



**Instituto Superior Minero Metalúrgico  
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"**

**Facultad de Geología y Minería  
Departamento de Geología**

**TÍTULO: SUSCEPTIBILIDAD POR INESTABILIDAD  
DE TALUDES Y LADERAS EN EL VIAL " LA FAROLA "**

(Tesis en opción al título académico de Máster en Geología)

**Autor: Ing. Daubel Avila Méndez**

**Tutores: Msc. Amalia Beatriz Riverón Zaldivar**

**Msc. Ediviges Pérez Romero**



---

## RESUMEN

En los últimos años la identificación y estudio de los denominados Riesgos Geológicos ha sido tarea de primer orden para aquellos gobiernos cuya política ha contemplado un programa para el conocimiento, estudio y conservación del medio ambiente natural de manera sostenible. Los desastres naturales provocados por deslizamientos constituyen, de tales riesgos, uno de los más dañinos al hombre, y hoy tienen una mayor atención y divulgación por el carácter catastrófico de sus desenlaces; de aquí la importancia de su estudio y mitigación.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la susceptibilidad por desprendimiento de rocas en los taludes y laderas del vial "La Farola", ubicada en la carretera Guantánamo-Baracoa que permita prevenir los daños que pueden ocasionar los mismos así como obtener un plan de mitigación y gestión de los riesgos en el área.

La metodología empleada se fundamenta en la aplicación de un Sistema de Información Geográficas (SIG) para determinar y representar espacialmente las zonas susceptibles a la ocurrencia de deslizamientos a partir del análisis de los factores pasivos (pendiente del terreno, litología, tectónica, humedad del terreno) y desencadenantes (sismicidad y lluvia máxima 24 horas).

La combinación de estos factores permiten definir los distintos grados de susceptibilidad, expresándose los resultados de forma cartográfica mediante los mapas de susceptibilidad, los cuales son una herramienta útil para el ordenamiento ambiental y para la prevención de movimientos de masas que ocurren en esta zona.

### **PALABRAS CLAVES:**

La Farola, Talud y Laderas



## **SUMMARY**

In the last years the identification and study of the denominated Geologic Risks has been task of first order for those governments whose politics has contemplated a program for the knowledge, study and conservation of the natural environment in a sustainable way. The natural disasters caused by slips constitute, of such risks, one of the most harmful to the man, and today has a bigger attention and popularization for the catastrophic character of their outcomes; of here the importance of their study and mitigation.

The present work has as objective to evaluate the susceptibility for detachment of rocks in the banks and hillsides of the vial "La Farola", located in the highway Guantánamo-Baracoa that allows to prevent the damages that can cause the same ones as well as to obtain a mitigation plan and administration of the risks in the area.

The used methodology is based in the application of a Geographical System of Information (SIG) to determine and to represent the susceptible areas to the occurrence of slips starting from the analysis of the passive factors (slope of the land, litology, tectonic, humidity of the land) and desencadenantes (seismic and rain maximum 24 hours).

The combination of these factors allows to define the different grades of susceptibility, being expressed the results in a cartographic way by means of the maps of susceptibility, which are a useful tool for the environmental classification and for the prevention of movements of masses that it happen in this area.

### **KEYWORDS:**

Lake, banks, hillsides



## DEDICATORIA

*Dicen que el amor es la razón alrededor del cual gira la vida, lo cual que implica que todo lo que hagamos, por mínimo que sea, requiere de este preciado sentimiento. Es por ello que la realización de esta memoria la dedico a las personas que más quiero y aprecio en la vida.*

*A mi hijo Sian Stefan Avila Milán, que es y será mi razón de existir.*

*A mis padres Mirna Méndez Martínez, Fráncico Avila Bravo.*

*Hermanos. Judit Avila Méndez, Daniel Avila Méndez, Dariel Avila Méndez.*

*A mi Familia en general.*

*A mis Amigos: Yordan Pérez Caballero, Anika milan Fonseca, Alieskis Preval Guilson, Javier Perez Pereira, Nayibe olivares*

*A quienes quizás no he nombrado, gracias por contribuir a mi formación profesional y personal, le estaré eternamente agradecido.*

*A Clara Estrella Fonseca por brindarme su amor, y su apoyo incondicional.*



## AGRADECIMIENTOS

A mi mamá Mirna, mis hermanos Dariel, Daniel y Yudit por enseñarme mucho de la vida y brindarme su apoyo incondicionalmente en todo momento.

A los trabajadores de la Agencia GEOCUBA Guantánamo en especial Addel por aprobar la realización de esta maestría y Yordan Pérez Caballero sacándome siempre de mis aprietos.

A mi tutora Eduviges que cada día nos enseña con su experiencia y sabiduría.

A todos los profesores que participaron en esta maestría, compañeros, amigos y amigas con quienes compartí esta grata experiencia.

A las profesoras Alina y Beatriz, Carmenate, Pedro, Guardado, Yexenia, Liuska y Andro por siempre brindar sus conocimientos y apoyo incondicional. Personas como ustedes son imprescindibles en toda revolución.



## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>8</b>
1.1 Introducción .....	12
1.2 Factores condicionantes y desencadenantes de la inestabilidad del terreno. .....	14
1.3 Analisis de peligrosidad y riesgo a los deslizamientos. ....	16
1.4 Métodos de estimación de la susceptibilidad del terreno.....	18
1.5 La cartografía de susceptibilidad en Cuba.....	22
<b>CAPÍTULO II. UBICACIÓN Y CARACTERIZACION DEL ÁREA DE ESTUDIO .....</b>	<b>35</b>
2.1 Introducción .....	35
2.2 Ubicación y características físico-geográficas del área de estudio.....	35
2.3 Características geólogo - tectónicas de la región .....	41
2.4 Características geomorfológicas.....	51
2.4.1 Características sísmicas del área de estudio. ....	52
2.4.2 Procesos geodinámicos y antrópicos presentes en el área de estudio. .....	59
2.4.3 Conclusiones.....	62
<b>CAPÍTULO III – METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO POR INESTABILIDAD DE TALUDES Y LADERAS.....</b>	<b>63</b>
3.1 Introducción .....	63
3.2 Etapas para la determinación de la susceptibilidad por deslizamientos. ...	65
3.3 Factores que contribuyen con la ocurrencia de deslizamiento de tierra. ...	67
3.4 Conclusiones .....	78
<b>CAPITULO IV. EVALUACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR INESTABILIDAD DE TALUD Y LADERA EN UN TRAMO DEL VIAL LA FAROLA.....</b>	<b>78</b>
4.1 Introducción .....	78
4.2 Descripción de los deslizamientos.....	78



---

4.3 Mecanismos y tipologías de los movimientos de ladera presentes en los taludes de la carretera.....	99
4.4 Caracterización de los Mapas Temáticos.....	101
4.4.1 Factores Pasivos.....	101
4.5 Mapas de Susceptibilidad.....	116
4.6. Validación del modelo de susceptibilidad mediante el cálculo de estabilidad.....	120
4.7 Propuesta del plan de medidas para mitigar o prevenir los deslizamientos.....	136
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>137</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>139</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>140</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>142</b>



## INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daños en las propiedades por valor de decenas de billones de dólares cada año (Brabb-1989); sin embargo, muy pocas personas son conscientes de su importancia. El 90% de las pérdidas por deslizamientos son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se toman medidas de prevención o control.

Las zonas montañosas tropicales son muy susceptibles a sufrir problemas de deslizamientos de tierra debido a que generalmente, se reúnen cuatro de los elementos más importantes para su ocurrencia como son: la topografía, sismicidad, meteorización y lluvias intensas.

La mejor estrategia para reducir los impactos a los deslizamientos, es su prevención, que precisa de la percepción de la existencia del fenómeno peligroso, de la evaluación de la peligrosidad y la adopción de medidas para mitigar los efectos (Corominas, 1992). En este sentido la primera fase en la prevención del peligro a deslizamiento es la identificación y caracterización de éste. La caracterización del peligro se expresa usualmente de forma cartográfica mediante la zonación del territorio. Los mapas resultantes (mapas de susceptibilidad y mapas de peligrosidad) son una herramienta básica para la planificación del territorio (Irigaray et al., 2000), sobre todo, en zonas montañosas.

La presente investigación se realiza en la carretera Guantánamo – Baracoa en el Viaducto "La Farola", perteneciente al municipio de Imías-Baracoa, ubicado en la región oriental de Cuba, siendo unos de los municipios de la provincia Guantánamo que más se ven afectados por fenómenos naturales por sus características topográficas, geológicas y climáticas, presentando áreas vulnerables a ser afectadas



por deslizamientos de rocas que en la mayoría de los casos provoca su aislamiento con la ciudad de Guantánamo.

Este trabajo estará organizado mediante cuatro capítulos.

**Capítulo I.** Basamento Teórico de la Investigación que comprenderá la descripción de los factores condicionantes y desencadenantes de la inestabilidad del terreno, análisis de peligrosidad y riesgos a los deslizamientos, métodos de estimación de la susceptibilidad del terreno, así como parámetros a considerar en el campo.

**Capítulo II.** Ubicación y caracterización del área de estudio, de los cuales se describirán los aspectos físico natural, descripción geológica-tectónica de la región, características geomorfológicas del área, características sísmicas y los procesos geodinámicos y antrópicos presentes en el área de estudio.

**Capítulo III Metodología de la Investigación:** En este capítulo se desarrolla detalladamente la metodología utilizada durante la investigación, se explican los materiales, métodos y programas utilizados para

**Capítulo IV. Análisis y Discusión de los Resultados:** en ella se detallarán los resultados obtenidos de los análisis de mecanismos y tipologías de los movimientos de ladera presentes en los taludes de la carretera, factores pasivos y disparo.

**Conclusiones.**

**Recomendaciones.**

**Bibliografía.**

**La justificación del tema**

La presente investigación se realiza en la carretera Guantánamo – Baracoa en el Viaducto "La Farola", perteneciente al municipio de Imías - Baracoa, ubicado en la región oriental de Cuba, siendo uno de los municipios de la provincia Guantánamo que más se ven afectados por fenómenos naturales por sus características topográficas, geológicas y climáticas, presentando áreas vulnerables a ser afectadas por deslizamientos de rocas que en la mayoría de los casos provoca su aislamiento con la ciudad de Guantánamo.



## **PROBLEMA**

La necesidad de evaluar la susceptibilidad **de los taludes y laderas** inestables en el viaducto "La Farola", que provocan frecuentes deslizamientos de rocas que ponen en riesgo la vida de las personas, y la funcionalidad de la vía.

## **OBJETO DE ESTUDIO**

Susceptibilidad por inestabilidad de taludes y laderas en el viaducto "La Farola" en el municipio Imías-Baracoa

**CAMPO:** movimientos de masas en los taludes y laderas en el viaducto "La Farola" en el municipio Imías-Baracoa

## **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la susceptibilidad por inestabilidad de taludes y laderas en el viaducto "La Farola" en el municipio Imías-Baracoa con vista a un plan de mitigación y gestión de los riesgos en el área.

## **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- ✓ Recopilar, Estudiar, revisar, y analizar los trabajos precedentes a la investigación en curso.
- ✓ Caracterizar los fenómenos de inestabilidades de laderas y taludes en el área.
- ✓ Evaluar la susceptibilidad por inestabilidad de ladera y taludes teniendo en cuenta los factores condicionantes de los movimientos.
- ✓ **Proponer plan de gestión de peligrosidad.**

## **HIPOTESIS**

**Si se conoce la disposición espacial de los deslizamientos en el área de estudio, así como la tipología y mecanismos que los gobiernan, la influencia que sobre estos**



tienen los factores condicionantes naturales y constructivos, es posible obtener el mapa de susceptibilidad del terreno por deslizamientos en el viaducto " La Farola ".

### **APORTES CIENTÍFICOS**

- ✓ Caracterización de los factores condicionantes de los deslizamientos y su influencia sobre su desarrollo y manifestación espacial del vial La Farola.
- ✓ Obtención y valoración del mapa de susceptibilidad del terreno por deslizamientos en el área de estudio.

### **FUNDAMENTO METODOLÓGICO.**

Para la evaluación del grado de susceptibilidad del terreno frente a deslizamientos se tuvieron en cuenta aquellos factores que influyen en la inestabilidad del medio, los cuales fueron caracterizados por los mapas temáticos de factores pasivos y desencadenantes obteniéndose como resultado los mapas de susceptibilidad.

Los factores pasivos que se tuvieron en cuenta para esta investigación fueron: pendiente, tectónica, litología y humedad de terreno y los factores desencadenantes: la sismicidad y lluvias intensas (100 mm de lluvias 24 horas).

Toda la información digital existente es procesada sobre un Sistema de Información Geográfico, donde es valorada y clasificada para cada mapa temático (factores pasivos y factores desencadenantes), convirtiéndose en formato raster, para la obtención del plano resultante de susceptibilidad del área.

El resultado de esta investigación pueden ser utilizados por la Defensa Civil, Poder Popular, Delegación territorial del CITMA, responsables del monitoreo y prevención de los desastres ocasionados por fenómenos naturales como los deslizamientos.

## CAPÍTULO I – MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.1 Introducción

Los movimientos de ladera o deslizamientos constituyen un riesgo geológico (Ayala et al., 1987) de origen natural o inducido, que debe tenerse en cuenta en la planificación del territorio, sobre todo en áreas de montaña.

Sharpe en 1938 definió los deslizamientos como la caída perceptible o movimiento descendente de una masa relativamente seca de tierra, roca o ambas. Según Crozier (1986) un deslizamiento se define como el movimiento gravitacional hacia el exterior de la ladera y descendente de tierras o rocas sin la ayuda del agua como agente de transporte.

Existen varias clasificaciones de deslizamientos, basadas todas ellas en el mecanismo de rotura y la naturaleza de los materiales involucrados (Varnes, 1984; Hutchinson, 1988; WP/WLI, 1993; Cruden y Varnes, 1996). La clasificación utilizada es la propuesta por Corominas y García (1997), siendo los mecanismos de rotura el criterio básico que permite separar los distintos tipos de deslizamientos en la mayoría de las clasificaciones. Se pueden encontrar cinco mecanismos principales:

- Desprendimiento: es aquel movimiento de una porción de suelo o roca, en forma de bloques aislados o masivamente que, en una gran parte de su trayectoria desciende por el aire en caída libre, volviendo a entrar en contacto con el terreno, donde se producen saltos, rebotes y rodaduras (figura 1).

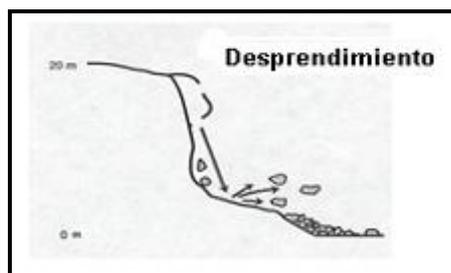


Fig. 1 Desprendimiento de rocas en el talud

- Vuelcos: son movimientos de rotación hacia el exterior, de una unidad o de un conjunto de bloques, alrededor de un eje pivotante situado por debajo del centro de gravedad de la masa movida. (figura 2).

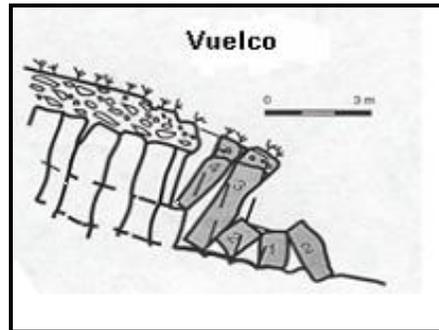


Fig. 2 Deslizamiento tipo vuelco

- Deslizamientos: son movimientos descendentes relativamente rápidos de una masa de suelo o roca que tiene lugar a lo largo de una o varias superficies definidas que son visibles o que pueden ser inferidas razonablemente o bien corresponder a una franja relativamente estrecha. Se considera que la masa movilizada se desplaza como un bloque único, y según la trayectoria descrita los deslizamientos pueden ser rotacionales, (figura 3)

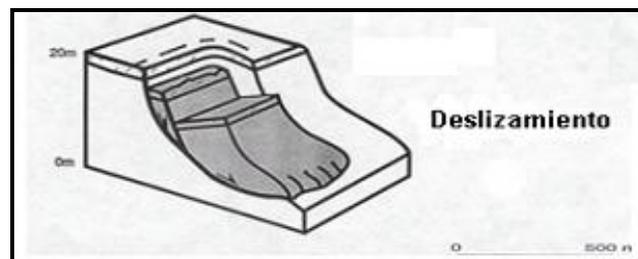


Fig. 3 Deslizamientos rotacionales

- Expansiones laterales: el movimiento dominante es la extrusión plástica lateral, acomodada por fracturas de cizalla o de tracción que en ocasiones pueden ser de difícil localización. (figura 4)

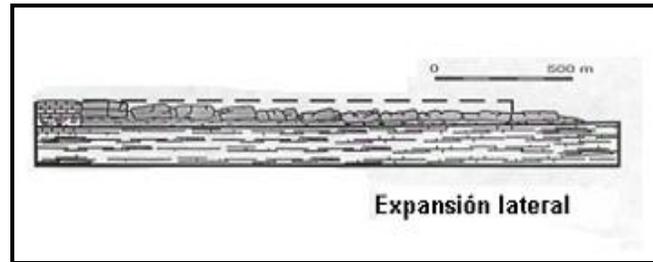


Fig. 4 Deslizamiento de expansión lateral

- Flujos: son movimientos de una masa desorganizada o mezclada, donde no todas las partículas se desplazan a la misma velocidad ni sus trayectorias tienen que ser paralelas. Debido a ello la masa movida no conserva su forma en su movimiento descendente, adoptando a menudo morfologías lobuladas, (figura 5).

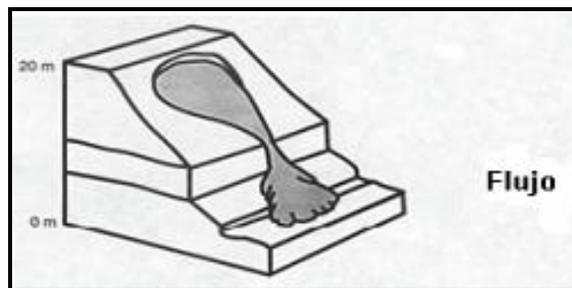


Fig. 5 Deslizamiento de flujos

## 1.2 Factores condicionantes y desencadenantes de la inestabilidad del terreno.

Los movimientos gravitacionales de masa, pueden ocurrir tanto por fenómenos de dinámica natural como por procesos inducidos artificialmente. Existen dos tipos de factores asociados a los movimientos de masa, estos son los factores condicionantes o factores desencadenantes

Factores condicionantes son aquellos factores intrínsecos que condicionan el suelo o roca, estos pueden ser: litológicos, estructurales (discontinuidades), presencia de agua, sismicidad y topografía.

Factores desencadenantes son aquellos factores que aceleran o retardan la ocurrencia del fenómeno, estos se dan por intervención antrópicas como:



excavaciones, voladuras, sobrecarga, urbanismos, procesos industriales, actividad minera a cielo abierto y subterráneo, cortes al pie de los taludes o laderas, aumento de la sobrecarga en la cresta y por fenómenos geodinámicos, precipitaciones intensas y prolongadas, sismicidad y vulcanismo.

La estabilidad de las laderas está condicionada por la acción simultánea de una serie de factores. Desde un punto de vista físico, los deslizamientos se producen como consecuencia de los desequilibrios existentes entre las fuerzas que actúan sobre un volumen de terreno. Los factores que influyen en la estabilidad de las laderas se pueden separar en dos grandes grupos (Ferrer, 1987, Alcántara, 2000): factores internos y externos.

