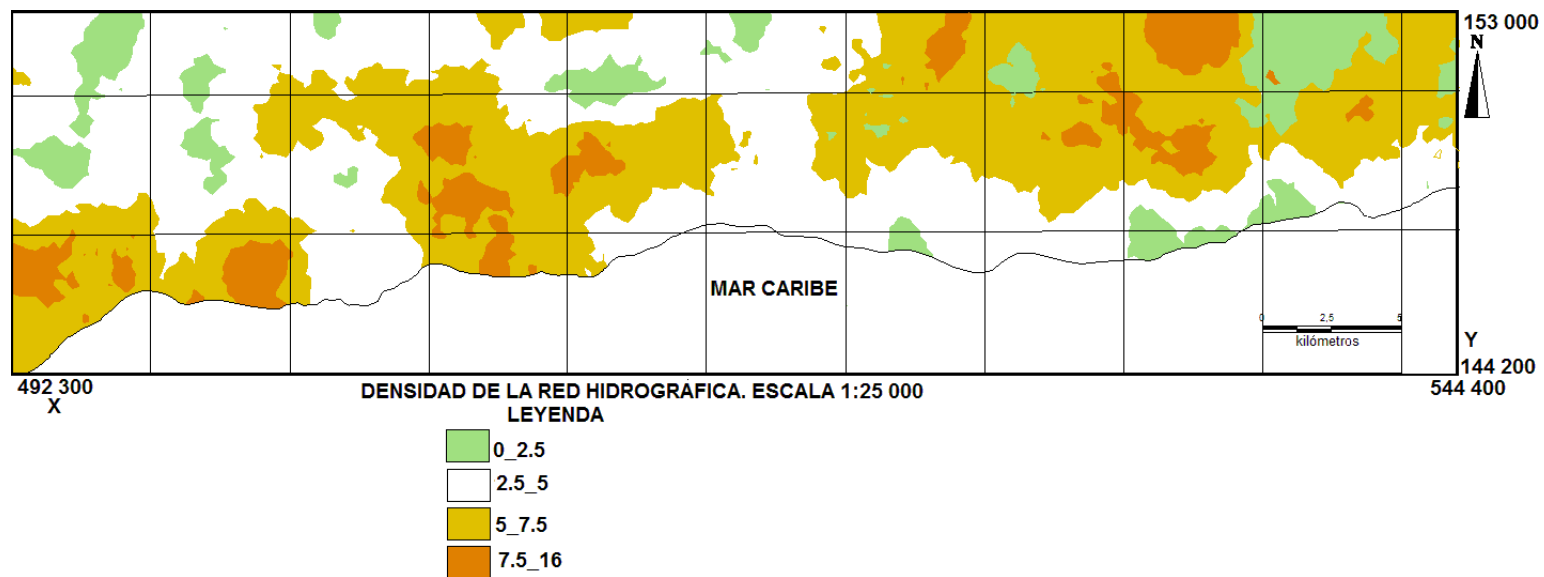


Figura 21. Densidad de la red hidrográfica del sector Guamá, expresada en km/km^2 . Escala 1:25 000. Fuente: Autora.

Próximo al litoral las isolíneas mantienen la misma trayectoria que la línea de costa y las inflexiones negativas conservan una ubicación perpendicular a esta, formando alineaciones, que pueden estar dadas por la existencia de estructuras tectónicas. Las direcciones de los morfoalineamientos son NW-SE y NE-SW (figura 22).

Nivel base de erosión de tercer orden. Se obtienen siete cierres positivos máximos, ubicados al oeste y este. Se describe un comportamiento similar a las isobasitas anteriores. Las principales formas alineadas mantienen la orientación de las primeras, hacia el norte (figura 23).

Pendiente. Muestran sectores de altos valores de 40° - 80° , que indican condiciones favorables para el desarrollo de caídas y desprendimientos de rocas, en zonas de contacto brusco entre inclinaciones altas con las de bajo ángulo, que pueden ser indicadoras de corrientes fluviales. Al sur, próximo a la costa y coincidente con los ríos, los valores disminuyen y oscilan entre 0° - 7° , lo cual indica ambientes propicios para la licuefacción (figura 24).

Disección vertical. Los máximos valores se distribuyen al oeste (450 - 650 m/km²), centro (500 - 650 m/km²) y al noreste (400 - 550 m/km²) del sector (figura 25).

Estos valores de disección vertical muestran inestabilidad en las laderas, un relieve diseccionado y condiciones propicias para el desarrollo de deslizamientos.

Alineaciones tectónicas. Para su determinación se valoraron los criterios de identificación. A partir del mapa de superposición gráfica de los alineamientos se confeccionó el mapa de estructuras tectónicas, con el cual quedaron cartografiadas aquellas que sobre de la base a la suma de criterios resultan de importancia dentro del área de estudio.

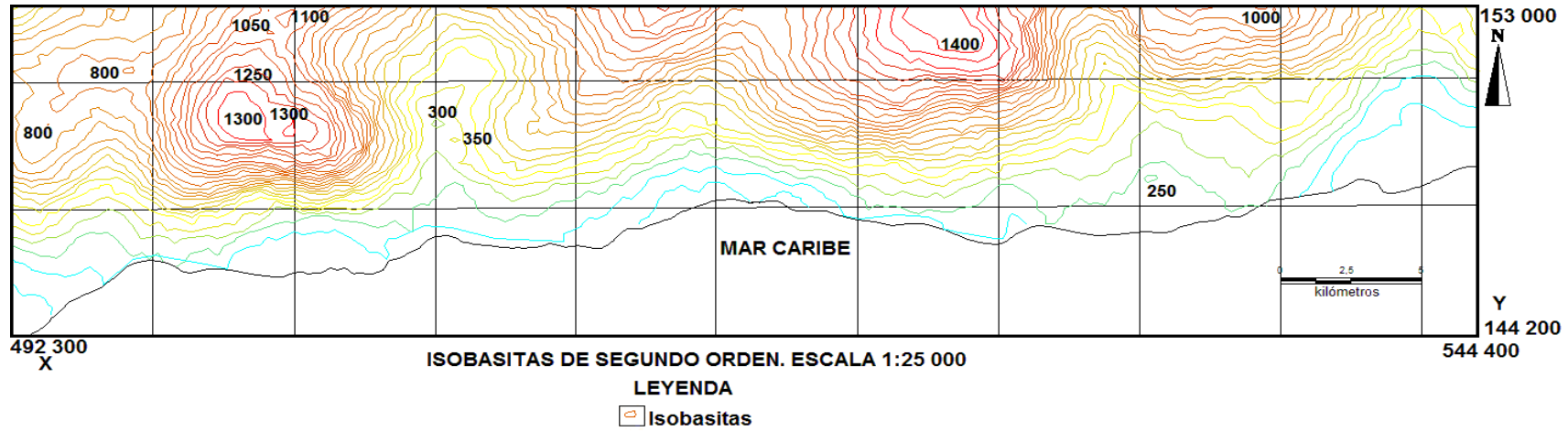


Figura 22. Nivel base de erosión (isobasitas) de segundo orden del sector Guamá. Escala 1:25 000. Fuente: Autora.

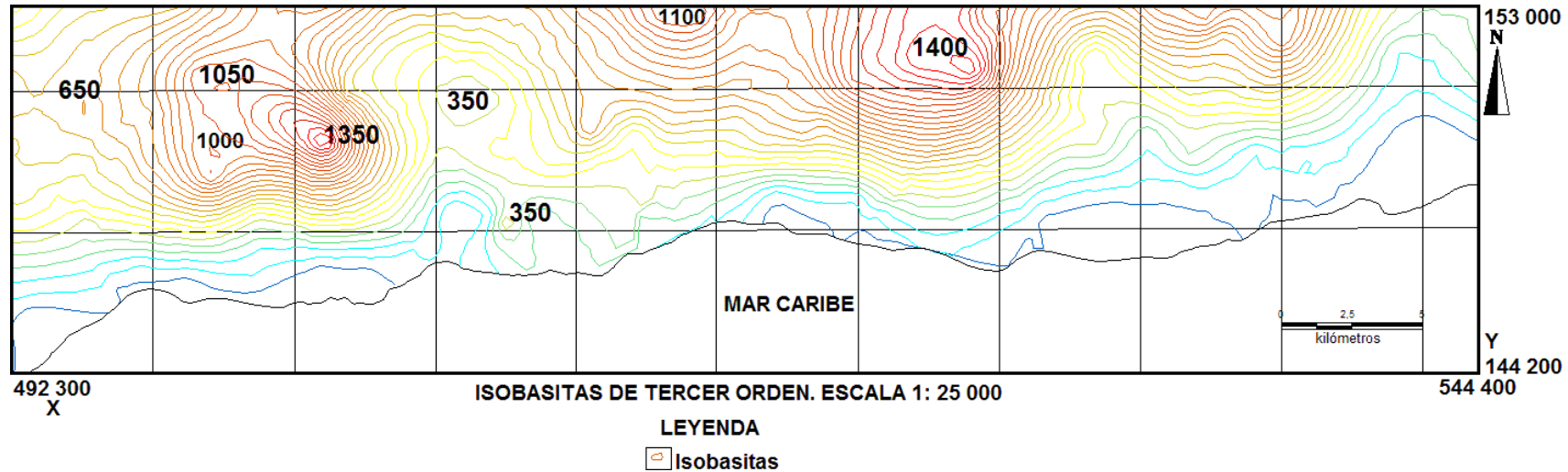


Figura 23. Nivel base de erosión (isobasitas) de tercer orden del sector Guamá. Escala 1:25 000. Fuente: Autora.

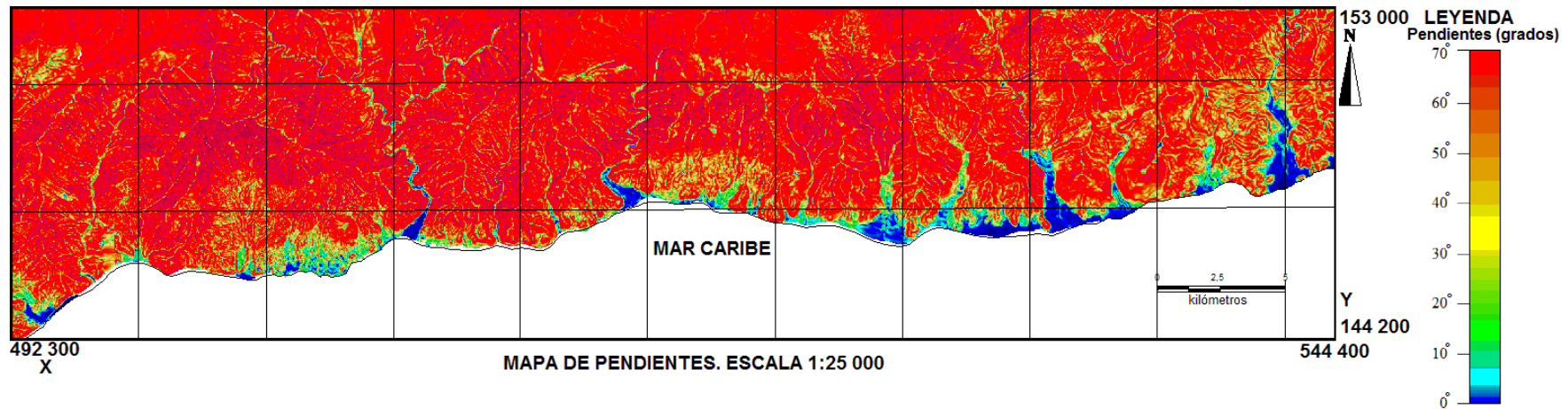


Figura 24. Mapa de pendientes del sector Guamá. Escala 1: 25 000.

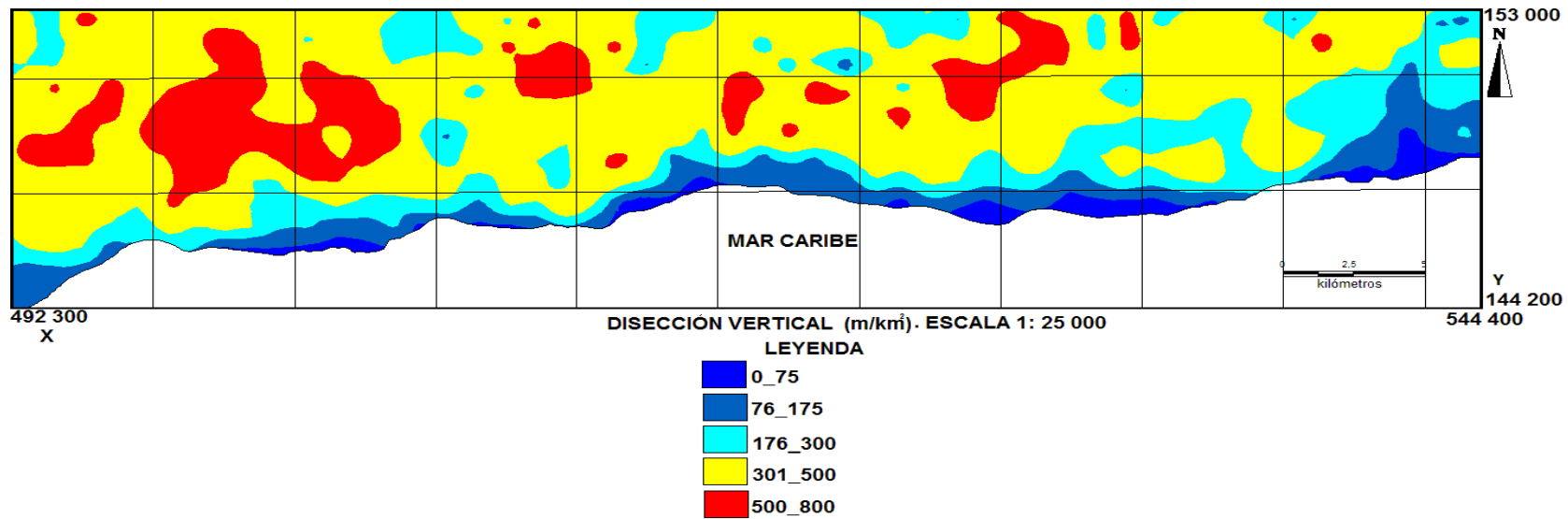


Figura 25. Mapa de disección vertical del sector Guamá. Escala 1:25 000. Fuente: Autora

Los trabajos precedentes describieron las fallas regionales del sector, tales como: Jibacoa (Alioshin *et al.*, 1975), Turquino, Vega Grande (Pérez y García, 1997) y Bayamita (Kuzovkov *et al.*, 1977; Pérez y García, 1997); declaradas con el empleo de métodos geofísicos, geológicos y geomorfológicos.

En la presente investigación los criterios geomorfológicos permitieron identificar o confirmar la existencia de algunas estructuras (tabla 13 y figura 26).

- Turquino. Se ubica en la parte occidental del sector con una dirección NNW. Delimitada por los tramos rectos del río Turquino, alineación de cursos de ríos y arroyos, alteración de valores morfométricos marcadamente diferentes sobre la misma litología, inflexión de las curvas de isobasitas de tercer orden.
- Bayamita. De dirección NW-SE. Se determinó por inflexión de las isobasitas de segundo y tercer órdenes, alteración de los valores morfométricos, tramos rectos del río Bayamita, alineación de ríos y arroyos.
- Guamá Abajo. Se localiza al este con una dirección NS. Fue identificada por inflexión de las isobasitas de segundo y tercer órdenes, tramos rectos del río Guamá, alteración de valores morfométricos, contactos bruscos lineales entre dos formaciones.
- Palma Mocha. Se sitúa en la parte occidental del sector con una dirección NE-SW. Identificada por los tramos rectos de río Palma Mocha, alineación de arroyos, contactos bruscos lineales entre dos formaciones, inflexión de las curvas de isobasitas de segundo y tercer órdenes, alineación brusca de montañas.

Tabla 13. Criterios de identificación de fallas y fallamiento activo en el sector Guamá. Fuente: Autora

| Estructuras | Criterios de identificación de fallas | | | | | | | | | | Criterios de identificación de fallamiento activo | | |
|--------------|---------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|-----------------------|---|------------------------------|--|---|---|-------------------|
| | Tramos rectos de ríos y arroyos | Alineación de cursos fluviales | Alineación brusca del relieve | Alteración de valores morfométricos | Mineralización epitermal secundaria | Contacto brusco lineales entre dos materiales distintos | Anomalía gravimétrica | Alineación del gradiente magnetométrico | Campo magnetométrico anómalo | Cambios del nivel del campo radiométrico | Encajamiento de valles fluviales | Valores morfométricos marcadamente diferentes sobre igual litología a ambos lados de la falla | Actividad sísmica |
| Turquino | Xx* | XX | - | XX | - | - | X* | - | X | X | X | XX | - |
| Bayamita | XX | XX | - | XX | - | - | - | - | - | - | X | - | - |
| Guamá | XX | - | - | XX | - | XX | - | - | - | - | - | - | - |
| Vega Grande | | X | X | - | X | - | - | - | - | X | - | - | - |
| Jibacoa | XX | X | X | - | X | XX | X | X | X | X | - | - | X |
| Palma Mocha | XX | XX | XX | - | - | XX | - | - | - | - | - | - | - |
| El Naranjo | XX | XX | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Potrillo | XX | XX | XX | - | - | XX | - | - | - | - | - | - | - |
| La Mula | XX | XX | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Bruja Arriba | - | - | XX | - | - | XX | - | - | - | - | - | - | - |
| Peladero | XX | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| La Plata | XX | XX | - | - | - | XX | - | - | - | - | - | - | - |
| Grande | XX | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Nota: en la tabla 13, las xx* representan la descripción por la investigación y la x* simboliza la descripción por otros autores.

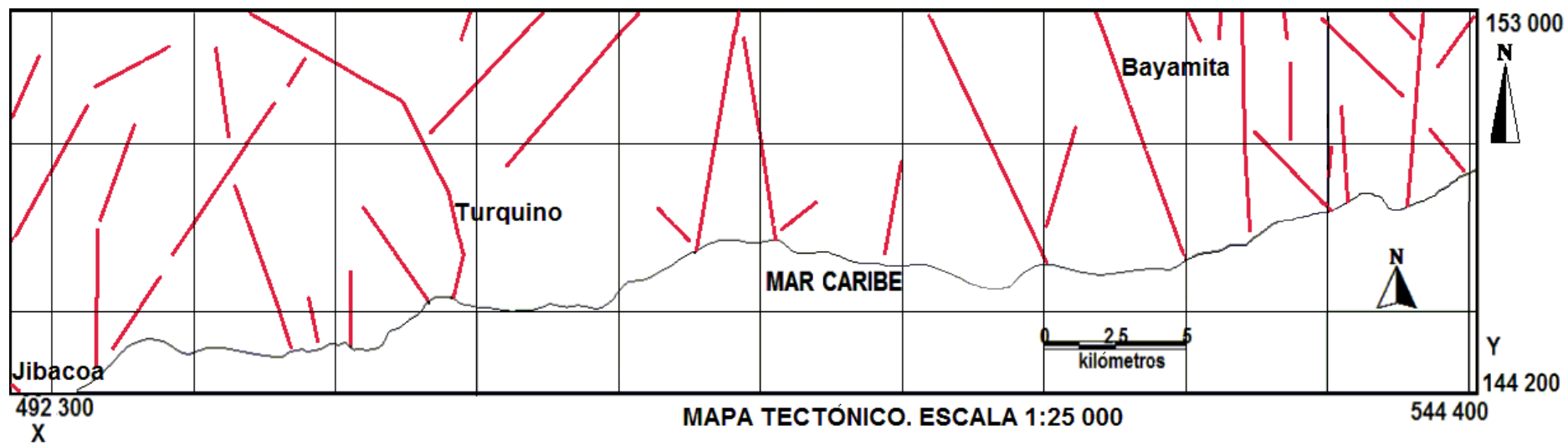


Figura 26. Mapa tectónico del sector Guamá. Escala 1:25 000. Fuente: Autora.

- Camaroncito. Ubicada al oeste con una dirección NE-SW. Se identificó por inflexión en el cierre de isobasitas de segundo orden, alineación brusca de montañas y alteración de valores morfométricos.
- Potrerillo. Identificada al oeste con una dirección NW y determinada por el contacto brusco lineal entre dos formaciones geológicas, tramos rectos del río y alineación de arroyos.
- La Mula. Se encuentra en la parte central del sector con una dirección NE-SW. Establecida por los tramos rectos del río La Mula, alineación de arroyos e inflexión de los cierres de las isobasitas de segundo orden.
- Vega Grande. Determinada por ligera inflexión de las isobasitas de segundo orden, la red del drenaje no muestra elementos por ser este un río muy joven y de corto recorrido.
- Uvero. Está al centro del sector con una dirección NE-SW. Se identificó por inflexión de las isobasitas de segundo orden, contacto brusco lineal entre dos formaciones geológicas.
- Peladero. Se localiza al centro del sector con una dirección NE-SW. Establecida por los tramos rectos del río, inflexión de las isobasitas de segundo y tercer órdenes.
- El Muerto. Se sitúa al oeste con una dirección NW-SE. Fue identificada por el contacto brusco lineal entre dos formaciones geológicas.
- La Plata. Situada al oeste con una dirección NE-SW. Digitalizada a partir de los criterios contacto brusco lineal entre dos formaciones de litologías diferentes, contacto de pendientes de bajos grados con altos grados, tramos

rectos del río La Plata, alineación de arroyos e inflexión de las líneas de isobasitas de segundo y tercer órdenes.

- Jibacoa. Se identificó por otros criterios, tales como tramos rectos del río, alineación de arroyos, contactos bruscos lineales entre dos formaciones geológicas de litologías diferentes, inflexión de las curvas de isobasitas de segundo y tercer órdenes.
- Alcarraza. Fue descrita por la alineación de montañas e inflexión de las isobasitas de segundo y tercer órdenes. Reconocida al este con una dirección NS.
- Chivirico. Se dispone en la parte oriental del sector con una dirección NS. Detectada por la inflexión de las isobasitas de segundo y tercer órdenes y tramos rectos del río.
- Babujal. Se ubica en la parte central del sector con una dirección NW-SE. Criterios que permitieron identificarla: inflexión de las isobasitas de segundo y tercer órdenes.
- La Fortuna. Reconocida al centro con una dirección NE-SW, por el contacto brusco lineal entre dos materiales distintos, alineación de río y arroyos, pequeña inflexión en las isobasitas de segundo y tercer órdenes.

3.3.5 Realización del análisis geomorfológico

Según Moreno *et al.* (2017), en el sector se distinguen tres categorías básicas del relieve: montañas, alturas y llanuras. Estas últimas se localizan en las proximidades de la zona costera y se distribuyen de este a oeste. Las llanuras fluviales se sitúan perpendiculares a la línea de costa, donde puede desarrollarse la licuefacción de suelos. Las montañas se localizan hacia el norte del sector de

este a oeste. Al centro y oeste se ubican los picos Martí (1 722 m), Suecia (1 734 m) y Cuba (1 872 m), clasificados como montañas medias; próximo al litoral se encuentran las alturas.

En el este predominan las premontañas, montañas pequeñas y bajas (Moreno *et al.*, 2017), como el Alto de Don Luis (500 m), Loma de Don Luis (650 m) y El Papayo (200 m); esta última se clasifica como altura media. Hacia el oeste está el Pico Turquino con 1 970 m (figura 27). En las estructuras Bayamita y Turquino se encontraron criterios geomorfológicos de tectónica activa (tabla 13).

3.3.6 Revaluación de estructuras tectónicas regionales o límites de bloques morfolotectónicos

Al reevaluar las estructuras tectónicas regionales mediante el método de Haller *et al.*, (1993), se detecta carencia de información relacionada con la geometría y el desplazamiento. Se clasifican las fallas Jibacoa, Turquino y Bayamita como simple falla (tabla 14).

Por otro lado, el análisis del agrietamiento (35 diagramas de rosas) fotointerpretado para la Sierra Maestra fue realizado por Pérez *et al.* (1994) y a su vez determinan las direcciones principales de las grietas en cada bloque de este sector.

Bloques morfolotectónicos del sector Guamá

El sector se divide en tres bloques morfolotectónicos (Turquino, Uvero, Bayamita), los cuales muestran tendencia a los movimientos neotectónicos de ascenso (Rosabal *et al.*, 2016a). A continuación, se realiza una breve caracterización de cada uno de ellos (figura 28).

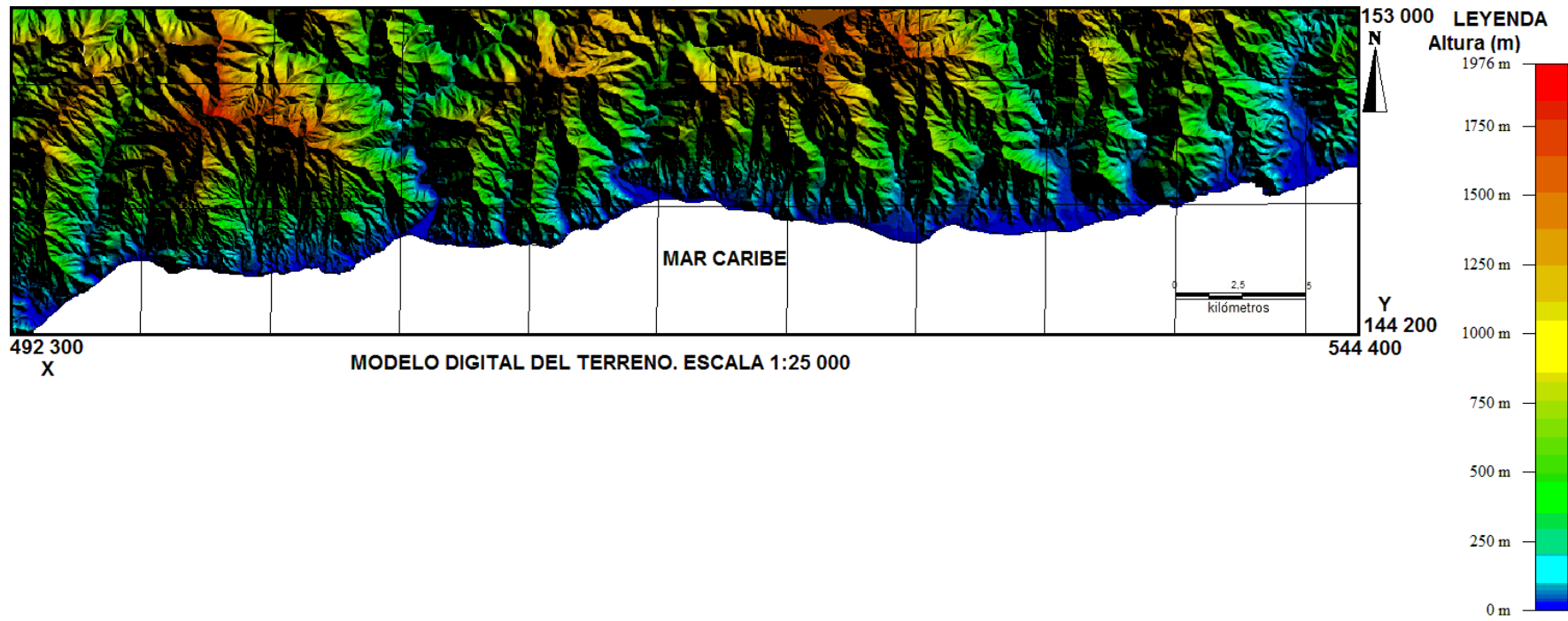


Figura 27. Modelo Digital del Terreno del sector Guamá. Escala 1: 25 000.

Tabla 14. Resultados de la evaluación de las principales fallas por el método Haller *et al.*, 1993, en el sector Guamá. Fuente: Autora

| Nombre de estructura | Falla Jibacoa | Falla Turquino | Falla Bayamita |
|--------------------------------|--|---|--|
| Número de estructura | 50 | 51 | 52 |
| Clasificación de la estructura | Simple falla | Simple falla | Simple falla |
| Comentario | Se localiza desde la desembocadura del río La Plata hasta Guabeje Arriba | Se sitúa a lo largo del valle del río Turquino hasta la costa. | Se ubica a lo largo del valle del río Bayamita hasta la costa sur. |
| Autor | Alioshin <i>et al.</i> , 1975; Pérez y García, 1997 | Pérez y García, 1997 | Kuzovkov <i>et al.</i> , 1977; Pérez y García, 1997 |
| Fecha de compilación | (- / - /1994) | (- / - /1994) | (- / - /1994) |
| Compilador y afiliación | Rosabal S. CENAI S | Rosabal, S. CENAI S | Rosabal, S. CENAI S |
| Provincia | Santiago de Cuba | Santiago de Cuba | Santiago de Cuba |
| País | Cuba | Cuba | Cuba |
| Fidelidad de localización | Buena | Buena | Buena |
| Comentario | Localización de la falla fundamentada en mapa a escala 1:50 000 (Pérez <i>et al.</i> , 1994) | Localización de la falla fundamentada en mapa a escala 1:50 000 (Pérez <i>et al.</i> , 1994) | Localización de la falla basada en mapa a escala 1:50 000 (Pérez <i>et al.</i> , 1994) |
| Situación geológica | Aumenta la presencia de cuerpos intrusivos subvolcánicos al este de la falla, manifestación de estructuras vulcano-tectónicas. Zona de trituración y alteración hidrotermal. | Limita zonas con cambios en el rumbo y buzamiento de las rocas. Predominio de las fallas y los ejes de estructuras plicativas de orientación noroeste-sureste en dirección al este. | Con ella se relacionan varios cuerpos intrusivos ácidos. |
| Sentido de movimiento | Normal | Normal | Normal transcurrente. |
| Comentario | Pérez y García, 1997 | Pérez y García, 1997 | Pérez y García, 1997 |
| Expresión geomorfológica | Alineamiento de ríos y relieve | Profundo cañón. Alineación de ríos y arroyos. Inflexión de las curvas de isobasitas de tercer orden. Valores morfométricos marcadamente diferentes sobre la misma litología | Encajamiento de valles fluviales. Profundo cañón |
| Azimut | desconocido | desconocido | desconocido |
| Desplazamiento | desconocido | desconocido | desconocido |
| Orientación | NO-SE | NNO | NW-SE |
| Longitud | 1,85 km en el interior del sector | 13,35 km dentro del sector | 9,40 km en los límites del sector |
| X; Y | X: 493300-477000; Y: 140 400-161900 | X:500000-507600; Y:143900-153000 | X:530100-533500; Y:144300-152900 |
| Escala del mapa | 1:25 000 | 1:25 000 | 1:25 000 |
| Proyección | Proyección cónica conforme de Lambert | Proyección cónica conforme de Lambert | Proyección cónica conforme de Lambert. |
| Edad | Paleoceno-Eoceno Inferior Activa desde el Paleoceno | Oligoceno Activa desde el Oligoceno | Oligoceno Activa desde el Oligoceno |
| Tipo de línea | sólida | sólida | sólida |

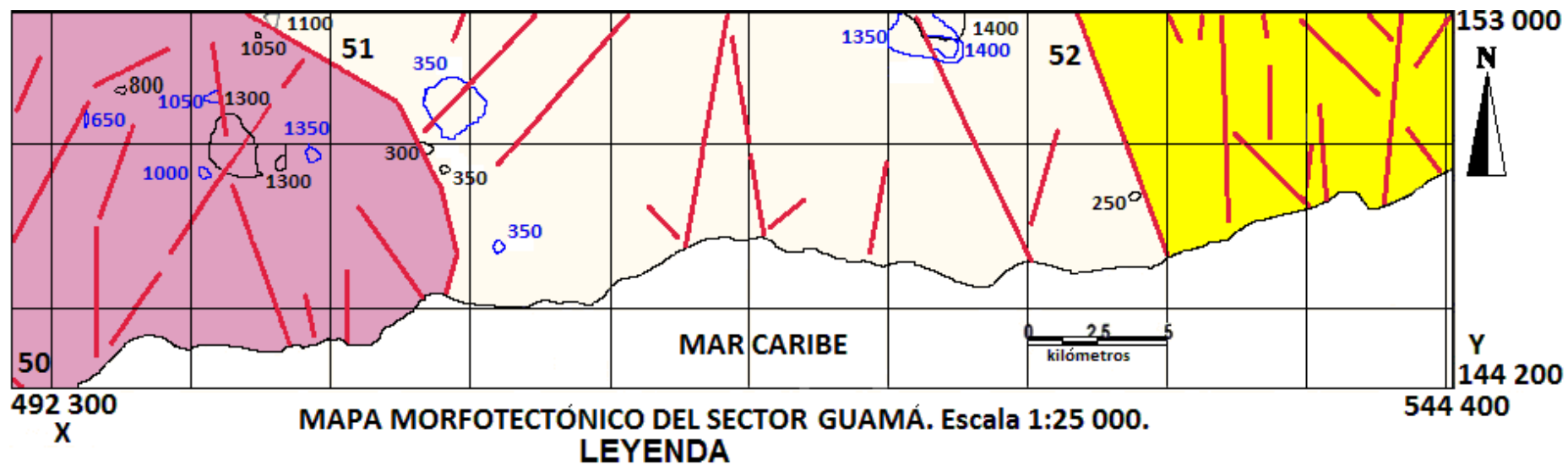


Figura 28. Mapa morfotectónico del sector Guamá a escala 1:25 000. Fuente: Autora.