Factores internos, condicionan las diferentes tipologías de deslizamiento, los mecanismos y modelos de rotura. Dentro de ellos se encuentran características intrínsecas, relativas a las propiedades del material y a su resistencia y las características extrínsecas relacionadas con la morfología y condiciones ambientales de la ladera. Las primeras incluyen parámetros como la litología (textura, granulometría, cementación), consolidación y espesor de los materiales y parámetros estructurales relativos a planos de estratificación y de debilidad (diaclasas, fallas y fracturas). En las características extrínsecas se encuentran las morfológicas como la pendiente de la ladera y su disposición respecto a discontinuidades geológicas y la orientación, y factores de tipo ambiental como cambios estacionales de temperatura y tipo de vegetación. La pendiente del terreno así como la morfología propia de la ladera es un factor y condicionante previo a partir del cual el resto de factores se combinarán influyendo en la estabilidad

Los factores externos actúan sobre el material y dan lugar a modificaciones en las condiciones iniciales de las laderas, provocando o desencadenando las roturas debido a las variaciones que ejercen en el estado de equilibrio. Tres tipos de acciones se incluyen: la infiltración de agua en el terreno, las vibraciones y las modificaciones antrópicas. La infiltración de agua provoca el aumento de la presión intersticial disminuyendo la resistencia de los materiales. La relación entre ocurrencia



de deslizamientos y períodos lluviosos es bien conocida. Las variaciones del nivel de agua subterránea pueden ser debidas a intensas precipitaciones, intervenciones humanas, etc. Las vibraciones provocan aceleraciones en el terreno, favoreciendo la rotura y la licuefacción. Éstas pueden ser debidas a movimientos sísmicos naturales o inducidos por el hombre, como explosiones mineras o por obras públicas. La sacudida debida a terremotos naturales es uno de los principales agentes que generan deslizamientos, siendo capaces en el caso de los terremotos más grandes, de desencadenar miles de deslizamientos a lo largo de áreas de más de 100.000 km<sup>2</sup> (Keefer, 1984). Las actividades humanas alteran el equilibrio de las laderas debido a cargas estáticas, provocadas por construcciones de edificios, construcciones de taludes para vías de comunicación, explotaciones mineras y construcciones de presas. Asimismo los cambios en el recubrimiento vegetal como la tala de bosques, la repoblación con especies alóctonas e incendios forestales también influyen en la estabilidad de las laderas.

El tiempo es un parámetro fundamental que determina el factor de seguridad en los taludes, el cual influye sobre aspectos como la geometría del talud, la resistencia del material y la oscilación de los niveles piezométricos (Alonso, 1986) observándose en la distinción entre estabilidad a corto, medio y largo plazo. Algunos de los factores definidos anteriormente cambian con el tiempo.

Aunque no se puede incluir como factor, existe un parámetro fundamental a tener en cuenta en la estabilidad, y que determina el factor de seguridad en los taludes: el tiempo. Éste influye sobre aspectos como la geometría del talud, la resistencia del material y la oscilación de los niveles piezométricos (Alonso, 1986). Su influencia se observa en la distinción entre estabilidad a corto, medio y largo plazo.

### **1.3 Analisisde peligrosidad y riesgo a los deslizamientos.**

Como ya se ha comentado los deslizamientos son procesos naturales que conllevan un riesgo geológico nada despreciable. Aunque el peligro de producir roturas en un lugar sea muy alto, el riesgo no lo será si ello no produce daños en la población o en las infraestructuras. El riesgo trae consigo la existencia de un peligro, pero un



fenómeno peligroso no conduce necesariamente a un riesgo para la población. Los siguientes conceptos basados en Varnes (1984) definen bien la relación entre peligrosidad y riesgo.

- Peligrosidad (P): es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente perjudicial dentro de un período de tiempo determinado y en un área específica.
- Vulnerabilidad (V): es el grado de pérdida provocado por la ocurrencia de un fenómeno natural de una magnitud determinada sobre un elemento o conjunto de elementos.
- Riesgo específico (Rs): es el grado de pérdida esperado debido a un fenómeno natural y se expresa como el producto de P por V.
- Los elementos bajo riesgo (E): son la población, las propiedades, etc.
- Riesgo total (Rt): corresponde al número de vidas pérdidas, daños a la propiedad y a las personas, etc. debidas a un fenómeno natural concreto. El riesgo total se define como el producto del riesgo específico y de los elementos bajo riesgo como se observa en la siguiente expresión:

$$R_t = E * R_s = E * (P * V)$$

El primer paso en la evaluación del riesgo consiste en la estimación de la peligrosidad a roturas de laderas y ésta, a su vez, se evalúa determinando los siguientes aspectos (Varnes, 1984; Corominas, 1987; Hartlén y Viberg, 1988)

1. Evaluar la susceptibilidad de la ladera a las roturas por deslizamientos
2. Determinar el comportamiento del deslizamiento (movilidad y dimensiones del mismo)
3. Establecer la potencialidad del fenómeno (probabilidad de ocurrencia).

El término susceptibilidad hace referencia a la predisposición del terreno a la ocurrencia de deslizamientos y no implica el aspecto temporal del fenómeno (Santacana, 2001). La mayor parte de estudios de peligrosidad evalúan únicamente



la susceptibilidad a la rotura, siendo pocos los que estudian el peligro de alcance por deslizamientos y reduciéndose aún más los que establecen la potencialidad.

#### 1.4 Métodos de estimación de la susceptibilidad del terreno

Existen diversas aproximaciones para evaluar el grado de susceptibilidad del terreno frente a los deslizamientos basadas en su mayoría en la determinación de los factores que influyen en la aparición de las roturas. Estos factores se combinan para definir los distintos grados de susceptibilidad, expresándose los resultados de forma cartográfica mediante los mapas de susceptibilidad.

La clasificación de los métodos empleados para evaluar la susceptibilidad a la rotura de una ladera así como para la realización de mapas, varían según los autores (Hansen, 1984; Hartlén y Viberg, 1988; Corominas, 1987 y 1992; Van Westen, 1993 y 1994; Carrara et al., 1995; y Leroi, 1996). Existen cuatro principales procedimientos utilizados en la evaluación y confección de mapas de susceptibilidad del terreno: métodos determinísticos, heurísticos, probabilísticos y geomorfológicos.

**Los métodos determinísticos** se utilizan para el estudio de la estabilidad de una ladera o talud concreto. Se fundamentan en métodos basados en el equilibrio límite o en modelos numéricos teniendo, pues, una base física, lo que es de una gran ventaja respecto a otros métodos. Los datos de entrada son derivados de ensayos de laboratorio y se utilizan para determinar el factor de seguridad de la ladera. El método más usual se aplica para deslizamientos traslacionales utilizando el modelo de talud infinito (Ward et al, 1982; Brass et al, 1989; Murphy y Vita-Finzi, 1991). Estos métodos generalmente requieren el uso de modelos de simulación del agua subterránea (Okimura y Kawatani, 1986). A veces se utilizan métodos estocásticos para seleccionar los parámetros de entrada (Mulder y Van Asch, 1988; Mulder, 1991; Hammond et al, 1992). Estos muestran un grado de fiabilidad alto en el caso en que los datos utilizados sean correctos. Su principal inconveniente es su baja idoneidad para zonificaciones rápidas y áreas extensas – regionalización- (Van Westen, 1993).

**Los métodos heurísticos** se basan en el conocimiento a priori de los factores que producen inestabilidad en el área objeto de investigación. Los factores son



ordenados y ponderados según su importancia asumida o esperada en la formación de deslizamientos (Carrara et al., 1995). Estos métodos permiten la regionalización o estudio a escala regional y son adecuados para aplicaciones en el campo de los sistemas expertos (Carrara et al., 1995). El principal inconveniente radica en que en la mayor parte de los casos, el conocimiento disponible entre los factores ambientales que pueden causar inestabilidad y los deslizamientos es inadecuado y subjetivo, dependiendo de la experiencia del experto.

**Las aproximaciones probabilísticas** se basan en las relaciones observadas entre cada factor y la distribución de deslizamientos actual y pasada (Carrara et al., 1995). Dentro de este grupo se encuentran los métodos estadísticos y el análisis de frecuencia de deslizamientos. Son métodos indirectos cuyos resultados se pueden extrapolar a zonas distintas de las utilizadas para estimar la susceptibilidad, con condiciones geológicas y climáticas homogéneas. Estas aproximaciones permiten regionalizar los resultados. Se utilizan cuando se dispone de abundante información, tanto cualitativa como cuantitativa, aplicándose los modelos estadísticos que pueden ser univariantes y multivariantes. La principal ventaja es la objetividad del método. La potencia de los métodos estadísticos depende directamente de la calidad y cantidad de los datos adquiridos. El coste de la adquisición de algunos factores relacionados con la inestabilidad de laderas es el principal inconveniente.

**Los métodos estadísticos univariantes** se dividen en dos grupos: los que utilizan el análisis condicional y los que no lo utilizan. El análisis condicional, trata de evaluar la relación probabilística entre diversos factores relevantes para las condiciones de inestabilidad y las ocurrencias de deslizamientos. Se basan en la superposición de uno o más factores con el mapa de distribución de deslizamientos, para obtener una probabilidad condicionada de cada factor a la presencia o ausencia de deslizamientos (Chung y Fabbri, 1993; Chung y Leclerc, 1994). Los resultados se interpretan en términos de probabilidad según el teorema de Bayes (Morgan, 1968; Chung y Leclerc, 1994), certeza (Heckerman, 1986; Luzi y Fabbri, 1995), según conjuntos difusos (Zadeh, 1965, 1978; MahdaviFar, 2000) o según plausibilidad



(Shafer, 1976). Otros modelos estadísticos, no basados en las funciones de favorabilidad, son el modelo basado en la combinación de tres factores en Brabb et al. (1972) considerado como el primer análisis cuantitativo de susceptibilidad a deslizamientos y su modificado (Irigaray, 1990), el modelo del valor de información (Yin y Yan, 1988; Kobashi y Suzuki, 1991; Irigaray, 1995), el modelo de mensaje lógico (Runqiu y Yuangua, 1992) entre otros.

Los métodos estadísticos multivariantes estudian la interacción y dependencia de un conjunto de factores que actúan simultáneamente en la ocurrencia de deslizamientos, para establecer la implicación que tienen cada uno de ellos. Las técnicas estadísticas más utilizadas son la regresión múltiple y el análisis discriminante (Jones et al., 1961; Neuland, 1976; Carrara, 1983 a y b; Mulder, 1991; Mora y Vahrson, 1994; Baeza, 1994; Irigaray, 1995; Chung et al., 1995; Dhakal et al., 2000). El resultado de ambos métodos son funciones basadas en la combinación lineal de los factores de mayor significación estadística, para definir las condiciones de inestabilidad, estando basadas en la presencia-ausencia de deslizamientos.

El análisis de frecuencia de deslizamientos (Van Westen, 1993), evalúa la peligrosidad a los deslizamientos, a diferencia de los anteriores, que suelen utilizarse para evaluar la susceptibilidad. La valoración de la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento en un cierto lugar y dentro de un periodo de tiempo, sólo es posible cuando se puede hallar la relación entre la ocurrencia de deslizamientos y la frecuencia de factores desencadenantes como lluvias intensas o terremotos (Van Westen, 1993).

**Los métodos geomorfológicos** se basan en la determinación de condiciones de inestabilidad de ladera mediante técnicas geomorfológicas, cartografía y zonificación. Son métodos directos que se basan en cartografía geomorfológica a partir de la cual el autor identifica y localiza los deslizamientos y procesos asociados a éstos directamente en el campo. Con las observaciones, el experto extrae unos criterios para la determinación de áreas potencialmente inestables y para la confección del mapa de susceptibilidad y/o peligrosidad final. La elaboración de estos mapas exige



conocer la morfología y tipología de movimientos (Hansen, 1984; Hansen y Frank, 1991). La principal ventaja es la validez y detalle del análisis y mapa resultantes, en el caso de estar realizados por un buen experto. El inconveniente de estos métodos es el alto grado de subjetividad dependiente de la experiencia del autor.

Cuando se preparan mapas de susceptibilidad, se debe valorar la influencia que un número de factores incidirá en la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos (Rengers et al., 1992). Cuanto más detallado sea el mapa más factores deberán ser estudiados. La escala de análisis es uno de los primeros puntos a considerar en un proyecto. De ella dependerá la metodología utilizada, los factores o datos considerados, la unidad de terreno etc. en general, se pueden distinguir tres escalas (IAEG, 1976) para la zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos:

- 2 - Escala regional (< 1:100.000)
- 3 - Escala media (1:25.000 a 1:50.000)
- 4 - Gran escala (1:5.000 a 1:10.000)
- 5 - Escala detallada (> 1:5.000), que se puede añadir a las tres anteriores (Luzi (1995).

**En la escala regional** los mapas se usan para identificar áreas con problemas de deslizamiento de una forma genérica. Son utilizados por organizaciones que trabajan con planificación regional (Luzi, 1995; Rengers et al., 1992). Utilizan métodos semicuantitativos como la superposición de mapas, y las unidades del terreno se basan en características morfológicas obtenidas de imágenes estereográficas a pequeña escala (1:60:000 a 1:50.000) (Rengers et al., 1992).

**La escala media** es utilizada para planificación intermunicipal y para estudios ingenieriles locales. Se emplean distintos métodos analíticos, principalmente estadísticos, así como modelos digitales de elevaciones detallados y otros mapas temáticos. Se usan imágenes estereográficas a escalas 1:15.000 a 1:25.000 (Rengers, et al., 1992). Los métodos estadísticos de análisis de susceptibilidad son apropiados para esta escala (Mulder, 1991; Dhakal et al., 2000).



**Los mapas a gran escala** son creados para estudiar problemas locales de inestabilidad, para planificar infraestructuras de proyectos de edificios e industriales (Luzi, 1995). Los métodos de análisis utilizados son métodos cuantitativos que incluyen estadística multivariante y modelos numéricos de estabilidad. Esta escala requiere información cartográfica de muy buena calidad, así como imágenes estereográficas de 1:5000 a 1:10.000) (Rengers et al., 1992). Finalmente, la escala detallada es utilizada por compañías o administraciones municipales que evalúan la susceptibilidad de áreas concretas de diversas hectáreas de tamaño máximo (Luzi, 1995).

### **1.5 La cartografía de susceptibilidad en Cuba**

Durante la ejecución de la investigación se consultaron trabajos realizados en diferentes lugares del territorio nacional, así como algunos desarrollados en el municipio Baracoa, relacionados con la aplicación de la cartografía digital en la evaluación de susceptibilidad, peligrosidad o riesgos geológicos.

Del Puerto J. A. y Ulloa D. (2003) realizan el cartografiado de la distribución espacial de los peligros naturales y la clasificación de la cuenca de Santiago de Cuba a partir del predominio de los tipos de peligros que pueden llegar a ocurrir en determinados sectores del mismo. La investigación está sustentada en la elaboración e interpretación de mapas morfométricos y como resultados obtienen el mapa tipológico de peligros y de regionalización, sin embargo estos no son validados con algún mapa de inventarios de fenómenos del área en cuestión.

Chang J. L. et al (2003) muestra una aplicación de datos geofísicos regionales como datos  $\gamma$ -espectrométricos aéreos dado la distribución espacial de los radioelementos naturales en el medio, identificando sitios potencialmente favorables para la ocurrencia de deslizamientos como información complementaria en el análisis de susceptibilidad de terrenos a la rotura por el desarrollo de deslizamientos.

Castellanos Abella, E. (2003) realiza la cartografía y evaluación de amenazas a deslizamientos de terreno en dos sectores de Cuba oriental. En este trabajo se



realizó un levantamiento geomorfológico semi-detallado creándose un mapa de unidades de terreno con una extensa base de datos asociada. Se fotointerpretaron más de 50 deslizamientos de terreno o parte de ellos y se creó una base de datos asociada donde se describen los mismos. Para hacer la evaluación de amenaza se creó un modelo heurístico y se aplicaron técnicas de soporte de decisión espacial asignándole peso a cada clase de cada variable para obtener un Mapa de Amenaza de Deslizamiento de Terreno una discusión sobre los aspectos que hay que tener en cuenta para la cartografía y evaluación de amenaza a deslizamientos de terreno. En el 2006 trabaja en la evaluación nacional de riesgo de deslizamiento de terreno, una importante investigación a partir de la cual se obtuvo el mapa de índice de riesgo nacional de deslizamiento de terreno. Este trabajo explica el procedimiento llevado a cabo para realizar la evaluación nacional de 110,860 km<sup>2</sup>, que abarca el archipiélago cubano con una resolución espacial de 90 m. Se diseñó e implementó un modelo de evaluación de riesgo de deslizamientos de terreno semicuantitativo con 11 indicadores empleando técnicas multi-criterio en un Sistema de Información Geográfica. Cada indicador fue procesado, analizado y estandarizado acorde al modelo. Se les asignó peso a los indicadores empleando los métodos directos, comparación pareada y ordenamiento para obtener el mapa de índice de riesgo de deslizamiento. El promedio de índice de riesgo de deslizamiento final fue de 0.12 (Desviación Estándar: 0.06) con valores en el rango desde 0.0216 a 0.4600. Los resultados fueron analizados por regiones fisiográficas y límites administrativos (provincial y municipal). Esta investigación reflejó que por ejemplo la Sierra Maestra tiene la mayor concentración de valores de índice de riesgo de deslizamientos de terreno, mientras que el sistema Nipe-Cristal-Baracoa tiene los valores más altos pero más dispersos. Se reconocieron las provincias y municipios en estas áreas con altos valores de índice de riesgo promedio y con mayor cobertura. Los resultados obtenidos permiten diseñar un apropiado plan de mitigación de riesgo de deslizamientos de terreno a nivel nacional.

Más tarde en el año 2007 realiza una caracterización de deslizamientos aplicando técnicas geofísicas en la zona del valle de Caujerí, provincia Guantánamo.



Guardado et al., (2000) desarrollan un Sistema de Información Geográfica (SIG) que permite cartografiar el medio natural y pone de manifiesto las características geoambientales del territorio, lo que proporciona una imagen global de sus potencialidades, grado de deterioro y vulnerabilidad ante procesos y fenómenos naturales y antrópicos que producen peligros y riesgos geoambientales en un sector de la zona costera y urbana de la ciudad de Moa. Como resultado se obtiene el mapa de riesgo geológico mediante la combinación de los mapas de vulnerabilidad de las obras ingenieriles, inestabilidad tectónica y amenaza geológica, determinándose que las áreas de mayor riesgo coinciden con aquellas donde las estructuras son desfavorables o poco competentes y las amenazas geológicas son altas.

Vega M. B. (2005), quién realiza una aplicación de un SIG en la obtención de un mapa de erosión de Cuba a escala 1:250 000 a través del análisis de varios factores como la lluvia, la escorrentía, el relieve, las propiedades del suelo, dirección del flujo, y el flujo acumulado. Rodríguez W. y Valcarce R. M. (2005) realizan una evaluación de la peligrosidad del territorio nacional cubano frente a inundaciones, utilizando una combinación de factores como pendiente del terreno, especialmente su horizontalidad; geomorfología, tipo y calidad del suelo, hidrología y extensión de las inundaciones, así como la frecuencia e intensidad de las precipitaciones históricas.

Pedroso I. I. et al (2005) hace una valoración de los Peligros, la Vulnerabilidad y los Riesgos Geólogo-Geofísicos y Tecnológicos del municipio Playa, Ciudad Habana, partiendo de la caracterización del medio físico, el medio construido, el medio socio-económico del mismo y la precisión de los Escenarios de Peligros, lo que permitió obtener información sobre las características de los elementos disparadores como los sismos, las lluvias intensas y los fuertes vientos, potenciales generadores de terremotos, deslizamientos, hundimientos, inundaciones y penetraciones del mar.

Cuevas J. L. et al (2005) realizan el estudio de los riesgos geólogo-geofísicos y tecnológicos inducidos por deslizamientos, inundaciones, lluvias y sismos, en condiciones de montaña y valles colindantes al macizo Guamuaya (Cienfuegos). El estudio parte de la identificación, observación, estudio, modelación, monitoreo de los



fenómenos, evaluación de las técnicas a aplicar en diferentes zonas para la estimación de los peligros, la vulnerabilidad y los riesgos naturales a las que están sometidas las diferentes comunidades sociales, industrias y en general la infraestructura construida por el hombre y el propio medio físico del área de estudio. Una vez realizado este análisis y partiendo de los mapas de peligros múltiples y las probabilidades de ocurrencia de los distintos eventos peligrosos que se obtuvieron se confeccionó un SIG que mostró de forma representativa los principales riesgos bajo las diferentes limitantes.

Carreño B. et al (2005) realizan un pronóstico de deslizamientos con el empleo de sistemas computarizados, aplicando criterios geomorfológicos clásicos para la determinación de los alineamientos procesados con la utilización del modelo digital del terreno, obteniendo finalmente el análisis cinemático de los alineamientos que resultan potencialmente propensos a comportarse como fallas estructurales, confeccionándose el mapa con las probables estructuras tectónicas y el esquema de zonificación de probables movimientos de masas, sin embargo no presentan un mapa de fenómenos o inventario de deslizamientos de la zona estudiada para la validación del mapa obtenido.

Castellanos E. (2005) muestra los resultados de un procesamiento de datos del SRTM para el Archipiélago Cubano, el análisis para producir los mapas derivados del Modelo de Elevación Digital (DEM) y la evaluación geomorfométrica de amenaza de deslizamiento de terreno. El análisis y procesamiento se realiza empleando técnicas SIG y software de sensores remotos. La cartografía de susceptibilidad del Archipiélago de Cuba la realiza empleando mapas derivados del DEM como el ángulo de la pendiente y el relieve interno (disección vertical) mostrando las áreas donde los deslizamientos de terreno pueden ocurrir con mayor posibilidad donde los factores morfométricos tienen los valores más altos, sin embargo el procedimiento de ponderación de cada factor analizado no se realiza teniendo en cuenta la distribución areal de los movimientos de masas, sino, que se hace referencia solamente a la coincidencia con los sistemas montañosos del país y se obtiene por los rangos que



podrían provocar en mayor o menor medida roturas en laderas según el criterio del autor.

Febles D. y Rodríguez J. (2005) presentan un mapa susceptibilidad a los deslizamientos de Cuba a escala 1: 250 000, donde precisan las áreas más propensas a este fenómeno a lo largo del territorio nacional, utilizando como factores condicionantes la pendiente del relieve topográfico, composición de las rocas y/o suelos, condiciones tectónicas, el efecto antrópico (densidad de población y densidad de carreteras y caminos) y el régimen de precipitaciones.

Rocamora E. (2005), detalla varios criterios de roturas por desprendimientos de bloques, detallados a partir de la modelación de dos casos de estudio, la Sierra de los Órganos y el noreste de la provincia de La Habana, identificando cuestiones fundamentales en el estudio de estos movimientos de masas como herramienta de pronóstico de la ocurrencia de los fenómenos, evaluación del peligro potencial que ellos representan y su alcance espacial, y método óptimo para el diseño de las medidas ingenieriles de contención del peligro.

Reyes C. R. et al (2005) realizan un análisis del comportamiento de los factores pasivos (el relieve, características geológicas y geotécnicas de las formaciones) y activos (Criterio magnitud-distancia), que actúan en la estabilidad de los suelos y rocas en las provincias orientales de Cuba, proponiendo un esquema de zonación de acuerdo a la susceptibilidad de ocurrencia de deslizamientos o derrumbes en los taludes de las carreteras provocados por terremotos de gran o mediana intensidad, atendiendo al relieve, constitución geológica y criterios del Manual de Zonación de Peligros Sísmico Geotécnicos. Como factores desencadenantes de los deslizamientos incluye los sismos y la influencia de las precipitaciones, considerado este último el más importante agente catalizador de este fenómeno.

Almaguer .Y (2005) realiza una evaluación de los niveles de susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos en el yacimiento Punta Gorda en el municipio Moa, estableciendo criterios de estabilidad de taludes y laderas como base para futuras evaluaciones de riesgos para prevenir o mitigar los daños



derivados de estos fenómenos. Además utiliza un Sistema de Información Geográfico, en el que se integra la información de todos los factores condicionantes que influyen en las inestabilidades de las laderas y taludes de este yacimiento.

Cabrera J. (2005) muestra en términos generales, un catastro ingeniero-geológico de la provincia de Pinar del Río sobre la base de una evaluación teórica de los factores a tomar en cuenta en la evaluación de las condiciones ingeniero geológicas de los territorios. Establece criterios, definiciones y consideraciones de como tomarlos en cuenta en función de su nivel de importancia partiendo de la derivación e integración de los factores involucrados, definiéndose a su vez los resultados cartográficos a obtener con cada acción. El análisis parte de considerar que la evaluación de las condiciones ingeniero-geológicas está en función de la influencia que ejercen sobre el medio, las condiciones naturales como el clima, relieve y condiciones geomorfológicas, condiciones tectónicas y de estratificación, particularidades litólogo-petrográficas de las rocas, condiciones hidrogeológicas, fenómenos físico-geológicos y la infraestructura económica. El método adoptado se basa en la obtención de una serie de mapas a partir de la reclasificación y superposición de dos mapas temáticos básicos, el topográfico y el geológico.

Bonachea J. (2006) desarrolla un procedimiento para evaluar el riesgo por deslizamientos basado en modelos probabilísticos de susceptibilidad y en modelos de peligrosidad, que incorporan una serie de escenarios que consideran el comportamiento del proceso en el futuro. Dichos escenarios suponen que la influencia humana, directa o indirecta, como factor desencadenante, probablemente, se incremente en el futuro, como muestran las relaciones observadas en el pasado entre frecuencia de deslizamientos y factores socioeconómicos.

El análisis de susceptibilidad se ha llevado a cabo a partir de la correlación existente entre los deslizamientos superficiales y una serie de parámetros relacionados con la inestabilidad: geometría del terreno, usos del suelo, geología, geomorfología, espesor de regolito y distancia a ríos y fallas. Los análisis de relaciones estadísticas se han realizado en el marco de las Funciones de Favorabilidad (FF). Para modelizar



el comportamiento futuro de las laderas, ha sido también necesario considerar la magnitud de los deslizamientos. En este sentido, se ha definido un escenario que consideraba el tamaño medio de deslizamiento en el área de estudio y que ha sido utilizado en el análisis de susceptibilidad. Los modelos de susceptibilidad así obtenidos reflejan la probabilidad espacial de aparición de deslizamientos, la distancia de alcance y la magnitud.

Mesa R. A (2006) Obtiene el mapa de riesgo específico por deslizamiento del municipio Yateras, con la aplicación de un Sistema de Información Geográfica. Para esto realiza una zonificación en cuanto al grado de peligrosidad y vulnerabilidad del área y analiza la influencia de varios factores (litológico, estructural, hidrogeológico, geomorfológico y el de uso de suelo etc.).

**Se consultaron algunos trabajos de cartografía de susceptibilidad realizados en el mundo.**

**Cruz y Delgado (2000)** realizan una cartografía de los deslizamientos más importantes a lo largo de la carretera de cuota Tijuana-Ensenada, tomando como base un estudio geológico detallado. Se reconocen deslizamientos rotacionales y desprendimientos de bloques, con cabeceras hasta de 1 km de largo. Se identifica que, además de las características geológicas, las obras civiles y otros factores antrópicos, son los principales agentes promotores de los deslizamientos.

Santacana (2001), aplica la tecnología de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) a la evaluación de la susceptibilidad del terreno a deslizamientos y a su cartografía. El análisis de la susceptibilidad de una ladera a la rotura por deslizamientos superficiales a escala regional, se realizó mediante tratamiento estadístico multivariante de tipo discriminante, con el objetivo principal de realizar la captura automática de la mayor parte de los factores relacionados con estos deslizamientos, derivados de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), el resto de factores no derivados del MDE, así como el inventario de deslizamientos, han sido capturados de forma tradicional mediante fotointerpretación, reconocimiento de campo y posterior digitalización



González M (2002) hace una evaluación y zonificación de la peligrosidad geológica (grado de amenaza) de determinadas laderas del NW de Nicaragua a partir de la fotointerpretación de imágenes, reconocimiento de campo y entrevistas a la población, realizando la cartografía movimientos de ladera a escala 1:10.000 y de zonas susceptibles a la rotura, obteniéndose como resultado una evaluación y zonificación de la peligrosidad geológica a escala local que permite realizar gestiones de alerta temprana y prevención de riesgos geológicos.

Donati et al (2002) presentan una metodología donde analizan la predisposición de varios factores que influyen en la ocurrencia de deslizamientos en Italia, auxiliándose del software IDRISI. La escala de trabajo 1:5 000 utilizando fotos aéreas a escala 1:13 000. El análisis de amenaza se realizó analizando factores tales como distancia a fallas normales e inversas, paralelismo entre alineaciones interpretadas en fotos aéreas y los escarpes de los deslizamientos detectados, uso del suelo, litología, distancia de la red fluvial, orientación de las pendientes, pendiente de las laderas, orientación de los estratos con respecto a los taludes y laderas. Para determinar la influencia de cada factor sobre la ocurrencia de deslizamientos se efectuó un análisis entre los mapas de cada factor y el inventario de deslizamiento para determinar el porcentaje del área de diferentes clases afectadas por deslizamientos.

Valadao et al (2002) presentan un análisis de densidad de deslizamientos a escala 1:25 000, el cual se realiza sobre la base de información existente sobre deslizamientos, además de se le incluye el inventario de deslizamientos obtenido por observación de fotos aéreas y reconocimientos de campo. La identificación de movimientos por el análisis de fotos aéreas está basada en criterios geomorfológicos, como la presencia de escarpes y en algunos lugares, la existencia de depósitos asociados. El reconocimiento de campo se realizó con el objetivo de caracterizar los eventos principales, definir su estructura geológica, tipo de depósito y la influencia de la actividad antrópica.

Kelarestaghi (2002), realiza una investigación sobre los factores efectivos en la ocurrencia de deslizamientos. Para esto hace uso de mapas tales como MDE,



pendiente, pluviometría, litología, uso del suelo, distancia de las carreteras, de las fallas y de la red hidrográfica. Cada factor fue analizado con respecto al mapa de deslizamientos. El método utilizado para determinar el peso de las clases de cada factor está basado en el análisis probabilístico condicional.

Morton et al (2003), presentan un trabajo sobre un mapa preliminar de susceptibilidad a deslizamientos donde analizan varios factores como la pluviometría, la condiciones geológicas, la pendiente del terreno y la dirección de las laderas. La vegetación y la concavidad-convexidad de la pendiente no tuvieron gran influencia en el desarrollo de los deslizamientos. En relación con la dirección de las pendientes se encontró una alta correlación entre los derrubios y los taludes orientados hacia el sur ya que estos soportan menos biomásas en esa dirección, además de contener mayor humedad. La valoración de los factores se realizó aplicando los métodos heurísticos, utilizando una escala entre 0 a 25, donde 0 corresponde a las unidades geológicas no susceptibles a movimientos de laderas, el valor 25 a las unidades más susceptibles, y el valor 5 a las unidades de baja susceptibilidad.

Corominas et al. (2003) presentan una metodología para realizar mapas de zonificación de peligrosidad por deslizamientos. Según este procedimiento, los autores hacen un análisis de susceptibilidad, seguido de la estimación de la probabilidad de ocurrencia de los deslizamientos según la frecuencia. Finalmente, la peligrosidad es analizada por la magnitud y la frecuencia en los sitios susceptibles, utilizando como herramienta indispensables el SIG para el procesamiento y análisis de los datos.

Baron, L (2005) hace la evaluación del terreno para la ocurrencia de deslizamientos en la isla de Dominica, provocados por las precipitaciones intensas, el tipo de roca, los deslizamientos, la topografía, geomorfología y la agricultura, utilizando la información pertinente al riesgo (deslizamiento) para formular mapas temáticos de la geología y uso de suelo aplicando un Sistema de Información Geográfica.

Benito et al. (2004) realizan una evaluación de riesgos y prevención de deslizamientos de laderas inducidos por terremotos, en el Salvador. Este análisis



toma como base la data histórica de los terremotos ocurridos en la región de estudio, así como los registros de los deslizamientos producidos durante los movimientos, los mapas topográficos y geológicos. Como resultado se obtienen modelos calibrados que permitieron evaluar los riesgos por deslizamientos asociados a zonas sísmicamente activas, implementado en un SIG.

Chau et al (2004), presentan un análisis de amenaza de deslizamientos en Hong Kong empleando datos históricos de deslizamientos acoplado con datos geológicos, geomorfológicos, actividad antrópica, clima y pluviometría. Se analiza la relación entre 1448 deslizamientos y la variación de las lluvias por estaciones del año, resultando una fuerte correlación entre la ocurrencia de estos fenómenos y el acumulado de lluvias. Como resultado final se obtiene el mapa de amenaza y el de riesgos por deslizamientos sobre formato raster.

Mora, R, et al (2004) emplea una metodología para el estudio de la susceptibilidad al deslizamiento que permite establecer los sectores con potencial de presentar deslizamientos en caso de lluvias de intensidad alta, sismos de magnitudes importantes o una combinación de ellos , además permite obtener una zonificación de la susceptibilidad del terreno a deslizarse, mediante la combinación de la valoración y peso relativo de diversos indicadores morfodinámicos, la cual es sencilla de implementar en un sistema de información geográfica (SIG).

Sinha et al (2004) realizan la zonación de amenazas por deslizamientos en terrenos del Himalaya, aplicando tecnología GIS. Para este estudio se analizaron varios factores como direcciones de las laderas, morfometría de las laderas, uso de suelo, pendiente de las laderas, resistencia de la roca, drenaje, geología, parteaguas, carreteras, alineamientos tectónicos y el relieve. Los mapas se trabajaron en formato raster asignándole un valor a cada clase de los factores analizados por comparación con el mapa de inventario de deslizamientos aplicando el método de análisis probabilístico condicional.

Sivakumar y Mukesh (2004) realizan un análisis de deslizamientos sobre un GIS mediante el empleo de métodos determinísticos para el cálculo del factor de



seguridad de taludes y laderas. La información utilizada para esta análisis se relaciona con el MDE, además de otros parámetros para el modelo predictivo como una caracterización detallada de las condiciones de los suelos: resistencia (cohesión, ángulo de fricción interna, peso), características de permeabilidad, profundidad de la cubierta de suelo y patrones de vegetación.

Tangestani (2004) presentan una investigación sobre mapeo de susceptibilidad a deslizamientos usando la operación Fuzzy Gamma en tecnología GIS. El modelo de predicción cuantitativo está basado en una base de datos espaciales con varios mapas digitales representando los factores causales de los movimientos. Son usadas tres teorías matemáticas para el modelo: teoría de probabilidades, teoría de conjuntos difusos y teoría de evidencias Dempster-Shafer. Sobre la base de estas tres teorías se realiza una medición cuantitativa de la amenaza futura frente a deslizamientos. Los factores analizados son el ángulo de los taludes, elevación topográfica, dirección de las laderas, profundidad de meteorización, litología, uso de suelo y distancia a las carreteras, obtenidos del procesamiento de datos topográficos, interpretación de fotos aéreas y de trabajos de campo. La asignación del peso de los factores se hizo sobre una escala entre 0 y 1.

Vilaplana J M (2007) hace una evaluación cartográfica de la peligrosidad por caída de rocas a lo largo de la vía del tren cremallera de Vall de Núria, Pirineos Orientales de Cataluña – España, utilizando una metodología basada en el análisis multicriterio con una etapa intermedia importante, la cartografía de la susceptibilidad del macizo rocoso a los desprendimientos, para la utilización de esta metodología es necesario un conocimiento general de los escenarios de peligro de la zona estudiada.

Chang et al. (2007) realizan un modelo de probabilidad de ocurrencia de los deslizamientos teniendo en cuenta los terremotos y los ciclones tropicales (tifones) usando el método de regresión lógica, tomando como variables la elevación, pendiente, distancia a la línea de falla, entre otras. Estas variables se analizaron del modelo digital de elevaciones (DEM), las imágenes SPOT, el mapa geológico y el mapa topográfico. Finalmente se obtienen mapas de probabilidad de ocurrencia de



los deslizamientos inducidos por ciclones y por terremotos, los cuales fueron validados y comparados, según las variables analizadas.

Domínguez et al. (2007) a partir de técnicas estadísticas de regresión lógica, realizan un estudio geomorfológico de inestabilidad de laderas y un modelo de susceptibilidad por deslizamientos a escala 1: 5000, empleando un GIS. Se tuvieron en cuenta como variables clases: pendiente, curvatura, aspecto, litología, vegetación y presencia de cobertura cuaternaria. Los factores condicionantes analizados son la litología, la vegetación y la topografía. La asignación del peso de los factores se hizo sobre una escala entre 0 y 1. Por los aspectos citados en la metodología algunos de estos elementos serán utilizados en la presente investigación.

Van Den et al. (2007) presentan la evolución geológica del deslizamiento Collinabos en Bélgica, a partir del procesamiento de datos geomorfológicos y geofísicos. El mapa geomorfológico fue procesado usando la técnica LIDAR (Light Detection and Ranging), derivado de un mapa de relieve sombreados. Según su morfología pudieron delimitarse tres zonas en el cuerpo del deslizamiento que fueron estudiadas a través de perfiles longitudinales de resistividad eléctrica. Como resultado se obtienen las características estructurales de este deslizamiento, además de la reconstrucción histórica del mismo.

Kamp et al. (2008) presentan una investigación sobre mapeo de susceptibilidad a deslizamientos utilizando tecnología de satélite ASTER y un GIS. Realizando una evaluación de multi-criterios aplicada para determinar los parámetros desencadenantes de los deslizamientos. Los parámetros analizados fueron la litología, fallas, gradientes de las pendientes, aspecto de las pendientes, elevación, ríos y caminos. El mapa de susceptibilidad generado en ESRI ArcMap 9.3, se evaluó cualitativa mediante una comparación con el mapa determinado por el análisis satelital.

Dunning et al. (2009) realizan un análisis estructural y obtienen información de la geometría de un deslizamiento con técnica Terrestrial Laser Scanning (TLS). El TLS en un tiempo de vuelo puede coleccionar datos xyz de un punto dado a través de un



sistema de reflectores láser. El procesamiento de estos datos se realiza en el software comercial Split FX (Split Engineering; RiSCAN Pro, Riegal Measurement Systems). Este método permite obtener información sobre la geometría de la zona deslizada, orientación de las discontinuidades e identificación del modelo. Los trabajos fueron complementados con imágenes Landsat 7 ETM, datos de elevación e interpretación de fotos aéreas.