Bloque Turquino. Abarca el extremo occidental del sector, entre las localidades de La Plata y La Mula. Las estructuras tectónicas que lo limitan son Jibacoa y Turquino. Manifiesta la mayor actividad neotectónica de ascenso (tabla 15).

Dado por el relieve, la disección vertical, las pendientes y la máxima altura (Pico Turquino). Predominan las rocas de los arcos volcánicos del Cretácico (formaciones Palma Mocha y Manacal) y del Paleógeno del Grupo El Cobre, así como cuerpos intrusivos intemperizados (IGP, 2003). Hacia la costa afloran las formaciones Río Macío (depósitos aluviales) y Jaimanitas con calizas biodetríticas, carsificadas (Colectivo de autores, 2013).

Es probable la ocurrencia de la licuefacción, dadas las condiciones existentes de suelos aluviales de edad Holoceno (Rosabal, 2014) en las desembocaduras de los ríos Jibacoa, Palma Mocha, El Naranjo, El Potrerillo, Ocuja, El Muerto y Turquino; con intensidad sísmica ($I > 8$ MSK) y aceleración horizontal (350 cm/s^2) alta (Chuy y Álvarez, 1995). La dirección principal del agrietamiento está entre los 320° - 330° (Pérez *et al.*, 1994).

Bloque Uvero. Ocupa la parte central del sector, desde el poblado La Mula hasta Bayamita, limitado por las fallas Bayamita y Turquino. Posee movimientos neotectónicos de ascenso, expresados en el relieve; pendientes, disección vertical e isobasitas de segundo y tercer órdenes (tabla 15). Existen suelos aluviales de edad Holoceno en la desembocadura de los ríos Peladero, Babujal, Uvero, Avispero y Bayamita; con alta peligrosidad sísmica (Chuy y Álvarez, 1995), que favorecen la licuefacción.

Tabla 15. Características geomorfológicas de los bloques morfotectónicos del sector Guamà. Fuente: Autora

| Bloques | Red drenaje | Orden | Relieve | Nivel base de erosión 2do orden (m) | Nivel base de erosión 3er orden (m) | Pendientes | Licuefacción | Tipos de deslizamientos | Tendencia de movimientos relativos |
|----------|-----------------------|-------|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--|----------------------------------|------------------------------------|
| Turquino | Radial | 5to | Montañas, y llanuras | 800 -1 300 | 1000-1 400 | 80° al norte y de 0°-11° al sur | Probable licuefacción en desembocaduras de ríos como: Jibacoa, Palma Mocha, El Naranjo, El Potrerillo, Ocuja, El Muerto y Turquino | Caídas de rocas y deslizamientos | Ascenso |
| Uvero | Paralela y dendrítica | 5to | Montañas, y llanuras | 1 400 | 900-1 400 | 25° a 80° al norte y 0°-11° al sur | Probable licuefacción en desembocaduras de ríos como: Peladero, Babujal, Uvero, Avispero y Bayamita | Deslizamientos | Ascenso |
| Bayamita | Paralela y dendrítica | 5to | Montañas, y llanuras | 600-1 150 | 500-1 100 | 80° al norte y de 18°-25° | Probable licuefacción en desembocaduras de ríos como: Bayamita, Grande y Guamà | Deslizamientos | Ascenso |

En el bloque Uvero la litología corresponde a las rocas de los arcos volcánicos del Cretácico (Formación Manacal) y del Paleógeno (Grupo El Cobre), rocas intrusivas y las formaciones Jaimanitas y Río Macío (IGP, 2003). La dirección principal del agrietamiento está entre los 330°-340° (Pérez et al., 1994).

Bloque Bayamita. Ocupa el extremo este, desde el asentamiento La Cuquita hasta Guamá Abajo, delimitado por las estructuras Bayamita y Guamá. Presenta movimientos relativos de ascenso, valores morfométricos mínimos en comparación con el resto del área de estudio (tabla 15). Suelos aluviales de edad Holoceno con probable licuefacción, ubicados en las desembocaduras de los ríos Bayamita, Grande y Guamá; (IGP, 2008; Peñalver et al., 2008; Rosabal, 2014) con peligro sísmico alto (Chuy y Álvarez, 1995). Indicios de inestabilidad tectónica en taludes de la carretera, con el desnivel y agrietamiento de la misma. La dirección principal del agrietamiento está entre los 330-340° (Pérez et al., 1994).

El sector Guamá está dividido en tres bloques morfotectónicos escalonados, con movimientos neotectónicos de ascenso, el bloque Turquino es el de mayor amplitud. Es un sector muy inestable debido a la neotectónica, son zonas de levantamientos donde existe erosión y manifestaciones de deslizamientos.

En los tres bloques existe alta susceptibilidad a los deslizamientos debido a condiciones del relieve, geología, fracturamiento, meteorización, densidad de la red hidrográfica, erosión en alto grado producida por la red fluvial y valores de disección vertical; todos estos factores provocan que los deslizamientos sean frecuentes en estos bloques en ascenso. A pesar de su movimiento predominante existe susceptibilidad a la licuefacción, se han acumulado sedimentos aluviales en

los canales de los ríos y sus desembocaduras y es posible la ocurrencia de expansiones laterales.

3.3.7 Evaluación sismológica

Varias series de terremotos han sido monitoreadas en este sector y la última ocurrió el 17 de enero de 2017. Se reportó un deslizamiento de rocas asociado al terremoto de Pílon (19 de febrero de 1976, magnitud 5,7 Richter e intensidad 8,0 MSK) en Purialón (Álvarez *et al.*, 1984), sin coordenadas geográficas para la confección del inventario de deslizamientos (figura 29). Los parámetros de peligrosidad sísmica para el sector Guamá (Chuy y Álvarez, 1995) indican altos valores de intensidad sísmica ($I > 8$ MSK) y aceleración horizontal efectiva (350 cm/s^2), lo cual favorece la ocurrencia de la licuefacción de suelos.

3.3.8 Peligros inducidos por la actividad sísmica

En el sector existen condiciones sismológicas, geológicas y geomorfológicas que influyen en la probable ocurrencia de la licuefacción a todo lo largo de esta área por la presencia de suelos aluviales de edad Holoceno (IGP, 2008; Rosabal, 2014), que denotan susceptibilidad de este a oeste; así como por el relieve de llanuras y llanuras fluviales, valores entre 0 y 7° de pendiente, intensidad sísmica ($I > 8$ MSK) y aceleración horizontal efectiva (350 cm/s^2) (Chuy y Álvarez, 1995) (figura 30). En el reanálisis realizado durante esta investigación de las calas de 2003 (Méndez *et al.*, 2003) se detectaron pozos en estado seco, obstruidos, surgentes y sin información de los mismos; lo cual no permite obtener información real de las profundidades de los niveles freáticos para los sectores de estudio de Cuba suroriental, además de una escasa información ingeniero-geológica.



Figura 29. Deslizamiento de rocas asociado al terremoto de Pílon de 1976, en Purialón. Cortesía del Dr. Tomás Chuy Rodríguez.

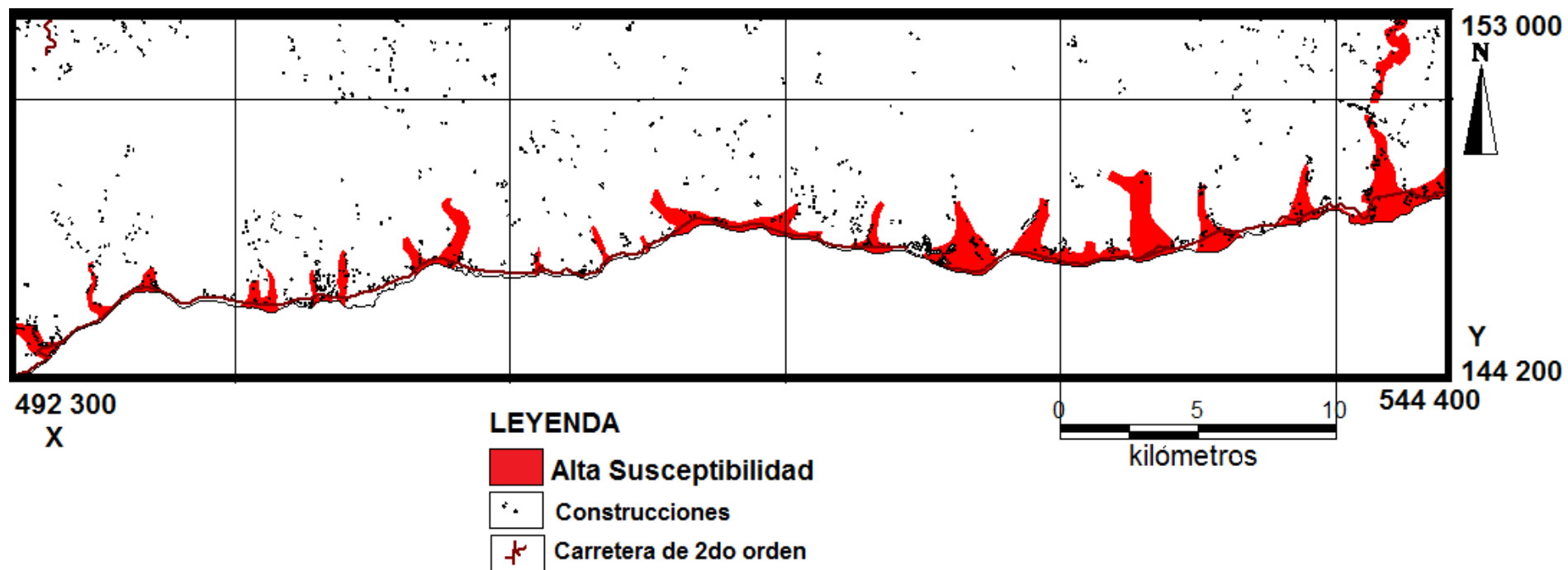


Figura 30. Mapa de susceptibilidad a la licuefacción de suelos del sector Guamà. Escala 1:100 000. Fuente: Autora.

En el sector Guamá los inventarios describen la existencia de un total de 10 eventos; de ellos, 4 flujos (ubicados en la Formación Jaimanitas y en el Grupo El Cobre), 4 combinados de caídas y flujo (en la Formación Jaimanitas) y 2 caídas (en los gabros, gabrodioritas).

También, es posible que ocurran deslizamientos inducidos por la actividad sísmica por el criterio de magnitud distancia (TC4, 1999), teniendo en cuenta las zonas sismogeneradoras (Oriente, Cauto-Nipe, Bayamo y Baconao) que afectan al sector (Chuy *et al.*, 1997). Pueden ocurrir fallos destructivos de taludes a las distancias epicentrales de 11,6 km (Bayamo), 19 km (Baconao y Cauto–Nipe), 34 km (Oriente 2), 50,4 km (Oriente 1) y fallos de taludes a 78,2 km (Bayamo), 119,8 km (Baconao y Cauto-Nipe), 199,9 km (Oriente 2), 281,2 km (Oriente 1); con mayor incidencia de los terremotos ubicados en la zona sismogeneradora Oriente (tabla 16).

Las condiciones geomorfológicas, hidrológicas y geológicas sugieren zona de alta susceptibilidad a la ocurrencia de caídas, desprendimientos y deslizamientos en gran parte del sector, al norte (tabla 17 y figura 31), donde existe alto nivel de erosión asociado a los ríos jóvenes y altos valores en los cierres de isobasitas de segundo y tercer órdenes, lo cual indica zonas de denudación del relieve.

Asimismo, influye la meteorización en los movimientos gravitacionales, en las zonas de derrumbes de cavernas, y asociados a estos últimos incide el carso.

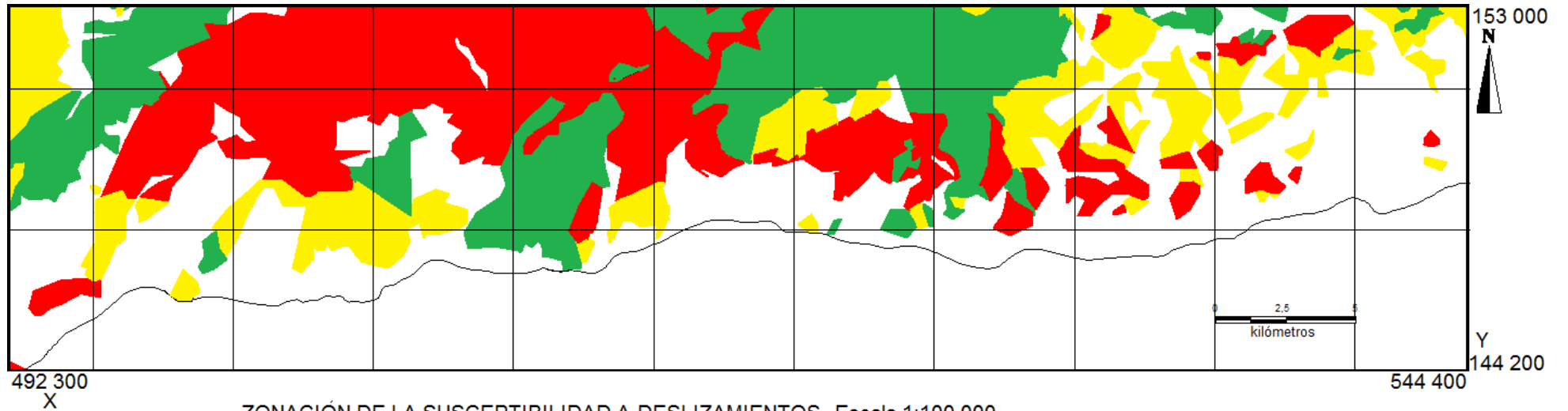
La zona de susceptibilidad moderada a los deslizamientos se localiza al sur y noreste del sector, donde están las rocas duras estables y relativamente duras-semiduras, con presencia de intemperismo, agrietamiento, carso, alternancia de rocas, estratificación y afectación por procesos tectónicos.

Tabla 16. Máxima distancia epicentral de fallo destructivo de taludes (Clase 1) y máxima distancia epicentral de fallo de taludes (Clase 2). Fuente: Chuy *et al.*, 1997; TC-4, 1999

| Zonas Sismogeneradoras | Ms (Richter) | Clase 1 (km) | Clase 2 (km) |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Bayamo | 6,5 | 11,6 | 78,2 |
| Baconao | 7 | 19 | 119,8 |
| Cauto-Nipe | 7 | 19 | 119,8 |
| Oriente 2 | 7,6 | 34,0 | 199,9 |
| Oriente 1 | 8 | 50,4 | 281,2 |

Tabla 17. Caracterización de la susceptibilidad a deslizamientos en el sector Guamá. Fuente: Autora

| Categoría | Geomorfología | | | Hidrología (km/km ²) | Geología y Geotecnia | | | Resultados |
|-----------|-------------------|---|----------------------|-------------------------------------|---|--|--|--|
| | Pendiente (°). | Disección vertical (m/km ²) | Relieve (m) | | Aspectos ingeniero- geológicos | Clasificación de las rocas | Litología | |
| Baja | 25 | 0-300 | 50-200 | 0,0-2,5 5,0-16 | Sin afectación | Rocas duras. Roca fuerte masivas | Andesitas, Basaltos Riolitas Formación .Manacal | No deslizamientos |
| Moderada | 35 | 176-300 | 50-200 | 0,0-5 | Intemperismo y rocas agrietadas, carso, alternancia de rocas, estratificación y afectación por procesos tectónicos | Rocas duras. Rocas relativamente duras-semiduras. Rocas fuerte masivas | Gabro, Gabrodioritas Gabrodiabasasdolerita Diabasas, Granodioritas Formación Palma Mocha | Meteorización, caídas de bloques y deslizamientos |
| Alta | 35-45 > 45 | 501-800 301-500 | 200- 500 > 500 | 0,0-5 | Intemperismo y agrietamiento, carso alternancia de rocas, estratificación y afectación por procesos tectónicos | Rocas kársticas. Rocas débiles granular. Rocas relativamente duras y duras-semiduras | Grupo El Cobre Formación Jaimanitas | Meteorización, caídas de bloques, colapso, hundimientos, desplomes de cavernas, desprendimientos y deslizamientos |



ZONACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS. Escala 1:100 000.

- LEYENDA
- Niveles de susceptibilidad
- Alta
 - Moderada
 - Baja

Figura 31. Zonación de la susceptibilidad a deslizamientos en el sector Guamá. Escala 1:100 000. Fuente: Autora.

Con baja y muy baja susceptibilidad a los deslizamientos se encuentra la parte sur del sector, con rocas duras estables sin o muy poca afectación por meteorización y agrietamiento y pendientes de 25° y de 0°-15°. No existen indicios que permitan predecir deslizamientos.

Se realizó la comprobación directa en el terreno y se corroboraron los resultados con la presencia de manifestaciones de deslizamientos, desprendimientos y caídas de rocas (figura 32) a todo lo largo del sector (Chuy y Rosabal, 2011). La gran mayoría de los taludes ubicados en la carretera Granma poseen una altura de 20-50 m y un ángulo de inclinación aproximado de 60°-90°. En esta área la acción antrópica (carretera Granma-Santiago de Cuba) rompió con el equilibrio natural, además de la presencia de grietas, fallas y meteorización, que hacen que estos peligros geológicos sean frecuentes. Igualmente, un estudio de taludes en la Loma del Papayo, Punta Bayamita, Don Luis y próximo al río Grande demostró que pueden ser totalmente inestables, por lo cual en estos puede ocurrir el fallo (Reyes y Seisdedos, 2001).

Se observó la distribución de los depósitos aluviales en cauces de ríos y llanuras fluviales del sector, así como ríos en estado seco (figura 33).

Estos materiales (arcillas, arenas, gravas, cantos y bloques) son transportados y depositados por la acción del agua, de ahí que estos suelos (arcillas y arenas) sean susceptibles a la licuefacción.



Figura 32. Caidas y desprendimientos de rocas en un talud con peligro para el vial del sector Guamà. Foto tomada por la autora.



Figura 33. Canal de un río seco en el sector Guamà, donde el potencial de licuefacción de suelos resulta ser no probable. Foto tomada por la autora.

3.4. Evaluación de los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos, inducidos por la actividad sísmica, en el sector Santiago de Cuba

En el sector Santiago de Cuba, al igual que en el sector Guamá, se aplica un conjunto de métodos morfométricos, geomorfológicos y sismológicos para evaluar los peligros de deslizamientos y licuefacción inducidos por la actividad sísmica.

3.4.1 Caracterización geológica

El sector Santiago de Cuba está compuesto por las formaciones geológicas que datan desde el Paleógeno hasta el Holoceno, donde se destacan el Grupo El Cobre y las formaciones Charco Redondo, Puerto Boniato, San Luis, Jaimanitas, La Cruz, Río Macío, Jutía y Río Maya. Algunas de estas formaciones ya fueron descritas en el sector Guamá. A continuación, se realiza un resumen de las formaciones presentes.

Formación El Caney (ecy). Su litología diagnosticada es la alternancia de tobas cineríticas, tufitas, tobas calcáreas, calizas tobáceas, lapilitas e intercalaciones de lavas y aglomerados. Edad: Eoceno Medio (Colectivo de autores, 2013).

Formación Charco Redondo (chr). Está compuesta por calizas compactas órgano-detríticas, fosilíferas. En la parte inferior del corte, son frecuentes las brechas. En esta parte predomina la estratificación gruesa y en la superior prevalece la estratificación fina. Edad: Eoceno Medio (Colectivo de autores, 2013).

Formación Puerto Boniato (pb). Presenta una alternancia de calizas organodetríticas y margas, con intercalaciones de sílice negro-parduzco. Edad: Eoceno Medio (Colectivo de autores, 2013).

Formación San Luis (sl). Está constituida por areniscas polimícticas, aleurolitas, margas, arcillas calizas arcillosas y conglomerados polimícticos. Se encuentra bien estratificada. Se halla cortada por diques y cuerpos de basalto. Sus depósitos aparecen ligeramente plegados. Edad: Eoceno Medio parte alta-Eoceno Superior (Colectivo de autores, 2013).

Formación La Cruz (lcz). Se subdivide en los miembros Quintero, Tejar y Santiago. Su litología diagnosticada es secuencia terrígeno-carbonática en la base y el techo, en su parte media carbonato-terrígena. Existen alternaciones de calizas biodetríticas, a veces limosas o arcillosas; calcarenitas de matriz margosa y subordinadamente margas, conglomerados, areniscas polimícticas y aleurolitas, formadas por vulcanitas. Edad: Mioceno Superior-Plioceno Superior.

Miembro Santiago (stg). Está constituido por argilitas calcáreas, limoso-arenáceas plásticas con interestratificaciones de aleurolitas polimícticas areno-arcillosas y calcilutitas laminares. Edad: Plioceno Inferior (Colectivo de autores, 2013).

Miembro Quintero (qt). Está compuesto por conglomerados polimícticos de vulcanitas y calizas. Edad: Mioceno Medio parte alta (Colectivo de autores, 2013).

Miembro Tejar (tjr). Su litología diagnosticada es alternancia de calizas biodetríticas, calizas limosas y limoso-arcillosas, calcarenitas de matriz margosa, margas, aleurolitas y más subordinadamente arcillas conglomerados y areniscas polimícticas. Edad: Mioceno Superior- Plioceno parte baja.

Formación Río Maya (rm). Está constituida por calizas biohémicas algáceas y coralinas muy duras de matriz micrítica. Las calizas se encuentran frecuentemente dolomitizadas. El contenido de arcilla es variable. Edad: Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior (Colectivo de autores, 2013).

En las tablas 11 y 12 se muestran las formaciones geológicas y sus aspectos ingeniero-geológicos, así como las formaciones más susceptibles a los deslizamientos. Igualmente, los sedimentos aluviales son susceptibles a la licuefacción.

3.4.2 Factores antrópicos

El relieve al este de la bahía de Santiago de Cuba ha sido modificado para la urbanización, lo cual influye en la detonación y formación de deslizamientos en la ciudad de Santiago de Cuba.

- La proliferación de barrios y asentamientos insalubres, muchos de los cuales se construyen excavando o con cortes del terreno para realizar su construcción; así como senderos peatonales, sin estudios geotécnicos previos, obras de protección y ni drenajes adecuados (figura 34).
- Alteración de las condiciones naturales del terreno, como la eliminación de la capa vegetal, y construcción de terrazas para ampliar sus propiedades, lo que impiden el normal flujo del agua (figura 35).
- Localización de viviendas cerca del pie o cabeza de taludes, con pendientes muy altas o verticales (figura 36).
- Sobrecarga de laderas y taludes de fuerte pendiente, con la conformación de basureros, muros de contención y edificaciones (figura 37).
- Baja percepción del riesgo de las personas que invaden estos terrenos de manera ilegal (Rosabal *et al.*, 2014a).

Para minimizar los impactos de los deslizamientos y licuefacción inducidos por sismos en el sector Santiago de Cuba y Guamá se realizaron acciones en la comunidad, como talleres comunitarios (Figura 38 y 39) en las zonas de peligro

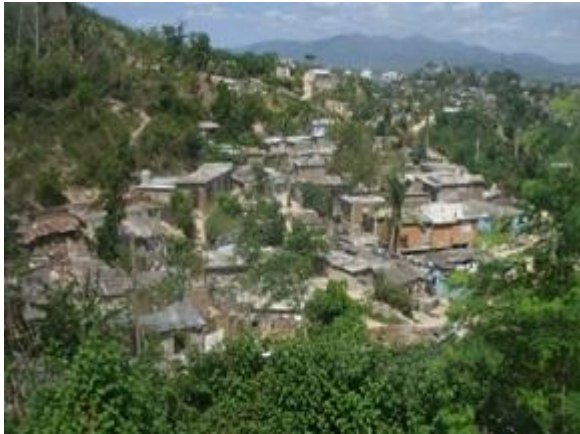


Figura 34. Barrios y asentamientos insalubres, contruidos en las laderas. Reparto Van Van, Consejo Popular Altamira, Santiago de Cuba. Foto tomada por la autora.



Figura 35. Alteración de las condiciones naturales. Foto tomada por la autora.



Figura 36. Vivienda ubicada cerca del pie del talud en calle Varadero, Altamira. Santiago de Cuba. Foto tomada por la autora.



Figura 37. Sobrecarga a las laderas naturales (al fondo zona de basurero en la ladera). Foto tomada por la autora.



Figura 38. Talleres comunitarios realizados en el sector Santiago de Cuba.



Figura 39. Charlas en las zonas de peligro donde existen instalaciones estatales.

donde existen instalaciones estatales para elevar el conocimiento entre los adultos y los decisores.

3.4.3 Caracterización morfotectónica

Para la caracterización morfotectónica del sector se emplean los métodos morfométricos, los criterios de identificación y se definen las estructuras tectónicas. Además, se realiza el análisis geomorfológico y se revalúan las estructuras tectónicas límites de bloques morfotectónicos. A continuación, se explican los pasos dados.

3.4.4 Definición de estructuras tectónicas

Se aplican los métodos morfométricos en el sector de estudio, como se muestra a continuación:

La red del drenaje. Se caracteriza por ser paralela y subparalela en casi todo el sector. Al norte es dendrítica y enrejada (figura 40). Los cursos principales de los ríos se disponen paralelos entre sí, con orientación NE-SW, NW.

En zonas de igual litología se observan tramos rectos y alineados de los ríos, al sureste aparecen cambios bruscos de la dirección de los cauces fluviales de San Juan y Sardinero, lo cual indica el control tectónico del drenaje.

Jerarquización de la red. Se identifica el séptimo orden como mayor índice de los ríos, lo que es característico del último tramo del río San Juan, ubicado al este de la bahía de Santiago de Cuba (figura 41).

Densidad de la red hidrográfica. La mayor densidad se obtuvo al norte en la parte central del sector (figura 42), que se corresponde con la zona del río Bongo. La litología pertenece al Grupo El Cobre y formación El Caney.

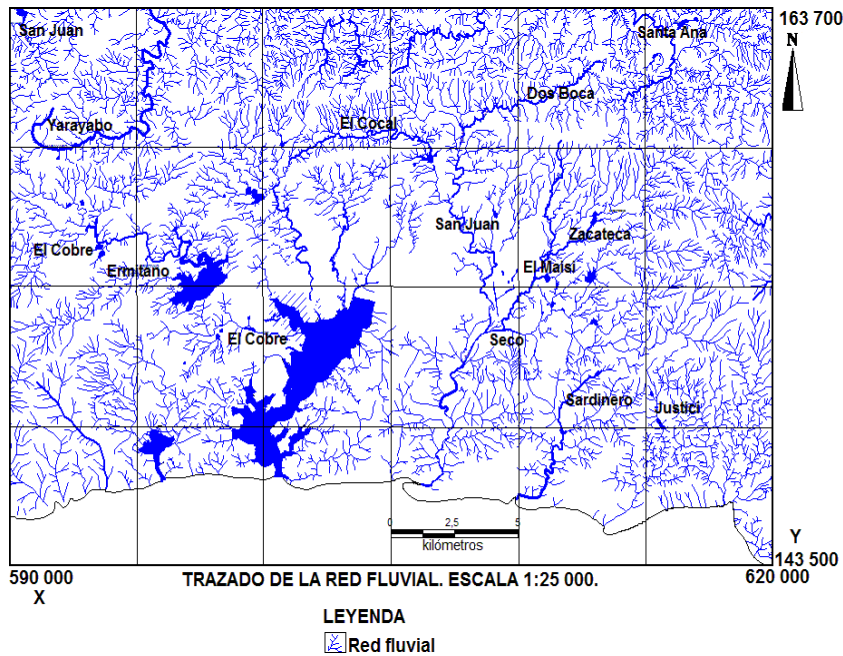


Figura 40. Trazado de la red fluvial del sector Santiago de Cuba. Escala 1:25 000. Fuente: Autora.

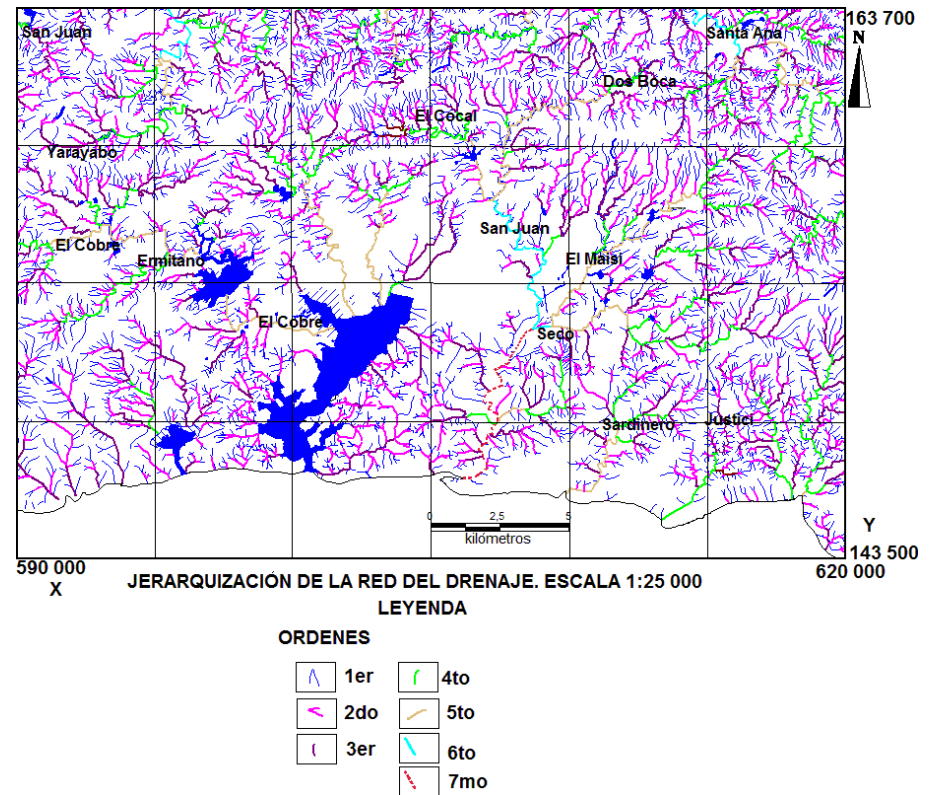


Figura 41. Jerarquización de la red del drenaje del sector Santiago de Cuba. Escala 1:25 000. Fuente: Autora.

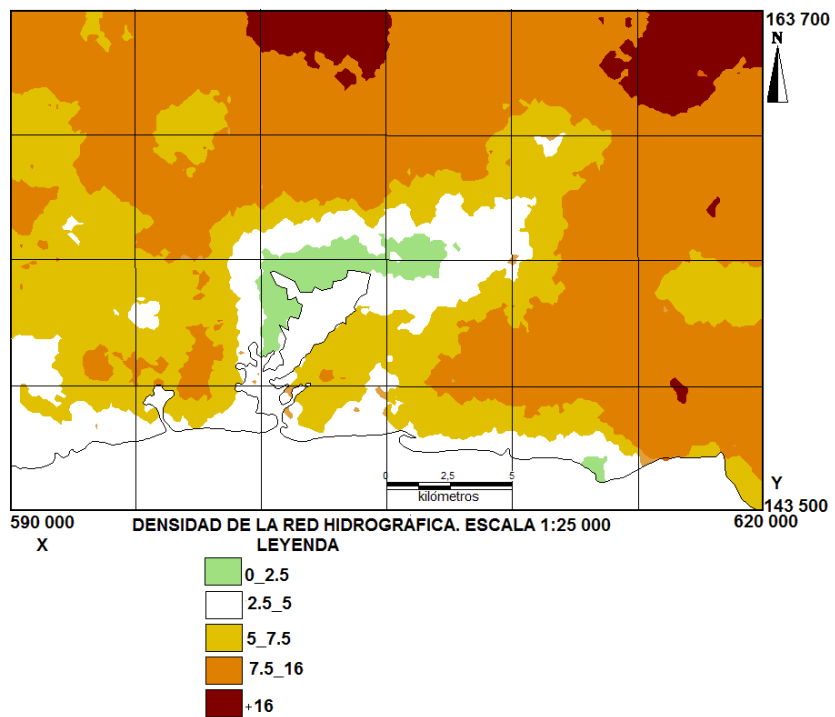


Figura 42. Densidad de la red hidrográfica del sector Santiago de Cuba, expresada en km/km^2 . Escala 1:25 000. Fuente: Autora.

Al noreste, por donde corre el río Santa Ana, la litología corresponde a las formaciones El Caney, Puerto Boniato y San Luis. Alrededor de la bahía de Santiago de Cuba y la costa se aprecian bajos valores de este parámetro.

Nivel base de erosión (isobasitas) de segundo orden. Se observan cierres positivos máximos, distribuidos al oeste (150 a 400 m), centro (300 a 400 m) y este (400 a 750 m). En las zonas próximas a la costa y la ciudad de Santiago de Cuba las isolíneas poseen bajos valores (figura 43). Los principales morfoalineamientos tienen como dirección predominante NW-SE y NE-SW.

Nivel base de erosión de (isobasitas) de tercer orden. Se observan ocho cierres positivos máximos, distribuidos en el oeste (450 m), noroeste (300 y 350 m), norte central (300 a 400 m) y noreste (350 a 700 m). Se observan otros cierres de bajos valores en los alrededores de la ciudad de Santiago de Cuba (figura 44). Las inflexiones negativas poseen dirección NW-SE, N y NE-SW, formando posibles estructuras (Rosabal *et al.*, 2015a).

Pendientes. Muestran sectores mayores de 40° , ubicados al suroeste; al norte, en las zonas de escarpes, oscilan entre 30° - 50° ; al noroeste con valores de este parámetro entre 25° - 45° , al noreste y este entre 20° - 50° y de 0° - 3° en los alrededores de la bahía de Santiago de Cuba y Cabañas; este último intervalo muestra un ambiente favorable para la licuefacción, al igual que al sur, en las zonas coincidentes con las corrientes fluviales, los valores son bajos de 0° - 7° . Próximo a la costa, en las terrazas, oscilan entre 20° - 40° (figura 45).

Disección vertical. Los máximos valores de disección vertical se encuentran ubicados hacia el este de la ciudad de Santiago de Cuba con 300 - 500 m/km^2 e indican media susceptibilidad a los deslizamientos (figura 46);

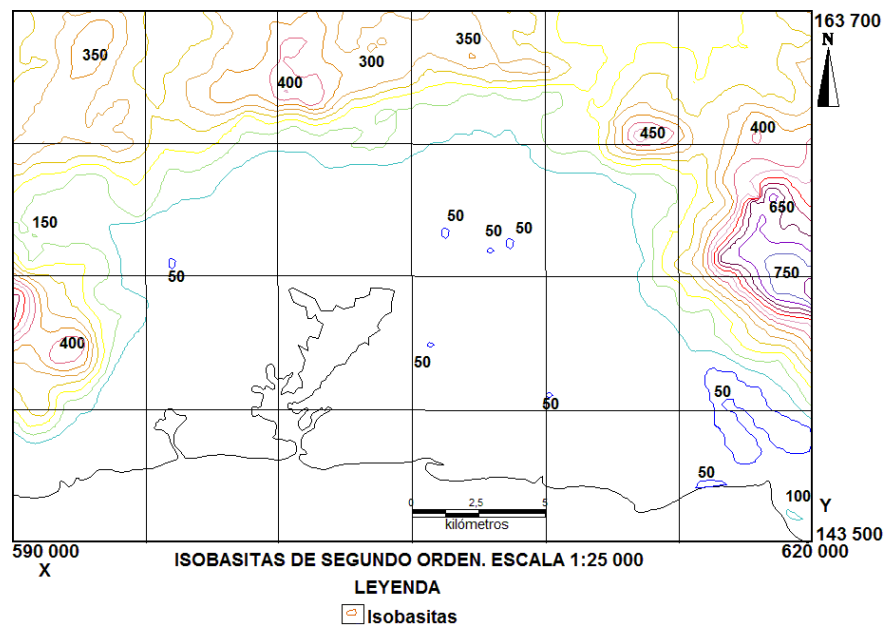


Figura 43. Nivel base de erosión (isobasitas) de segundo orden del sector Santiago de Cuba. Escala 1:25 000. Fuente: Autora.

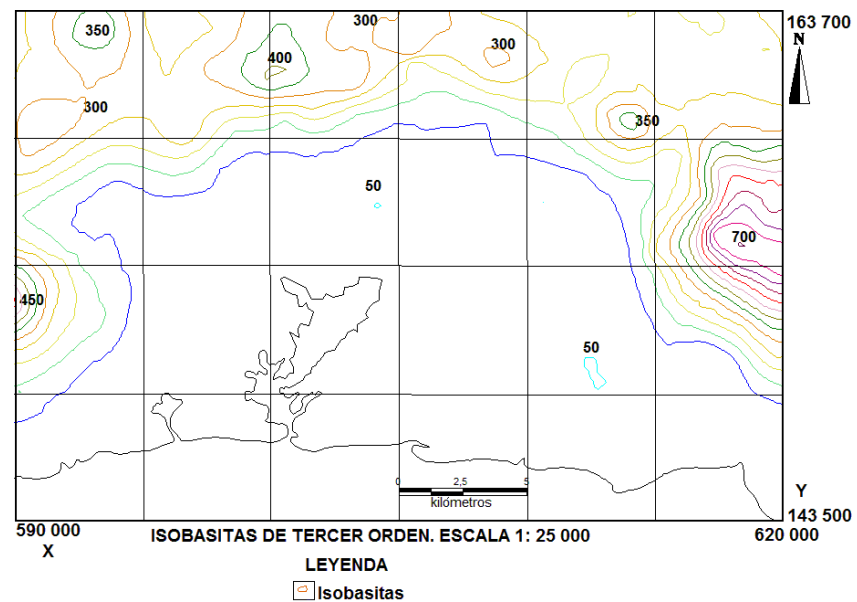


Figura 44. Nivel base de erosión (isobasitas) de tercer orden del sector Santiago de Cuba. Escala 1:25 000. Fuente: Autora.

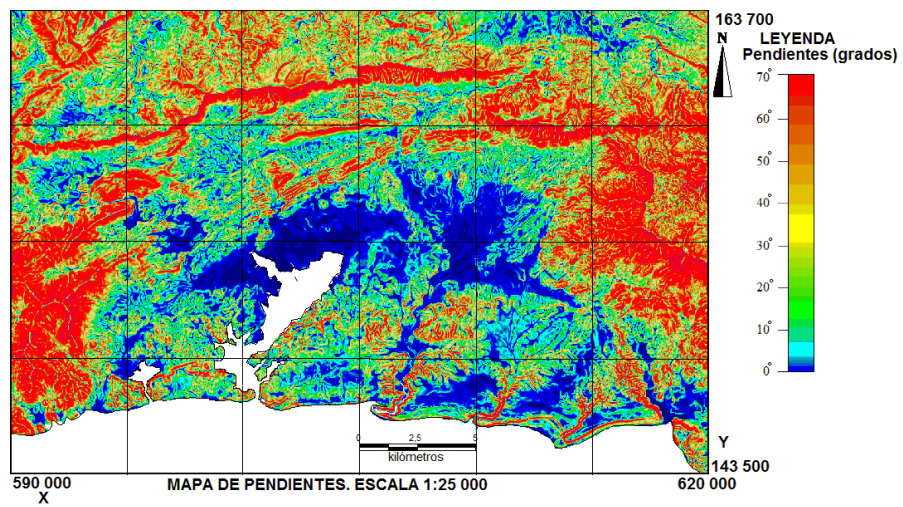


Figura 45. Mapa de pendientes del sector Santiago de Cuba. Escala 1: 25 000. Fuente: Autora.

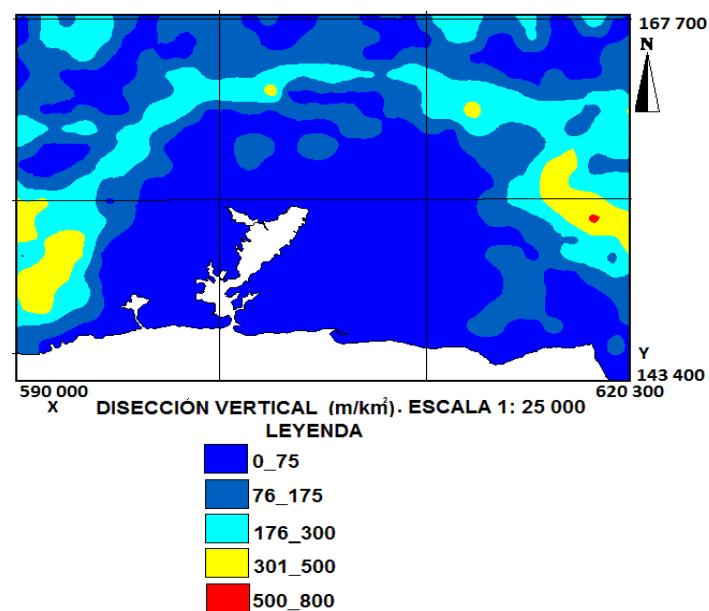


Figura 46. Mapa de disección vertical del sector Santiago de Cuba. Escala 1:25 000. Fuente: Autora.

al suroeste sobre igual litología (Grupo El Cobre) con 350 m/km², al noroeste y norte sobre la formación El Caney con 250 m/km².

Hacia estas direcciones existe mayor probabilidad de ocurrencia de los deslizamientos. En los alrededores de la bahía de Santiago de Cuba los valores son bajos, de 50 m/km².

Alineaciones tectónicas. A partir de la aplicación e interpretación de los métodos morfométricos se evidenciaron las principales alineaciones tectónicas del sector y con los criterios de identificación se determinaron las principales estructuras (tabla 18 y figura 47), muchas de las cuales han sido descritas en trabajos precedentes; entre ellas: Boniato (Taber, 1934; Pérez y García, 1997; Magaz *et al.*, 1998), Mar Verde-El Cristo (Pérez y García, 1997), Sardinero y otras (Seisdedos *et al.*, 1991; Arango, 1996; Pérez y García, 1997; Rosabal, 2001; García *et al.*, 2002); caracterizadas por diferentes métodos.

En la presente investigación, con la aplicación de métodos geomorfológicos, se detectan y confirman nueve estructuras, citadas a continuación:

- Boniato. Se confirma por la localización de un escarpe con pendiente por encima de los 30°.
- Puerto Pelado. Cambios bruscos de pendientes y alineación fluvial. Esta falla se ubica al norte del área y constituye límites de bloques morfotectónicos.
- Costera. Esta falla es denominada con este nombre por la proximidad a la costa y los elementos geomorfológicos de igual nombre, conforma la línea costera con dirección este a oeste y presenta un escarpe costero, que levanta la topografía del relieve hasta los 40-60 m aproximadamente (Rosabal, 2001). Identificada, además, por la alineación costera y de pendientes.

Tabla 18. Criterios de identificación de fallas y fallamiento activo en el sector Santiago de Cuba. Fuente: Autora

| Criterios de identificación de estructuras tectónicas del sector Santiago de Cuba | | | | | | | | Criterios de identificación de fallamiento activo | | |
|---|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------|---|------------------------------|--|-------------------------------|--|--------------------|---|
| Estructuras | Tramos rectos de los ríos y arroyos | Alineación costera | Alineación de cursos fluviales | Contacto brusco lineales entre dos materiales distintos | Campo magnetométrico anómalo | Cambios del nivel del campo radiométrico | Alineación brusca del relieve | Formación de escarpes rectilíneos con pendientes mayores a 30° en contacto con pendientes suaves | Escarpes de fallas | Alineación y desplazamiento de la línea de costa actual |
| Boniato | - | - | Xx* | - | - | - | X* | xx | - | - |
| Puerto Pelado | - | - | xx | - | - | - | - | xx | - | - |
| Costera | - | - | - | - | - | - | xx | - | xx | xx |
| Mar Verde | - | - | - | xx | x | x | x | - | xx | - |
| Santiago | - | xx | xx | xx | - | - | - | - | xx | - |
| Universidad | xx | - | - | - | - | - | xx | - | - | - |
| San Juan | xx | - | xx | - | - | - | xx | - | - | - |
| Sardinero | xx | - | xx | - | x | x | xx | - | - | - |
| Justicia | xx | - | | - | - | - | xx | - | - | - |

Nota: en la tabla 18 las xx* representan la descripción por la investigación y la x* simboliza la descripción por otros autores.

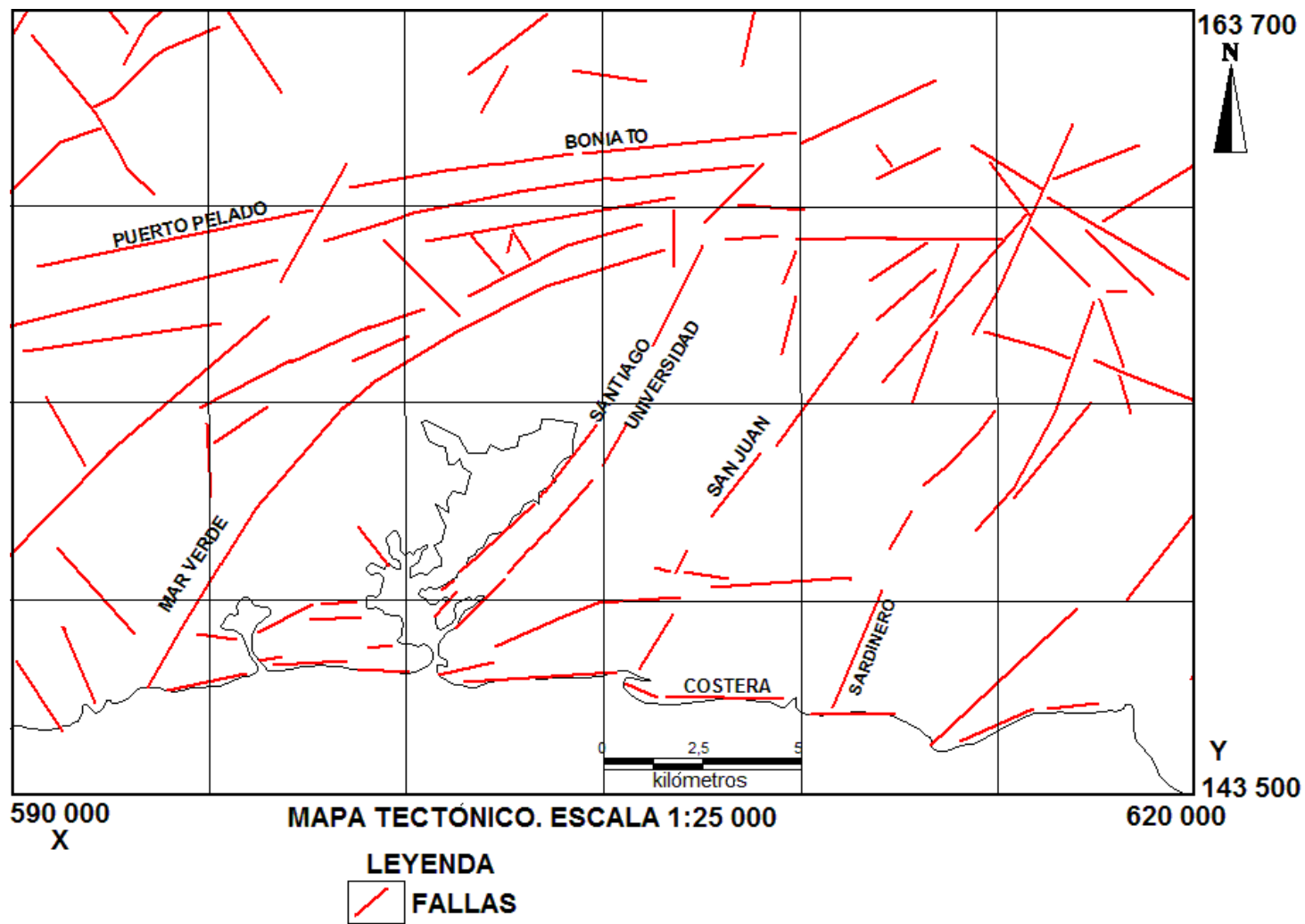


Figura 47. Mapa tectónico del sector Santiago de Cuba. Escala 1:25 000. Fuente: Autora.

- Mar Verde. Esta falla nace en la playa Rancho Club, se extiende desde la carretera de Mar Verde, Micro VII, hasta las inmediaciones del Cristo con dirección NE-SW; presenta un escarpe de falla bien definido donde se registran deslizamientos y derrumbes de rocas (Rosabal, 2001).
- Santiago. Se extiende por el margen este de la bahía de Santiago de Cuba hasta las cercanías de la sierra de Puerto Boniato. Determinada por criterios morfométricos y fotogeológicos (Rosabal, 2001). Identificada por el contacto brusco lineal entre dos formaciones, ubicadas al oeste; escarpe de falla donde existen desprendimientos de rocas en el lado este de la bahía; alineación de la costa, visible en fotografías aéreas y mapas topográficos; alineación de cursos fluviales. Esta estructura presenta elementos geomorfológicos que sugieren fallamiento activo.
- Universidad. Es nombrada en la investigación con ese nombre por su ubicación geográfica y su influencia sobre elementos construidos. Se encuentra muy próxima a la falla Santiago, con la misma dirección, y determinada por los métodos morfométricos y fotogeológicos (Rosabal, 2001). Se detecta también por tramos rectos de arroyos y alineación de pendientes.
- San Juan. Se extiende con dirección NNE-SSW a través de los tramos rectos del río San Juan, determinada por alineación fluvial y otros criterios morfométricos (Rosabal, 2001). Se observa alineación de pendientes.
- Sardinero. Tramos rectos del río Sardinero, alineación fluvial y de pendientes.
- Justicí. Identificada por tramos rectos del arroyo Justicí y alineación de pendientes.

En estudios precedentes las estructuras Boniato (Arango, 1996; Pérez y García, 1997; Magaz *et al.*, 1998); Sardinero (Pérez y García, 1997), Mar Verde, (Arango, 1996; Pérez y García, 1997), Santiago (Arango, 1996), San Juan y Puerto Pelado fueron descritas como fallas activas mediante diversos criterios.

3.4.5 Realización del análisis geomorfológico

En el sector Santiago de Cuba, se distinguen tres categorías básicas del relieve (Moreno *et al.*, 2017): montañas, alturas y llanuras (figura 48). Esta última comprende los alrededores del río San Juan y de las bahías de Cabañas y Santiago de Cuba, que indican condiciones favorables para la licuefacción; al este de esta última aparecen las llanuras y terrazas fluviales acumulativas y erosivo-acumulativas, medianas, onduladas y planas (Pórtela *et al.*, 1989). La zona de montañas pequeñas a bajas (500-1000 m) está distribuida en todo el sector, como Pico Cobre (805.6 m), ubicado al oeste, y Loma el Bonete (578.3 m), al este.

Montañas medias como la sierra de la Gran Piedra (1 225 m), ubicada al este. Las sierras de Puerto Pelado y Boniato desarrollan un relieve de tipo crestas y cuevas, elevaciones alargadas que poseen una ladera de pendiente suave y otra más abrupta (Rodríguez, 1991). Al norte se encuentran las montañas pequeñas en cadenas disecionadas.

Terrazas fluviales a lo largo de los valles de los ríos San Juan y Sardinero, donde predominan los procesos de erosión y acumulación. Próximo a la zona costera, al este, se desarrollan las terrazas marinas escalonadas, producto de la acción erosiva del mar; al bajar el nivel del mar o elevarse el continente, la plataforma de abrasión queda expuesta, dando origen a una nueva terraza marina; en las mismas predominan las formaciones cársicas.

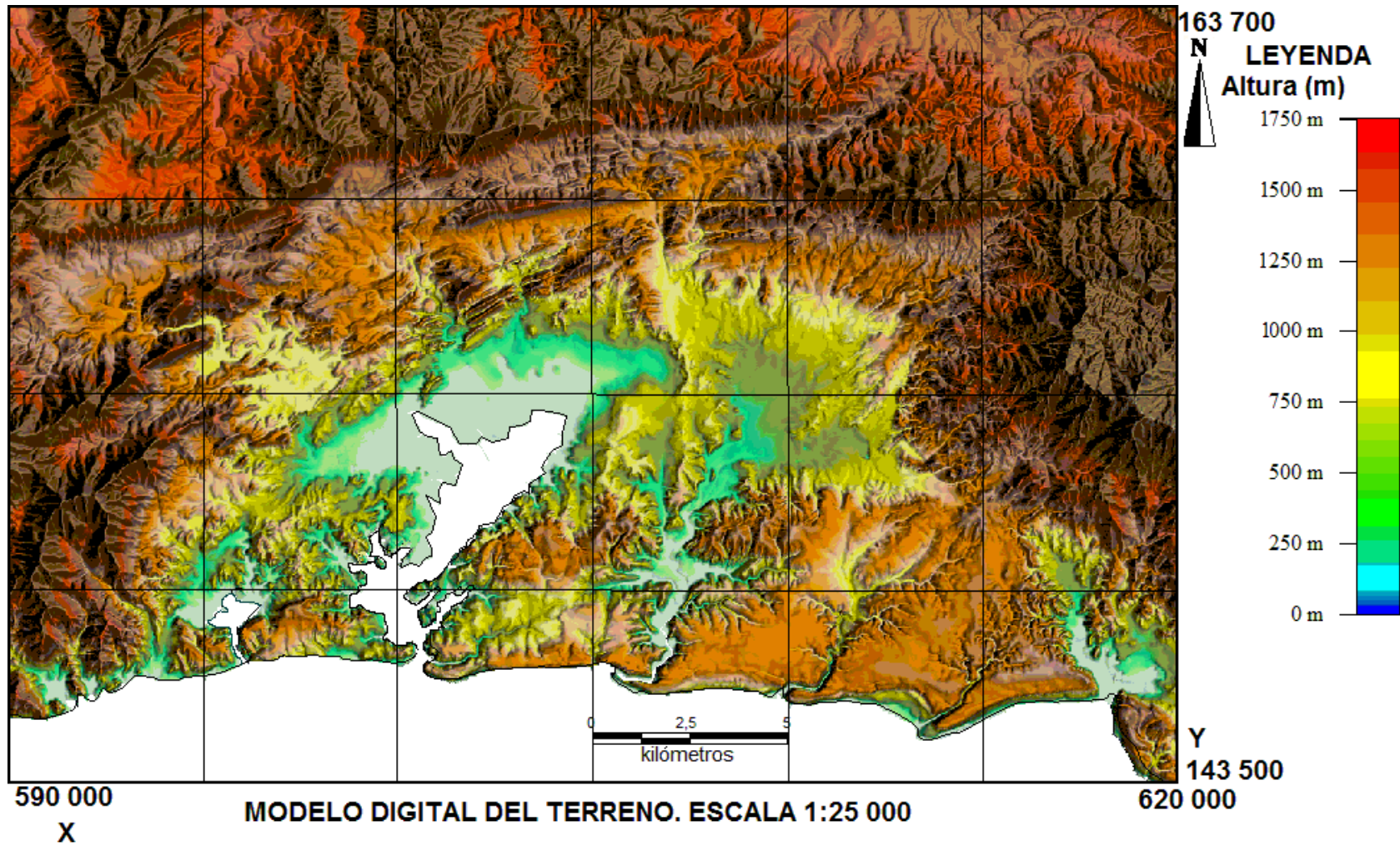


Figura 48. Modelo Digital del Terreno del sector Santiago de Cuba. Escala 1: 25 000. Fuente: Geocuba, 2006.

Se analizan las principales estructuras límites de bloques morfotectónicos (tabla 18). Se detecta un escarpe en las estructuras tectónicas Boniato, Costera, Mar Verde y Santiago. En estas dos últimas se registran desprendimientos de rocas, que se consideran como criterio de falla activa. Así como se determina la alineación de la línea costera actual en la estructura Costera. Las fallas Puerto Pelado y Boniato se confirman por la formación de un escarpe rectilíneo con pendientes mayores de 30° en contacto con pendientes suaves.

Las fallas activas propuestas (Santiago, Universidad, Mar Verde y Boniato), por mediciones geodésicas de primer orden de la cuenca Santiago de Cuba, presentan evidencias geomorfológicas; aunque no constituyen un peligro significativo por su capacidad sismogénica, sino por servir de guías de ondas de la zona de falla Oriente y por producir movimientos diferenciales rápidos y lentos (Arango, 1996; García *et al.*, 2002).

3.4.6 Revaluación de estructuras tectónicas regionales o límites de bloques morfotectónicos

Al reevaluar las estructuras tectónicas mediante el método de Haller *et al.* (1993), se detecta poca información relacionada con la geometría y el desplazamiento. Las fallas Boniato, Puerto Pelado, San Juan y Mar Verde se clasifican como simple falla (tabla 19).

En cada bloque propuesto se determinó la dirección principal del agrietamiento mediante la medición de elementos de yacencia y los diagramas de rosetas (Rosabal, 2001).