Hattanji y Moriwaki (2009) realizan un estudio morfométrico de los relictos de deslizamientos en cuatro áreas de Japón. La selección de los deslizamientos se realizó teniendo en cuenta distancia entre escarpe principales, flancos y superficies de ruptura, el movimiento lineal y superficies de ruptura con áreas mayores de 0.01 km<sup>2</sup>. Se midieron las longitudes horizontales y las alturas de descenso de los deslizamientos, y las longitudes horizontales ( $L_r$ ), alturas ( $H_r$ ) y áreas de las superficies de ruptura, estableciéndose una correlación entre el volumen y el área del deslizamiento, donde se asume el área de la superficie de ruptura como un indicador del tamaño. Al existir una relación entre el coeficiente de fricción equivalente y la pendiente de la superficie de ruptura, los autores aplican que  $\tan \theta_r = H_r/L_r$ , y obtienen las ecuaciones de análisis regresión lineal para cada caso de estudio. Como resultado los autores establecen que el análisis de regresión lineal entre  $\tan \theta_r$  y H/L para los relictos de un deslizamiento permite preveer la posible proporción H/L de una masa inestable.



## CAPÍTULO II. UBICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

### 2.1 Introducción

Este capítulo tiene como objetivo establecer las herramientas necesarias que permitan organizar y procesar la información, de manera que los resultados obtenidos aporten una solución a la problemática o simplemente de una respuesta a las interrogantes formuladas en la investigación: Evaluación de la susceptibilidad por inestabilidad de taludes y laderas en el vial La Farola.

En su desarrollo se parte del establecimiento del área de trabajo y su clasificación en zonas de los tramos, la metodología seguida para ello, así como un análisis de la susceptibilidad de los tramos seleccionados en el vial.

### 2.2 Ubicación y características físico-geográficas del área de estudio

Geográficamente el viaducto La Farola inicia su trazado vial desde el Sureste del municipio Imías, exactamente en el km 102 hacia la ciudad Primada de Baracoa (km 0) hasta el km 34,0 situado en el poblado de Cabacú en dirección Norte provincia Guantánamo entre las Cuchillas de Baracoa - Sierra del Purial, formando parte de las Montañas del Noreste. Tiene una extensión territorial de 198,703 7 km<sup>2</sup> y una longitud de 34 km lineal, Se localiza en las hojas cartográficas 5376 - III - c "Cajobabo", 5376 - III- a "La Farola" y 5376 - IV- c "Paso de Cuba", a escala 1:25 000, limitando por las siguientes coordenadas Lambert:

Tabla 1 Coordenadas planas del Vial en estudio

Vial en estudio	Iniciales		Finales	
	X	Y	X	Y
La farola	744 056	161 961	748 364	177 814

Este vial perteneciente a la provincia de Guantánamo, limita al Norte con el Municipio Baracoa, al Sur con el Mar Caribe, al Este con el poblado el Jauco y al Oeste con el municipio Imías, ver anexo 1.



El relieve de la zona es montañoso fuertemente abrupto, el trazado del vial atraviesa un relieve muy variado, ver anexo 2, donde podemos encontrar llanuras, alturas y montañas: a las llanuras pertenecen las medias (20 - 80 m) y altas (80 – 120 m); a las alturas pertenece las pequeñas (menores de 120 m), medias (120 - 200 m), grandes (200 – 300 m) y submontañas (300 - 500 m); las montañas pequeñas (500 – 1 000 m) aplanadas y diseccionadas, ver anexo 3.

La disección vertical expresa el grado de profundización alcanzado por las corrientes de agua superficiales en su acción erosiva sobre la superficie terrestre, por lo es un indicador del trabajo erosivo realizado por el escurrimiento concentrado del los ríos presentes en el área de estudio, donde varían desde muy poca disección (0 - 10) hasta disección profundas (50 - 75), expresado en metros, ver anexo 4.

La disección horizontal indica el grado de desmembramiento de la superficie terrestres provocado por la acción de las corrientes de aguas superficiales, tanto permanentes como temporales y varían desde muy suavemente (0-3) hasta fuertes diseccionadas (4-5), que coinciden con los causes de los afluentes de las corrientes temporales, ver anexo 5.

Atendiendo a la inclinación de las laderas, se puede encontrar una gran variedad en todo el viaducto, desde ligeramente inclinadas ( $2^{\circ}$  -  $5^{\circ}$ ), fuertemente inclinada ( $5^{\circ}$  -  $15^{\circ}$ ), escarpadas ( $15^{\circ}$  -  $35^{\circ}$ ), precipicios ( $35^{\circ}$  -  $55^{\circ}$ ) y verticales ( $55^{\circ}$  -  $90^{\circ}$ ); estas últimas tiene un origen antrópico fundamentalmente, ver anexo 6.

Entre los límites del área se encuentran todas las cotas de altura absolutas en la región Cuchillas de Baracoa - Sierra del Purial, (Alto de Cotilla: 570 m, Cuchillas de Baracoa 460 m, Loma Salto del Indio 490 m, Loma de la Farola 700 m, Loma Juan Ramirez 570 m y otros).

La red fluvial de la zona es densa, formada por ríos y arroyos los cuales a veces se secan durante los períodos de seca, son ríos de montañas de corta y larga longitud, los cuales drenan sus aguas hacia las vertiente Sur y Norte con una dirección predominante submeridional. Sus valles son en forma de U o en V y en sus cursos superiores abundan los saltos de agua con altura que oscilan entre 1-4 a 20-50 m.



Entre los ríos que se representan en el área de estudio tenemos: Sierra, Jagüeyes, Jobito, Colonia, Pino, Jojo, Yagrumaje, Minas, Viaya, Yarey, etc, que en tiempos de lluvia son rápidos y se producen grandes avenidas. Estos constituyen su principal vía de abastecimiento de agua y en algunos casos de electricidad, ver anexo 7.

### **Características de la vegetación**

La flora de la zona es tropical, la mayor parte esta cubierta por densos bosques y matorrales que hace que el transito se realice con dificultad, ver anexo 8. Atendiendo a la clasificación dada por Capote y Berzaín (1984), las formaciones vegetales presentes son:

- ✓ Bosque Coníferas
- ✓ Bosques Foliácea
- ✓ Cultivos rotativos
- ✓ **Hiervas** y pastos artificiales
- ✓ **Hurtos**, frutales o cítricos
- ✓ Malezas compactas sin espinas

### **Características climáticas regionales:**

El Clima que se representa en el área de estudio, según la clasificación de Köppen presenta un clima Tropical Lluvioso. Con lluvias distribuidas estacionalmente en forma muy marcada con más del 65 % del acumulado anual en el periodo lluvioso (mayo-octubre) y uno seco (noviembre-abril).

En general se caracteriza por elevadas temperaturas todo el año: los meses más cálidos son julio y agosto con 27.8 y 27.6 °C respectivamente, los más frescos febrero y enero con 23.7 y 24.0 °C. La temperatura media anual es de 25.8 °C con una tendencia al aumento, (figura 6).

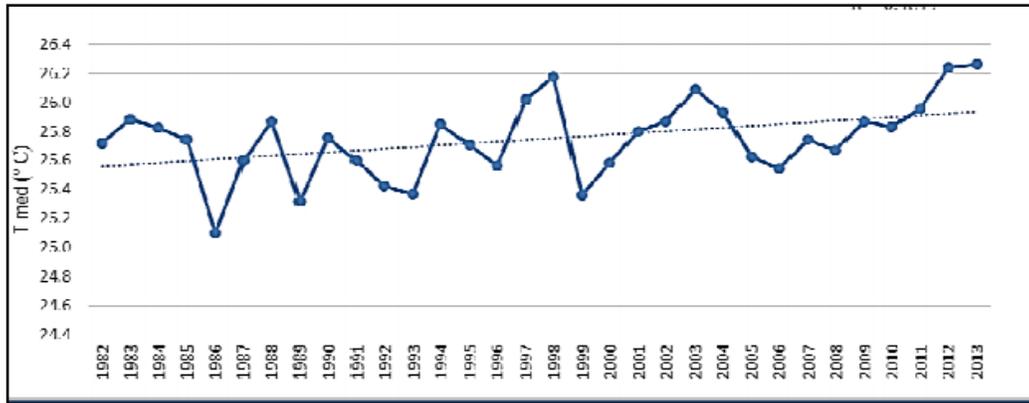


Fig. 6 Temperatura media anual período 1982-2013

Estas altas temperaturas dan lugar a evaporación y evapotranspiración alta, que conjuntamente con la pobre precipitación, determina el carácter seco (semiárido) de la zona en algunos meses.

La precipitación media anual es de 2 700 mm, siendo el mes julio el menos lluvioso, con una media de 93,5 mm. Los meses más lluviosos son Octubre y Noviembre con más de 300,0 mm.

En la tabla 2 se observa, que las temperaturas medias más elevadas, se registran en los meses de verano o estación lluviosa (mayo-octubre), con valores superiores a 26.0 °C, destacándose desde junio hasta agosto con más de 27.0 °C.

Tabla 2 Temperatura media mensual del aire (C<sup>0</sup>) serie 1982-2013.

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura. media	23,7	24,0	24,5	25,5	26,1	27,2	27,8	27,6	27,6	26,2	25,2	24,3
T. Máx. med	30,5	30,9	31,3	32,1	32,2	33,1	34,3	34,3	33,5	32,3	31,4	30,6
T. Mín. med	18,2	18,2	19,0	20,2	21,4	22,4	22,6	22,7	22,5	22,1	20,5	19,3

Fuente: Centro Meteorológico Provincial.



### Precipitación.

La precipitación media, es relativamente pobre y presenta una distribución estacional bien definida, con el 67,8 % del acumulado anual en el período lluvioso y una gran variabilidad interanual. Son frecuentes las lluvias intensas y altos acumulados en episodios cortos, pero también largos períodos de días sin lluvia y los procesos de sequías.

Presenta años con acumulados superiores a 1500 mm e inferiores a 800 mm: en el 2007 registró 1701,1 mm; el más bajo de la data histórica fue en el 2004 con 683,1 mm, seguido de los años 1988 y 2000 con 751,3 y 794,0 mm respectivamente. Son frecuentes grandes diferencias entre los acumulados anuales consecutivos, (figura 7).

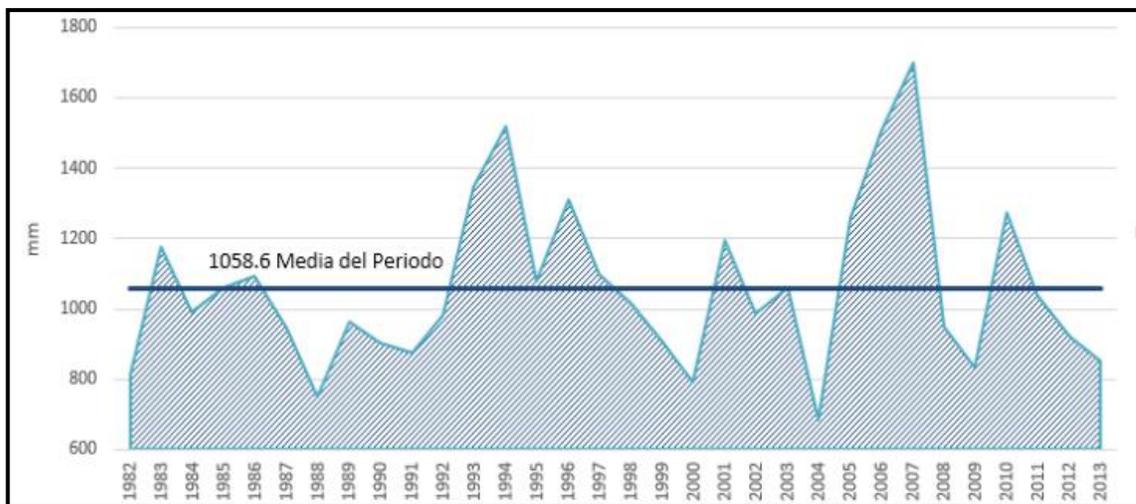


Fig. 7 Comportamiento de la precipitación media anual serie 1982- 2013

La zona es escasamente poblada, los cuales se concentran en todo el vial (Veguita del Sur, La Guásima, Ligornio, Alto de Cotilla, Yumurí del Sur, Palma Clara, Cagüeybaje, y Paso Cuba.), en los montes se encuentran poblaciones más pequeñas (Limonos, los Asientos, Vega del Jobo, Cantarrana, El Chorrillo, La María, Palo Gordo, La Calzada Masquitero, etc ) y casas aisladas.

Las vías de comunicación están muy débilmente desarrolladas, la vía principal que comunica a los municipios Imías y Baracoa es el vial en estudio que lo atraviesa de Sur a Norte todo el complejo montañoso existente en la zona de estudio. De forma



secundaria se pueden encontrar otros terraplenes y caminos que se utilizan como vías de accesos.

### **Descripción de los Suelos:**

Los suelos del área de estudio La Farola se clasifican según la II Clasificación Genética de los Suelos en Cuba como: *Fersialíticos rojos*, *Fersialítico*, *Pardo rojizo*, *Pardos sin carbonato*, *Ferralítico amarillento*, *Ferrálico rojo*, *Ferrítico rojo oscuro*, *lithosol* y *ferralítico rojo amarillento lixiviado*, ver anexo 9.

#### *Agrupamiento Ferríticos.*

Esta agrupación está representada por suelos evolucionados, quizás los de mayor evolución en nuestro país. Fueron descritos por H.H.Bennett como las series Nipe y Holguín, conociéndose en literaturas internacionalmente como suelos lateríticos rojos, Oxisoles y Latosoles. Se formaron a partir de rocas ultrabásicas que han sufrido un intenso metamorfismo, dando lugar a las llamadas serpentinitas, cuyos principales macizos en Cuba están constituidos por peridotitas. Este tipo de rocas se caracteriza por el bajo contenido de Aluminio (0,7-7,5 %) y abundancia de sílice, magnesio y ferrosilicatos.

#### *Agrupamiento Ferralíticos.*

Se conocen como suelos ferralíticos cálcicos según S.V Zoon y latosólicos y amarillos tropicales. Se desarrollan sobre rocas sedimentarias y metamórficas, nunca sobre rocas ígneas, el proceso de formación se identifica por el proceso pedogenético elemental de carácter zonal, siendo la alitización el que le da origen. La ferralitización ocurre según el contenido de los óxidos de hierro, aluminio y sílice particularmente.

#### *Ferralíticos rojos amarillentos Lixiviados.*

Son suelos de perfil ABC donde se manifiesta una lixiviación de arcilla a través del perfil con acumulación definida en profundidad, se desarrolla sobre eluvios de esquisto y pizarras o sobre materiales transportados procedente de la región calcáreas que se mezclan con materiales transportados desde regiones de esquistos, también a partir cristalizadas de calizas.



### *Agrupamientos Ferrialíticos.*

Este agrupamiento comprende los suelos que se encuentran en estado de evolución de sialíticos a ferralíticos, según sean estos suelos formados a partir de rocas calcáreas, efusivas o de eluvios de rocas serpentínicas. Se encuentra principalmente evolucionando a partir de rocas calizas duras, rocas efusivas cristalinas ácidas y básicas, esquistos y serpentinitas.

### *Agrupamientos de suelos Pardos.*

Los suelos pardos en Cuba ocupan más 38 000 Km<sup>2</sup> de la República, lo que significa más del 34 % del área del país. Estos suelos fueron clasificados por Bennett en 1928 con diferentes series de suelos, entre los que encontramos Palma, Palmarito, Santa Clara, La Larga etc. Fueron clasificados por Zoon (1968) quien los distinguió como Pardos de Sabana que a su vez los dividió en pardos con o sin Carbonatos, en la II Clasificación Genética de los suelos de Cuba se separan en tres tipos: Pardos con carbonatos desarrollados a partir de materiales carbonatados, pardos sin carbonatos desarrollados a partir de rocas efusivas, tobas, areniscas, etc, es decir con materiales con contenido bajos de cuarzo y los pardos grisáceos desarrollados a partir de rocas nétamente ácidas.

## **2.3 Características geólogo - tectónicas de la región**

La geología de la región se caracteriza por una gran complejidad condicionada por la variedad litológica presente y los distintos eventos tectónicos ocurridos en el de cursar del tiempo geológico, lo que justifica los diferentes estudios y clasificaciones realizadas, basados en criterios o parámetros específicos según el objeto de la investigación. (Adamovich y Chejovich, 1964; Cobiella, 1978; Quintas, 1989; Blanco y Proenza, 1993; Iturralde-Vinent, 1996), llevando a cabo estudios encaminados a profundizar en la estructura geológica cubana en general.

Desde el punto de vista regional (Cuba oriental) existen cuatro estructuras bien definidas (Anticlinorium Sierra Maestra, Sinclorium Oriental, Anticlinal Oriental y Cuenca Nipe – Baracoa) y tienen una historia geológica bastante larga, que en el caso



del anticlinal oriental se remonta al paleoceno, ya a finales del Eoceno todas se encuentran bien diferenciadas y mantienen su naturaleza hasta la actualidad. Las rocas más antiguas de Cuba Oriental afloran en el núcleo del anticlinal oriental y están representadas por diferentes secuencias de metamórficas, rocas vulcanógenas y serpentinitas.

Los sedimentos de la parte más alta del Eoceno Superior y del Oligoceno son predominantemente terrígenos, a veces de grano muy grueso y están representados por las formaciones Maquey y Sabanalarca (flanco sur del anticlinal oriental). Los sedimentos del Cuaternario tienen una distribución limitada, se observan en las rocas calcáreas de las terrazas marinas y al sur de la Sierra Purial donde los aluviones alcanzan decenas de metros.

### **Estratigrafía.**

En el Área de estudio se caracteriza por una estructura geológica muy compleja debido al desarrollo de diferentes complejos litológicos de rocas, amplia manifestación del vulcanismo y magmatismo intrusivo así como numerosas dislocaciones de ruptura. En el corte estratigráfico de la región se destacan las siguientes subdivisiones, ver anexo 10, las cuales fueron descritas según el Léxico Estratigráfico del año 2013 editado por el Instituto de Geología y Paleontología.

#### *Formación San Ignacio.*

Representadas por: Brecha polimítica con fragmentos de esquistos verdes, filitas y serpentinitas, en una matriz arcillosa. Los clastos de la brecha son de rocas metamórficas, fundamentalmente esquistos verdes, filitas y serpentinitas, en una matriz arcillosa. Los fragmentos y bloques pueden alcanzar hasta varios metros de diámetro, con zonas donde predominan los clastos de una misma composición.

Yace discordantemente sobre las formaciones Sabaneta y Sierra del Purial. Está cubierta discordantemente por las formaciones San Luis y Yateras, los miembros Cilindro y Vega Grande, de la Fm. Maquey, así como el Miembro. Guardarraya, de la Fm. Punta Imías Edad Eoceno Medio (parte alta).



*Complejo Sierra del Purial. (sp)*

Edad Cretácico inferior, constituida por: Andesito-basaltos y basaltos, principalmente tobos y lavobrechas, andesidacitas, areniscas polimícticas, areniscas derivadas de granitoides e intercalaciones y lentes de calizas. Estas rocas se encuentran metamorfizadas en condiciones de muy bajo grado y baja presión, en las facies de esquistos verdes. Los colores son de tonalidades grises, verdes y hasta negros.

*Tectonitas.*

Edad Jurásico medio, representado por Litología Serpentinitas harzburgíticas, harzburgitas, lherzolitas, dunitas y piroxenitas con diferente grado de serpentinización y serpentinitas. El emplazamiento de las ofiolitas propició el desmembramiento de sus unidades oceánicas, por lo que los niveles ofiolíticos aparecen imbricados tectónicamente entre sí o con rocas del arco volcánico cretácico y sedimentos del Campaniano-Eoceno.