Tabla 19. Resultados de la evaluación de las principales fallas por el método de Haller *et al.*, 1993 en el sector Santiago de Cuba.
Fuente: Autora

| Nombre de estructura | Falla Boniato | Puerto Pelado | Falla Mar Verde | Falla San Juan |
|--------------------------------|--|--|--|---|
| Número de estructura | 56 referida como falla 06 (Magaz <i>et al.</i> , 1998) | 57 | 58 | 59 |
| Clasificación de la estructura | Simple Falla | Simple Falla | Simple Falla | Simple Falla |
| Comentario | Se localiza al sur de la meseta de Boniato, al norte de Santiago de Cuba | Se localiza al sur de la Sierra de Puerto Pelado al noroeste de Santiago de Cuba | Limita a la cuenca de Santiago de Cuba por el noroeste | Se localiza al este de la ciudad de Santiago de Cuba, en la cercanía de Playa Aguadores |
| Autor | Taber, 1934; Hernández <i>et al.</i> , 1989 en Magaz <i>et al.</i> , 1998; Pérez y García, 1997 | Seisdedos <i>et al.</i> , 1991; Arango, 1996; Rosabal, 2001 | Pérez y García, 1997; Arango, 1996, Rosabal, 2001; | Seisdedos <i>et al.</i> , 1991; Arango, 1996; Rosabal, 2001. |
| Fecha de compilación | (28 /12 /1995) | (- /- /2014) | (- /- /1994) | (- /- /) |
| Compilador y afiliación | Hernández, J. Instituto de Geografía Tropical. CITMA | Rosabal S. CENAI S | Rosabal, S. CENAI S | Rosabal, S. CENAI S |
| Provincia | Santiago de Cuba | Santiago de Cuba | Santiago de Cuba | Santiago de Cuba |
| País | Cuba | Cuba | Cuba | Cuba |
| Fidelidad de localización | Buena | Buena | Buena | Buena |
| Comentario | Localización de la falla fundamentada en el mapa a escala 1:250 000 (Colectivo de autores, 1988). A partir del mapa de Alineamientos (Pérez, 1989). Mapa geomorfológico de la zona de suturas interplacas (Hernández, 1987; Hernández <i>et al.</i> , 1991). | Localización de la falla basada en el mapa a escala 1:25 000. Actual investigación | Localización de la falla basada en el mapa a escala 1:50 000 (Pérez <i>et al.</i> , 1994) | Localización de la falla basada en el mapa a escala 1:75 000 (Seisdedos <i>et al.</i> , 1991) |
| Situación geológica | Limita actualmente con la Formación Caney de la secuencia superior del grupo El Cobre al noroeste de Santiago de Cuba | Limita al oeste la Formación El Caney del Grupo El Cobre | Su ubicación desde el oeste de Santiago de Cuba hasta las inmediaciones del Pueblo El Cristo | Parece limitar la distribución de la Formación La Cruz del Mioceno Superior, separa 2 bloques con diferente corte erosivo |
| Sentido de movimiento | Normal de ángulo abrupto | Normal | Normal | Normal |
| Comentario | Magaz <i>et al.</i> , 1998 | Actual investigación | Pérez y García, 1997 | Actual investigación |
| Expresión geomorfológica | Escarpe tectónico, alineación de elementos del relieve. Constituye la zona de articulación entre la meseta horst-monoclinal de Boniato y la depresión graben-monoclinal Santiago de Cuba. | Cambios bruscos de pendientes y alineación fluvial. | Alineación del relieve | Tramos rectos del río San Juan, alineación fluvial, alineación de pendientes |

Tabla 19. Resultados de la evaluación de las principales fallas por el método de Haller *et al.*, 1993 en el sector Santiago de Cuba (continuación). Fuente: Autora

| Nombre de estructura | Falla Boniato | Puerto Pelado | Falla Mar Verde | Falla San Juan |
|----------------------|--|---------------------------------------|--|---|
| Azimut | desconocido | desconocido | desconocido | desconocido |
| Desplazamiento | desconocido | desconocido | desconocido | desconocido |
| Orientación | NE-SW | NE-SW | NE-SW | NNE-SSW |
| Longitud | 11,29 km en el sector | 7,18 km en el sector | 26,51 km en el sector | 12,82 km en el sector |
| X; Y | X:598600-609900; Y:159000-160300 | X:590700-597700; Y:157000-158400 | X:593500-615200 Y:163000-157700 | X:606000-613400; Y:146900-156800 |
| Escala del mapa | 1:25 000 | 1:25 000 | 1:25 000 | 1:25 000 |
| Proyección | Proyección cónica conforme de Lambert | Proyección cónica conforme de Lambert | Proyección cónica conforme de Lambert | Proyección cónica conforme de Lambert. |
| Edad | Cretácico Superior-Eoceno Medio En Magaz <i>et al.</i> , 1998 | Eoceno Medio | Eoceno Superior y activa desde esa etapa | Mioceno Superior y activa a partir de este. |
| Tipo de línea | sólida | sólida | sólida | sólida |

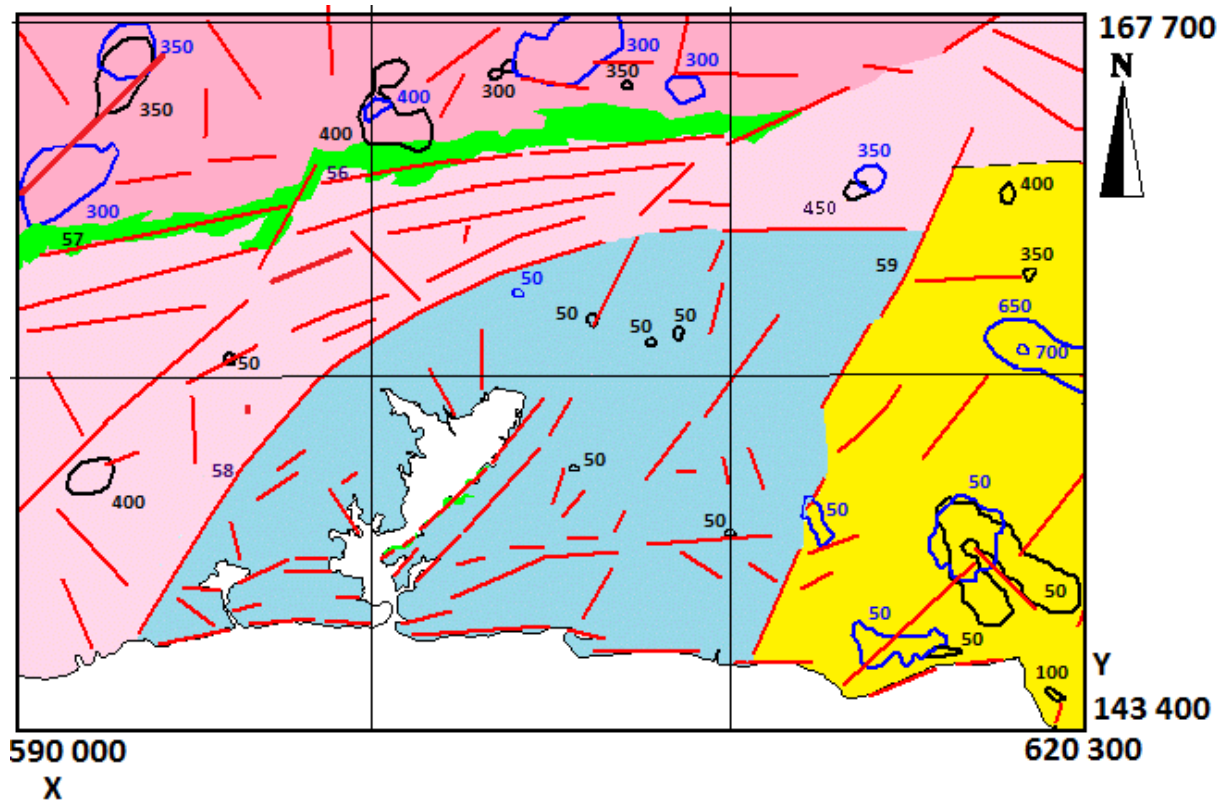
Bloques morfotectónicos del sector Santiago de Cuba

El sector Santiago de Cuba queda compuesto por cuatro bloques morfotectónicos (figura 49). A continuación, se realiza una breve caracterización de cada uno de ellos (Rosabal *et al.*, 2015a).

Bloque Boniato. Se extiende de este a oeste por toda la parte norte del sector, limitado por las estructuras Boniato y Puerto Pelado. Afloran las calizas de la Formación Puerto Boniato, que dan lugar a un paisaje cársico. El relieve que se desarrolla es de crestas y cuevas. El máximo valor de amplitud es 585,7 m, ubicado en la parte sur central. Se encuentran las rocas del Grupo El Cobre y las formaciones Puerto Boniato y San Luis. Como resultado de la aplicación de los métodos morfométricos se obtienen movimientos relativos de ascenso y moderada susceptibilidad a deslizamientos. Las mediciones geodésicas reflejan ascenso de 2 a 3 mm por año en la región de El Cristo (Lilienberg *et al.*, 1998).

Existen condiciones favorables para los deslizamientos y desprendimientos de roca por las pendientes, condiciones ingeniero–geológicas del Grupo Cobre y por la estratificación fina de la formación Puerto Boniato. La dirección principal del agrietamiento es hacia el este-oeste (Rosabal, 2001).

Bloque Cobre. Se extiende de este a oeste, limitado por las estructuras Boniato y Puerto Pelado al norte y por la falla Mar Verde al sur. Experimenta movimientos relativos ascendentes. Altos valores de disección vertical (350 m/km^2), isobasitas de 2do (400, 600 m) y 3er (550 m) órdenes. Relieve de montañas pequeñas en cadenas diseccionadas.



MAPA MORFOTECTÓNICO DEL SECTOR SANTIAGO. Escala 1:25 000.

LEYENDA

Bloques

- Boniato
- Cobre
- Santiago
- Siboney

Isobacitas

- 100 Segundo orden
- 250 Tercer orden

Fallas principales

- 56 Falla normal Boniato
- 57 Falla normal Puerto Pelado
- 58 Falla normal Mar Verde
- 59 Falla normal San Juan

- Otras fallas
- Límites morfométricos
- Escarpe

Figura 49. Mapa morfotectónico del sector Santiago de Cuba a escala 1:25 000. Fuente: Autora.

Alta susceptibilidad a los desprendimientos de rocas en la Autopista Nacional de Santiago de Cuba-Palma Soriano (Rosabal, 2012; 2013) y licuefacción de suelos en el tramo del río Cobre, ubicado entre la presa Paradas y la bahía de Santiago de Cuba (Rosabal, 2014). La dirección del agrietamiento es hacia el norte-sur, alcanzando valores aproximados de hasta 90° (Rosabal, 2001).

Bloque Santiago. Se ubica al centro del sector. Limita al norte con la falla Mar Verde, de dirección SW-NE, y al este con la falla San Juan, de dirección NNE-SSW. Este bloque experimenta movimientos neotectónicos relativos de descenso, bajos valores de pendiente, disección vertical (50 m/km²), isobasitas de 2do (50 m) y 3er (50 m) órdenes (tabla 20). La dirección del agrietamiento es hacia el NE-SW (Rosabal, 2001). El relieve desarrollado es de llanuras; además, presenta suelos susceptibles a la licuefacción en los alrededores de las bahías de Santiago de Cuba y Cabañas y en las proximidades del río San Juan (Zapata, 1995; Rosabal, 2014).

Existe alta susceptibilidad a los deslizamientos en los repartos Altamira y Van Van, desprendimientos de rocas al este de la bahía de Santiago de Cuba y en la antigua cantera de la fábrica de cemento José Merceron (Rosabal, 2012; 2013; Rosabal *et al.*, 2013, 2014).

Bloque Siboney. Se ubica al este del sector y se encuentra limitado por la falla San Juan, de dirección NNE-SSW (Rosabal *et al.*, 2015a), y límites morfométricos. Relieve característico de montañas medias a bajas, presencia de terrazas fluviales en los ríos San Juan y Sardinero. Terrazas marinas escalonadas en la parte sur del sector. Se distingue el movimiento relativo de ascenso, la mayor amplitud se encuentra al este, con 1 010,7 m.

Tabla 20. Características geomorfológicas de los bloques morfotectónicos del sector Santiago de Cuba. Fuente: Autora

| Bloques | Red drenaje | Orden | Relieve | Isobasitas 2do orden (m) | Isobasitas 3er orden (m) | Pendientes | Licuefacción | Tipos de deslizamientos | Tendencia de movimientos relativos |
|-----------------|------------------------------------|-----------|-------------------|--------------------------|--------------------------|--|--|--|------------------------------------|
| Boniato | Paralela, subparalela y dendritica | 6to orden | Crestas Cuestas | 300- 400 | 300- 400 | De 30°-50° en la zona del escarpe. De 25°-45° al noroeste | Probable ocurrencia al noreste en el arroyo Santa Ana | Deslizamientos | Ascenso |
| Cobre | Paralela, subparalela y enrejada | 5to orden | Montañas pequeñas | 50-600 | 350 | Mayores de 40° al suroeste | Posible ocurrencia en la costa y probable en las proximidades del río Cobre | Desprendimientos de rocas | Ascenso |
| Santiago | Paralela y subparalela | 6to orden | Llanuras | 50 | 50 | De 0°-3° próximo a las bahías de Santiago de Cuba y Cabañas. Cercano a la costa los valores son 20°-40°. | Probable ocurrencia en los alrededores de las bahías y próximo al río San Juan | Deslizamientos y desprendimientos | Descenso |
| Siboney | Paralela, Subparalela | 7mo orden | Montañas bajas, | 50-800 | 50-700 | Oscilan entre 20°-50°, y hacia la costa son de 20°-40°. | Probable ocurrencia próximo al río Sardinero | Deslizamientos, desprendimientos y caídas de rocas | Ascenso |

Altos valores de disección vertical que indican alta influencia a deslizamientos (501-800 m/km²), isobasitas de 2do (400-800 m) y 3er (650-700 m) órdenes. Alta susceptibilidad a los deslizamientos, desprendimientos, caídas de rocas y licuefacción de suelos en las proximidades de los ríos San Juan y Sardinero (Rosabal, 2014); pueden aparecer las expansiones laterales en las terrazas fluviales. La dirección del agrietamiento es en dos direcciones, E-W y NE-SW (Rosabal, 2001).

En resumen, el mapa obtenido muestra la existencia de movimientos neotectónicos en ascenso y descenso relativo. Los primeros son zonas muy inestables debido a los movimientos neotectónicos y las condiciones geológicas y geomorfológicas, que favorecen los deslizamientos. Sin embargo, en los bloques con descenso relativo predominan las mayores áreas de susceptibilidad a la licuefacción por los valores de las pendientes, relieve, condiciones geomorfológicas específicas y geológicas.

3.4.7 Evaluación sismológica

El sector se ubica en una zona de alta actividad sísmica por su cercanía a la falla Oriente. Los últimos terremotos significativos sentidos fueron los sismos del 13 de octubre de 2003 y 20 de marzo de 2010 (Zapata y Chuy, 2011). La localidad de mayor perceptibilidad del primero fue la ciudad de Santiago de Cuba, con 5,5; el segundo fue de 6 grados MSK–EMS en playa Cazonal y Barrio Técnico. Del primer sismo en esta misma zona (ciudad de Santiago de Cuba) se reportaron intensidades (SSNC, 2017) cercanas a 6 y 6,5 grados, lo cual pudo deberse a las características propias de los suelos (Zapata y Chuy, 2011; Chuy *et al.*, 2015a).

Existen reportes de deslizamientos inducidos por sismos, como el terremoto de 1852 que produjo deslizamiento general de grandes rocas en la zona de la Sierra Maestra, cerca de la Gran Piedra; así como largas y anchas grietas en terrenos secos y húmedos (Chuy y Pino, 1982). En 1930, en Santiago de Cuba, un sismo con magnitud de 5,8 Richter causó grandes deslizamientos de en el puerto de Moya, en la formación de basalto columnar cerca de El Cobre, en Maffo, cerro de Las Cabras y El Corojo (Chuy y Pino, 1982).

Relacionado con la licuefacción de suelos existe un solo reporte, asociado con el sismo de 1932, en la zona de La Alameda (figura 50) cercana a la bahía de Santiago de Cuba (Chuy, 1999).

3.4.8 Peligros inducidos por la actividad sísmica

Al evaluar los factores condicionantes (tabla 10) se determinó: alta susceptibilidad a los deslizamientos; al norte, en forma de una franja que se extiende de oeste a este, el relieve es de montañas en cadenas, diseccionadas; limitadas por el escarpe de Boniato (tabla 21 y figura 51). Presencia de secuencias plegadas, espejos de fricción, desplazamientos de estratos y fallas. Litológicamente compuesta por rocas vulcanógenas y vulcanógenas sedimentarias del Grupo El Cobre. También este nivel de susceptibilidad existe al sureste, en las proximidades de los cauces de los ríos y en el asentamiento costero Aguadores.

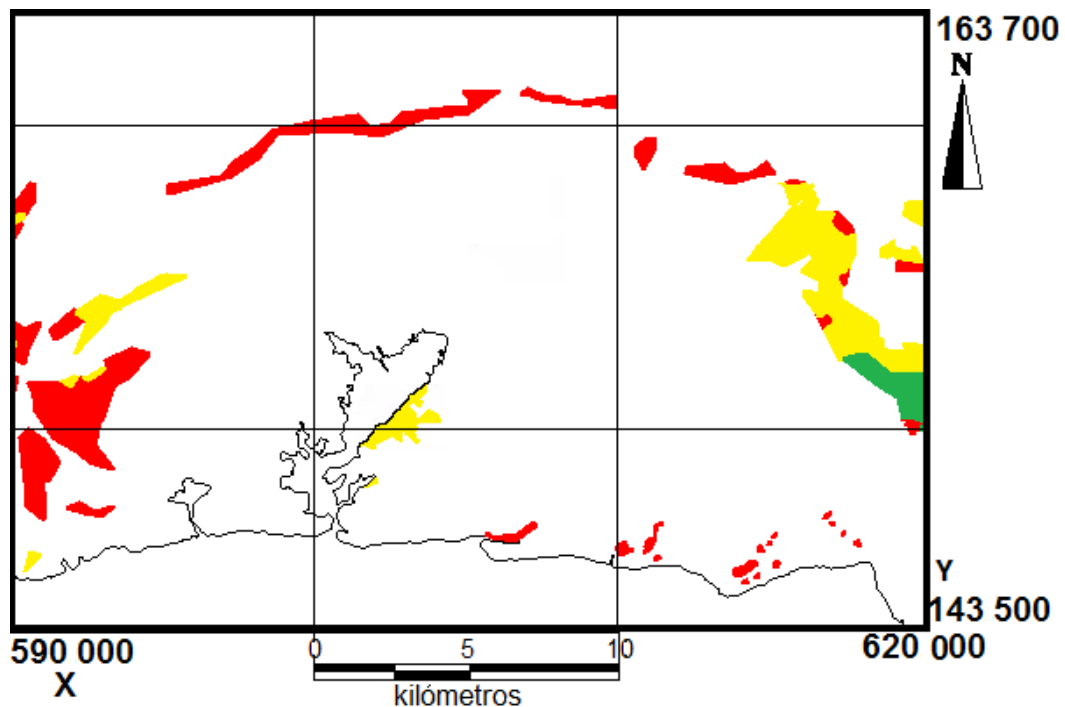
Moderada susceptibilidad a los deslizamientos al este de la bahía de Santiago de Cuba, donde aflora la formación la Cruz y en la que la acción antrópica ha jugado un papel importante al alterar el equilibrio natural de esta área; corroborada por el inventario de deslizamientos, que para este sector cuenta con el reporte de 14



Figura 50. Probable ocurrencia de licuefacción de suelo, en la zona de la Alameda (Avenida Jesús Menéndez), causada por el terremoto del 3 de febrero de 1932. Fuente: Chuy, 1999.

Tabla 21. Caracterización de la susceptibilidad a deslizamientos en el sector Santiago de Cuba. Fuente: Autora

| Categoría | Geomorfología | | | Hidrología (km/km ²) | Geología y Geotecnia | | | Resultados |
|-----------|-------------------|---|----------------|-------------------------------------|---|--|---|---|
| | Pendiente (°). | Disección vertical (m/km ²) | Relieve (m) | | Aspectos ingeniero- geológicos | Clasificación de las rocas | Litología | |
| Baja | 0-15 | 0-175 | 0-50 | 2,5-5 5-7,5 | Intemperismo | Rocas relativamente duras-semiduras. Roca débil granular. | Formación La Cruz | No deslizamientos |
| Moderada | 25-35 | 76-175 | 50-200 | 5-7,5 7,5-16 | Intemperismo | Rocas relativamente duras-semiduras. Roca débil granular. | Formación La Cruz | Meteorización, caída de bloques, y deslizamientos |
| Alta | > 35 | 176-500 | > 500 | 2,5-5 5-7,5 7,5-16 | Sinclinales, anticlinales, zona agrietada y agentes tectónicos | Rocas relativamente duras-semiduras. | Grupo El Cobre Formación La Cruz Formación Jaimanitas | Deslizamientos, desplomes de cavernas, caídas y desprendimientos de rocas |



ZONACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS. Escala 1:100 000.

LEYENDA

Niveles de susceptibilidad

- Alta**
- Moderada**
- Baja**

Figura 51. Zonación de la susceptibilidad a deslizamientos en el sector Santiago de Cuba. Escala 1:100 000. Fuente: Autora.

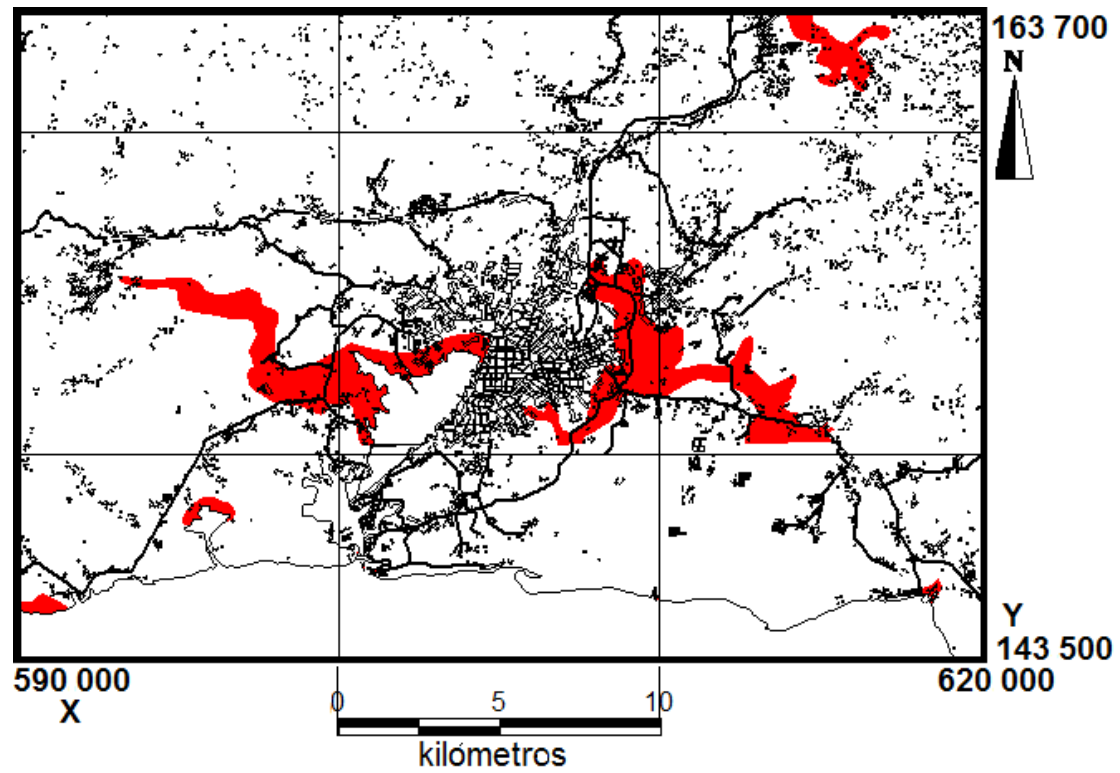
eventos; de ellos: 12 deslizamientos (en la Formación La Cruz) y 2 desprendimientos (en la Formación La Cruz y el Miembro Santiago).

Baja y muy baja susceptibilidad a los deslizamientos en la parte baja de la cuenca Santiago de Cuba, en las laderas, que no presentan ningún síntoma de que puedan ocurrir deslizamientos.

Las principales zonas sismogeneradoras que afectan al sector son Oriente, con 8 Richter, y Baconao, con 7 Richter (tabla 22). Pueden ocurrir fallos destructivos de taludes a las distancias epicentrales de 19 km (Baconao), 50,4 km (Oriente 1) y fallos de taludes a 119,8 km (Baconao), 281,2 km (Oriente 1) con mayor incidencia de los terremotos ubicados en la zona sismogeneradora Oriente.

Relacionado con la licuefacción, existe muy alta susceptibilidad a la licuefacción de suelos al oeste de la bahía de Santiago de Cuba, donde existen sedimentos aluviales y palustres, con nivel freático de 0-1 m (figura 52); asimismo, al norte de bahía de Cabañas, al SW y NE del sector, en las proximidades de los ríos Sardinero, San Juan y El Cobre (Rosabal, 2014), donde además es posible la manifestación de las expansiones laterales.

Durante la comprobación directa realizada (Rosabal y Oliva, 2012; Rosabal, 2012, 2013; Rosabal *et al.*, 2013, 2014) se corroboró la zonación propuesta de deslizamientos y se caracterizaron manifestaciones de caídas de rocas y desprendimientos en la Autopista Nacional Santiago–Palma Soriano, entre el km 10-12 (figura 53), y deslizamientos en la zona de Altamira, con gran incidencia del factor antrópico (figuras 54, 55 y 56).



LEYENDA

- Alta Susceptibilidad**
- Construcciones
- Carretera de 1er orden
- Carretera de 2do orden

Figura 52. Mapa de susceptibilidad a la licuefacción de suelos del sector Santiago de Cuba. Escala 1:100 000. Fuente: Autora.

Tabla 22. Máxima distancia epicentral de fallo destructivo de taludes (Clase 1) y máxima distancia epicentral de fallo de taludes (Clase 2). Fuente: Chuy *et al.*, 1997; TC-4, 1999

| Zonas Sismogeneradoras | Ms (Richter) | Clase 1 (km) | Clase 2 (km) |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Baconao | 7 | 19 | 119,8 |
| Oriente 1 | 8 | 50,4 | 281,2 |

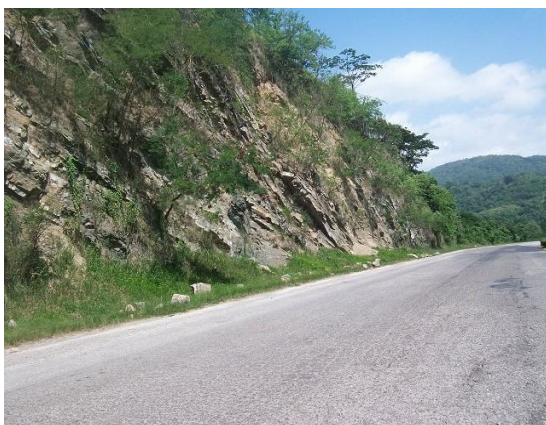


Figura 53. Desprendimiento de rocas en la autopista nacional en el tramo Santiago de Cuba-Palma Soriano. Foto tomada por la autora.



Figura 54. Vivienda ubicada en el pie del talud con pared casi vertical entre calle 10 y calle 14. Consejo Popular Altamira. Santiago de Cuba. Foto tomada por la autora.



Figura 55. Desprendimiento del material del talud, por excavaciones o banqueos para la ampliación de las viviendas. Foto tomada por la autora



Figura 56. Calle 12 de Altamira. Santiago de Cuba. Foto tomada por la autora

En todo el margen este de la bahía de Santiago de Cuba existen desprendimientos de calizas de diferentes diámetros, (figuras 57 y 58) en un talud de 85°-90° aproximadamente (Rosabal *et al.*, 2013, 2014).

En la antigua cantera de la fábrica de cemento José Mercerón se observó erosión y desprendimientos de rocas en la base del talud. Deslizamientos en las proximidades del motel Bella Vista, a un 1 km sobre la carretera turística, en un talud con altura de 5 m y 45° de inclinación aproximadamente. En calle 3ra de Van Van, esq. 2da, ocurrencia de un deslizamiento en mayo (Rosabal *et al.*, 2014).

Deslizamiento ubicado en calle 1ra, esq 2da, de Van Van; aparecen calizas agrietadas en la parte superior, el contacto con margas meteorizadas y presencia de descalce con desprendimientos de rocas (calizas). Deslizamiento en calle 11 entre Ave. Mármol y calle 7, talud ubicado en calle 11 con altura de 5-7 m, ángulo de inclinación de 70°-75°, largo de 50-60 m aproximadamente.

En la localidad de Aguadores se observaron caídas y desprendimiento de rocas, con indicios recientes (Rosabal *et al.*, 2015) sobre la vegetación (figura 59), suelos, surcos, bloques individuales y coloración de la roca. En imágenes satelitales se muestran las caídas de rocas (figuras 60 y 61).

3.5. Evaluación de los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos, inducidos por la actividad sísmica, en el sector Guantánamo

En el sector Guantánamo, al igual que en los otros dos sectores de estudio, se evalúan los peligros inducidos por la actividad sísmica.

3.5.1 Caracterización geológica

Desde el punto de vista geológico el sector Guantánamo está compuesto por formaciones geológicas del arco volcánico Albiense-Campaniense hasta el



Figura 57. Desprendimiento de roca al este de la bahía de Santiago de Cuba.
Foto tomada por la autora

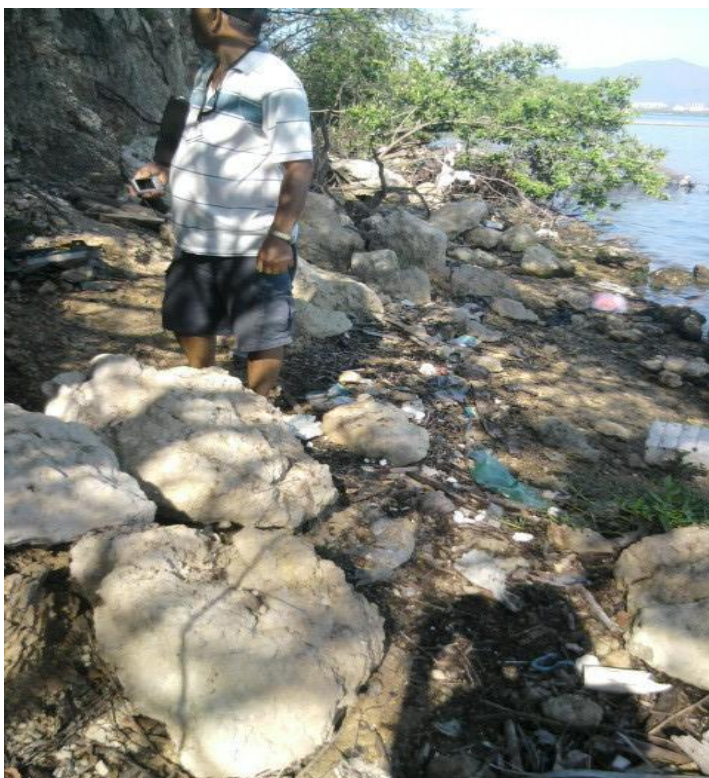


Figura 58. Rocas desprendidas en la costa este de la bahía de Santiago de Cuba.
Foto tomada por la autora



Figura 59. Proceso de la caída de un bloque de roca en las cercanías del asentamiento costero de Aguadores, sector Santiago de Cuba. Foto en sucesión cortesía de Ing. Ricardo Oliva Álvarez.

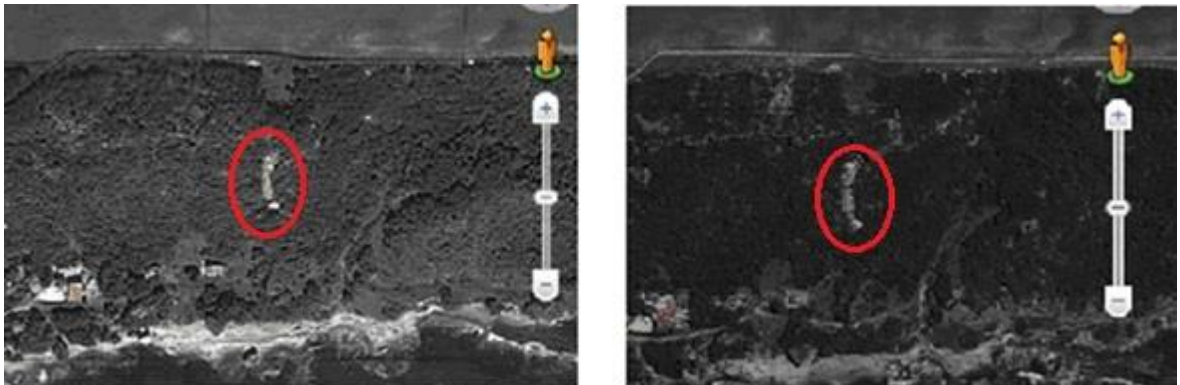


Figura 60 y 61. Imágenes que muestran el proceso de la caída de roca. Tomadas de google earth, en diferentes fechas. Cortesía de Ing. Ricardo Oliva Álvarez.

Holoceno. Solo se describen de forma resumida las formaciones que no han sido descritas con anterioridad.

Formación Santo Domingo (sd). Su litología diagnosticada es tobas y lavobrechas andesíticas, dacíticas, tufitas, argilitas, aleurolitas vulcanomícticas, lavas basálticas, liparitodacíticas, conglomerados y calizas. También aparecen pequeños cuerpos de pórfidos dioríticos, andesitas y diabasas. Edad: Cretácico Inferior (Aptiano)-Cretácico Superior (Turoniano) (Colectivo de autores, 2013).

Formación Sabaneta (sn). Está compuesta por tobas vitroclásticas, litovitroclásticas, cristalovitroclásticas con intercalaciones de tufitas calcáreas, areniscas tobáceas, calizas, conglomerados tobáceos, aleurolitas, margas, gravelitas, conglomerados vulcanomícticos y ocasionalmente pequeños cuerpos de basaltos, andesitas, andesito-basaltos y andesito-dacitas. Edad: Paleoceno Inferior (Daniano parte alta)-Eoceno Medio (Colectivo de autores, 2013).

Formación Gran Tierra (gt). Está constituida por calizas brechosas, conglomerados vulcanomícticos, brechas, margas, tobas, calizas órgano-detríticas, areniscas vulcanomícticas de cemento calcáreo, aleurolitas y tufitas. Edad: Paleoceno Inferior (Daniano) (Colectivo de autores, 2013).

Formación San Luis (sl). Su litología diagnosticada es areniscas polimícticas, aleurolitas, margas, arcillas calizas arcillosas, organodetríticas, arenosas y conglomerados polimícticos. Edad: Eoceno Medio parte alta-Eoceno Superior.

Formación Camarones (cm). Está constituida por conglomerados polimícticos y areniscas polimícticas de grano grueso. Edad: Eoceno Superior.

Formación Maquey (mq). Su litología diagnosticada es alternancia de areniscas, aleurolitas y arcillas calcáreas y margas, con intercalaciones de calizas

biodetríticas, calizas arenáceas y calizas gravelíticas. Edad: Oligoceno Inferior-Mioceno Inferior parte baja (Colectivo de autores, 2013).

Formación Yateras (yt). Constituida por alternancia de calizas biodetríticas y detríticas, y calizas biógenas. Edad: Oligoceno Inferior-Mioceno Inferior parte baja (Colectivo de autores, 2013).

Formación Jamaica (jmc). Está compuesta por conglomerados polimícticos de matriz margosa, con clastos que corresponden a calizas, metavulcanitas, silicitas y ultramafitas. Edad: Plio-Pleistoceno (Colectivo de autores, 2013).

En las tablas 11 y 12 se muestran los aspectos ingeniero-geológicos de las rocas y formaciones geológicas presentes en los sectores, así como las formaciones más susceptibles a los deslizamientos. Los sedimentos aluviales y los depósitos palustres susceptibles son los a licuefacción.

3.5.2 Factores antrópicos

En el noreste del sector el relieve fue antropizado con el trazado y la construcción de la carretera, ya que se cortó la ladera; por consiguiente, se rompieron las condiciones de equilibrio existente, las condiciones del drenaje natural formada por los procesos denudativos de erosión. Bajo esas nuevas condiciones pueden incrementarse los movimientos gravitacionales e incluso reactivarse antiguos deslizamientos (Rosabal *et al.*, 2009).

3.5.3 Caracterización morfotectónica

Se realiza la caracterización morfotectónica del sector Guantánamo, con la aplicación de métodos morfométricos, análisis geomorfológico y reevaluación de estructuras tectónicas límites de bloques morfotectónicos, tal como se muestra a continuación:

3.5.4 Definición de estructuras tectónicas

Se aplican los métodos morfométricos en el sector de estudio, como se muestra a continuación:

La red del drenaje. Se caracteriza por ser paralela y subparalela en casi todo el sector. La orientación de los ríos es NS, NW-SE. El drenaje radial se localiza al NW en las colinas y al SW en la sierra de la Gran Piedra (figura 62).

Jerarquización de la red. Se identifica el séptimo orden como mayor índice de los ríos del sector, que caracteriza el último tramo del río Guantánamo, ubicado al NW-SE (figura 63).

Densidad de la red hidrográfica. Se obtienen altos valores de densidad en casi todo el sector, excepto en algunas áreas al oeste de la bahía de Guantánamo, donde la litología presente son sedimentos aluviales, palustres y Formación San Luis. Al norte, en forma de parches, donde aparecen las formaciones Maquey y San Luis; y al NW, donde aflora la Formación Charco Redondo (figura 64).

Nivel base de erosión (isobasitas) de segundo orden. Se observan veinte cierres positivos máximos y zonas de inflexión de isobasitas con dirección NNE y NW-SE, que se asocian con posibles estructuras tectónicas (figura 65).

Nivel base de erosión (isobasitas) de tercer orden. Se obtienen doce cierres positivos máximos e inflexiones negativas con dirección NW-SE y NNE por la presencia de fallas (figura 66).

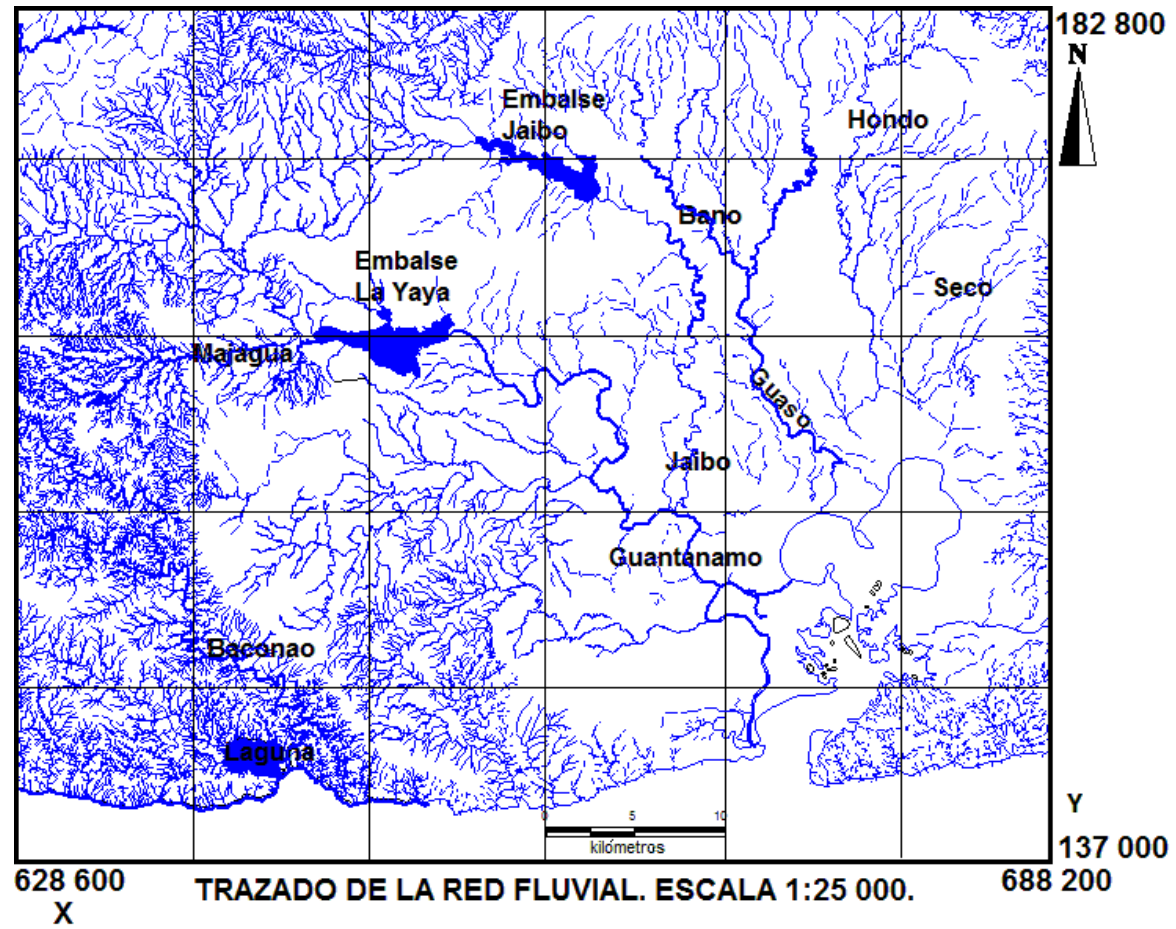
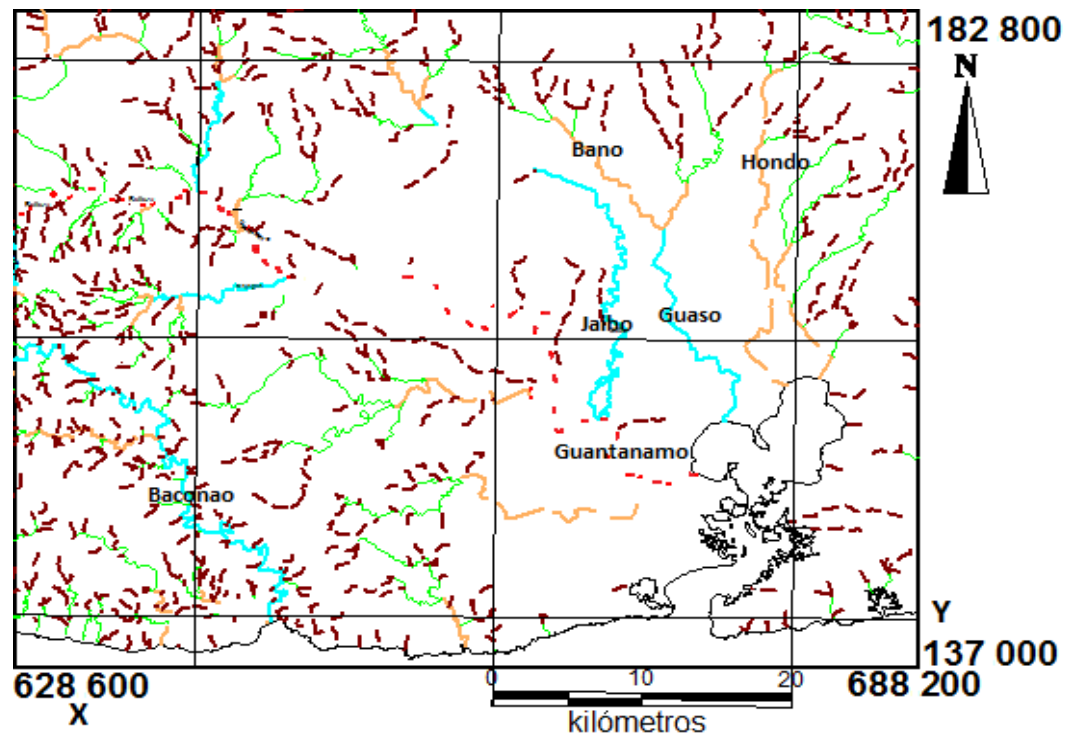


Figura 62. Trazado de la red fluvial del sector Guantánamo. Escala 1:25 000. Fuente: Autora.



JERARQUIZACIÓN DE LA RED DEL DRENAJE. ESCALA 1:25 000

LEYENDA

ORDENES

| | | | |
|---|-----|---|-----|
| (| 3er | (| 6to |
| (| 4to | (| 7mo |
| (| 5to | | |

Figura 63. Jerarquización de la red del drenaje del sector Guantánamo. Escala 1:25 000. Fuente: Autora.

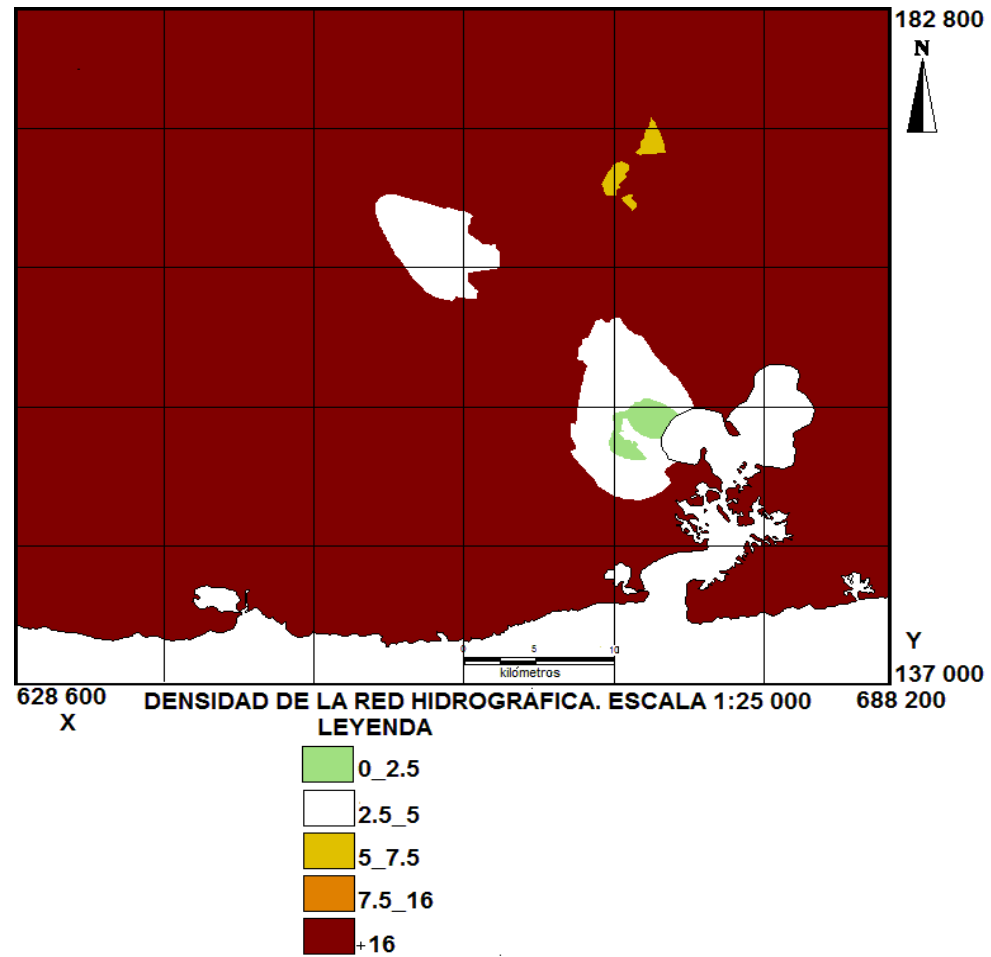


Figura 64. Densidad de la red hidrográfica del sector Guantánamo, expresada en km/km^2 . Escala 1:25 000. Fuente: Autora.

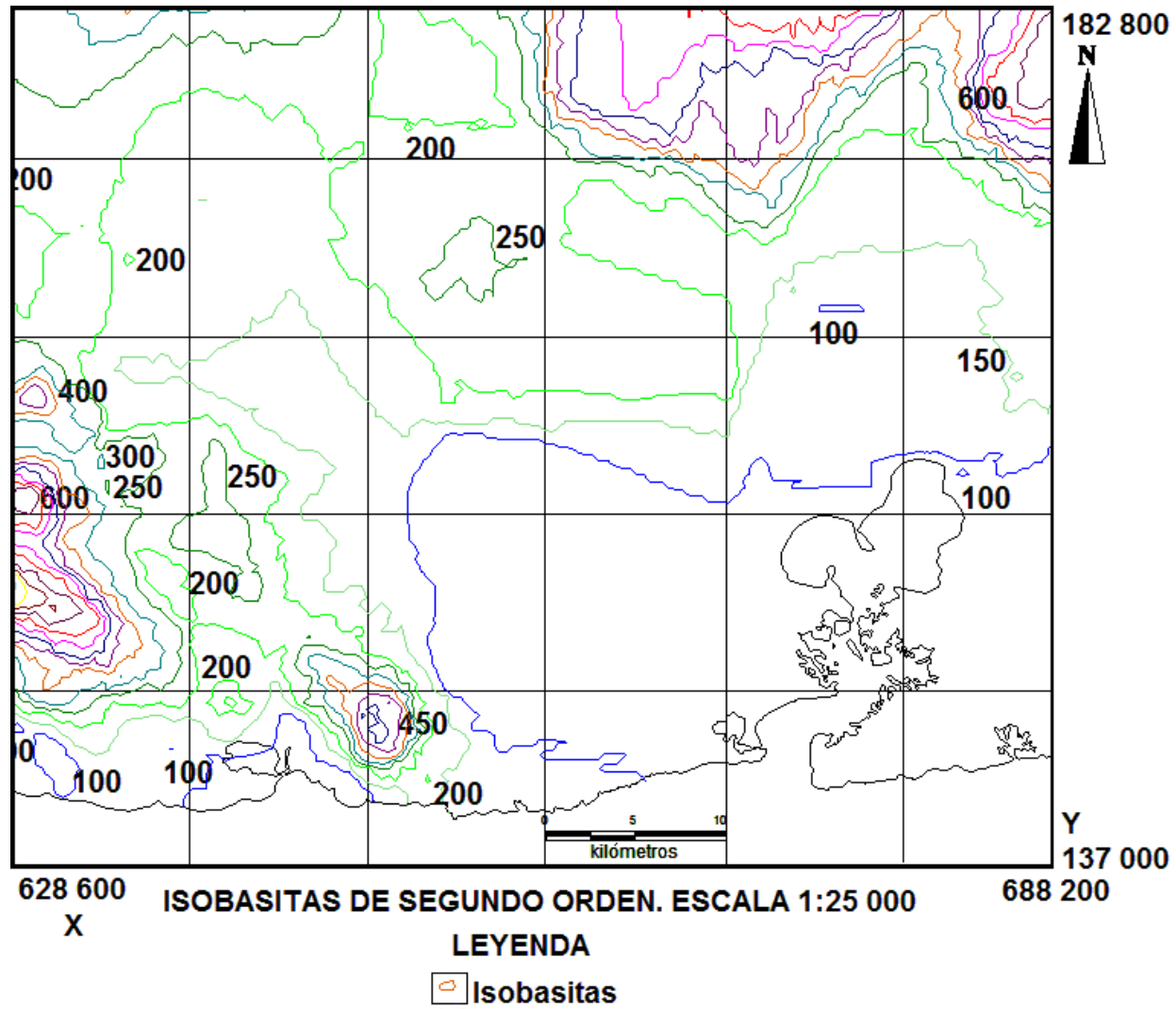


Figura 65. Nivel base de erosión (isobasitas) de segundo orden del sector Guantánamo. Escala 1:25 000. Fuente: Autora.

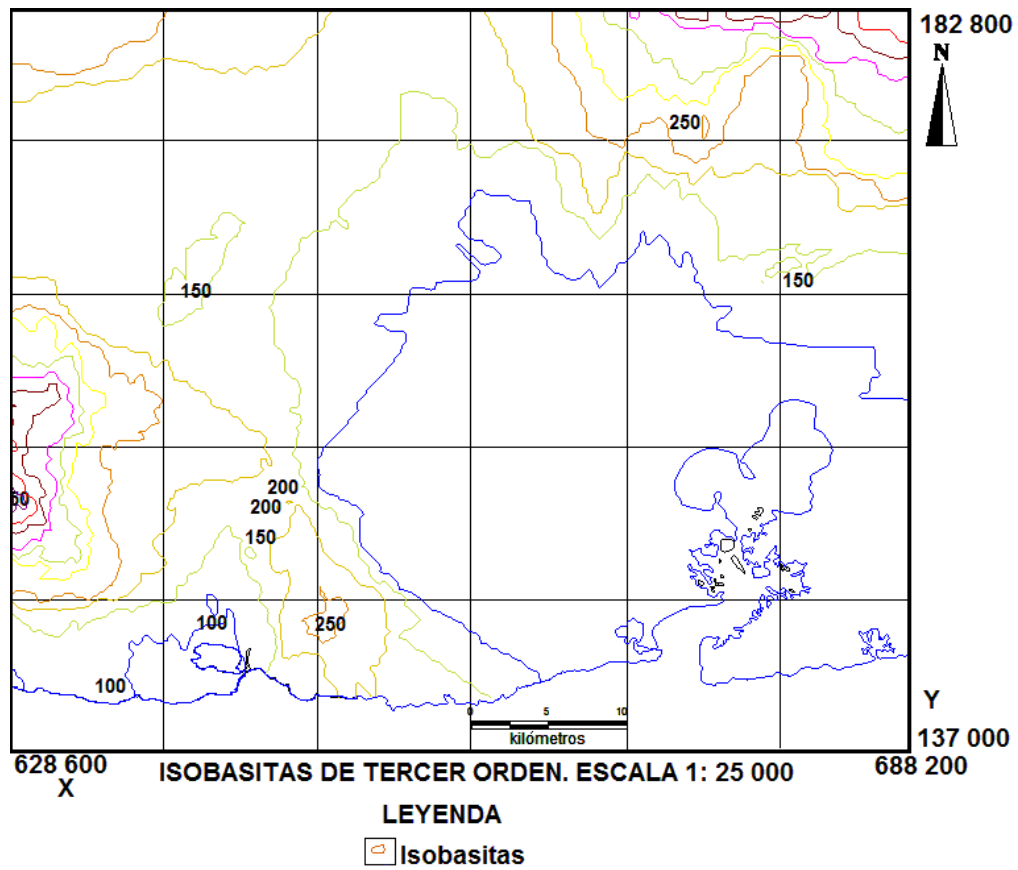


Figura 66. Nivel base de erosión (isobasitas) de tercer orden del sector Guantánamo. Escala 1:25 000. Fuente: Autora.

Pendientes. Mayores de 40°, se distribuyen al SW en la sierra de la Gran Piedra, la meseta de Santa María del Loreto, El Tibet y en sectores pequeños de las colinas montañosas. Los valores de este parámetro oscilan entre 30° y 60° al este, en el escarpe y las alturas. Hacia la costa, los cursos fluviales, la laguna de Baconao y la bahía Guantánamo fluctúan entre 0° y 10° (figura 67).

Disección vertical. Los máximos valores se ubican al oeste del sector con 176-300 y 301-500 m/km² (figura 68), lo cual indica actividad neotectónica de ascenso y susceptibilidad a los deslizamientos (Mora & Vahrson, 1993).

Alineaciones tectónicas. Se describen las principales fallas detectadas por morfometría (figura 69). En estudios precedentes se caracterizaron algunas de ellas, tales como: Baconao (Nagy *et al.*, 1976; Pérez y García, 1997; Magaz *et al.*, 1998), Mal Paso, Guantánamo y La Yaya (Hernández *et al.*, 1991); nombradas de esta forma en la actual investigación.

A continuación, se exponen los criterios geomorfológicos que permitieron identificar y confirmar las estructuras del área (tabla 23).

- Baconao. Se le asigna dirección NW-SE. Se observan algunos tramos rectos del río Baconao, alineación de arroyos con dirección NE y SW; hacia esta última zona se encuentra la mayor cantidad de afluentes. Contacto brusco lineal entre dos formaciones (depósitos aluviales y la Formación Puerto Boniato), alteración de valores morfométricos. Presencia de un escarpe y alineación en costa. El río Baconao posee control tectónico en algunos tramos (fallas de plumillas).
- Maquey. Dirección N-S. Se observan pendientes mayores de 30° en contacto con las de bajos valores. Alineación brusca de norte a sur del relieve.

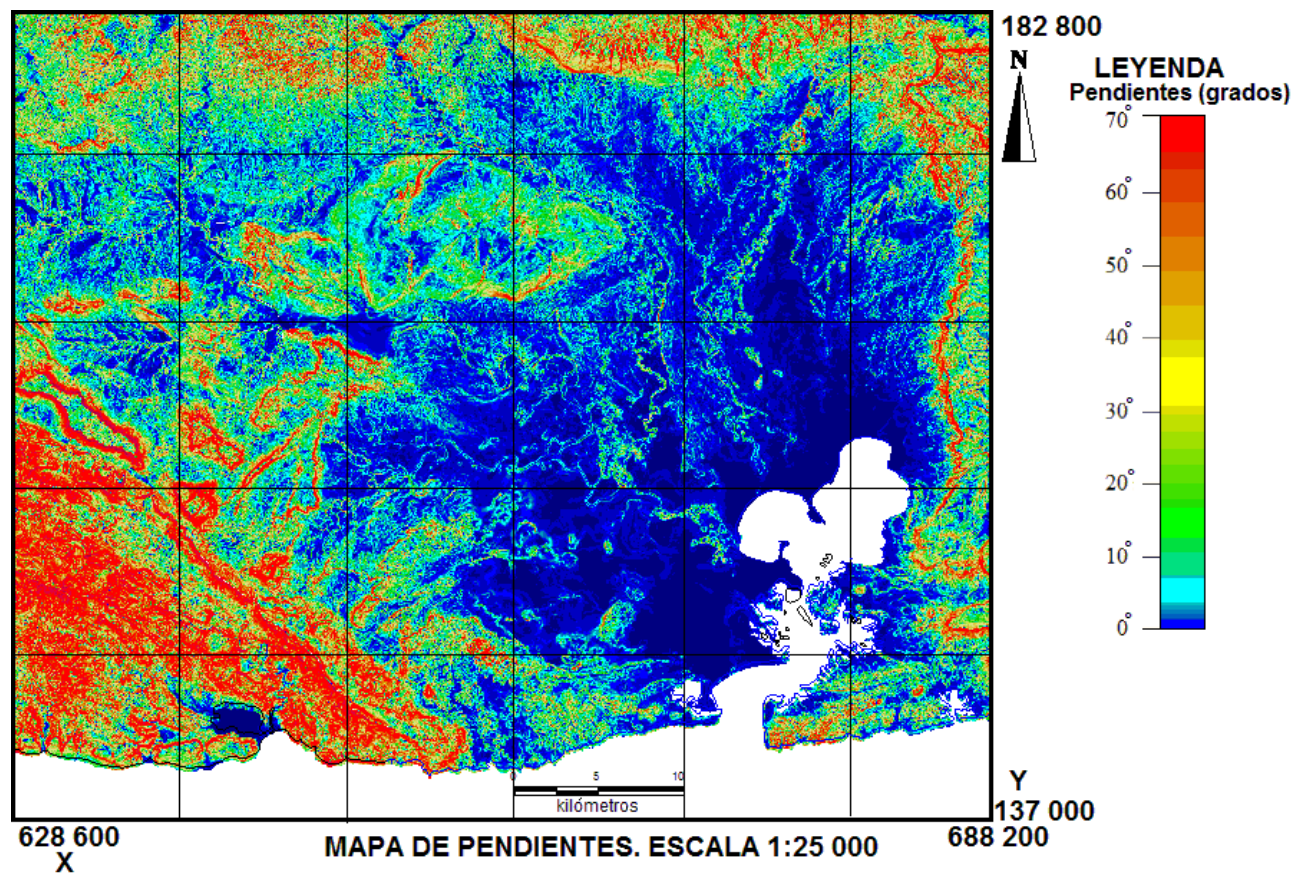


Figura 67. Mapa de pendientes del sector Guantánamo. Escala 1: 25 000. Fuente: Autora.

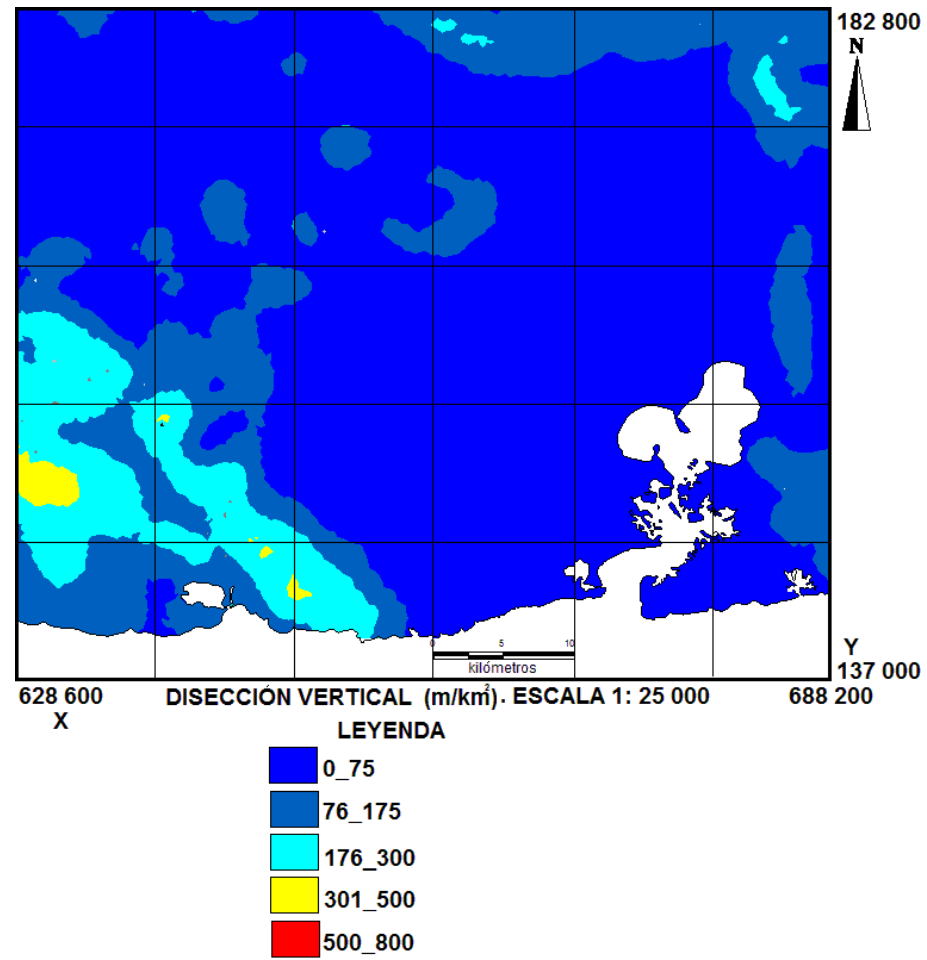


Figura 68. Mapa de disección vertical del sector Guantánamo. Escala 1:25 000. Fuente: Autora.