*Formación Charco redondo. (chr)*

Compuesta por: Calizas compactas organodetríticas, fosilíferas, de color variable, predominando los tonos blancos a grises verdosos. En la parte inferior del corte, son frecuentes las brechas, donde predomina la estratificación gruesa, mientras que en la parte superior predomina la estratificación fina. Yace concordantemente sobre la Formación Sabaneta y discordantemente sobre las formaciones El Caney, La Picota, Mícará, Sabaneta, Santo Domingo, Tejas, Vigía y el Gr. El Cobre (parte indiferenciada). Está cubierta concordantemente por la Fm. Mucaral y la Fm. San Luis, y discordantemente por las formaciones Barrancas, Bayamo, Dátil, Farallón Grande, Sierra de Capiro, Yateras, las formaciones Manzanillo, Paso Real y el Mbro. Rolanda de la Fm. Cabo Cruz (Gr. Guacanayabo), el Mbro. Gobernadora de la Fm. Maquey (Gr. Guantánamo) y las formaciones Bitirí, y Camazán consu Miembro. Pedernales (Gr. Nipe). Edad Eoceno medio, Se depositó en aguas marinas poco profundas, en un ambiente litoral y sublitoral.

*Formación San Luis (sl)*



El nombre se deriva del pueblo de San Luis, provincia de Santiago de Cuba. La litología está compuesta por una secuencia terrígena flyschoides, finamente estratificada, de rocas clásticas y terrígeno-carbonatadas, de granulometría variada desde arcillas hasta conglomerados. También contiene areniscas polimícticas de grano medio a fino, de color gris, que en ocasiones aparecen en capas gruesas; limolitas de color marrón-pardusco; limolitas calcáreas de color crema; lutitas calcáreas de color marrón, masivas; calizas micríticas arcillosas, de color beige; calizas biodetríticas, con abundantes foraminíferos bentónicos grandes; margas de color crema blanquecino, que pueden pasar lateralmente a calizas. Las calizas presentan aspecto masivo, son laminadas y en ocasiones deleznable, con predominio de colores pardo y crema; están constituidas por calcita de cripto a microcristalina, con contenido de material arcilloso y de óxidos e hidróxidos de hierro.

En algunos casos incluyen formas bentónicas, indicadoras de aguas someras de la zona sub litoral; en otras ocasiones sólo contienen formas planctónicas indicadoras de ambientes profundos. Esto último se aprecia principalmente hacia la parte más oriental del territorio. Asimismo, en las calizas se aprecian granos de plagioclasas, cuarzo, metálico, clorita y rocas efusivas.

Las secuencias terrígenas están constituidas por areniscas de grano fino y grueso, que transicionan a areniscas calcáreas por el aumento de material carbonatado. Éste se encuentra representado por fragmentos de calizas, de organismos y por un cemento del tipo de contacto, de calcita, generalmente recristalizada. El material terrígeno es muy variado, caracterizado por rocas efusivas básicas, medias y ácidas, rocas intrusivas, rocas arcillosas y granos de plagioclasas de diferente composición, clinopiroxenos, cuarzo y granos de metálico. Los organismos presentes son fragmentos de algas, foraminíferos planctónicos y bentónicos, raramente silíceos, y aisladamente se observan algunos formados por minerales fosfáticos. El cemento de estas rocas es de calcita, material criptocristalino no definido y zeolitas.

Relaciones estratigráficas: yace concordantemente sobre las formaciones Caney, Charco Redondo, Farallón Grande y Puerto Boniato y discordantemente sobre las



formaciones Sabaneta, San Ignacio, Sierra del Purial y el grupo El Cobre (parte indiferenciada). Está cubierta concordantemente por la formación Camarones con la cual transiciona lateralmente y discordantemente por las formaciones Cabacú, Cauto, Río Maya, Manzanillo, Sevilla Arriba, así como por el miembro Rolanda, de la formación Cabo Cruz (Grupo Guacanayabo), la formación Yateras y los miembros Baitiquirí, de la formación San Antonio, Cilindro, de la formación Maquey, Guardarraya y Yacabo, de la formación Punta Imías (Grupo Guantánamo) y las formaciones Bitirí y Camazán (grupo Nipe).

La edad es del Eoceno Medio parte alta al Eoceno Superior. Se formó en un ambiente de sedimentación que inicialmente ocurrió en aguas marinas profundas, finalizando en aguas de mediana a poca profundidad. El espesor es de 700 m aproximadamente

#### *Formación Sabaneta.*

Edad Eoceno medio determinado por Tobas vitroclásticas, litovitroclásticas, cristalovitroclásticas con intercalaciones de tufitas calcáreas, areniscas tobaceas, calizas, conglomerados tobaceos, limolitas, margas, gravelitas, conglomerados vulcanomícticos y ocasionalmente pequeños cuerpo. Ambiente marino con un régimen dinámico de las aguas muy inestable, con un aporte piroclástico considerable producto de la cercanía a centros magmáticos explosivos.

#### *Formación Cabacú.*

Constituido por: Gravelitas, areniscas y limolitas polimícticas (provenientes principalmente de ultramafitas y vulcanitas), de cemento débilmente arcilloso-calcáreo y ocasionales lentes de margas arcillosas en la parte inferior del corte. La estratificación es lenticular y, en ocasiones, cruzada. Colores grisáceos, verdosos, negruzcos y blancuzcos, abigarrados. Yace discordantemente sobre las formaciones Sabaneta, San Luis y Sierra de Capiro. Está cubierta discordantemente por el Miembro. Vega Grande, de la Fm. Maquey (Gr. Guantánamo) con edad. Oligoceno Superior - Mioceno Inferior parte baja. Se depositó en un ambiente fluviomarino, probablemente deltaico.



### *Asociación Tonalito-Granodiorítica.*

Complejo Magmático de Edad Eoceno Medio compuesta por Dioritas cuarcíferas, tonalitas, granodioritas, plagiogranitos, granitos masivos, aplitas y pegmatitas, y equivalentes hipabisales de estas rocas intrusivas. Son rocas de alcalinidad normal, además pertenecen a la subserie sódico-potásica.

### *Formación Cabo Cruz.*

Representada por Calizas biodetríticas arcillosas, fosilíferas, de color secundario rojizo ha abigarrado que por desagregación dan lugar a margas secundarias y pseudoconglomerados. Las calizas pueden aparecer ligeramente fosfatizadas y contienen abundantes tubos de Tered.

### *Complejo Granodiorítico.*

Complejo magmático compuesto por Gabros, gabro dioritas, dioritas, dioritas cuarcíferas, granodioritas y granitos, prevaleciendo los diferenciados ácidos finales (granodioritas y granitos), con un desarrollo homodrómico normal. Perteneciente a la serie Calcoalcalina normal.

### *Formación El Cobre.*

Está constituida por diferentes tipos de rocas volcánicas, volcánico-sedimentarias y tufogénicas, con una gran variabilidad facial, tanto en sentido vertical como lateral. Las transiciones entre las diferentes litologías a veces son bruscas, otras graduales y, en muchos casos, es prácticamente imposible establecer delimitaciones entre ellas. Las rocas más abundantes son: tobas, desde aglomeráticas hasta cineríticas, lavas, lavas brechas y aglomeráticas, de composición andesítica, andesito-dacítica y dacítica, raramente riolítica, riódacítica y basáltica. En su constitución también participan tobas cineríticas, tufitas, tobas calcáreas, calizas tobáceas, areniscas polimícticas y vulcanomícticas, así como grauvacas.

Además, este complejo volcánico-sedimentario está cortado por cuerpos hipabisales y diques de diversa composición.



### *Formación Jaimanita*

El nombre proviene del pueblo de Jaimanitas, provincia de Mayabeque. La litología está caracterizada por calizas biodetríticas masivas, generalmente carsificadas, muy fosilíferas, con contenido principalmente de conchas bien preservadas, corales de especies actuales y ocasionalmente biohermos. Los bolsones cársicos se encuentran en ocasiones rellenos por una fina mezcla carbonático – arcillosa - ferruginosa, de color rojo ladrillo. Pasan a biocalcarenitas, de granulometría y estratificación variables o masivas. En mayor o menor cantidad contienen fragmentos de sedimentos terrígenos, que incluyen calizas preexistentes. Es frecuente encontrar variaciones litofaciales y biofaciales. En general, la cementación es variable y en su superficie presenta un casquete recristalizado de evaporita y caliche combinado, de 1 m a 2 m de espesor, por debajo del cual en ocasiones la roca aparece desintegrada, convertida en un material terroso. La coloración predominante es blancuzca, rosácea o amarillenta.

*Relaciones estratigráficas:* Yace discordantemente sobre las formaciones Güines, La Cruz, Río Maya, Vázquez, Vedado, Versalles, Turiguanó y las formaciones Júcaro y Río Jagüeyes (Grupo Nipe). Está cubierta discordantemente por las formaciones Cocodrilo, El Salado, La Cabaña, Los Pinos, Cayo Guillermo y Playa Santa Fe y los depósitos innominados del Holoceno en el territorio emergido y en la plataforma marina insular.

*Correlación.* Puede ser correlacionada con las formaciones Camacho, Jamaica y Cauto, de Cuba Oriental y Sigüanea de Isla de la Juventud. La edad es del Pleistoceno Superior, en su ambiente de sedimentación predominan las facies de playa, postarrecifal y arrecifal. El espesor probablemente excede de los 10 m.

### *Formación Maquey. (mq)*

Su nombre proviene de la sierra del Maquey. Litológicamente presenta alternancia de areniscas, limolitas y arcillas calcáreas de color gris y margas de color blanco a crema, que contienen intercalaciones de espesor variable de calizas biodetríticas, arenáceas y gravelíticas de colores blanco, amarillo y crema, ocasionalmente amarillo



grisáceo. La estratificación es de fina a media, menos frecuentemente gruesa o masiva. Algunos horizontes, particularmente de limolitas y calizas biodetríticas, son fosilíferos en los que abundan grandes lepidocyclinas. Otros horizontes contienen yeso, lignito y restos vegetales lignitizados.

*Relaciones estratigráficas:* Su miembro Vega Grande yace discordantemente sobre las formaciones Cabacú, Mucaral y Santo Domingo. Su miembro Gobernadora yace discordantemente sobre las formaciones Camarones, Charco Redondo y San Luis. Sus miembros Vega Grande y Cilindro lo hacen también discordantemente sobre las formaciones Sabaneta y San Ignacio y las ultramafitas. Está cubierta concordantemente por las formaciones Baracoa, San Antonio y Yateras y discordantemente por las formaciones Jamaica, Punta Imías y Río Maya. Transiciona lateralmente con la formación Yateras.

*Correlación:* Es correlacionable con las formaciones Báguanos, Bitirí, Cabacú, Sevilla Arriba y Yateras de Cuba Oriental; parcialmente con Colón y Jaruco, de Cuba Occidental; Paso Real y Banao, de Cuba Central.

*Ambiente de sedimentación:* La base de la formación sugiere una deposición en un ambiente sub litoral de moderada energía, con desarrollo coralino limitado que no llegó a formar barreras arrecifales. Está caracterizado por la asociación Lepidocyclina - Corallinaceae. Marginalmente parece haber existido un ambiente lagunar con carácter muy local. La parte alta de la formación refleja oscilaciones marinas desde sub litoral a lagunar con influencia fluvial y áreas de pantano. En los episodios de levantamiento se produjo un mayor aporte de materiales terrígenos. Existieron fases de desarrollo coralino cuyos arrecifes están representados por la formación Yateras con la cual existe una transición tanto lateral como vertical.

Surgió en la edad Oligoceno Superior al Mioceno Inferior (parte baja). Es la formación con mayor desarrollo y presencia en el área de estudio. Tiene un espesor mayor de 700 m.

*Formación Río Maya*



El origen del nombre se deriva del río Maya, en el municipio de Maisí, provincia de Guantánamo. La litología está caracterizada por calizas biohémicas algáceas, coralinas y micríticas, muy duras, frecuentemente aporcelanadas. Contiene corales en posición de crecimiento y fragmentarios, así como, subordinadamente, moldes y valvas de moluscos, todos recristalizados, entre los que hay abundancia del coral *Acropora prolifera*. Las calizas se encuentran frecuentemente dolomitizadas. El contenido de arcilla es muy variable. Hay abundantes clastos de material terrígeno, provenientes de las rocas de las zonas vecinas emergidas; su granulometría varía entre arenas y cantos. En ocasiones existen intercalaciones de conglomerados polimícticos de granulometría variable y cemento calcáreo. El color es blanco, amarillento, rosado y grisáceo.

*Relaciones estratigráficas:* Yace discordantemente sobre las formaciones, Cabo Cruz, Baracoa, Camarones, Chafarina, La Cruz, Pílón, Sabaneta, San Antonio, San Luis, Sierra del Purial, el grupo El Cobre (parte indiferenciada), los miembros Baitiquirí (formación San Antonio y Yacabo) y Guardarraya (formación Punta Imías) y las ultramafitas y granitoides. Está cubierta discordantemente por la Formación Jaimanitas.

*Correlación:* Es correlacionable con las formaciones Guane y Vedado, de Cuba Centro - Occidental; así como con Dátil y Bayamo, de Cuba Oriental y Alegrías, del Archipiélago Sabana - Camagüey.

Se desarrolló desde el Plioceno Superior hasta el Pleistoceno Inferior. El espesor oscila entre 30 y 80 m. Se formó en un ambiente donde sus depósitos se corresponden a episodios de desarrollo arrecifal que alternan con intenso aporte de materiales clásticos terrígenos, predominando los de desarrollo arrecifal.

### **Tectónica.**

El área de estudio está enmarcada en una estructura superpuesta, dentro de la fase subplatafórmica. Su evolución comienza en el Eoceno Superior, en la subsidencia de un área poligonal irregular, enmarcada por fallas de diversas orientaciones, ver anexo 11.



Durante el Eoceno Medio y Superior se desarrollaron ampliamente las estructuras asociadas a fenómenos plicativos, donde se reflejan muy bien las estructuras disyuntivas. A grandes rasgos el área está marcada por movimientos de ascensos y descensos, dividida en forma de bloques que han ocurrido en diferentes épocas; los que han influenciado de forma decisiva en la conformación litológica, estado y morfología actual de la región.

El plano estructural básico de la región fue originado por las formaciones del piso estructural geosinclinal inferior, en el cual se destacan tres capas estructurales: Cretácico, Paleoceno-Eoceno Inferior y Eoceno Inferior Medio, formadas en el transcurso de la fase de plegamiento de Cuba que corresponde a la etapa de formación del arco de Isla.

La capa estructural del **Cretácico** (Sierra del Purial), determina las etapas iniciales de nacimiento del arco insular, observándose la existencia de una flexura geosinclinal. Los movimientos de la etapa temprana del plegamiento cubano en el límite del Cretácico y del Paleógeno concluyen la formación de esta capa estructural y señalan el inicio de la etapa pre-orogénica e inversión del geosinclinal.

La capa estructural **Paleoceno-Eoceno medio** (El Cobre, Sabaneta), señala el período de formación del arco insular. Los movimientos ascendentes en este tiempo fueron sustituidos nuevamente por el hundimiento de la región pero ya en condiciones de flexionamiento compensado, las cuales se conservaron en lo sucesivo hasta finales de la formación del piso estructural inferior.

En la capa estructural **Eoceno Inferior- Medio** concluye la formación de la capa geosinclinal inferior en la etapa pre-orogénica de su desarrollo, se caracteriza por la penetración de dioritas de gran potencia. (San Luis, San Ignacio etc.)

La estructura plegada de la región se formó definitivamente en el Eoceno Superior-Medio y es relativamente simple y esta complicada por las estructuras volcánicas antiguas e intrusiones de dioritas, presentando numerosas fallas que le dan al área una estructura de bloques.



Las fallas disyuntivas se desarrollan muy ampliamente en la región, destacándose dos grupos de fallas disyuntivas con relación a la edad:

**Fallas del post-Eoceno Medio.** Estas se distribuyen por toda el área, se pueden descifrar por las fotos aéreas y se confirman en el campo, es característica en ella una extensión rectangular y significativa con yacencia brusca y vertical, lo que la caracteriza como grietas de cizallamiento.

**Fallas con desplazamiento.** Constituyen un grupo numeroso en la región, la mayoría tienen buzamientos bruscos y vertical, morfología simple, destacándose en el plano por sus líneas rectas o algo curvas lo que permite considerarlas como fallas de tipo de cizallamiento.

**Fallas sin desplazamiento.** Las fallas de este grupo se observan por todas partes y están representadas por grietas primarias y secundarias. Las primarias se originaron en una situación de extensión, muchas de ellas están rellenas por depósitos de diques y filoniano y las secundarias fueron resultados de los movimientos tectónicos y se originaron en una situación de comprensión.

#### **2.4 Características geomorfológicas.**

El territorio estudiado presenta un relieve montañoso, en su forma presente se ha formado por las acciones conjuntas de diferentes factores tanto climatológicos como tectónicos, durante la etapa plioceno cuaternario, durante este período se formaron diferentes tipos de superficie, entre las que se destacan, superficies formadas por los procesos exógenos (denudación y acumulación) y endógenos (litomórficos, volcano-plutónicos y tectonomórficos).

Las formas del relieve son de diferentes clases: de gravitación, diluvial-proluvial, y tectónica.

A las clases gravitacionales pertenecen las formas de relieve formadas por los procesos de derrumbe y deslizamiento, con mayor frecuencia aparecen y se desarrollan en las fuentes de arroyos y ríos, en los lugares de las inclinaciones máximas, así como en las pendientes abruptas.



Según la clasificación de Spiridonov, en el anexo 12, están representadas las unidades geomorfológicas del área de estudio, las cuales son clasificadas de: complejo de llanuras 0 - 200m, alturas de bajas a medias 200 - 400m y montañas bajas de 400 - 796m.

#### **2.4.1 Características sísmicas del área de estudio.**

La región sur oriental de Cuba se encuentra en la zona de influencia de la falla Oriente, conocida también como Bartlett - Caimán, la cual constituye un límite de placas significativo en la región del Caribe. Esta falla es la zona sismogeneradora más activa del territorio cubano, con un movimiento diferencial de alrededor de 20 mm/año, además la zona Sismogénica Purial su trazado coinciden aproximadamente en cuanto a su potencialidad. Variando el mismo entre 4,9 y 6,5 grados de magnitud Richter; la Zona Sismogénica Sabana es la porción Oriental de la estructura conocida como Norte Cubana que tiene una extensión total de casi 1 000,0 km. La dislocación se establece en muchos perfiles sísmicos transversales a lo largo del talud Norte Cubano los que detectaron desplazamientos de hasta 300,0 m de salto vertical.

Esta estructura constituye un límite del sistema tectónico interplacas y presenta un contraste significativo entre el borde nororiental del megabloque cubano y la depresión submarina de sutura del Canal Viejo de Bahamas, la sismicidad de esta es bastante significativa en volumen, distribuyéndose fundamentalmente en los lugares de intersección con las fallas que la cortan de dirección Suroeste - Noreste, lo cual hace que se diferencien tres sectores:

- ✚ Oriental, se prolonga al Este, desde la bahía de Nipe, se diferencia por su expresión geomorfológica fundamentalmente y que se relaciona con la falla Sabana.
- ✚ Central, desde la bahía de Nipe hasta Nuevitas.
- ✚ Occidental, que se extiende hacia el Oeste, desde la bahía de Nuevitas.

Todos los autores coinciden en su trazado a todo lo largo de la costa Norte cubana; pero no en cuanto a su potencialidad, variando la misma entre 5,3 y 7,0 de magnitud Richter. La sismicidad de esta zona es bastante significativa en volumen,



distribuyéndose fundamentalmente en los lugares de intersección con las fallas que la cortan de dirección Suroeste – Noreste.