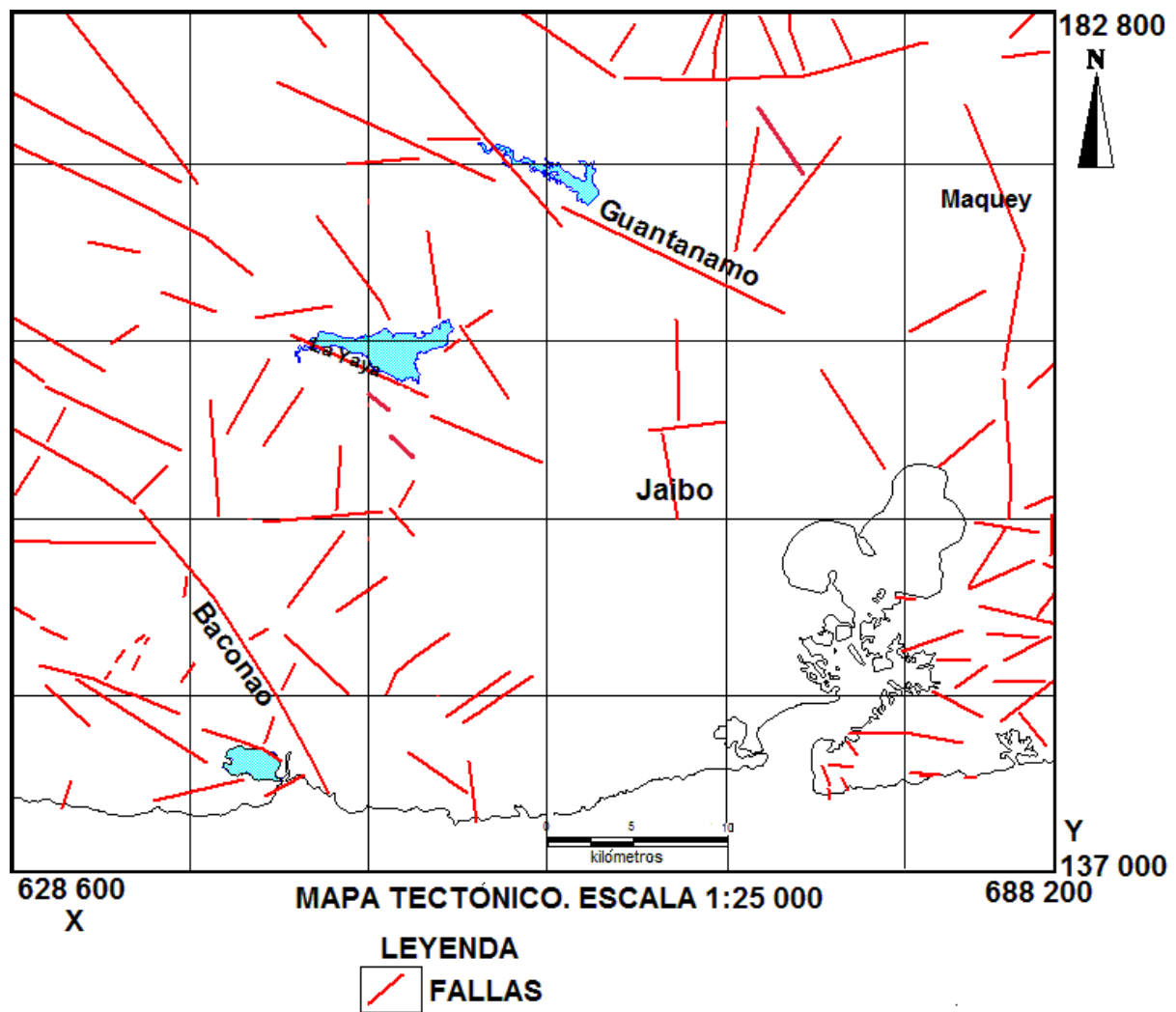


Figura 69. Mapa tectónico del sector Guantánamo. Escala 1:25 000. Fuente: Autora.

Tabla 23. Criterios de identificación de fallas y fallamiento activo en el sector Guantánamo

| Criterios de identificación de fallas | | | | | | | | | Criterios de identificación de fallamiento activo | |
|---------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|--------------------------------|---|-------------------------------------|------------------------------|--|-------------------------------|---|-------------------|
| Estructuras | Tramos rectos de ríos y arroyos | Anomalías gravimétricas | Alineación de cursos fluviales | Contacto brusco lineales entre dos materiales distintos | Alteración de valores morfométricos | Campo magnetométrico anómalo | Cambios del nivel del campo radiométrico | Alineación brusca del relieve | Formación de escarpes rectilíneos con pendientes mayores a 30° en contacto con zonas de pendientes suaves | Actividad sísmica |
| Baconao | XX* | X* | x | XX | XX | x | x | | | x |
| Maquey | | | | | | | | XX | XX | |
| La Higuera | | | | XX | | | | XX | | |
| La Güira | | | | XX | | | | | | |
| Jaibo | xx | | | | | | | | | |
| La Yaya | | | | | | | | XX | XX | |
| Mal Paso | | | xx | | | | | XX | | |

Nota: en la tabla 23 las XX* establecen la descripción propia de la investigación y la X* significa la descripción por otros autores.

- La Higuera. Alineación de pendientes. Dirección NE-SW. Contacto brusco lineal entre dos formaciones (San Luis y Camarones).
- Jaibo. Tramos rectos del río Jaibo. Dirección N-S.
- Guantánamo. Inflexión de las isobasitas de segundo y tercer órdenes. Se recomienda emplear otros métodos que validen su existencia; esta estructura atraviesa la ciudad de Guantánamo y fue cartografiada en trabajos anteriores (Hernández *et al.*, 1991). Dirección NW-SE.
- La Yaya. Formación de un escarpe rectilíneo, con pendientes mayores de 30° en contacto con las de bajos grados. Inflexión de isobasitas de tercer orden. Fue cartografiada en investigaciones precedentes (Hernández *et al.*, 1991). Dirección NW-SE. Se ubica muy próxima al embalse La Yaya, del cual toma su nombre. Se recomienda emplear otros métodos que validen su existencia.
- Mal Paso. Se ubica al norte con dirección este oeste. Se manifiesta a través de los criterios alineación del relieve, ríos y arroyos que corren en dirección N-S; fue cartografiada en trabajos preliminares (Hernández *et al.*, 1991).

Diversos investigadores definieron la estructura Baconao como activa (Cotilla *et al.*, 1996; Pérez y García, 1997), con segmentos (Cotilla *et al.*, 2007; Arango 2014) y secciones (Magaz *et al.*, 1998); zona sismogénica (Chuy *et al.*, 1997) asociada a terremotos (Cotilla & Córdoba, 2010) históricos (5 de marzo de 1927 con I=6 MSK) y perceptibles (Chuy, 1999), con I=4 MSK (23.10.1984, 01.09.1985, 07.01.1986 y 07.07.1987); existencia de deformaciones en casi toda su extensión, observadas por técnicas de alta precisión (Arango, 2014); además, descrita como falla normal (Nagy *et al.*, 1976; Iturralde–Vincent, 1998).

3.5.5 Realización del análisis geomorfológico

Según los criterios de Moreno *et al.* (2017), están presentes tres categorías básicas del relieve: montañas, alturas y llanuras. Esta última incluye los alrededores de la laguna de Baconao, las cercanías del litoral, los cursos fluviales y el valle de Guantánamo.

Las montañas bajas a medias se sitúan al SW y las máximas elevaciones presentes son La Gran Piedra y Pico Mogote (1 000 m), un relieve de montañas pequeñas con más de 600 m representado por Santa María del Loreto, al oeste, en la localidad de Las Yaguas.

Zona de montañas pequeñas a bajas (colinas montañosas) con altitudes entre 500 y 1000 m, ubicada al SW y NW, en forma de una franja estrecha próxima al Tibet y el Ramón. Al este un escarpe alineado de norte a sur, con pendientes mayores de 40° en contacto con las de bajos ángulos (0°-10°); al sur, cercano a la bahía de Guantánamo, este tipo de relieve separa las formaciones San Luis y Maquey. Las alturas grandes como La Plata, Los Malones y Las Guasitas, con 300 m de altitud, se localizan al SE (figura 70).

El análisis geomorfológico realizado a las estructuras Maquey y La Yaya muestra evidencias de fallamiento activo (tabla 23). La falla Baconao presenta un escarpe de falla, reflejado en el análisis del relieve; así como los otros elementos descritos con anterioridad. Esta falla se ubica dentro de la zona sismogeneradora de igual nombre y tiene un ancho irregular de 10 km (Cotilla, 1993; Cotilla y Álvarez, 1998), según este criterio y la precisión de los datos sismológicos es posible que terremotos de baja energía se ubiquen dentro de esta franja. En la tabla 24 se presentan fallas activas y/o zonas sismogeneradoras de los sectores de estudio.

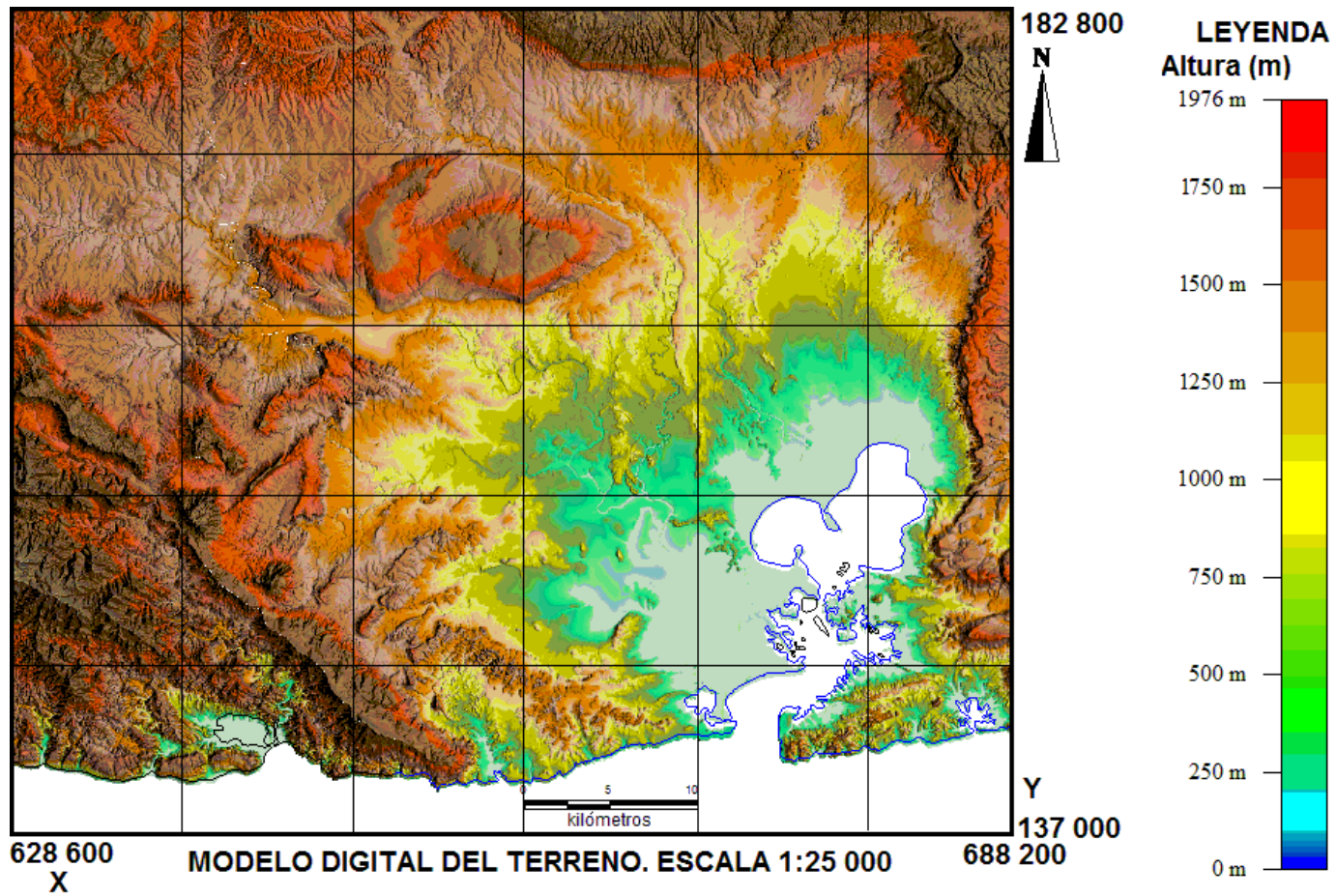


Figura 70. Modelo Digital del Terreno del sector Guantánamo. Escala 1: 25 000.

Tabla 24. Resumen de las fallas activas y/o zonas sismogeneradoras propuestas por investigaciones precedentes para los tres sectores de estudio. Fuente: Autora

| Fallas Activas y/o Zonas Sismogeneradoras | Investigaciones precedentes realizadas para los tres sectores de estudio | | | | | | | |
|---|--|--------------|--------------------|-------------------|----------------------|----------------------|-------------|---------------------------------------|
| | Babaev et al., 1989 | Arango, 1996 | Magaz et al., 1998 | Chuy et al., 1997 | Pérez y García, 1997 | Cotilla et al., 2007 | Arango 2014 | Resultados de la actual investigación |
| Boniato | - | - | SF* | - | FA | - | - | SF |
| Alineamiento Manati-San German-Baconao/ Baconao | FA* | - | FSc* | ZS* | FA | FSeg* | FSeg | CFA-FSc* |
| Jibacoa | - | - | - | - | FA | - | - | SF |
| Turquino | - | - | - | - | FA | - | - | SF |
| Vega Grande | - | - | - | - | FA | - | - | F |
| Bayamita/Bayamo | - | - | - | ZS | FA | - | - | SF |
| Guamá Abajo | - | - | - | - | - | - | - | F |
| La Fortuna | - | - | - | - | - | - | - | F |
| El muerto | - | - | - | - | - | - | - | F |
| Uvero | - | - | - | - | - | - | - | F |
| Babujal | - | - | - | - | - | - | - | F |
| Peladero | - | - | - | - | - | - | - | F |
| Mar Verde | - | FA | - | - | - | - | - | SF |
| San Juan | - | - | - | - | - | - | - | SF |
| Puerto Pelado | - | - | - | - | - | - | - | SF |
| Santiago | - | FA | - | - | - | - | - | CFA |
| Universidad | - | FA | - | - | - | - | - | F* |
| Maquey | - | - | - | - | - | - | - | SF |
| La Yaya | - | - | - | - | - | - | - | SF |
| Mal Paso | - | - | - | - | - | - | - | F |

Nota: en la tabla 24 se representa con FA*: Falla Activa; F*: Falla; ZS*: Zona Sismogeneradora; CFA*: Criterios de Falla Activa; SF*: Simple Falla; FSc*: Falla con Secciones; FSeg*: Falla Segmentada

3.5.6 Revaluación de estructuras tectónicas regionales o límites de bloques morfortectónicos

Al aplicar el método de Haller *et al.* (1993), se detecta que no existen trincheras paleosísmicas sobre cada uno de los segmentos o sobre una parte de ellos, control estratigráfico del tiempo de fallamiento, sentido y magnitud del movimiento; por lo que los segmentos propuestos (Cotilla *et al.*, 2007 y Arango 2014) aquí son considerados como secciones y se confirman los criterios de Magaz *et al.* (1998) (tabla 25). Las fallas La Yaya y Maquey se clasifican como simple falla por insuficiente información (Rosabal *et al.*, 2016b).

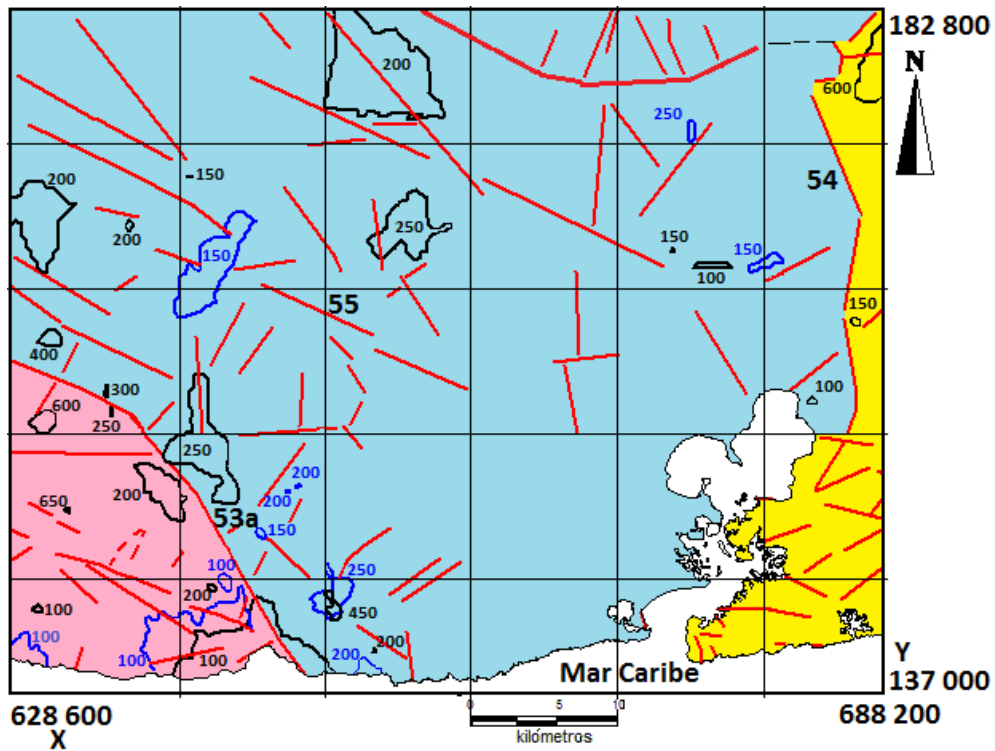
A partir del análisis realizado por Pérez *et al.* (1994) del agrietamiento fotointerpretado en la Sierra Maestra se toman las direcciones principales de las grietas de cada bloque morfortectónico.

Bloques morfortectónicos del sector Guantánamo

Para el sector Guantánamo se establecen tres bloques morfortectónicos: Siboney, Guantánamo y Maquey (figura 71).

A continuación, se realiza una breve caracterización de cada uno de ellos.

Bloque Siboney. Se ubica al oeste del sector en la sierra de la Gran Piedra, limitado por la falla Baconao, con dirección NW-SE. El relieve característico es de montañas bajas a medias. Posee altos valores de pendientes, disección vertical, isobasitas de segundo y tercer órdenes (tabla 26). Refleja los mayores movimientos neotectónicos de ascenso (Rosabal *et al.*, 2016b). Predominan rocas del arco volcánico del Paleógeno (Grupo El Cobre), dioritas cuarcíferas, gabros y basaltos. La dirección del agrietamiento es en dos direcciones: E-W y NE-SW.



MAPA MORFOTECTÓNICO DEL SECTOR GUANTÁNAMO. Escala 1:25 000.

LEYENDA








| | | | |
|--|---|---------------------------|---|
| Bloques | Isobacitas | Fallas principales | |
|  Siboney |  Segundo orden | 53a Falla normal Baconao |  Otras fallas |
|  Guantánamo |  Tercer orden | 54 Falla normal Maquey |  Límites morfométricos |
|  Maquey | | 55 Falla normal La Yaya | |

Figura 71. Mapa morfotectónico del sector Guantánamo. Escala 1:25 000. Fuente: Autora.

Tabla 25. Resultados de la evaluación de las principales fallas por el método de Haller et al., 1993 en el sector Guantánamo. Fuente: Autora

| Nombre de la estructura o Nombre de la sección | Baconao | Maquey | La Yaya |
|--|---|---|---|
| Número de la estructura o Número de sección | 53a y referida como falla 07 (Magaz <i>et al.</i> , 1998) | 54 | 55 |
| Clasificación | Falla con secciones | Simple Falla | Simple Falla |
| Comentario | Ubicación a lo largo del río Baconao hasta cerca de El Cristo | Ubicación de norte a sur al este de la bahía de Guantánamo | Se sitúa al sur del embalse La Yaya |
| Autor | Nagy <i>et al.</i> , 1976; Pérez, 1989; Pérez y García, 1997 | Hernández <i>et al.</i> , 1991 | Hernández <i>et al.</i> , 1991 |
| Fecha de compilación | (10/ 31/1995) | (-/-/2014) | (-/-/2014) |
| Compilador y afiliación | Hernández, J.R; Instituto de Geografía Tropical. CITMA. (Magaz <i>et al.</i> , 1998) | Rosabal, S; CENAI | Rosabal, S; CENAI |
| Provincia | Santiago de Cuba | Santiago de Cuba | Santiago de Cuba |
| País | Cuba | Cuba | Cuba |
| Fidelidad de localización | Buena | Buena | Buena |
| Comentario | Localización basada en el mapa a escala 1:50 000 (Pérez <i>et al.</i> , 1994); Mapa de alineamientos, a escala 1: 2000 000 (Pérez, 1989) y expresión en fotos aéreas e imágenes espaciales. | Localización de la falla basada en el mapa, a escala 1:25 000 (Hernández <i>et al.</i> , 1991). | Localización de la falla basada en el mapa, a escala 1:25 000 (Hernández <i>et al.</i> , 1991). |
| Situación geológica | Separa las rocas carbonatadas de la Formación Puerto Boniato de las formaciones San Luís y Camarones | Al sur de la bahía de Guantánamo separa la formación San Luis de Maquey | Separa las formaciones San Luis y Camarones |
| Sentido de movimiento | Normal | Normal | Normal |
| Comentario | Pérez y García, 1997 | Actual investigación | Actual investigación |
| Expresión geomorfológica | Gran escalón en el relieve y alineación del río | Alineación brusca del relieve de norte a sur. Contacto de pendientes $\geq 30^\circ$ con las de bajos ángulos | Escarpe rectilíneo con pendientes $\geq 30^\circ$ en contacto con las de bajos grados |
| Azimut | desconocido | desconocido | desconocido |
| Desplazamiento | desconocido | desconocido | desconocido |
| Orientación | dirección NO-SE | dirección N-S | dirección NO-SE |
| Longitud: | 37,39 km en el sector | 28,60 km en el sector | 8,70 km en el sector |
| X: | X: 647500-621400 | X: 683400-683000 | X: 645100-653000 |
| Y: | Y: 138900-164000 | Y:150600-177400 | Y: 164000-161100 |
| Escala del mapa | 1:25 000 | 1:25 000 | 1:25 000 |
| Proyección | Proyección cónica conforme de Lambert | Proyección cónica conforme de Lambert | Proyección cónica conforme de Lambert |
| Edad | Eoceno Medio | Mioceno Inferior | Eoceno Superior |
| Tipo de línea | sólida | sólida | sólida |

Tabla 26. Características geomorfológicas de los bloques morfotectónicos del sector Guantánamo. Fuente: Autora

| Bloques | Red drenaje | Orden | Relieve | Isobasitas 2do orden (m) | Isobasitas 3er orden (m) | Pendientes | Licuefacción | Tipo de deslizamientos | Tendencia de movimientos relativos |
|--------------------------|---|-----------|--|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------|--|------------------------------------|------------------------------------|
| Siboney (parte oriental) | Paralela, Subparalela y muy densa | 6to orden | Montañas bajas | 100- 950 | 100 | > 40° | Probable ocurrencia en tramos y desembocadura del río Baconao y en los alrededores de la laguna homónima | Deslizamientos | Ascenso |
| Guantánamo | Radial en las colinas. Paralelo y subparalelo | 7mo orden | Llanuras, alturas y colinas montañosas | 200-450 | 150- 250 | De 2° a >40° de forma muy puntual | Probable ocurrencia en los ríos Guaso, Jaibo y Guantánamo, así como en los alrededores de la bahía | Caídas de rocas y desprendimientos | Descenso |
| Maquey | Paralelo y subparalelo | 4to orden | Alturas | 150- 650 | - | > 40° | Probable ocurrencia en un tramo del río Yateras | Deslizamientos rotacional | Ascenso |

Este bloque tiene condiciones geológicas, geomorfológicas para el desarrollo de deslizamientos (Rosabal, 2013). Las rocas se encuentran muy intemperizadas y agrietadas, en estas zonas pueden ocurrir deslizamientos. Los sedimentos aluviales de edad Holoceno, ubicados en tramos y desembocadura del río Baconao y en los alrededores de la laguna homónima, tienen susceptibilidad a la licuefacción de suelos (Rosabal, 2014). Las arenas no superan el máximo valor del rango para este fenómeno (1,5 mm) (Peñalver *et al.*, 2008); además, existen altos valores de aceleración horizontal, que favorecen la licuefacción (TC4, 1999).

Bloque Guantánamo. Se ubica al centro del sector, limitado por las fallas Baconao al oeste, Maquey al este, Mal Paso y límites morfométricos al norte. Se caracteriza por movimientos neotectónicos relativos de descenso en comparación con el resto del área de estudio (Rosabal *et al.*, 2016b). Este bloque está constituido por las formaciones geológicas Camarones, Charco Redondo, Puerto Boniato, San Luis, Río Maya, Jaimanitas, depósitos aluviales y palustres.

Su relieve es de llanuras, pero al oeste se observan montañas pequeñas representadas por Santa María del Loreto y las colinas montañosas. Por los valores de las pendientes en estas zonas puntuales pueden surgir caídas de rocas y desprendimientos (Rosabal, 2013).

Los sedimentos aluviales de edad Holoceno en los ríos Guaso, Jaibo y Guantánamo, así como en los alrededores de la bahía, son suelos susceptibles a licuar (Rosabal, 2014).

Bloque Maquey. Se localiza al este del sector y se extiende de norte a sur, limitado por la estructura Maquey, donde aflora la formación geológica de igual nombre. Posee movimientos neotectónicos de ascenso (Rosabal *et al.*, 2016b). El

relieve característico es de alturas y exhibe altos valores de pendientes y disección vertical. Presenta alta susceptibilidad a los deslizamientos rotacionales (Rosabal *et al.*, 2009); además, existen condiciones geológicas y geomorfológicas que hacen que estos tipos de deslizamientos no sean raros.

Hacia la parte norte, sobre un tramo del río Yateras, por la presencia de suelos aluviales de edad Holoceno, existe alta susceptibilidad a la licuefacción (Rosabal, 2014). Pueden aparecer, también, deslizamientos, caídas y desprendimientos de rocas; fallo destructivo de taludes y fallo de estos últimos.

En resumen, los diferentes modelos morfotectónicos obtenidos (figuras 28, 49 y 71) pueden ser empleados como material de consulta para nuevas inversiones, por Planificación Física, el Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais), el Instituto de Vialidad, la Defensa Civil, que intervienen en el ordenamiento territorial.

3.5.7 Evaluación sismológica

Se reportan sismos históricos y perceptibles; de ellos, una cantidad significativa con intensidades de 4-5 MSK y otros con epicentro en Oriente (Chuy, 1999). Igualmente, terremotos con hipocentro en Holguín y Santiago de Cuba fueron perceptibles en este territorio. De los terremotos sentidos se destaca el del 20 de marzo de 2010, las localidades de mayor perceptibilidad dentro del sector fueron Guantánamo y Caimanera, con 5 y 6 grados MSK–EMS respectivamente (Zapata y Chuy, 2011). Los valores de aceleración horizontal efectiva e intensidad sísmica son mayores que en el resto del país.

3.5.8 Peligros inducidos por la actividad sísmica

Alta susceptibilidad a los deslizamientos rotacionales (Escobar *et al.*, 2006 y Rosabal *et al.*, 2009) en la sierra de Maquey (tabla 27 y figura 72), corroborada por los inventarios, que reportan 4 deslizamientos rotacionales en la formación Maquey; al W-NW en Santa María de Loreto (Rosabal, 2012, 2013), así como al SW, donde predomina la Formación Río Maya (Colectivo de autores, 2013) con calizas biohémicas muy duras.

Al norte y centro del sector, en las colinas montañosas, pueden producirse caídas y desprendimientos de rocas en las formaciones Puerto Boniato y Charco Redondo. Hacia el SW el relieve característico es de montañas, los valores de pendiente sobrepasan los 35° (Rosabal, 2012, 2013), se encuentran rocas ígneas (dioritas cuarcíferas, gabros, gabro-dioritas) y pueden ocurrir deslizamientos.

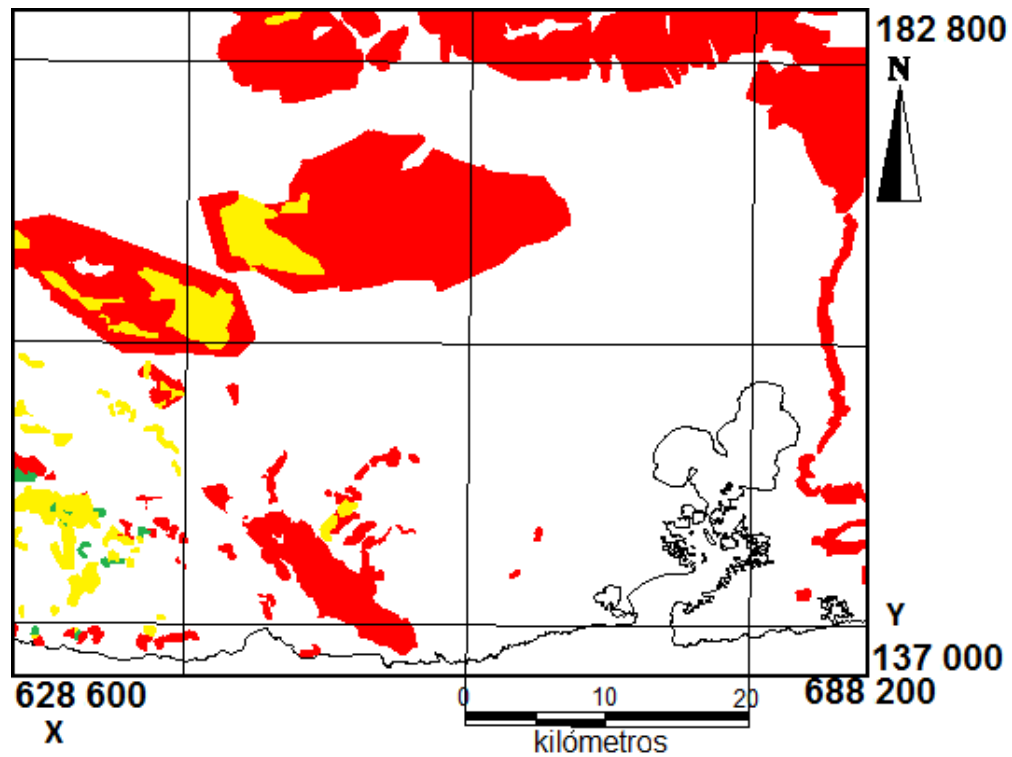
Moderada susceptibilidad a los deslizamientos al norte del sector por la presencia de margas intemperizadas de la formación San Luis.

Baja y muy baja susceptibilidad a los deslizamientos en los alrededores de la bahía de Guantánamo, donde no existen indicios de que puedan ocurrir deslizamientos.

El Criterio Magnitud-Distancia (TC4, 1999) para el sector Guantánamo muestra las principales zonas sismogeneradoras (tabla 28): Oriente, con magnitud 8 Richter; Baconao y Sabana, con 7; Purial, con 6,5; todas afectan al sector (Chuy *et al.*, 1997). Pueden ocurrir fallos destructivos de taludes a las distancias epicentrales de 19 km (Baconao y Sabana 1), 50,4 km (Oriente 1) y 11,6 km (Purial); y fallo de taludes a 119,8 km (Baconao y Sabana 1), 281,2 km (Oriente 1)

Tabla 27. Caracterización de la susceptibilidad a deslizamientos en el sector Guantánamo. Fuente: Autora

| Categoría | Geomorfología | | | Hidrología (km/km ²) | Geología y Geotecnia | | | Resultados |
|-----------------|-------------------|---|----------------|-------------------------------------|---|---|--|---|
| | Pendiente (°). | Disección vertical (m/km ²) | Relieve (m) | | Aspectos ingeniero- geológicos | Clasificación de las rocas | Litología | |
| Baja y muy baja | 0-7 | 0-75 | Zonas bajas | 0-5 | - | Rocas friables incoherentes | Sedimentos aluviales y palustres | No deslizamientos |
| Moderada | 15-25 | 76-175 | 200-500 | 5-7,5 | Margas intemperizadas | Rocas relativamente duras a semiduras y roca compuesta | Formación San Luis | Deslizamientos |
| Alta | > 25 | 76-175 | 50-200 | 5-7,5 | Estratificación fina, alternancia de margas con calizas y alternancia de areniscas y margas | Rocas relativamente duras a semiduras y roca compuesta | Formación Maquey | Deslizamientos, caídas y desprendimientos, colapso, hundimiento y desplomes de cavernas |
| | 25-35 | 76-175 | 200-500 | 5-7,5 | Rocas carsificadas, estratificación y diente de perro | Rocas relativamente duras a semiduras y rocas kársticas | Formaciones Charco Redondo Y Camarones | |
| | > 35 | 76-175 | 50-200 | 2-5,5 | Rocas carsificadas | Rocas relativamente duras a semiduras y rocas kársticas | Formación. Río Maya | |
| Alta | > 35 | 176-300 | > 500 | 2-5,5 | Rocas muy intemperizadas y agrietadas | Rocas fuertes masivas y rocas duras | Dioritas Cuarcíferas, Gabros, Gabro-dioritas | - |



ZONACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS
Escala 1:100 000.