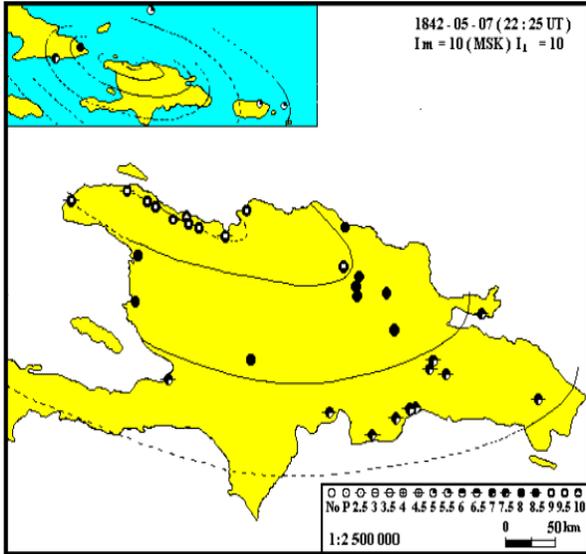
Otras zonas activas que inciden en el comportamiento de la sismicidad de la provincia de Guantánamo son la Sabana 1 con una magnitud máxima de 7.0 Richter y Purial con una magnitud máxima de 6.5. Es de significar que a pesar de la potencialidad sísmica que presentan las zonas sismogénicas de la provincia Guantánamo, las mayores afectaciones producidas en la provincia de Guantánamo se deben a terremotos cuyos epicentros se localizaron en la parte Norte de La Española (Haití y República Dominicana), o bien al Sur de la provincia de Santiago de Cuba; en ningún caso por sismos generados por las zonas activas localizadas en este territorio.

La carretera objeto de estudio comprende los municipios de Imias y Baracoa, donde, se han registrado históricamente muchos sismos de los cuales una cantidad apreciable han sido perceptibles por la población. Igualmente, sismos con epicentro en otras provincias han afectado a esta zona de alguna manera. Los casos más significativos ocurrieron dentro de los últimos 30 años.

En esta zona sismogeneradora han ocurrido 20 de los 28 sismos fuertes reportados en Cuba, es de especial interés significar que de estos sismos fuertes ocurridos en Santiago de Cuba, 2 de ellos produjeron intensidad  $I = 9.0$  MSK en áreas de la provincia de este nombre en 1766 (Magnitud Richter  $M_s = 7.6$ ) y 1852 ( $M_s = 7.3$ ), reportándose de ambos considerables daños en toda la región oriental. Así también, los más recientes que han afectado a la ciudad de Santiago de Cuba se reportan en 1932 ( $I = 8.0$  MSK) y 1947 ( $I = 7.0$  MSK).

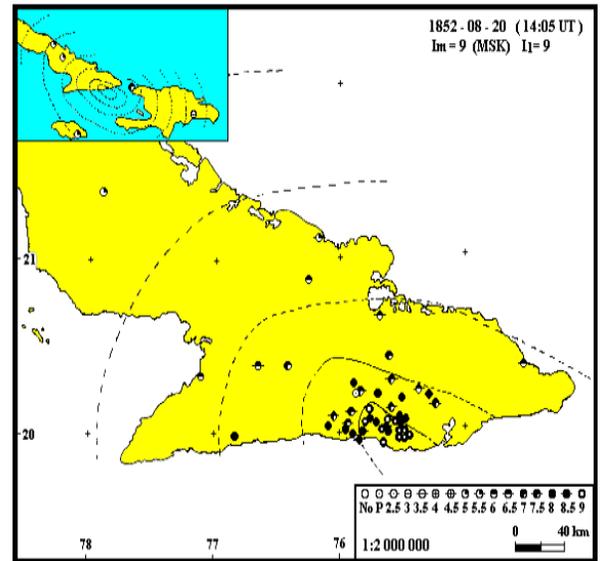
Es de significar que a pesar de la potencialidad sísmica que presentan el área de estudio, las mayores afectaciones producidas en este zona se deben a terremotos cuyos epicentros se localizaron en la parte norte de La Española (Haití y República Dominicana) o bien al sur de la provincia de Santiago de Cuba; en ningún caso por sismos generados por las zonas activas localizadas en este territorio (figuras 8 y 9). Cuando los epicentros de los movimientos telúricos fuertes se localizan en el sector desde Baconao hasta la bahía de Santiago de Cuba, siempre han sido reportados en

la ciudad de Guantánamo con 0,5 a 1,0 grados de intensidad MSK menos que en la ciudad de Santiago de Cuba.



Mapa de Isosistas del Terremoto de La Española del 7 de Mayo de 1842 de 10,0 grados MSK. Tomado de Chuy, 1999.  
NOTA: Im - Intensidad máxima ; I<sub>1</sub> - Primera isosista ; P - perceptible ; Las intensidades en MSK.

Fig.8 Isosistas del terremoto de 10,0 grados MSK de La Española.



Mapa de Isosistas del Terremoto de Santiago de Cuba del 20 de Agosto de 1852 de 9,0 grados MSK. Tomado de Chuy et al, 1991.  
NOTA: Im - Intensidad máxima ; I<sub>1</sub> - Primera isosista ; P - perceptible ; Las intensidades en MSK.

Fig.9. Isosistas del terremoto de 9,0 grados MSK de Santiago de Cuba.

Según estudios realizados, se definieron las características principales de las zonas sismogénicas de la región suroriental, que pueden generar magnitudes capaces de provocar efectos negativos sobre las instalaciones (figura 10); para ello la zona cercanas que mayor incidencia tiene en el área de estudio son Oriente 1, Oriente 3, Baconao 1, Santiago - Moa y Purial, siendo la primera la de mayor potencialidad sísmica.

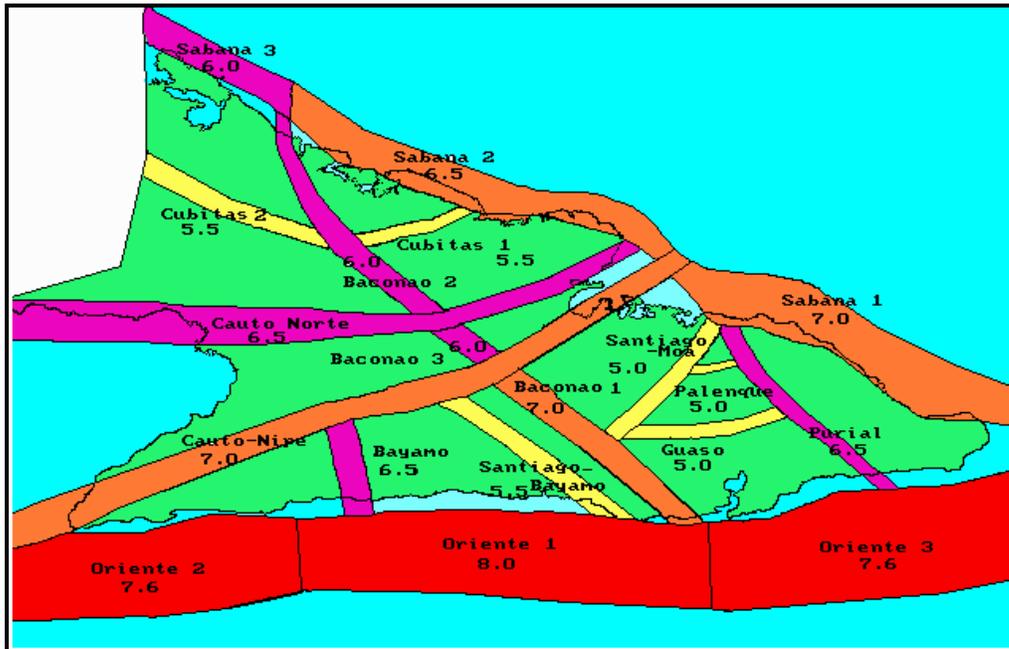


Fig. 10 Zonas Sismogénicas de la región Sur Oriental.

#### *Zona Sismogénica Oriente (Bartlett - Caimán)*

Está asociada a la falla geológica transcurrente Oriente que se encuentra al S de Cuba oriental, presentando una dirección predominante de E a W y constituye el límite entre las placas de Norteamérica a la que pertenece Cuba y la microplaca del Gonave a la que pertenece la fosa de Bartlett y la isla de La Española (figura 11).

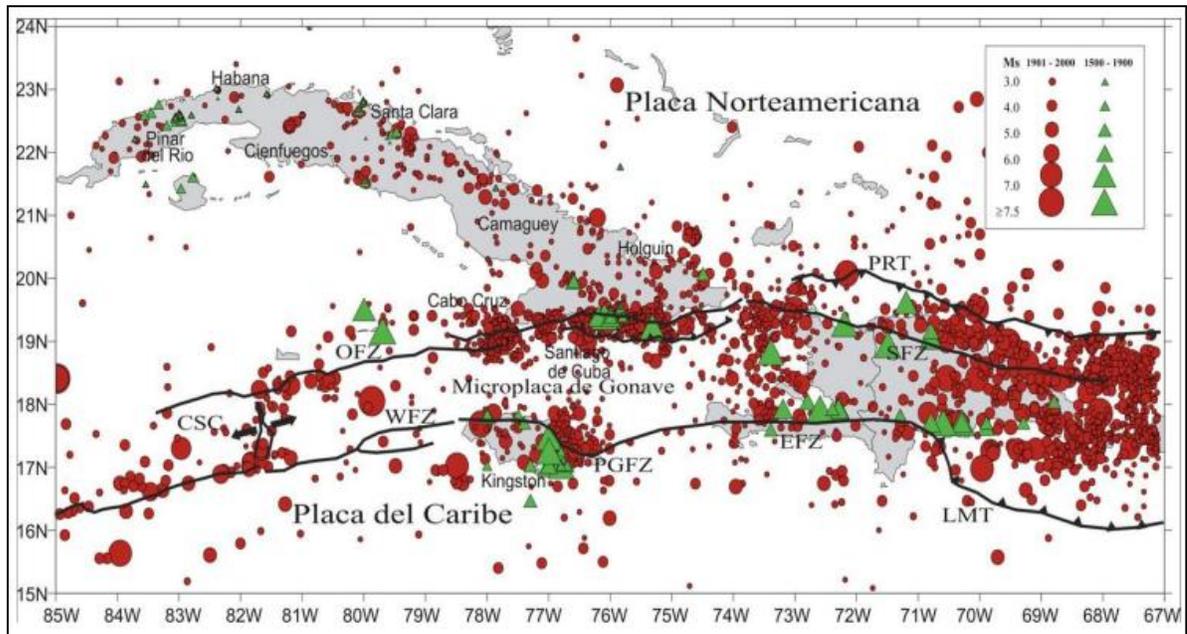


Fig. 11. Génesis de la sismicidad de la República de Cuba

Constituye además un límite de morfoestructuras del sistema tectónico global y presenta un contraste topográfico muy significativo (+8 000 m) entre los megabloques de la cresta y la fosa Bartlett - Caimán. A esta se asocia la más alta sismicidad de todo el territorio cubano, incluyendo los terremotos de mayor intensidad conocidos hasta entonces a partir del siglo XVI.

En los últimos 15 años se han registrado instrumentalmente más de 3 000 terremotos débiles y moderados. La alta actividad tectónica del territorio también se manifiesta en los altos gradientes de las velocidades de los movimientos neotectónicos, especialmente en la región de la sierra Maestra. La magnitud máxima estimada que puede esperarse para la zona es de 8,0 Richter (Comisión Ad Hoc, 1991).

En la determinación de los parámetros de cálculo para el Terremoto Máximo de Cálculo (TMC) y el Terremoto de Proyecto (TP); para todas las zonas se utilizó en el TMC un período de recurrencia ( $T_r$ ) de 1 000 años, tiempo de vida útil ( $T_u$ ) de 50 años y probabilidad de no excedencia ( $p$ ) de 85 %; en el TP un  $T_r$  de 100 años,  $T_u$

de 50 años y una p del 61 %. La zona sismo generadora Oriente 1 tiene para el TMC, una magnitud de 7,5 y para el TP una magnitud de 6,9.

### Peligrosidad sísmica en la provincia de Guantánamo

Utilizando el nivel actual de conocimiento que se tiene de las zonas sismogénicas de Cuba y sus niveles de actividad específica, se adquieren estimados de peligrosidad en términos de intensidad y otros parámetros dinámicos, tales como la aceleración horizontal, tanto en forma probabilística, como determinística. Esta última, se refleja en los periodos de recurrencia, donde los valores de intensidad sísmica puedan repetirse cada cierto número de años.

En las figuras 12 y 13, se observa que el peligro en términos de intensidad sísmica es del orden de los 7,0 - 8,0 grados MSK, para el municipio de Guantánamo (8,0) en toda su extensión. Para el caso de las aceleraciones horizontales los valores regionales están entre 20 y 30 % de la fuerza de gravedad. Los valores de intensidad (MSK) y aceleración horizontal (% de g) son los máximos. Los estimados cartografiados se realizaron para perfiles de suelo medio tipo S2, una probabilidad de ocurrencia del 15 % y un período de vida útil de 50 años.

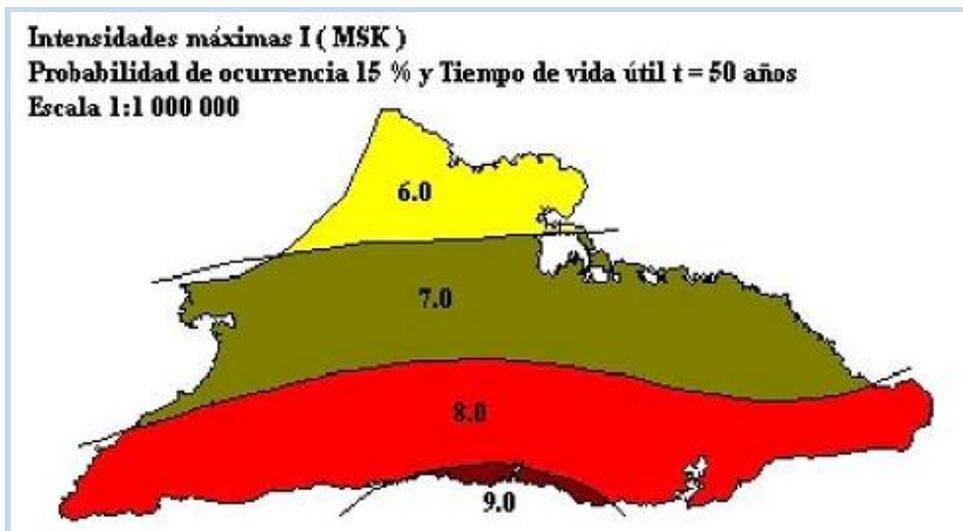


Fig. 12 Esquema de intensidades máximas a esperar (MSK) para la región oriental de Cuba.

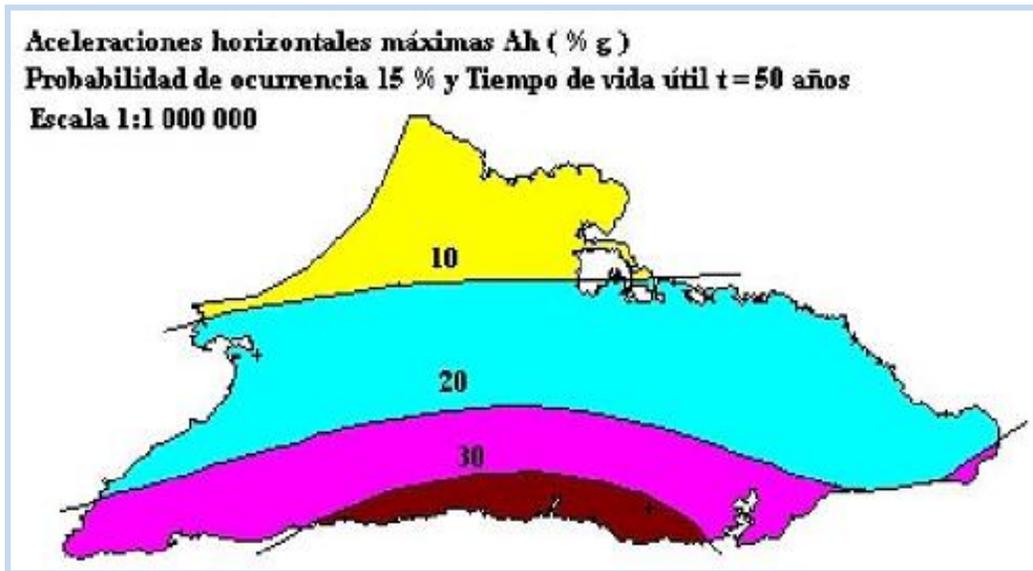


Fig. 13 Esquema de aceleraciones horizontales máximas a esperar (% g) para la región oriental de Cuba.

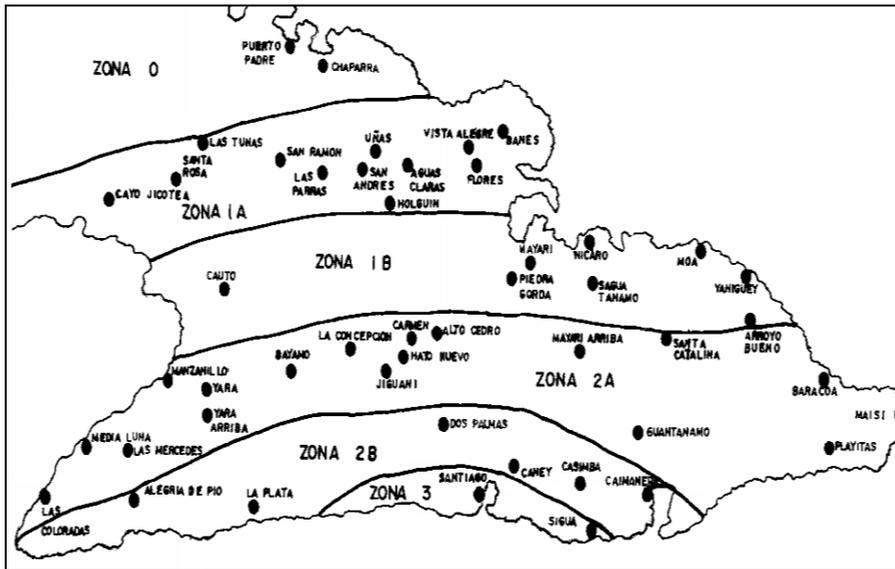


Fig. 14 Mapa de la zonificación sísmica de la parte oriental, según la NC 46: 1999.

El Área de estudio se localiza en la zona sísmica 2A (figura 14), de acuerdo a los parámetros y delimitaciones que se establecen en la Norma Cubana 46:1999 "Construcciones Sismorresistentes Requisitos Básicos para el Diseño y Construcción", lo que implica riesgo sísmico moderado, que puede ocasionar afectaciones en las construcciones, e incita a la toma de medidas preventivas sismorresistentes en todas las estructuras y obras. Los valores de la aceleración horizontal máxima del terreno en esta área es de 0,15 g (147,0 cm/s<sup>2</sup>).

#### 2.4.2 Procesos geodinámicos y antrópicos presentes en el área de estudio.

La situación geográfica del vial La Farola, ubicada en las estribaciones del Macizo Nipe – Sagua - Baracoa, condiciona la existencia de fenómenos que favorecen a la

ocurrencia de deslizamientos, desprendimientos o derrumbes de taludes, los cuales se pueden agrupar en dos tipos: fenómenos geodinámicos y fenómenos antrópicos.

✓ **Movimientos de masas.**

Es uno de los fenómenos más desarrollados en el área, debido a la existencia de taludes inestables con alturas que pueden alcanzar los 50 m y ángulos de inclinación que varía entre 20 - 75 grados, todo esto unido al intenso agrietamiento y fracturación de las rocas, la intensa actividad sismo-tectónica de la región y los elevados índices pluviométricos hacen que este fenómeno este presente a todo lo largo de la carretera que ocupa el área de estudio, figura 15.



Fig. 15 Desprendimiento de bloques en el talud de la carretera.

Alto de Cotilla

✓ **Sismicidad.**

Esta zona se caracteriza por una gran actividad sísmica, como consecuencia de su cercanía a la estructura geológica Bartlett - Caimán, límite entre las placas del Caribe y Norteamérica. Esta estructura sismogeneradora es capaz de producir sismos de hasta 8,0 grados de magnitud Ritcher.

Es importante conocer que a pesar de presentar la Sismicidad de Interior de Placa una menor frecuencia de ocurrencia de terremotos en ellas, su ubicación en el interior del territorio, así como la poca profundidad de los hipocentros de los sismos, hacen que en ocasiones los efectos de estos sismos de menor magnitud produzcan afectaciones significativas, figura 16.



Fig. 16 Deslizamiento en el viaducto la Farola producido por movimientos sísmicos

✓ **-Erosión:**

Está presente en todo el corte de la carretera y se desarrolla por la influencia no solamente de las aguas superficiales, sino también de los flujos de agua sub-superficiales y la deforestación producida por la construcción de la carretera, figura 17.



Fig. 17 Erosión en el talud de la carretera. Localidad Yumurí del Sur

✓ **Actividad antrópica.**

Se ve reflejada fundamentalmente en la construcción de la carretera el vial La Farola, la cual en la mayoría de los casos presenta taludes con alturas que oscilan entre los 20 y 90 metros y una inclinación de 60 a 90° lo que ha provocado que los taludes se encuentren en un estado donde se ha alterado completamente el estado de equilibrio tensional (estabilidad natural) del macizo rocoso a favor de la acción de la fuerza de

la gravedad, la cual supera en estas condiciones, al conjunto de esfuerzos que se oponen al deslizamiento del suelo o derrumbe de bloques de rocas que forman los taludes, figura 18.



Fig. 18 Viaducto La Farola. Tramo Palma Cana – Cagüeybaje

### 2.4.3 Conclusiones

- ✓ La zona de estudio se caracteriza por las formaciones Sierra del Purial, representada por la presencia de una secuencia de rocas vulcanogenas sedimentarias, generalmente metamorfizadas en la facies de esquistos verdes llegando localmente hacia los esquistos galucofánicos, andesitobasaltos y basaltos, principalmente tovas y lovobrechas, andesidacitas, areniscas polimícticas, areniscas derivadas de granitoides e intercalaciones y lentes de calizas, y el Complejo Magmático Tectonitas, compuesto por Serpentinitas, Harzburgítas, Iherzolitas, dunitas y piroxenitas con diferentes grados de serpentización y serpentinitas, en los cuales se manifiestan fenómenos de fracturación y agrietamientos intensos, siendo uno de los factores que condicionan la ocurrencia de fenómenos de deslizamientos.
- ✓ La ubicación geográfica de esta carretera condiciona que la misma se vea afectada por el efecto de los sismos ocurridos en la región sur oriental siendo otro de los factores que condicionan la ocurrencia de los fenómenos de deslizamientos.
- ✓ Alrededor de un 70% de los taludes que se encuentran en la carretera, su pared presenta una orientación paralela o subparalela a la orientación de los sistemas de



grietas principales, y de estos, ya en el 80% se han manifestado o se manifiestan de alguna manera deslizamientos, derrumbes o desprendimientos de rocas.

- ✓ La ocurrencia de abundantes precipitaciones son unos de los factores condicionantes en la ocurrencia de deslizamientos.

## **CAPÍTULO III – METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO POR INESTABILIDAD DE TALUDES Y LADERAS.**

### **3.1 Introducción**

En el presente capítulo se hace una descripción de la metodología aplicada durante la investigación, para la evaluación de la susceptibilidad del terreno por inestabilidad de taludes y laderas en el vial La Farola, se parte del estudio bibliográfico de los trabajos precedentes, las observaciones realizadas durante los trabajos de campo y el procesamiento de toda la información existente.

Se ha empleado la metodología para el estudio de la susceptibilidad al deslizamiento, denominada método Mora-Vahrson-Mora (MVM) (Mora, R. et al., 2002), para establecer los sectores con potencial probabilidad de presentar deslizamientos en caso de lluvias de intensidad alta, sismos de magnitud importante o una combinación de ambos.

Esta metodología permite obtener una zonificación de la susceptibilidad del terreno a deslizarse, mediante la combinación de la valoración y peso relativo de diversos indicadores morfodinámicos, la cual es sencilla de implementar en un sistema de información geográfica (Mora, R. et al., 2002).

La combinación de los factores y parámetros se realiza considerando que los deslizamientos ocurren cuando en una ladera, compuesta por una litología determinada, con cierto grado de humedad y con cierta pendiente, se alcanza un grado de susceptibilidad (factores pasivos) (Mora, R. et al., 1992). Bajo estas



condiciones, los factores externos y dinámicos, como son la sismicidad y las lluvias intensas (factores desencadenantes) actúan como factores de disparo que perturban el equilibrio, la mayoría de las veces precario, que se mantiene en la ladera (Mora, R. et al., 1992).

Es así como se considera que el grado de susceptibilidad al deslizamiento es el producto de los elementos pasivos y de la acción de los factores de disparo (Mora, R. et al., 1992):

$$S = Sep * Sed$$

Donde:

**S**: Susceptibilidad por deslizamiento.

**Sep**: Susceptibilidad por elementos pasivos.

**Sed**: Susceptibilidad por factor de disparo.

Por su parte el valor de los elementos pasivos se compone de los siguientes parámetros (Mora, R. et al., 1992):

$$Sep = SI * Sp * Sh * St$$

Donde:

**Sp**: susceptibilidad por pendiente.

**SI**: susceptibilidad litológica.

**St**: susceptibilidad tectónica.

**Sh**: susceptibilidad humedad del terreno.

El factor de disparo se compone de los siguientes parámetros (Mora, R. et al., 1992):

$$Sd = Ds + DII$$

Donde:



**Ds:** valor del parámetro de disparo por sismicidad

**DII:** valor del parámetro de disparo por lluvia.

Sustituyendo los parámetros apropiados, la ecuación original se puede expresar como (Mora, R. et al., 1992):

$$S = (Sp * SI * St * Sh) * (Ds + DII)$$

De esta ecuación se pueden derivar las relaciones (Mora, R. et al., 1992):

$$Ss = (Sp * SI * St * Sh) * (Ds)$$

$$SII = (Sp * SI * St * Sh) * (DII)$$

Donde:

**Ss:** susceptibilidad al deslizamiento por sismicidad, y

**SII:** susceptibilidad al deslizamiento por lluvias.

Para los resultados de la combinación de todos los factores no se puede establecer una escala de valores única, pues los mismos dependen de las condiciones de cada área estudiada.

### **3.2 Etapas para la determinación de la susceptibilidad por deslizamientos.**

El análisis de susceptibilidad por deslizamientos se realizó en varias etapas fundamentales:

#### **Etapa I. Recopilación de la información**

Es la etapa clave en el desarrollo de cualquier investigación, para realizar la misma se revisaron múltiples bibliografías referentes al tema de peligro por deslizamiento y la cartografía de susceptibilidad a los deslizamientos usando los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se realizaron búsquedas en el centro de información del ISMM, donde se tuvo acceso a revistas, trabajos de diploma, tesis de maestría y doctorales.



También se realizaron búsquedas en Internet relacionada con este tema contribuyendo significativamente al enriquecimiento de información con datos actualizados.

En esta etapa se recopiló toda la información necesaria para esta investigación como son las características de la zona de estudio, se prepararon los diferentes mapas como son el mapa geológico, mapa tectónico, mapa de red fluvial y el MDT del área.

## **Etapa II. Trabajos de campo.**

Los trabajos de campo se realizaron con el objetivo de delimitar el área de estudio y realizar la documentación necesaria para esta investigación. La zona de estudio corresponde a las hojas cartográficas 1:25 000, 5376 - III - c "Cajobabo", 5376 - III - a "La Farola" y 5376 - IV - c "Paso de Cuba", abarcando una longitud aproximadamente de 34 Km de carretera, en los cuales se describieron los deslizamientos existentes en los taludes de la carretera estudiada teniéndose en cuenta la ubicación geográfica del punto, altura, longitud y ángulo del talud, azimut y ángulo de buzamiento de las estructuras, se realizaron mediciones de grietas y familias de grietas y se describieron las rocas presentes así como su grado de alteración y agrietamiento..

Para facilitar la documentación de los deslizamientos se utilizó el modelo de la Planilla de Inventario de deslizamiento de terreno de la Republica de Cuba confeccionada por el Grupo Nacional de Evaluación de Riesgo de la AMA-CITMA.

## **PLANILLA DE INVENTARIO DE DESLIZAMIENTOS DE TERRENO**

### **1. Localización**

1.1 Nombre del que registra:

1.2 Fecha de registro: 1.3 Provincia:

1.4 Municipio: 1.5 Localidad del evento:

Coordenadas del evento: 1.7 X: 1.8 Y:



1.9 Escala del mapa donde se tomaron las coordenadas:

## 2. Clasificación:

Tipo de material: 2.1 Roca: 2.2 Detrito: 2.3 Suelo:

Tipo de evento: 2.4 Caída: 2.5 Volcamiento: 2.6 Deslizamiento: 2.7 Propagación: 2.8 Flujo:

## 4. Otros datos de interés:

---

---

---

### 3.3 Factores que contribuyen con la ocurrencia de deslizamiento de tierra.

Los deslizamientos que ocurren en el vial la Farola son ocasionados por un conjunto de factores que inciden directamente en la ocurrencia de los mismos y en dependencia de cómo actúan se clasifican en dos grupos ver tabla 13:

a) *Condicionantes*, también conocidos como pasivos o intrínsecos, son aquellos que dependen de la naturaleza, estructura y forma del terreno como por ejemplo la constitución geológica, (tipos de rocas, estructura, fallas tectónicas, ángulos de agrietamiento y de estratificación), grado de meteorización y la altura e inclinación del talud.

b) *Desencadenantes*, también llamados activos o externos, son factores que actúan desde fuera del medio que se estudia, provocando o desencadenando un deslizamiento, como son los eventos hidrometeorológicos extremos que provocan lluvias torrenciales y los fuertes sismos.

Los factores pasivos varían significativamente en cada uno de los taludes de la carretera, en los sectores donde predominan rocas con alto grado de meteorización se producen con mayor frecuencia los flujos detríticos de suelo, ocurrido en la mayoría del trayecto, Sin embargo en los taludes formados por rocas poco meteorizadas pero muy agrietadas y fracturadas se producen desprendimientos o



caídas de bloques de diferentes tamaños ante sacudidas del terreno al ocurrir un sismo de moderada o gran intensidad.

Tabla: 13 Factores utilizados en el análisis de susceptibilidad.

FACTORES	<i>Pasivos</i>	Factor geomorfológico	Pendiente, aspecto de la pendiente
		Factor litológico	Litologías presentes
		Factor tectónico	Densidad de fallas
		Humedad del terreno	Lluvia potencial
	<i>Disparos</i>	Factor Sísmico	Intensidad y magnitud de los sismos.
		Factor intensas Lluvias	Ocurrencia de lluvia máximas diaria (mm)

#### Factor geomorfológico.

La pendiente del terreno fue el factor geomorfológico utilizado, y expresa la inclinación de la superficie del terreno, es considerado como uno de los factores más importantes a tener en cuenta ya que se necesita de cierta pendiente para que se produzcan estos movimientos de ladera.

En los taludes descritos durante los trabajos de campo se pudo observar que presentan alturas que oscilan entre los 15-50 m, con una inclinación que varía de 50° - 75°, casi más del 50 % de la pared de los taludes presentan sistemas de grietas con una orientación paralela o subparalela, lo que permite que en más del 85 % de los mismos se han manifestado o se manifiestan de alguna manera deslizamientos de rocas.

Los intervalos de pendiente seleccionados, se tomaron sobre la base de la clasificación modificada de Van Zuidam (1986).

#### Factor estructural

Para el análisis de este factor se tuvieron en cuenta las fallas inclinadas, verticales y subverticales, las cuales actúan como planos de debilidad tectónica y juegan un papel importante en la inestabilidad de los taludes.



La información cartográfica de las fallas se obtuvo del esquema de tectónica del Nuevo Atlas Nacional de Cuba. Editado por el Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía. La Habana 1989 (figura 19).

Este factor se determinó con el método de densidad lineal con el cual se calcula la cantidad de rasgos lineales correspondiente a las líneas de fallas en la vecindad de cada celda del raster, la densidad es calculada en unidad de longitud por unidad de área, en nuestro caso Km x Km<sup>2</sup>.

Conceptualmente se hace un radio de búsqueda a partir del centro de cada celda, la longitud de la porción de cada línea que se encuentra dentro de radio de búsqueda es multiplicada por su cantidad, sumándose el total y dividiéndose por el área del círculo creado a partir del radio de búsqueda. (Reference Silverman, B.W. Density Estimation for Statistics and Data Analysis. New York: Chapman and Hall, 1986).

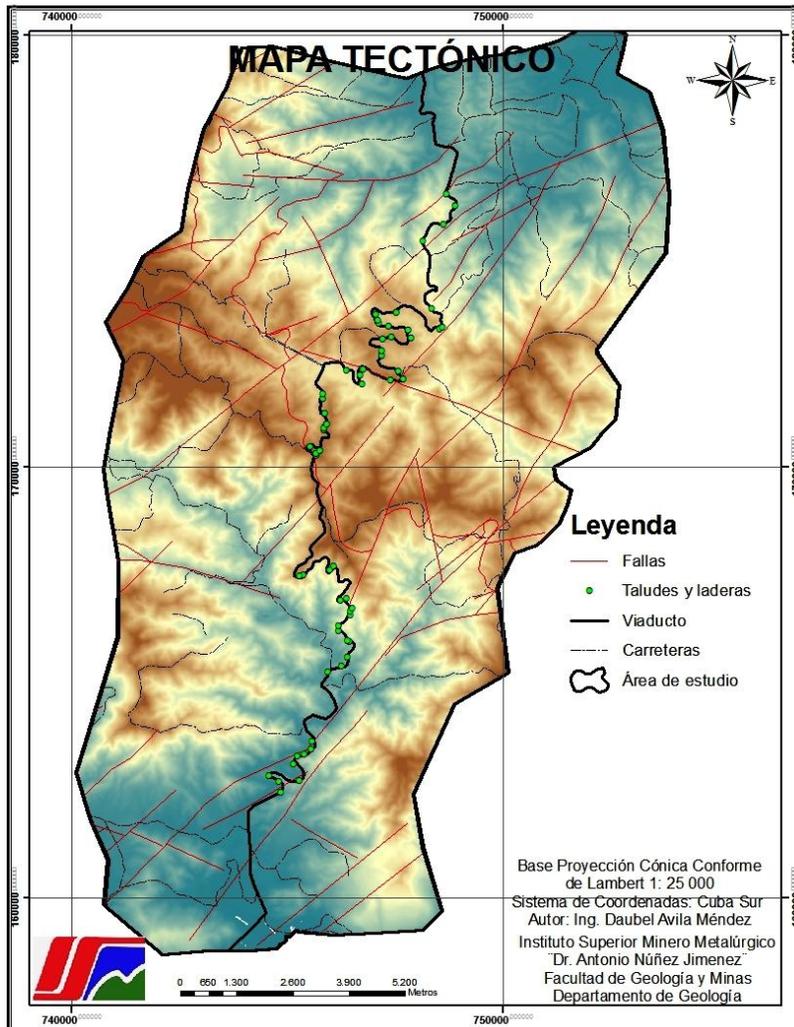


Figura 19 Mapa tectónico. (Escala: 1:80 000).

### Factor Litológico.

Los tipos de suelos y rocas juegan un papel preponderante en el comportamiento dinámico de las laderas (Mora, R. et al., 1992). La composición mineralógica, la capacidad de retención de humedad, los espesores y grado de meteorización, el estado de fracturamiento, el ángulo de buzamiento, la posición y variación de los niveles freáticos, etc., influyen claramente en la estabilidad o inestabilidad de las laderas (Mora, R. et al., 1992).



La evaluación del factor litológico, se evaluó a partir de la clasificación de las rocas (modificado de Nicholson y Hencher, 1997) de acuerdo a grupos litoestructurales, teniendo en cuenta sus susceptibilidades, resistencia y características litológicas.

En dependencia de estos grupos el área de estudio se clasificó en tres grupos litoestructurales (ver tabla 14), el primer grupo esta formado por las rocas fuerte masiva, Sierra del Purial, representado por las rocas magmáticas dioritas, andesitas, basaltos, tovas y lavobrechas, areniscas polimígticas, el segundo grupo representado por las rocas fuertes discontinuas representado por las formaciones Charco, Redondo, San Luis y Complejo Magmático las Tectónitas por Serpentinatas Harzburgitas, dunitas, la cual aflora en casi todo el trayecto del vial, y el tercer grupo formado por rocas debilitadas tectónicamente Grupo El Cobre y las rocas débil granular la formación San Ignacio.

Tabla 14 Caracterización de los grupos lito-estructurales de la zona de estudio.

Factor litológico				
Clases	Grupos lito-estructurales	Formación	Litología	Características en el área de estudio
I	Roca fuerte masiva	Rocas magmáticas	Andesitas, dioritas cuarcíferas y andesitas	Se observan de forma masivas en mayor grado alteradas.
II	Roca fuerte discontinua	Complejo Magmático Tectónitas	Serpentinatas Harzburgitas, dunitas en menor cantidad aparecen calizas; intercalaciones de argilitas. Las tobas y aglomerados de esta unidad son de composición básica.	Tobas aglomeráticas andesito basalto, con intercalaciones finas de argilitas, calizas y aleurolitas.
		Charco Redondo y	Areniscas Polimígticas, Limolitas, margas,	Representada por calizas biodetríticas



		<b>San Luis</b>	arcillas, caliza arcillosas	masivas, generalmente carstificadas, muy fosilíferas
<b>III</b>	<b>Roca debilitada tectónicamente</b>	<b>Grupo El Cobre</b>	Secuencias vulcanógeno-sedimentarias, con predominio de tobas de composición andesítico-basáltica, de modo subordinado, aparecen areniscas, aleurolitas y calizas tobáceas, así como mantos de andesita y andesita-basálticos.	Rocas masivas de composición andesítica muy tectónizadas, con direcciones bien definidas de las discontinuidades, coincidiendo en algunos lugares con el ángulo del talud provocando grandes derrumbes y desprendimientos (40° a 60° de acimut).
	<b>Roca débil granular</b>	<b>Sierra del Purial</b>	Depósitos aluviales, cantos rodados, gravas, arenas, aleurolitas y arcillas derivados de la erosión fluvial y regional.	Susceptible a meteorización del material, muchas veces tienden a ser inestables y son susceptibles a procesos de erosión.

### Factor Humedad del terreno.

Las intensas lluvias es un factor que se debe de tener en cuenta ya que influyen en el aumento de la humedad del terreno, ver anexo 13. Para el cálculo de este factor se utilizó la clasificación de Mora, R et. al (1992), teniendo en cuenta la precipitación media mensual (mm) tomada de las mediciones de los acumulados de precipitación de los últimos 5 años (2009-2014) de 7 pluviómetros pertenecientes al municipio



Imias y el valor de la evaporación (mm) calculado en base a los % de evaporación mensual tomados del Atlas de Cuba (1989).