LEYENDA
Niveles de susceptibilidad

- Alta
- Moderada
- Baja

Figura 72. Zonación de la susceptibilidad a deslizamientos en el sector Guantánamo. Escala 1:100 000. Fuente: Autora.

Tabla 28. Máxima distancia epicentral de fallo destructivo de taludes (Clase 1) y máxima distancia epicentral de fallo de taludes (Clase 2). Fuente: Chuy et al., 1997; TC-4, 1999

| Zonas Sismogeneradoras | Ms (Richter) | Clase 1 (km) | Clase 2 (km) |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Baconao | 7 | 19 | 119,8 |
| Sabana | 7 | 19 | 119,8 |
| Purial | 6,5 | 11,6 | 78,2 |
| Oriente 1 | 8 | 50,4 | 281,2 |

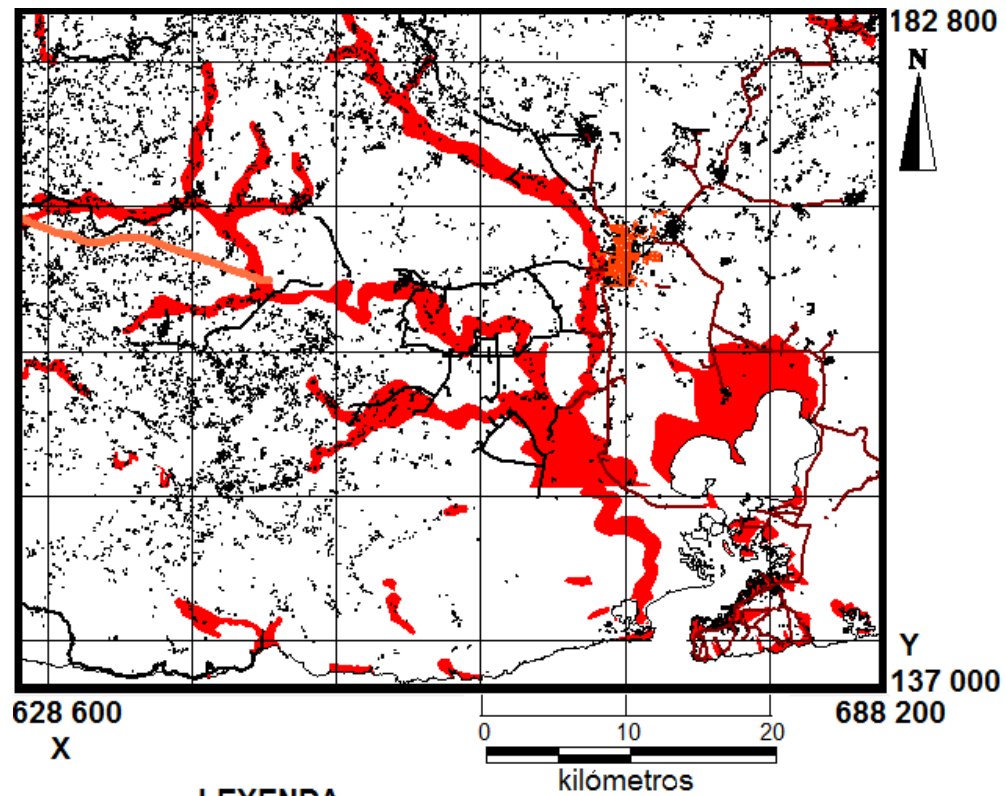
y 78,2 km (Purial), con mayor incidencia de los terremotos ubicados en la zona sismogeneradora Oriente.

En el caso de la licuefacción de suelos, puede ocurrir en la costa este en los tramos de los ríos Guantánamo, Jaibo, Baconao, Hatibonico y sus desembocaduras; asimismo, en los alrededores (norte, este, oeste) de la Laguna Baconao (figura 73) y los alrededores de la bahía de Guantánamo (Rosabal, 2014). En estas zonas es posible la ocurrencia de expansiones laterales. Baja susceptibilidad en los depósitos coluviales del pleistoceno, ubicados en el oeste del sector en toda la sierra de la Gran Piedra.

Se realizó la comprobación directa y se confirma la zonación de la susceptibilidad a los deslizamientos, donde existe manifestación de deslizamiento rotacional en Beltrán, Guantánamo, en Bellavista y el Zoológico de Piedra. También se corroboran estos resultados con los alcanzados por Rosabal *et al.* (2009). Asimismo, se confirma la susceptibilidad con la zonación del peligro geológico por deslizamientos en los municipios de Songo-La Maya (Rosabal, 2012, 2013) y en las 12 comunidades del municipio de Guantánamo (Chuy *et al.*, 2004).

3.6 Conclusiones

1. Se aplicaron en los sectores seleccionados, los métodos morfométricos, la tectónica activa y el análisis sismológico, apoyado en herramientas del SIG, y se demostró su viabilidad dado que permite la caracterización y cartografiado del fallamiento activo; la caracterización morfotectónica a escala detallada y la zonación de la susceptibilidad a los deslizamientos y licuefacción de suelos.
2. Se obtuvieron las zonas de mayor susceptibilidad a los deslizamientos en el sector Guamá donde pueden ocurrir caídas, desprendimientos y



LEYENDA

- Alta Susceptibilidad**
- Construcciones
- Carretera de 1er orden
- Carretera de 2do orden

Figura 73. Mapa de susceptibilidad a la licuefacción de suelos del sector Guantánamo. Escala 1:100 000. Fuente: Autora.

deslizamientos; en el de Santiago de Cuba producto de la acción antrópica pueden ocurrir deslizamientos; así como en Guantánamo pueden ocurrir deslizamientos rotacionales en la sierra de Maquey.

3. Se obtuvieron las zonas de probable licuefacción de suelos en Guamá en los depósitos aluviales en cauces de ríos y llanuras fluviales; en Santiago de Cuba en las proximidades de los ríos Sardinero y San Juan, donde son posibles las expansiones laterales y licuefacción en los entornos de la bahía de Santiago de Cuba y en el sector Guantánamo, en los ríos, Guantánamo, Jaibo y Baconao, así como en los alrededores de la laguna homónima y Guantánamo. En estos sectores es posible la ocurrencia de las expansiones laterales.
4. Se caracterizaron nueve bloques morfotectónicos; de ellos, siete en ascenso (Turquino, Uvero, Bayamita, Boniato, Cobre, Siboney y Maquey) y dos en descenso relativo (Santiago y Guantánamo).
5. Se revaluaron las fallas Jibacoa, Turquino, Bayamita, Boniato, Puerto Pelado, Mar Verde, San Juan, Maquey y La Yaya como de simple falla, y la Baconao como una falla con secciones.

CONCLUSIONES

Como conclusiones finales se obtuvieron las siguientes:

1. La evaluación conceptual y contextual de los deslizamientos y la licuefacción de suelos como peligros geológicos inducidos por actividad sísmica demostró que en la gran mayoría de las investigaciones se emplean los criterios sísmicos y tectónicos, sin integrar los elementos geomorfológicos y la tectónica activa.
2. Se desarrolló una metodología para la evaluación de los peligros inducidos, deslizamientos y licuefacción de suelos a partir del uso de indicadores morfométricos, la tectónica activa y el análisis sismológico. La misma se apoya en herramientas del SIG.
3. Al aplicar la metodología a los sectores Guamá, Santiago de Cuba y Guantánamo, se establecieron las fallas principales que cortan a los sectores y se caracterizaron nueve bloques morfotectónicos; de ellos, siete en ascenso con predominio a los deslizamientos y dos en descenso relativo donde prevalece la licuefacción de suelos.
4. Se obtuvo la susceptibilidad a los peligros de deslizamientos en los sectores donde pueden ocurrir caídas, desprendimientos y derrumbes de cavernas asociados al carso, así como deslizamientos producto de la acción antrópica y deslizamientos rotacionales.
5. Se obtuvo la susceptibilidad a la licuefacción de suelos en los sectores de estudio, donde las zonas de mayor susceptibilidad son los alrededores de las bahías Cabañas, Santiago de Cuba, Guantánamo y laguna de Baconao, así como en las proximidades de los ríos Sardinero y San Juan.

RECOMENDACIONES

1. Generalizar la aplicación de la metodología en otras zonas de Cuba para la evaluación de los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por la actividad sísmica.
2. Zonificar con mayor precisión, a través de métodos de detalle, en las áreas con alta susceptibilidad a la licuefacción de suelos y deslizamientos, para el ordenamiento del territorio, proyectos constructivos y medidas de defensa civil. En todos los casos se recomienda la inclusión de las propiedades físico-mecánicas de los suelos y rocas.
3. Crear un inventario de deslizamientos inducidos por sismos para Cuba.
4. Se recomienda que la tarea Vida tenga en cuenta los resultados alcanzados por esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abramson, L. (1996). Slope stability and stabilization methods. *Engineering geology Principles*. Wiley Interscience. pp. 60-106.
2. Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo/Apoyo Local para el Análisis y Manejo de los Riesgos Naturales (COSUDE/ALARN). (2006). *Proyecto ALARN. Instrumentos de apoyo para el análisis y la gestión de riesgos naturales. Guía para el especialista*. Recuperado de <http://cidbimena.desastres.hn/docum/crid/Abril2006/CD1/pdf/spa/doc14894/doc14894-2c3.pdf>
3. Alioshin, V., Sánchez, F., Eguipko, O., Pérez, M., Shelagurov, V., Burov, V. (1975). Informe sobre los resultados del levantamiento geológico y su búsqueda a escala 1:100 000 en la parte nororiental de la Sierra Maestra [Archivo CNFG].
4. Almaguer, Y. (2005). *Evaluación de la susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos en el yacimiento de Punta Gorda* (Tesis doctoral). Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Holguín, Cuba.
5. Álvarez, L., Serrano, M., Rubio, M., Chuy, T. J. y González, B. E. (1984). El terremoto del 19 de febrero de 1976, Pílon, Región Oriental de Cuba. *Investigaciones Sismológicas en Cuba*, No. 5. IGA, ACC. La Habana. pp 5 – 60.
6. Álvarez, L., Chuy, T., García, J., Moreno, B., Álvarez, H., Blanco, M.,... Fernández, A. (1999). *An earthquake catalogue of Cuba and neighboring areas*. Miramare, Trieste. International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Internal Report IC/IR/99/1.

7. Arango, E. (1996). *Geodinámica de la región de Santiago de Cuba en el límite de las placas de Norteamérica y el Caribe* (Tesis de Maestría). Instituto Politécnico Nacional de México. Ciudad México.
8. Arango, E. (2014). *Análisis sismotectónico del territorio oriental de Cuba a partir de la integración del modelo de corteza 3D de datos gravimétricos con datos sismológicos y geodésicos* (Tesis doctoral). Centro de Investigaciones Científicas y de Educación Superior de Ensenada. Baja California. México.
9. Arcia, M., Barranco, G., del Busto, R., Cañete, C., Cotilla, M., González, E.,... Valdés, C. (1997). Generalidades de la geología de Cuba. En G. Furrázola-Bermúdez y K. Núñez, (eds.) *Estudios sobre Geología de Cuba*. Ciudad de La Habana: Centro Nacional de Información Geológica. Instituto Geología y Paleontología (IGP).
10. Aristizábal, E. y Yokota, Sh. (2006). Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el valle de Aburra. *Dyna Rev. Fac. Nac. Minas*, 73(149).
11. Babaev, A., Tokariov, B., Lyskov, L. y Orbera, L. (1989). *Informe de las investigaciones geólogo-tectónicas del territorio de Cuba Oriental y la región de emplazamiento de las áreas No. 2 y No.10 de la CEN Holguín* [Reporte de Investigación] (Tomo I, Libro 3, Parte I/I). [Fondos de Archivo de la UPI-CEN Holguín del Minbas].
12. Barredo, J., Benavidez, A., Hervhl, J. & van Westen. (2002). Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain. *International J. Appl. Earth Observ. Geoinform.*, 2(1), 9-23.

13. Bathrellos, G., Kalivas, D. & Skilodimou, H. (2009). GIS-based landslide susceptibility mapping models applied to natural and urban planning in Trikala, Central Greece. *Estudios Geol.*, 65(1), 49-65.
14. Caballero, O. (2011). *Base de datos de deslizamientos inducidos por sismos* (Tesis de grado). Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil. Bogotá, Colombia.
15. Cabrera, M., Orbera, L., Pantaleón, G., Nuñez, A., Nuñez, K., Triff, J.,... González, D. (2011). Mapa Neotectónico de Cuba a escala 1:250 000. En *Memorias de IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra*. La Habana.
16. Calais, E. & Lépina, M. (1989). Géométrie et régime tectonique le long d'une limite de plaques en coulissage: la frontière nord-Caraïbe de Cuba à Hispaniola, Grandes Antilles. En *Geodynamique. C.R. Acad. Sci* (t. 308, serie II, pp. 131-135). Paris.
17. Calais, E. & Mercier de Lépina, B. (1991). From transtension to transpression along the northern Caribbean plate boundary off Cuba: Implications for the recent motion of the Caribbean plate: *Tectonophysics*, 186, 329–350.
18. Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F. & Reichenbach, P. (1995). GIS technology mapping landslide hazard. En A. Carrara y F. Guzzetti (eds.), *Geography information systems in assessing natural hazards* (pp. 135-175). Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.
19. Castellanos, E. (2008). *Evaluación multiescala de riesgo por deslizamientos de terreno en Cuba* (Tesis doctoral). International Institute for Geo-information Science and Earth Observation. Enschede, The Netherlands.
20. Colectivo de autores. (2011). *Estudios de peligros, vulnerabilidad y riesgos de deslizamientos de tierra* [Informe final]. Holguín.

21. Colectivo de autores. (2013). *Léxico Estratigráfico de Cuba*. La Habana. Instituto de Geología y Paleontología. Servicio Geológico de Cuba. Ministerio de Energía y Minas.
22. Cotilla, M. (1993). *Caracterización sismotectónica de Cuba* (Tesis doctoral). Instituto de Geofísica y Astronomía, Academia de Ciencias de Cuba (ACC). La Habana, Cuba.
23. Cotilla, M., Millán, G., Álvarez, L., González, D., Pacheco, M. y Arteaga, F. (1996). *Esquema neotectogénico de Cuba* [Informe científico-técnico]. Departamento de Geofísica del Interior. Archivo del Instituto de Geofísica y Astronomía, Academia de Ciencias de Cuba.
24. Cotilla, M., Álvarez, J. y Rubio, S. (1997). Sismicidad de tipo intermedio en Cuba. *Geología Colombiana*, 22, 35-40.
25. Cotilla, M. y Álvarez, J. (1998). Zonas sismogeneradoras en Cuba. *Geología Colombiana*, 23, 97-106.
26. Cotilla, M. (1998). Sismicidad y sismotectónica de Cuba. *Revista Física de la Tierra*, 10, 53-86.
27. Cotilla, M. (1999). El controvertido alineamiento Habana–Cienfuegos, Cuba. *Estudios Geológicos*, 55, 67-88.
28. Cotilla, M. (2001). Regularidades sismogenéticas de la Unidad Neotectónica Occidental de Cuba. *Revista Geológica de Chile*, 28(1).
29. Cotilla, M., González, E., Canete, C., Díaz, J. y Carral, R. (2003). La red fluvial de Cuba y su interpretación morfoestructural. *Revista Geográfica*, 134, 47–74.
30. Cotilla, M., Franzke, H. y Córdoba, D. (2007). Seismicity and seismoactive faults of Cuba. *Russian Geology and Geophysics*, 48, 505-522.

31. Cotilla, M. & Córdoba, D. (2010). Study of the Cuban Fractures. *Revista Geotectonics*, 44(2), 176-202.
32. Cotilla, R. & Cordoba, B. (2010). The Bayamo earthquake (Cuba) of 18 october 1551. *International Journal of Geosciences*, 2010, 1-13. Recuperado de <http://www.SciRP.org/journal/ijg>.
33. Chuy, T. y Pino, O. (1982). Datos macrosísmicos de los terremotos de la provincia Santiago de Cuba. *Investigaciones Sismológicas en Cuba*, 2, 47–136.
34. Chuy, T. y Álvarez, J. (1995). *Peligrosidad sísmica de Cuba con fines de la Norma Sismorresistente Cubana* [Reporte de Investigación]. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)]. Santiago de Cuba.
35. Chuy, T., Orbera, L., Hernández, J., Magaz, A., Sánchez, F., Pérez, C.,... Ramírez, R. (1997). Dictamen Conclusivo. Comisión Ad-hoc para la determinación de las Zonas Sismogénicas de la región Oriental de Cuba y zonas aledañas. *Ciencia en su PC*, 2(2),13.
36. Chuy, T. (1999). *Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de Peligrosidad y Microzonación Sísmica* (Tesis doctoral). Instituto Superior Politécnico Julio Antonio Echavarría. La Habana, Cuba.
37. Chuy, T., Puente, G., Baza, R., Seisdodos, J., Álvarez, M., Reyes, C.,... Martel, Y. (2004). *Evaluación de las amenazas por la actividad geodinámica e hidrometeorológica en comunidades del municipio Guantánamo* [Informe Final]. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)]. Santiago de Cuba.

38. Chuy, T. y Rosabal, S. (2011). *Recorridos de campo realizados en el marco del Proyecto PNUD Fortalecimiento de la capacidad local en la gestión para la reducción de riesgos en la provincia Santiago de Cuba*. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)]. Santiago de Cuba.
39. Chuy, T., Zapata, J., Rosabal, S., Despaigne, G. (2015a). *Evaluación sismológica de los sectores. Proyecto Territorial: Modelo sismo-morfotectónico para tres sectores de Cuba Oriental* [Informe de Proyecto]. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)]. Santiago de Cuba, Cuba.
40. Chuy, T., Rosabal, S., Caballero, F. y Oñate, R. (2015b). *Evaluación de la sismicidad y peligro sísmico para la inversión Terminal Multipropósito del Puerto de Santiago de Cuba*. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais) y Puerto Guiller món Moncada]. Santiago de Cuba.
41. Cuba. Estado Mayor Nacional de la Defensa Civil Nacional (21 de diciembre, 1994). *Ley 75 de la Defensa Nacional*. La Habana, Cuba.
42. Cuba. Comité Ejecutivo del Consejo de Ministros. (1997). *Decreto Ley 170/97 Del Sistema de Medidas de Defensa Civil*. La Habana, Cuba. Recuperado de http://www.ecured.cu/index.php?title=Decreto_Ley_No.170_del_Sistema_de_Medidas_de_Defensa_Civil&action=edit&redlink=1
43. Cuba. Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA). (11 de julio, 1997). *Decreto Ley No 81 del Medio Ambiente*. La Habana. Gaceta Oficial de la República de Cuba (Edición Extraordinaria) XCV(7), 47.
44. Cuba. Comité Ejecutivo del Consejo de Ministros de Cuba. (1999). *Decreto 262/99 Reglamento para la compatibilización del desarrollo económico social*

- del país con los intereses de la defensa*. La Habana, Cuba. Recuperado de <https://www.uh.cu/infogral/areasuh/defensa/dl262.htm>
45. Cuba. (2002). Estado Mayor Nacional de la Defensa Civil. Resolución No.6. *Procedimientos para la Compatibilización del desarrollo económico y social del país con los intereses de la Defensa Civil*. 5 de junio del 2002.
 46. Cuba. Oficina Nacional de Normalización (1999). *Norma Cubana NC 46:1999: Construcciones Sismorresistentes. Requisitos Básicos para el Diseño y Construcción*. La Habana.
 47. Cuba. Oficina Nacional de Normalización (2000). *Norma Cubana NC59: 2000: Geotecnia. Clasificación Geotécnica de los suelos*. La Habana, Cuba.
 48. Cuba. Servicio Sismológico Nacional de Cuba (SSNC). (2017). *Base de Datos del Servicio Sismológico Nacional de Cuba*. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)]. Santiago de Cuba.
 49. Cuba. Defensa Civil Nacional. (2010). *Directiva 1/2010 del Vicepresidente el Consejo de Defensa Nacional Para la planificación, organización y preparación del país para las situaciones de desastres*. Recuperado de www.medioambiente.cu/revistama/10_04.asp
 50. Cuba. Agencia de Medio Ambiente (AMA)-Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA). (2012). *Guía metodológica para el estudio de peligro, vulnerabilidad y riesgo por deslizamientos de terreno a nivel municipal*. La Habana, Cuba.
 51. Cuba. Servicio Sismológico Nacional de Cuba (SSNC). (2015). *Servicio Sismológico Nacional. Base de Datos*. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)]. Santiago de Cuba, Cuba.

52. Dai, F., Lee, C. & Ngai, Y. (2002). Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 64(1), 65-87.
53. Dai, F. & Lee, C. (2002). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42(3), 213-228.
54. Davis, S & Karzulovic, J. (1963). Landslides of Lago Riñihue, Chile. *Geological Society of America Bulletin*, 53(6), 1403-1414.
55. Delgado, J., Peláez, J., Tomas, R., García, F., Alfaro, P., López, C. (2011). Seismically-induced landslides in the Betic Cordillera (Spain). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(2011), 1203-1211.
56. Del Puerto, J. y Ulloa, D. (2003). Identificación de los peligros geológico-geomorfológicos de la cuenca de Santiago de Cuba. En *Memorias del V Taller Internacional de Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente. GEOMIN2003*. La Habana, Cuba.
57. DeMets, C. & Wiggins-Grandison, M. (2007). Deformation of Jamaica and motion of the Gonave microplate from GPS and seismic data. *Geophys. J. Int.*, 168, 362-378.
58. Denier, P., Personius, S. y Arias, O. (1991). Generalidades sobre los efectos geológicos del terremoto de Limón. *Revista Geológica de América Central*, Vol. Especial Terremoto de Limón, 29-38.
59. Diez, E., Cutié, M., Montenegro, C., Palau, R., Poveda, V., Yinxing, Z.,... Fengxia, W. (2014). Modernización de la red sísmica Cubana. Instalación, calibración y puesta a punto. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 29(2).

60. Escobar, E., Guasch, F., Bársana, A., Villalón, M., Rosabal, S., Oliva, R.,... Mesa, A. (2006). *Informe preliminar sobre el deslizamiento de tierra ocurrido en la localidad de Beltrán, municipio Yateras, Provincia Guantánamo en noviembre del 2006* [Informe técnico]. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)]. Santiago de Cuba.
61. Everard, K. & Savagny, K. (1994). Neotectonic effects on landslide distributions, Yukon, Canada. In *Proceeding of the 7th International Congress of the International Association of Engineering Geology*. Edited by R. Oliveira, L.F. Rodrigues, A.G. Coelho and A.P. Cunha. Lisbon, (pp. 1811-1820). Falcón, M., Ramírez, P. (2012). Sectores críticos para la ocurrencia de licuefacción en Chile: una mirada desde la experiencia del sismo del 27 de febrero de 2010. En Memoria de *IV Conferencia Internacional de Peligrosidad, Riesgo Geológico e Ingeniería Sísmica y de Desastres*. Santiago de Cuba, Cuba.
62. Fernández, B., Rivera, Z., Reyes, C. y Zapata, J. (2000). Los fenómenos físico-geológicos secundarios en la ciudad de Santiago de Cuba. *Revista Minería y Geología*, 17(2), 11-13.
63. Fernández, B. (2000). *Posibilidad de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en la cuenca de Santiago de Cuba catalizado por terremotos fuertes* (Tesis de Maestría). Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.
64. Fernández, L., Guardado, R., Herrera, I., Oliva, R. y Díaz, P. (2016). Escenarios susceptibles a licuefacción inducida por sismos de gran magnitud en Santiago de Cuba. *Revista Minería y Geología*, 32(2), 53-69.
65. Fernández, L., Bandera, I., Guardado, R. y Oliva, R. (2017). Susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en la ciudad de Caimanera, Guantánamo. *Revista Minería y Geología*, 33(1), 26-43.

66. Flores, M. (2003). *Movimientos en masa: identificación, causas y alternativas de manejo en Medellín*. Medellín: Editorial Alcaldía.
67. Flores, M. y Hernández, J. (2012). Procesos de remoción en masa inducidos por el terremoto del 27 F de 2010 en la franja costera de la Región del Biobío, Chile. *Revista Geografía Norte Grande*, 53, 57-74.
68. Galbán, L., Chuy, T. y Vidaud, I. (2012). *Indicadores más comunes en la evaluación de riesgos geológicos. Indicadores cualitativos y cuantitativos para la evaluación de peligro, vulnerabilidad y riesgos geológicos*. España: Editorial Académica Española.
69. Galbán, L. (2014). *Procedimiento para la gestión y reducción de riesgos geológicos en la provincia Santiago de Cuba* (Tesis doctoral). Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.
70. Galbán, L. y Guardado, R. (2016). Modelación del peligro a deslizamientos en el municipio Santiago de Cuba considerando el peso de las variables determinantes. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales*, 18(1), 89-99.
71. García, J., Zapata, J. A., Arango, E. D., Monnar, O., Chuy, T. J., Fernández, B. C., Reyes, C. R., Oliva, R. (2002). Manejo y evaluación del riesgo sísmico en la ciudad de Santiago de Cuba, a partir de su implementación en un Sistema de Información Geográfica (SIG). *Nuevas Investigaciones Sismológicas en Cuba*. La Habana, Cuba. Editorial Academia. pp 73 – 82
72. González, E., Díaz, J., Arteaga, F., Álvarez, L., Grunthal, G., Cotilla, M.,... Chuy, T. (1991). *Sismotectónica. Atlas de Santiago de Cuba*. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)]. Santiago de Cuba, Cuba.

73. González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Prentice Hall.
74. González, F. y Verdugo, R. (2014). Sitios afectados por licuefacción a causa del terremoto 27-F. En *Memorias de VIII Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica*. Chile.
75. Grupo Empresarial Geocuba. (2006). *Met 30-03: Metodología para la creación del modelo digital del terreno*. Santiago de Cuba: Agencia Geomática. UCT GEOCUBA IC.
76. Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. & Reichenbach, P. (1999.). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1–4), 181-216.
77. Guzzetti, F., Galli, M., Reichenbach, P., Ardizzone, F. & Cardinalli, M. (2006). Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, Central Italy. *Natural Hazards and Earth system Sciences*, 6, 115-131.
78. Haller, K., Machette, M. & Dart, R. (1993). *Guidelines for US database and map for the maps of the major active faults, Western Hemisphere, International Lithosphere Program (ILP), Project II-2*. Denver, Colorado, USA: US Department of Interior, US Geological Survey.
79. Hernández, J., Lilienberg, D. y Marques, M. (1989). Movimientos tectónicos recientes de la corteza terrestre. En G. Oliva. (ed.), *Nuevo Atlas Nacional de Cuba* [Sección Relieve, cuadernillo IV.2.1, mapa 4a-4d]. Madrid: Instituto Geográfico Nacional de España.
80. Hernández, J., Díaz, J., Magaz, A., González, R., Pórtela, A., Arteaga, F,... Blanco, P. (1991). *Morfotectónica de Cuba Oriental*. La Habana: Instituto de Geografía, Academia de Ciencias de Cuba.

81. Hernández, J., Díaz, J., Magaz, A., González, R., Pórtela, A. y Arteaga, F. (1991). Criterios geomorfológicos para la clasificación morfotectónica de Cuba Oriental. En *Morfotectónica de Cuba Oriental*. La Habana: Editorial Academia.
82. Hernández, J., Ortiz, M., Magaz, A., Díaz, J. y Zamorano, J. (1994). Estilos geotectónicos bidimensionales y tridimensionales interbloques: una nueva categoría neotectónica para la determinación de morfoestructuras montañosas. *Investigaciones Geográficas Boletín*, 28.
83. Heredia, N. y Calderín, F. (2004). El Fenómeno de Licuefacción en suelos de la ciudad de Santiago de Cuba. En *Memorias de I Conferencia Internacional Peligrosidad, Riesgo Geológico e Ingeniería Sísmica SISMOS 2004*. Santiago de Cuba: Editorial Oriente.
84. Horton, R. E. (1945). Erosional Development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56, 275-276.
85. Instituto de Geología y Paleontología (IGP). (2003). *Mapa Geológico Digital de la República de Cuba a escala 1:100 000*. La Habana: Instituto de Geología y Paleontología.
86. Instituto de Geología y Paleontología (IGP). (2008). *Mapa geológico digital del Cuaternario a escala 1:250 000*. La Habana: Instituto de Geología y Paleontología, Ministerio de la Industria Básica (Minbas).
87. Iturralde-Vinent, M. (1998). Sinopsis de la Constitución Geológica de Cuba. *Acta Geológica Hispánica*, 33, 9-56.
88. Keefer, D. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Survey of America Bulletin*, 95, 406-421.

89. Keefer, D. & Wilson, R. (1989). Predicting Earthquake-Induced landslides with Emphasis on Arid and Semi-arid Enviroments. *Publications of the inland Geological Society*, 2, 118-149.
90. Keefer, D. (2002). Investigating landslides caused by earthquakes. *A historical review. Surveys in Geophysics*, 23(6), 473-510.
91. Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New.Jersey.State, pp653.
92. Kuzovkov, G., Arseniev, Y., Sánchez, R. y Quesada, R. (1977). *Informe sobre los resultados del levantamiento geológico a escala 1:1000 000 realizados por la brigada Sierra Maestra en la pendiente sur de la cresta del Turquino en la parte oeste de la Provincia de Santiago de Cuba durante los años 1974-1977*. La Habana, Cuba. Oficina Nacional de Recursos Minerales, Ministerio de la Industria Básica (Minbas) (Inédito).
93. Laffaille, J., Ferrer, C. & Laffaille, C. (2010). Venezuela: the construction of vulnerability and its relation to the high seismic risk. In E. Latrubesse (Ed.), *Natural Hazards and Human-Exacerbated disasters in Latin America, Developments in Earth Surface Processes*, Vol.13, Chapter 5, (pp. 99-129). Amsterdam: Elsevier Science.
94. Lépinay, B.M and Rangún, C. (2011). Argumentos geológicos para una iniciación Miocénica de la falla Norte de la fosa Caimán. En *Memorias de IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra*. La Habana, Cuba.
95. Lilienberg, D., Hernández, J., Marques, M. & Rueda, J. (1988). General Trends and Regional Differentiation of the Recent Geodynamics of Morphostructures of an Island Interplate Zone: Studies in a Complex Polygon at Santiago de

- Cuba and in an Eastern-Cuba Model Area. *Journal of Geodynamics*, 9, 305-318.
96. Lomtadze, V. (1977). *Geología aplicada a la ingeniería geodinámica aplicada a la ingeniería*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
97. Magaz, A., Díaz, L., Hernández, J., González, R. y Chuy, T. (1991). *Correlaciones Morfotectónicas. Atlas de Santiago de Cuba*. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)]. Santiago de Cuba, Cuba.
98. Magaz, A., Díaz, J. y Hernández, J. (1998). Elementos geomorfológicos básicos para el análisis y determinación de zonas de fallamiento activo en las condiciones de Cuba. *Investigaciones Geográficas*, 35, 9-83.
99. Magaz, A. (2017). *Geomorfología de Cuba*. La Habana: (s.n).
100. Mann, P., Calais, E., Ruegg, J., DeMets, Ch., Jansma, P. & Mattioli, G. (2002). Oblique collision in the northeastern Caribbean from GPS measurements and geological observations. *Tectonics*, 21(6). doi: 10.1029/2001TC001304.
101. Mann, P., Calais., E. & Huerfano, V. (2004). Earthquake shakes big bend región of North America Caribbean boundary zone, EOS, Transactions. *American Geophysical Union*, 85, 24.
102. Márquez, I., Seisdedos, J., Chuy, T. y Díaz, R. (2002). *Valoración de las amenazas naturales y problemas estructurales que presentan dos instalaciones de la empresa Retomed en la ciudad de Santiago de Cuba*. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)] Santiago de Cuba.
103. Marta, R., Kerle, N., Jetten, V., Van Western, C. & Kumar, K. (2010). Characterizing spectral, spatial and morphometric properties of landslides for

- semiautomatic detection using object-oriented methods. *Geomorphology*, 116, 24-36.
104. Méndez, I., Aguller, M., Guevara, T., Rodríguez, M., Ramírez, M., Llull, E. y Recouso, Y. (2003). *Confeción base de datos de pozos de perforación de Cuba Oriental* [Informe]. Santiago de Cuba: Ministerio de la Industria Básica, Empresa Geominera Oriente.
105. Mercier Meunier, P., Hovius, N. & Haines, J. (2007). Regional patterns of earthquake-triggered landslides and their relation to ground motion. *Geophysical Research Letters*, 34. doi: 10.1029/2007 GL031337.
106. Mora, R., Vahrson, W. y Mora, S. (1992). *Mapa de amenaza de deslizamientos, Valle Central, Costa Rica*. Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres Naturales en América Central. Centro de Coordinación para la prevención de desastres naturales en América Central. (CEPREDENAC).
107. Mora, S. & Vahrson, W. (1993). *Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination*, Bull. Intl. Ass. Eng. Geology.
108. Mora, S. (1997). El impacto de las amenazas naturales en Costa Rica: aspectos sociales, políticos, económicos y su relación con el desarrollo del país. En *II Seminario Colombiano de Ingeniería Sísmica y Geotecnia*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
109. Morejón, G., Candebat, D., Márquez, I., Ferrera, H., Arango, E., Zapata, J., Chuy, T. y Díaz, L. (2006). *Evaluación de la vulnerabilidad ante la ocurrencia de eventos naturales de las carreteras de interés nacional de la provincia Santiago de Cuba: Autopista Nacional* [Informe científico-técnico]. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)]. Santiago de

Cuba, Cuba.

110. Moreno, Y., Labrada, A., Rodríguez, A., Figueroa, Y. (2017). Metodología para la confección del mapa geomorfológico de la república de Cuba a escala 1:100000. Guía para su elaboración. (Geocuba, ISMM, IGP).
111. Naciones Unidas. (1992). *Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*. Recuperado de <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
112. Naciones Unidas. (1992). *Declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo*. Recuperado de http://www.bioculturaldiversity.net/downloads/papers/Río_declaration_Spanish.pdf
113. Nagy, E., Brezsnianszky, K., Brito, A., Coutin, D., Formell, F., Franco, G., Radocz, G. (1976). *Texto explicativo del mapa geológico de la provincia de Oriente a escala 1:250, 000, levantado y confeccionado por la Brigada Cubana-Húngara entre 1972-1976*. La Habana: Academia de Ciencias de Cuba, Instituto de Geología y Paleontología.
114. Nicholson, D. T. & Hencher, S. (1997). Assessing the potential for deterioration of engineered rock slopes. In *Proceeding International Symposium on Engineering Geology and the environment* (pp. 911-917). Athens.
115. Obregón, Ch. y Lara, J. (2014). Aplicación del mapa de susceptibilidad por procesos de geodinámica superficial a la gestión territorial. *Revista del Instituto de Investigación (RIIGEO)*, 17(33), 73-80.
116. Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 2015. Recuperado de <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cop21/>

117. Organización Organización de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR). (2015). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030*. Recuperado de https://www.unisdr.org/files/43291_spanishsendaiframeworkfordisasterri.pdf
118. Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible. 17 objetivos para transformar nuestro mundo. Recuperado de <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/mdgs/>
119. Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). Cumbre de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible 2015. Recuperado de http://www.exteriores.gob.es/Portal/es/SalaDePrensa/EIMinisterioInforma/Paginas/Noticias/20150925_MINISTERIO2.aspx
120. Orbera, L. (1985). *Neotectónica y sismicidad de Cuba Oriental* (tesis doctoral). Moscú.
121. Ordaz, A., Hernández, J., Chuy, T. y García, J. (2013). La susceptibilidad a la licuefacción en el emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal, Cuba Occidental. *Minería & Geología, Revista de Ciencias de la Tierra*, 29(2), 1-15.
122. Ouimet, W. B. (2011). Tectonic geomorphology. The hills came tumbling down. *Nature Geoscience*, 4, 424-425.
123. Parker, N., Densmore, A., Rosser, N., De Michele, M., Huang, R., Whadcoat, S. y Petley, D. (2011). Mass wasting triggered by the 2008 Wenchuan earthquake is greater than orogenic growth. *Nature Geoscience*, 4, 449-452.
124. Peñalver, L., Cabrera, M., Delgado, R., Rodríguez, L., Pantaleón, G., Ugalde, C., Pérez, C. y Denis, R. (2008). *Mapa Digital de los Depósitos Cuaternarios*

- del Archipiélago Cubano a escala 1:250 000*. La Habana: Instituto de Geología y Paleontología.
125. Pérez, N. (1976). Aspectos ingeniero-geológicos de Cuba Oriental. En texto explicativo del mapa geológico de la provincia de Oriente....(Manuscrito). La Habana. Archivo del. Instituto de. Geología y. Paleontología. Academia de Ciencias de Cuba.
126. Pérez, C. (1989). Alineamientos a escala 1:2.000 000. En *Atlas Nacional de Cuba* [Sección III Constitución geológica. III. 3.1]. La Habana, Cuba.
127. Pérez, C., García, D., Cañete, C. y Sánchez, F. (1994). *Informe final del resultado 555. Tectónica de la Sierra Maestra y áreas adyacentes. Problema de ciencias naturales: Estudio geológico integral de la Sierra Maestra*. [Fondos de la Industria Básica, Instituto de Geología y Paleontología]. La Habana, Cuba.
128. Pérez, C. y García, D. (1997). Tectónica de la Sierra Maestra (Sureste de Cuba). En G. Furrázola-Bermúdez y K. Núñez, (eds.), *Estudios sobre Geología de Cuba*. Ciudad de La Habana: Centro Nacional de Información Geológica. IGP.
129. Pérez, C., Núñez, K., Arango, E., Rueda, J., Zapata, J., Ricardo, S.,... Puentes, G. (2008). *Valoración de la amenaza sísmica en la región minera del noreste de Holguín*. La Habana, Cuba: Ministerio de la Industria Básica, Grupo empresarial Geominsal, Instituto de Geología y Paleontología.
130. Pierre-Yves, Bard. (2005). *Local effects on strong ground motion: physical basis and estimation methods in view of microzoning studies*. *Seismology, Seismic data analysis, hazard assessment and risk mitigation International Training Course*. Postdam, Germany.

131. Pórtela, A., Díaz, J., Hernández, J., Magaz, A. y Blanco, P. (1989). Geomorfología escala 1:1 000 000. En *Nuevo Atlas Nacional de Cuba* [IV Relieve]. La Habana, Cuba.
132. Priego, A., Bocco, G., Mendoza, M. y Garrido, A. (2008). *Propuesta para la generalización semiautomatizada de unidades de paisajes. Fundamentos y Métodos*. México, D.F: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México.
133. Rauch, A. (1997). *An empirical method for predicting surfaces displacements due liquefaction-induced lateral spreading in earthquakes* (Degree of Dr of Philosophy in Civil Engineering). Faculty of the Virginia Polytechnique Institute and State University. Virginia, USA.
134. Rauch, A. & Martin, J. (2000). EPOLLS model for predicting average displacements on lateral spreads. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 126(4), 360-371.
135. Reyes, C. (2001). *Susceptibilidad de deslizamiento en Santiago de Cuba y sus alrededores, escala 1:25 000* (Tesis de Maestría). Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.
136. Reyes, C. y Seisdedos, J. (2001). *Estudio de los sectores de la carretera Granma con peligro potencial de deslizamientos. Atlas de Peligros Naturales del Municipio Guamá*. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)]. Santiago de Cuba, Cuba.
137. Reyes, P., Ríos, Y., Vega, N. y Arango, E. (2005). Peligro geológico de la red vial de las provincias orientales para casos de sismos de gran intensidad. En

Memorias de VI Congreso de Geología y Minería. Simposio de sismicidad y riesgos geológicos.

138. Roa, J., Kamp, U. (2008). *Modelos de elevación digital (MED) a partir de sistemas satelitales. Una introducción y análisis comparativo en la cordillera de Mérida-Venezuela.* Revista Geográfica Venezolana, 49 (1) 2008, 11-42. Recuperado de <http://www2.scielo.org.ve/pdf/rgv/v49n1/art02.pdf>
139. Rodríguez, A. (1991). *Manual de geomorfología.* Moa, Holguín, Cuba: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
140. Rodríguez, A. (1998). *Estudio morfotectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluación de riesgos de génesis tectónica (Tesis doctoral).* Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.
141. Rodríguez, A. (2000). *Geomorfología.* Moa, Holguín, Cuba: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
142. Rosabal, S. (2000). Esquema morfotectónico de la cuenca Santiago de Cuba a escala 1:25 000. *Revista Redes de estaciones e investigaciones sismológicas en Cuba.* Editorial Academia. La Habana, Cuba.
143. Rosabal, S., Zapata, J. y Gómez, J. (2009). Incidencia de la geomorfología en los deslizamientos de la carretera de Beltrán, Guantánamo, Cuba. *Revista GEOS. Unión Geofísica Mexicana*, 29(2), 1-12.
144. Rosabal, S. y Oliva, R. (2012). Deslizamiento inducido por intensas lluvias en el Consejo Popular Altamira los días 8 y 9 de junio del 2011. En *Memorias de IV Conferencia Internacional de Peligrosidad, Riesgo Geológico e Ingeniería Sísmica y de Desastres.* Santiago de Cuba.
145. Rosabal, S. (2012). Peligro geológico por deslizamientos en sectores de la Provincia de Santiago de Cuba. En *Memorias de V Taller internacional de*

- ingeniería y arquitectura para la reducción de desastres (CIIARD). 16 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura. La Habana.*
146. Rosabal, S. (2013). Peligro geológico por deslizamientos en sectores de la provincia de Santiago de Cuba. En *Memorias de IV Simposio de riesgos geológicos y sismicidad. X Congreso Cubano de Geología (Geología 2013)*. La Habana, Cuba.
147. Rosabal, S., Oliva, R., Candebat, D., Zapata, J. y Chuy, T. (2013). *Caracterización detallada de la comunidad costera del este de la bahía de Santiago de Cuba. Proyecto del FNMA (08-13-01): Gestión de riesgos ambientales en la comunidad costera del lado este de la bahía de Santiago de Cuba (Consejos Populares: Guillermón Moncada y Altamira)* [Informe de Proyecto]. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)]. Santiago de Cuba, Cuba.
148. Rosabal, S. (2014). *Zonación preliminar de licuefacción de suelos en la región Cuba Oriental*. Recuperado de <http://www.monografias.com/trabajos101/zonacion-preliminar-licuefacción-suelos-region-cuba-oriental/zonacion-preliminar-licuefacción-suelos-region-cuba-oriental.shtml>
149. Rosabal, S., Oliva, R., Chuy, T., Zapata, J. y Caballero, L. (2014). *Capacitación a la comunidad y líderes comunitarios sobre los efectos de los fenómenos naturales e inducidos en el área de estudio. Proyecto Territorial: Gestión de riesgos ambientales en la comunidad costera del lado este de la bahía de Santiago de Cuba (Consejos populares: Guillermón Moncada y Altamira)*. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones sismológicas (Cenais)]. Santiago de Cuba.

150. Rosabal, S., Oliva, R., Zapata, J., Chuy, T., Caballero, F. (2014a). Percepción social sobre sismos en las comunidades costeras de la bahía de Santiago de Cuba. En *Memorias de IV Foro de Comunicación de las Ciencias*. Santiago de Cuba, Cuba.
151. Rosabal, S., Rodríguez, A. y Oliva, R. (2015). *Rasgos morfométricos indicadores de posible ocurrencia de movimientos en masa en el sector Santiago de Cuba*. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)]. Santiago de Cuba, Cuba.
152. Rosabal, S., Savón, Y. y Oliva, R. (2015a). *Caracterización morfotectónica de los sectores objeto de estudio. Proyecto: Modelo sismo-morfotectónico para tres sectores de la región de Cuba Oriental. Programa DISA-Desarrollo de Investigaciones Sismológicas Aplicadas en la República de Cuba* [Informe parcial]. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)]. Santiago de Cuba, Cuba.
153. Rosabal, S., Rodríguez, A. y Zapata, J. (2016a). Esquematización morfotectónica del sector Guamá, Santiago de Cuba. *Minería y Geología. Revista de Ciencias de la Tierra*, 32(3), 32-46.
154. Rosabal, S., Rodríguez, A. y Zapata, J. (2016b). Evaluación morfotectónica del sector Verraco-Punta Barlovento, Guantánamo, Cuba. *Minería y Geología. Revista de Ciencias de la Tierra*, 32(4), 77-90.
155. Rosencrantz, E & Mann, P. (1991). Sea Marc II Mapping off transform faults in the Cayman Trough, Caribbean Sea. *Geology*, 19, 690-693.
156. Savón, Y., Mesa, A., Matos, L., Castillo, L., Odilio, M. y Delgado, R. (2017). Las precipitaciones como elemento disparador de movimientos gravitacionales en la provincia Guantánamo. En *Memorias de XII Congreso*

de Geología. VI Simposio de riesgos geológicos, procesos costeros. VII Convención de Ciencias de la Tierra. La Habana, Cuba.

157. Schulz, W., Galloway, S. & Higgins, J. (2012). Evidence for earthquake triggering of large landslides in coastal Oregon, USA. *Geomorphology*, 141-142, 88-98.
158. Seisdedos, J., Heredia, N. y Oliva, R. (1991). *Esquema Tectónico de Santiago de Cuba. Atlas de Santiago de Cuba.* [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)]. Santiago de Cuba, Cuba.
159. Servicio Geológico de los Estados Unidos, 2017.
160. Suárez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales.* Bucaramanga, Colombia: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Ingeniería de suelos, Universidad Industrial de Santander.
161. Taber, S. (1934). Sierra Maestra of Cuba, part of the northern rim, of the Bartlett trough. *Bull. Geol. Soc. América*, 45, 567-619.
162. Technical committee for earthquake geotechnical engineering (TC4) of the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). (1999). *Manual for zonation on seismic geotechnical hazards.* Tokyo, Japan: The Japanese Geotechnical Society.
163. Tossati, G., Castaldini, D., Barbieri, M., D'Amato, G., Giannecchini R., Mandrone, G.,... Tellini, C. (2008). Additional Causes of Seismically-Related Landslides in the Northern Apennines, Italy. *Rev. geomorfologie*, 10, 5-21.
164. Van Westen, C. (1993). *Application of geographic information systems to landslide hazard zonation* [Publication Number 15]. Enschede, The Netherlands: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC).

165. Van Westen, C., Rengers, N., Terlien, M. & Soeters, R. (1997). Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation. *Geologische Rundschau*, 86(2), 404-414.
166. Van Westen, C., Seijmonsbergen, A. & Mantovani, F. (1999). Comparing landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, 20(2-3), 137-158.
167. Van Westen, C. & Soeters (2000). Remote Sensing and GIS for Disaster Management. In P.S. Roy, C. J. van Westen, V. K. Jha, R. C. Lakhera & P. K. Champati Ray (Eds.), *Natural Disasters and their Mitigation. Remote Sensing and Geographic Information System Perspective* (pp. 31-76). Dehra Dun, India: Indian Institute of Remote Sensing, NRSA.
168. Vargas, R. (2002). Evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos municipio de La Celia. Departamento de Risaralda. Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER). Pereira, *Risaralda-CARDER-Feb. 2002*
169. Vargas, R. (2002). Evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos municipio de Balboa. Departamento de Risaralda. Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER). Pereira, *Risaralda-CARDER-Feb. 2002*
170. Vargas, A. (2002). Deslizamientos inducidos por sismos y sus efectos en abanicos aluviales [Compendio de trabajos de investigación CNDG, Vol.3] Lima: Biblioteca del Instituto Geofísico del Perú.
171. Varnes, D. (1978). Slope movement types and processes [Cap. 2 de *Landslides Analysis and Control* Transportation Research Board]. Washington, D.C: National Academy of Sciences.
172. Verdugo, R. (2009). Seismic performance based-design of large earth and tailing dams. Tsukuba, Japan. Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, ICPBD Conference.

173. Villalón, M., Reyes, C., Aguller, C., Trejo, R., Nápoles, S., Despaigne, G.,... Suarez, O. (2012). *Informe sobre los estudios de PVR deslizamientos provincia Santiago de Cuba*. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)]. Santiago de Cuba, Cuba.
174. Wang, W. (1979). Some findings in soil liquefaction, Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing.China. Earthquake Engineering Department, *Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute*.
175. Weischet, W. (1963). Further observations of geologic and geomorphology changes resulting from catastrophic earthquake of may 1960, in Chile. *Bulletin of the Seismological, Society of America*, 53(6), 1237-1257.
176. Youd, T. (1977). Packing changes and liquefaction susceptibility. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103, 918-922.
177. Youd, T & Perkins, D. (1978). Mapping of Liquefaction Induced Ground Failure Potencial. J. GED,. ASCE, 104(4), 433-446.
178. Zamorano, J., Ortiz, M., Ramírez, T. y Hernández, J. (2000). Meseta de Boniato y graben de Santiago de Cuba: un enfoque geomorfológico de su desarrollo morfoestructural. *Investigaciones geográficas*, 041, 26-45.
179. Zapata, J. (1995). *Utilización de variantes metodológicas de Microzonación Sísmica en la ciudad de Santiago de Cuba* (Tesis doctoral) [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais) y del Instituto de Geofísica y Astronomía]. Instituto Superior Politécnico Julio Antonio Echavarría. La Habana.
180. Zapata, J. y Chuy, T. (2011). *Análisis y recomendaciones sobre la información de los terremotos perceptibles de enero al 25 de abril/2010* [Reporte de

investigación] [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS)]. Santiago de Cuba.

181. Zapata, J., Rosabal, S. y Cutie, M. (2013). *Investigaciones sismológicas para proyecto de estabilidad de taludes de la presa de cola de la empresa de níquel Ernesto Che Guevara en Moa, Holguín*. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)]. Santiago de Cuba.

ANEXO A. GLOSARIO DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

SIGLAS Y ABREVIATURAS

- ALARN. Apoyo Local para el Análisis y Manejo de los Riesgos Naturales.
- AMA. Agencia de Medio Ambiente.
- CENAIIS. Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas.
- CFA. Criterios de Falla Activa.
- CGRR. Centros de Gestión para la Reducción de Riesgos.
- CITMA. Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente.
- COSUDE. Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo.
- F. Falla.
- FA. Falla Activa.
- Fm. Formación.
- FSc. Falla con Secciones.
- FSeg. Falla Segmentada.
- IGA. Instituto de Geofísica y Astronomía.
- IGP. Instituto de Geología y Paleontología.
- ISMM. Instituto Minero Metalúrgico de Moa.
- MDT. Modelo Digital del Terreno.
- M.M. Mercali Modificada.
- PVR. Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo.
- SF. Simple Falla.
- SIG. Sistema de Información Geográfica.

- SPT. Standard Penetration Test en inglés. Ensayo de penetración estándar.
- SSNC. Servicio Sismológico Nacional Cubano.
- UNAICC. Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba.
- UNDRO. United Nations Disasters Office en inglés. Oficina de las Naciones Unidas para los Desastres.
- UO. Universidad de Oriente.
- ZS. Zona Sismogeneradora.



CERTIFICADO DE PUBLICACIÓN

La contribución titulada:

Esquematación morfotectónica del sector Guamá, Santiago de Cuba

De los autores:

Sandra Rosabel-Domínguez y Alina Rodríguez-Infante

Ha sido publicada en el número 3 del volumen 32 correspondiente al trimestre julio-septiembre del año 2016. La misma está disponible a la comunidad científica a través de la dirección <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg>

Minería y Geología es indizada por:

- [Cab Abstracts Database](#)
- [Ulrich's Periodicals Directory](#)
- [Redalyc](#)
- [Ehseo Fuente Académica](#)
- [Actualidad Iberoamericana](#)
- [Academic Search Complete](#)
- [Directory Of Open Access Journals](#)
- [Journals HoCs](#)
- [Latindex](#)
- [Google Scholar](#)

Dr. Alexis Otero Calvis
Editor
13 octubre 2016

Minería y Geología

Certificado de publicación del artículo titulado:

Evaluación morfotectónica del sector Verraco-Punta Barlovento, Guantánamo, Cuba

Autores:

Sandra Rosabal-Domínguez, Alina Rodríguez-Infante y José A. Zapata-Balanqué

Publicado en:

Vol. 32 No.4 (sept-dic) 2016



www.ismm.edu.cu/revistamg

revistamg@ismm.edu.cu

Indexado en:

CAB Abstracts / EBSCO Fuente Académica / Redalyc / Directory of Open Access Journals / Journals TOC / Ulrich's Periodicals Directory / Academic Search Complete / Latindex



del 26 al 30 de noviembre del 2012

**16 CONVENCIÓN CIENTÍFICA
DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**
PALACIO DE CONVENCIONES DE LA HABANA

El Comité Organizador
de la XVI Convención Científica
de Ingeniería Y Arquitectura
otorga el presente

CERTIFICADO

Ponente

a: *Sandra Yanetsy Rosabal Domínguez*

Por la presentación del trabajo titulado:

*Peligro geológico por deslizamiento de sectores de la provincia
Santiago de Cuba.*

En el marco del:

I Congreso Internacional de Gestión del Riesgo de Desastre

48
ANIVERSARIO
cujae
2 0 1 2

Dra. Alicia Alonso Becerra
Presidenta del Comité Organizador
Rectora del Instituto Superior Politécnico
José Antonio Echeverría

La Habana, Cuba



V CONVENCION CUBANA DE CIENCIAS DE LA TIERRA

Exhibición de Productos, Nuevas Tecnologías y Servicios

Palacio de Convenciones, La Habana, Cuba

1 al 5 de abril de 2013



CERTIFICADO

La Sociedad Cubana de Geología le otorga a:

Sandra Yanetsy Rosabal Dominguez.

Por su participación en:

- | | |
|---|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> X Congreso Cubano de Geología (GEOLOGIA'2013) | <input type="checkbox"/> IV Congreso de Petróleo y Gas (PETROGAS'2013) |
| <input type="checkbox"/> VII Congreso Cubano de Geofísica (GEOFISICA' 2013) | <input type="checkbox"/> XI Congreso de Informática y Geociencias (GEOINFO'2013) |
| <input type="checkbox"/> V Congreso Cubano de Minería (MINERIA'2013) | <input type="checkbox"/> Feria/Exhibición GEOEXPO '2013 |

en calidad de: Delegado Expositor

Póster en IV Simposio de Riesgos Geológicos y Sismicidad

PELIGRO GEOLOGICO DE SECTORES DE LA PROVINCIA SANTIAGO DE CUBA.

Autores: Sandra Yanetsy Rosabal Dominguez.


Dr. Manuel A. Iturralde Vinent
Presidente del Comité Organizador de la Convención
Presidente de la Sociedad Cubana de Geología


Ing. Eric Escobar Pérez
Presidente del Comité Científico de la Convención

*"Las Geociencias al servicio
de la Sociedad y el Desarrollo"*



**XXXIII
CONVENCIÓN
PANAMERICANA
DE INGENIERÍAS**

CERTIFICADO

**UPADI
2012**

Título: *PELIGRO GEOLOGICO POR DESLIZAMIENTOS EN EL MUNICIPIO II PRENTE.*

Autor(es): *Sandra Rosabal Dominguez,*

Evento: *Congreso Medio Ambiente y Desarrollo Humano, MADEHUMAN 2012*

Aprobada y publicada en las Memorias del Evento con el ISBN 978-959-247-094-1 de la Editorial Obras

La Habana, 9-13 de abril de 2012


Ing. Irene Campos Gomez
Presidenta de UPADI


Ing. Antonio Caparo Marichal
Presidente de Comité Organizador


Ing. Elena Feliez Girón
Coordinadora del Programa Científico


Presidente del Evento



VI CONVENCION CUBANA DE CIENCIAS DE LA TIERRA

Exhibición de Productos, Nuevas Tecnologías y Servicios
Palacio de Convenciones, La Habana, Cuba
4 al 8 de mayo de 2015



CERTIFICADO

La Sociedad Cubana de Geología le otorga a:

Sandra Rosabal Domínguez

Por su participación en:

- XI Congreso Cubano de Geología (GEOLOGÍA'2015)
- V Congreso de Petróleo y Gas (PETROGAS'2015)
- VIII Congreso Cubano de Geofísica (GEOFÍSICA'2015)
- XII Congreso de Informática y Geodencias (GEOINFO'2015)
- VI Congreso Cubano de Minería (MINERÍA'2015)
- Feria/Exhibición GEOEXPO'2015

en calidad de: Delegado Expositor

Póster en VI Simposio de Riesgos Geológicos y Sismicidad

ESQUEMA SIMO - MORFOTECTÓNICO DEL SECTOR SIERRA MAESTRA CENTRAL.
SANTIAGO DE CUBA, CUBA

Autores: Sandra Rosabal Domínguez, Alina Rodríguez Infante, José A. Zapata Balanqué

Dr. Manuel A. Iturralde Vinent
Presidente del Comité Organizador de la Convención
Presidente de la Sociedad Cubana de Geología

Ing. Eric Escobar Pérez
Presidente del Comité Científico de la Convención
Vicepresidente Honorario de la Sociedad Cubana de Geología

*"Las Geociencias al servicio
de la Sociedad y el Desarrollo"*

se otorga el presente

CERTIFICADO

A: Sandra Y. Posada Bruneles, Ricardo Oiva Álvarez

por su participación en la IV Conferencia Internacional "Peligrosidad, Riesgo Geológico e Ingeniería Sísmica y de Desastres" en calidad de ponente.

Con el trabajo: Resumen de Tercer Taller de Nuevas Luchas en el Consenso Regional de América de Santiago de Cuba los días 2 y 3 de Junio de 2011

Dado en Santiago de Cuba, a los 11 días del mes de mayo de 2012

Aprobado y publicado en las memorias del evento con ISBN 978-959-207-446-1 en Ediciones UO

Sandra Y. Posada Bruneles

Ricardo Oiva Álvarez



Dra. Arq. Eisi María López Arias
Presidenta del Comité Organizador

Dra. C. Ing. Zenaida Pouletto Frómela Solís
Vice-presidenta del Comité Organizador

**ORGANO DE LA DEFENSA CIVIL
PROVINCIA SANTIAGO DE CUBA**

7 de Agosto del 2017
"Año 59 de la Revolución"

CERTIFICA

Por este medio comunicamos que la MSc. Sandra Yanetsy Rosabal Domínguez, Investigadora Auxiliar del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas de Cuba, ha presentado los resultados vinculados a su investigación doctoral titulada "**Evaluación de peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos, inducidos por la actividad sísmica en Cuba Oriental**". Los mismos están relacionados con tareas orientadas por el Gobierno y la Defensa Civil provincial en función de realizar los estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgo ante la ocurrencia de posibles desastres.

El estudio realizado por esta investigadora aporta nuevos mapas y complementa los estudios de peligros realizados para la provincia de Santiago de Cuba y Guantánamo, entre los que se encuentran:

1. Se obtienen nuevos mapas de susceptibilidad a los deslizamientos y licuefacción de suelos en los sectores Guamá, Santiago de Cuba y Guantánamo, a partir de la integración de métodos morfométricos, análisis sísmológico y tectónica activa.
2. La caracterización de fallas activas.
3. La obtención de tres esquemas morfotectónicos que incluye nueve bloques, de ellos siete en ascenso y dos en descenso relativos.

Los resultados presentados de susceptibilidad a la licuefacción de suelos y deslizamientos son de utilidad para ordenamiento del territorio, los proyectos constructivos y para puntualizar las medidas de defensa civil, son de apoyo en la precisión de los estudios PVR ejecutados y se presentan precisiones para las ciudades de Santiago de Cuba y Guantánamo y el poblado de Chivirico.

Las consideraciones presentadas reconocen la actualidad del tema presentado y reconocemos las potencialidades de empleo real de los resultados.

Atentamente


Tte Coronel Hernán Nieves Moya
Órgano de la Defensa Civil
Santiago de Cuba

Santiago de Cuba, 3 de Junio del 2016
"Año 58 de la Revolución"

Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba
(UNAICC)

CERTIFICA

Durante el Taller de Medio Ambiente de la Sociedad de Geociencias y Química aplicada a la Construcción, se presentó ante el grupo de expertos de la UNAICC el tema "Evaluación de peligros de remoción de masa y licuación de suelos inducidos por la actividad sísmica en Cuba Oriental", en opción al Grado de Doctor en Ciencias Técnicas, de la Aspirante MSc. Ing. Sandra Yanetsy Rosabal Domínguez fue presentado en nuestra Casa Sede como conferencia técnica el día 3 de Junio a las 5:00 pm, como invitada por la SIGEQ.

Las consideraciones expresadas por los presentes están dadas por el reconocimiento a la actualidad del tema presentado, las escalas de trabajo utilizadas en las tres áreas de detalle, permiten su empleo en evaluaciones detalladas para ordenamiento, posibilidad generalizar este conocimiento, por lo que consideramos hay potencialidades de empleo real de los resultados.

Atentamente



MsC. Ing. María Elena Luna Castellanos
Presidenta Provincial UNAICC Santiago de Cuba





Santiago de Cuba, 8 de agosto del 2017.
"Año 59 de la Revolución"

El Consejo Científico del Centro Nacional de Investigaciones
Sismológicas

CERTIFICA

que el Tema "**Evaluación de peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos, inducidos por la actividad sísmica en Cuba Oriental**", en opción al Grado de Doctor en Ciencias Técnicas, de la Aspirante **MSc. Ing. Sandra Yanetsy Rosabal Domínguez**, fue analizado y aprobado en nuestro Órgano Científico mediante el **Acuerdo No. CC-10-17**

Todo lo cual informamos para sus efectos correspondientes.

Sin otro asunto,


Dr. C. Tomás J. Chuy Rodríguez
Secretario CC del CENAI S


Dr. C. Bladimir Moreno Toirán
Presidente CC del CENAI S