#### Factor disparo sísmicos

Los sismos constituyen uno de los principales factores catalizadores dinámico de los fenómenos gravitacionales ya que durante la ocurrencia de los mismos las rocas son sometidas a vibraciones que provocan la ocurrencia de deslizamiento. En este municipio, se han registrado históricamente pequeños sismos de los cuales han sido perceptibles por la población. Igualmente, sismos con epicentro en otras provincias han afectado a esta zona de alguna manera.

Para el análisis de este factor se utilizó el mapa de peligro sísmico de la región Oriental de Chuy et al, 2000.

#### Factor disparo intensas lluvias

Dentro de los elementos que conforman el clima de una región, la lluvia es un agente importante como factor disparador de fenómenos gravitacionales.

La región montañosa Nipe-Sagua-Baracoa es una zona donde existe un alto acumulado de precipitaciones y muchas veces se ve afectada por eventos meteorológico como son ciclones que vienen acompañados de gran cantidad de lluvia y fuertes vientos haciéndolos susceptibles a la ocurrencia de grandes deslizamientos de tierra.

Para la clasificación de este factor se utilizó la valoración del parámetro de disparo por lluvias (Mora, R. et al., 1992) (ver tabla 15)



Tabla 15. Valoración del parámetro de disparo por lluvias.

Lluvia máxima en 24 horas, período de retorno 100 años [mm]	Descripción	Valor del parámetro DII
< 100	Muy bajo	1
100-200	Bajo	2
200-300	Medio	3
300-400	Alto	4
> 400	Muy alto	5

Luego de haber analizado los diferentes factores pasivos y factores de disparos que inciden en la ocurrencia de deslizamiento se preparó toda la información existente en formato digital para ser procesada en un Sistema de Información Geográfica que permitirá obtener los diferentes tipos de mapas: mapa de pendiente, litológico, tectónico, humedad del terreno, red fluvial, inventario de deslizamientos, etc.

### **Etapas III. Procesamiento de la Información.**

Después de obtenida toda la información, esta se procesa utilizando **el SIG** ArcGis 9.3, el (figura 20), cual es una herramientas de gran capacidad de procesamiento gráfico y alfanumérico, dotadas de procedimientos y aplicaciones para captura, almacenamiento, análisis y visualización de la información georeferenciada.

El proyecto está formado por Tablas, Diagramas o Gráficos y Presentaciones. La información integrada en el proyecto se almacena en una base de datos Access La Farola, la cual contiene las tablas con toda la información del proyecto como son: ríos, viales, fallas, formaciones geológicas, peligro sísmico, etc, esta base de datos conjuntamente con el archivo con extensión \*.mxd componen toda la información del proyecto de investigación.

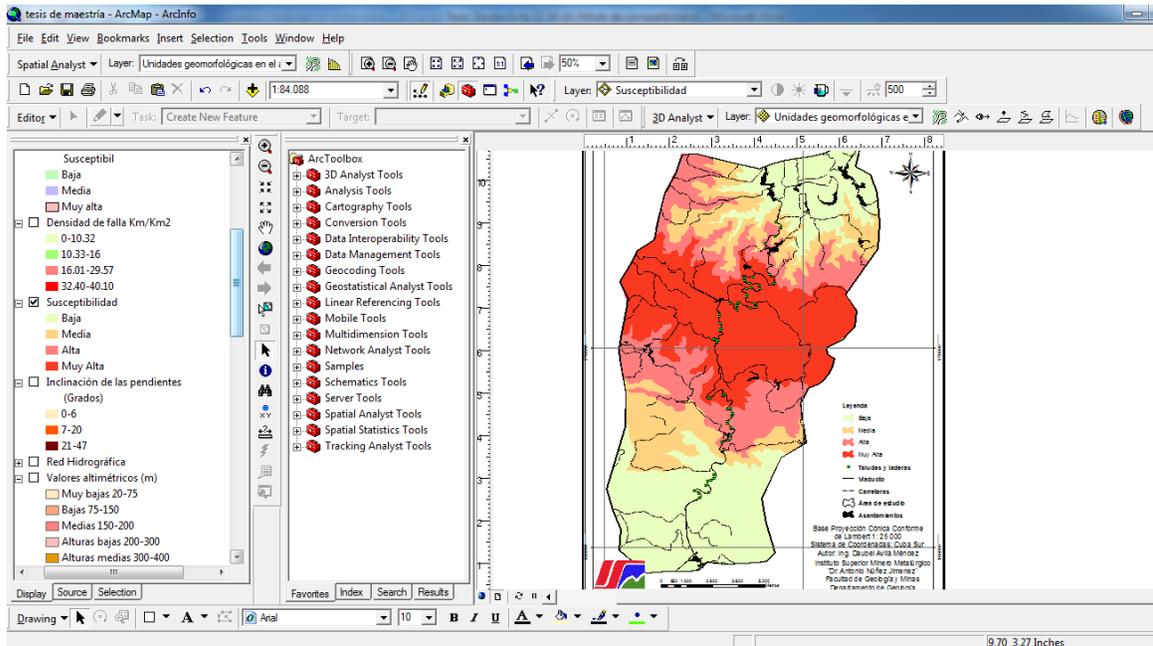


Fig. 20 Visualización del SIG,

La clasificación de los factores se realizó según la metodología para el estudio de la susceptibilidad al deslizamiento denominada Mora-Vasrson-Mora (MRM) (Mora, R. et al., 2002), la cual permite obtener una zonificación de la susceptibilidad del terreno a deslizarse mediante la combinación de la valoración y peso relativo de diversos indicadores morfodinámicos, la cual es sencilla de implementar en un SIG.

Una vez clasificados los factores pasivos y disparadores se procedió a la conversión en formato raster (figura 21) de toda la información.

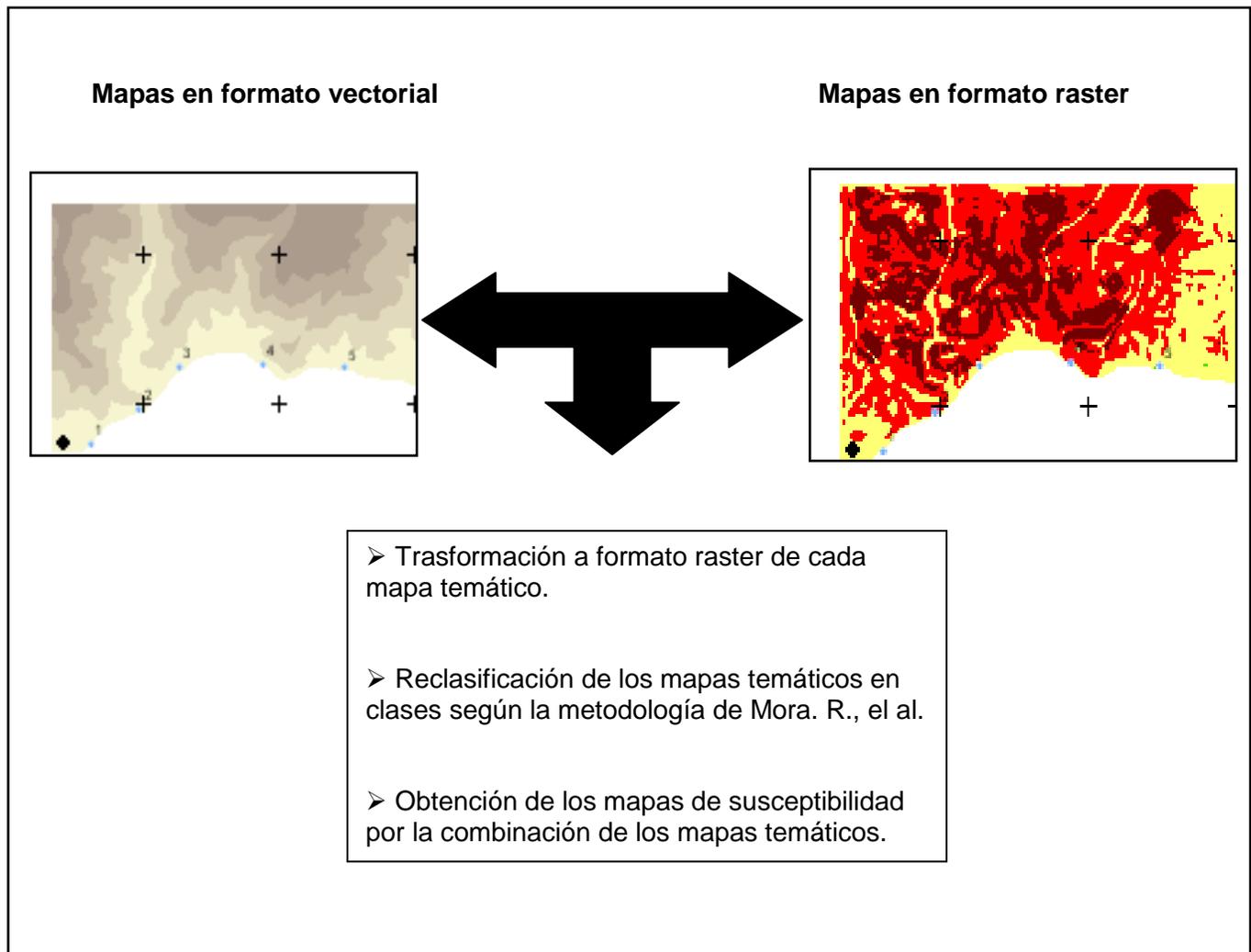


Fig. 21 Proceso de rasterización y reclasificación para la obtención de mapas de susceptibilidad

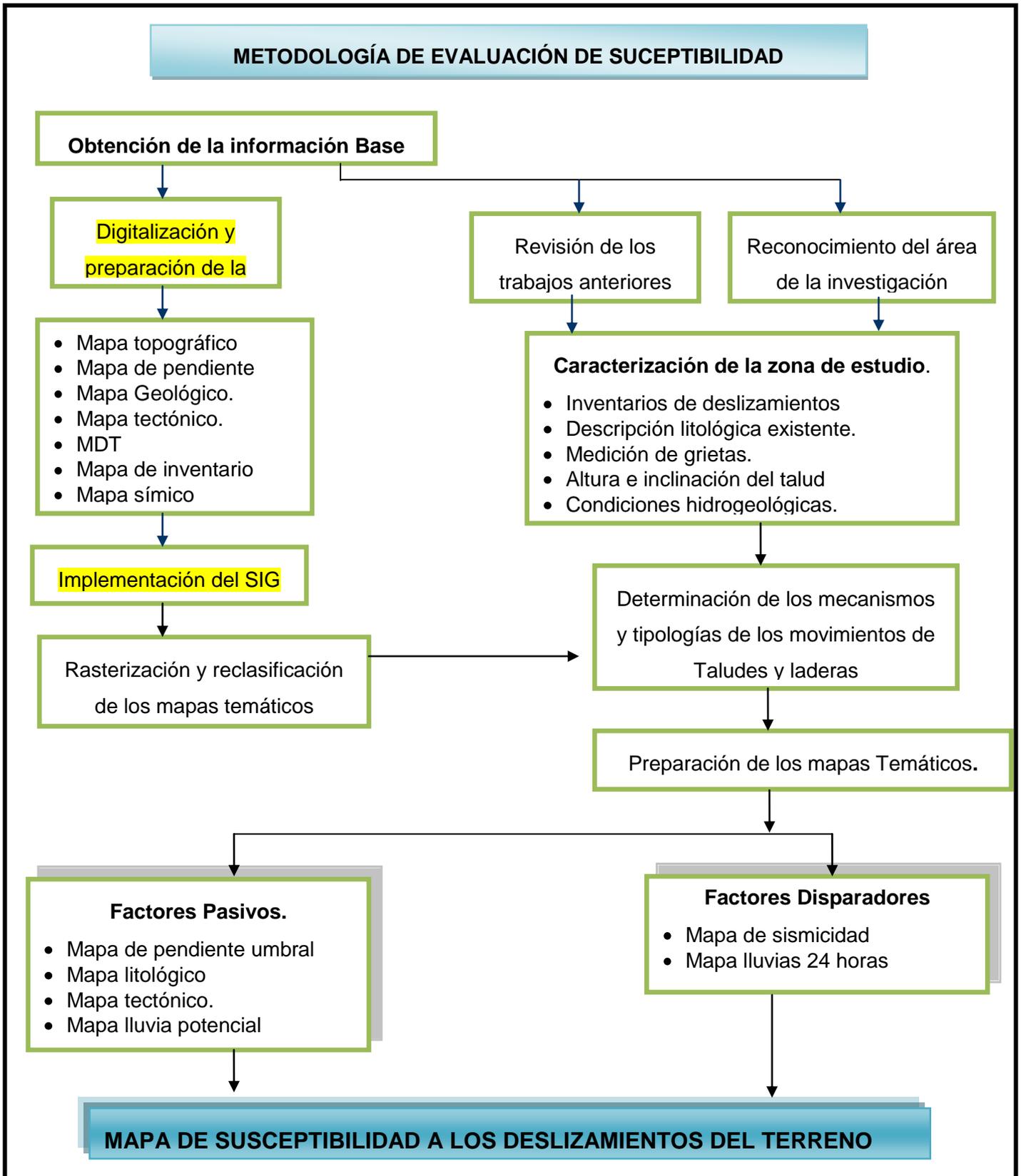


Fig.22 Metodología empleada en la evaluación de la susceptibilidad del terreno por deslizamientos.



### **3.4 Conclusiones**

Los factores que inciden en la inestabilidad de los taludes de la carretera estudiada son: factores pasivos (pendiente de los taludes, tipos lito-estructurales de rocas presentes, tectónica del área y humedad del terreno y los factores desencadenantes (actividad sísmica del área y las intensas lluvias).

## **CAPITULO IV. EVALUACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR INESTABILIDAD DE TALUD Y LADERA EN UN TRAMO DEL VIAL LA FAROLA.**

### **4.1 Introducción**

Como ya se ha comentado, para evaluar el grado de susceptibilidad del terreno frente a los deslizamientos existen diversas aproximaciones basadas la mayor parte de ellas en la determinación de los factores que influyen en la aparición de las roturas. En general, estos factores se combinan para definir los distintos grados de susceptibilidad, expresándose los resultados de forma cartográfica mediante los mapas de susceptibilidad.

La clasificación de los métodos empleados para evaluar la susceptibilidad a la rotura de una ladera así como para la realización de mapas, varían según los autores (Hansen, 1984; Hartlén y Viberg, 1988; Corominas, 1987 y 1992; Van Westen, 1993 y 1994; Carrara et al., 1995; y Leroi, 1996).

En este capítulo reflejamos los resultados del análisis de los factores condicionantes y su influencia sobre las inestabilidades y la aplicación de los métodos utilizados en la cartografía de susceptibilidad del terreno al desarrollo de deslizamientos.

### **4.2 Descripción de los deslizamientos.**

Los primeros trabajos realizados, con vista al análisis de la susceptibilidad del terreno, fueron de reconocimiento del área de la investigación para ubicar y

caracterizar los deslizamientos existentes, donde se describieron 50 taludes y ladera ubicados en el vial La farola, de los cuales se describieron 21 movimientos de ladera

A continuación se presentan las características de los movimientos descritos.

### Deslizamiento 1

*Ubicación:* Cerca del asentamiento Veguita del Sur.

*Dimensiones y dirección de la ladera o talud:* En la figura 23 se observa 30 m de talud muy inestable, fracturado con una altura que varía entre 15-28 m, azimuth  $170^{\circ}$  e inclinación  $78^{\circ}$

*Litología:* Brecha polimíctica con fragmentos de esquistos verdes, filitas y serpentinitas, en una matriz arcillosa.

*Características estructurales:* Agrietamiento medio, observándose familias de grietas con valores de  $180/85^{\circ}$  y  $140/85^{\circ}$ , los sistemas de grietas son ortogonales y forman bloques pequeños.

Características del movimiento.

*Dirección:* Los estratos buzcan con un rumbo perpendicular a la dirección del talud  $250/30^{\circ}$

*Tipo de movimiento:* Flujos detríticos



Fig.23 a) Deslizamiento; b) flujos de detríticos; c) Fragmento de roca. (2014)



## Deslizamiento 2

*Ubicación:* Sur de la localidad Veguita del Sur.

*Dimensiones y dirección de la ladera o talud:* La altura del talud es de 30 m con una longitud de 35 m, la ladera presenta una inclinación de  $35^\circ$  con un azimut de  $180^\circ$ , figura 24 y 25.

*Litología:* Andesitobasaltos y basaltos, principalmente tobas y lavobrechas, andesidacitas, areniscas polimícticas, areniscas derivadas de granitoides e intercalaciones y lentes de calizas. Estas rocas se encuentran metamorfozadas en condiciones de muy bajo grado.

*Características estructurales:* Talud muy fracturado y agrietado, las fracturas son casi perpendicular a la carretera.

### Características del movimiento.

*Dirección:* Grietas en diferentes direcciones, muchas prácticamente verticales, se observan familias de grietas,  $224^\circ/90^\circ$  y  $130^\circ/70^\circ$

*Tipo de movimiento:* Flujo detrítico.

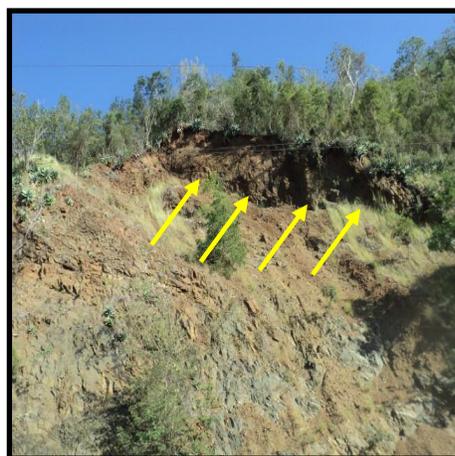


Fig. 24 Evidencias de desprendimiento de suelo.

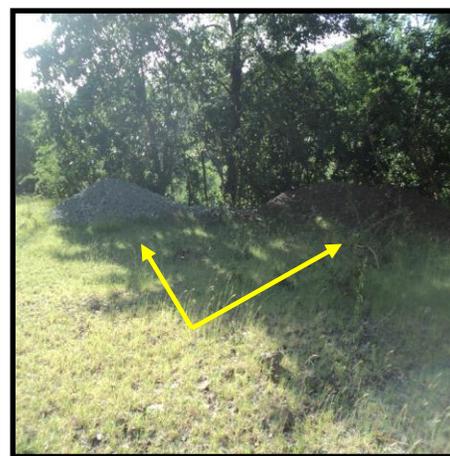


Fig. 25 Material acumulado cerca del borde de la vía.



### Deslizamiento 3

*Ubicación:* cercano al asentamiento Veguita del Sur

*Dimensiones y dirección de la ladera o talud:* en la figura 26 el talud muy inestable, con Longitud de 12 m, altura de 12-24 m y un ángulo aproximado de  $130^{\circ}/45^{\circ}$

*Litología:* Andesitobasaltos y basaltos, principalmente tobas y lavobrechas, andesidacitas, areniscas polimícticas, areniscas derivadas de granitoides e intercalaciones y lentes de calizas. Estas rocas se encuentran metamorfizadas en condiciones de muy bajo grado, se observa el talud desprovisto de vegetación.

*Características estructurales:* Talud medianamente fracturado y agrietado, familia de grietas  $160^{\circ}/60^{\circ}$  y  $40^{\circ}/90^{\circ}$

Características del movimiento.

*Tipo de movimiento:* Flujo detrítico.

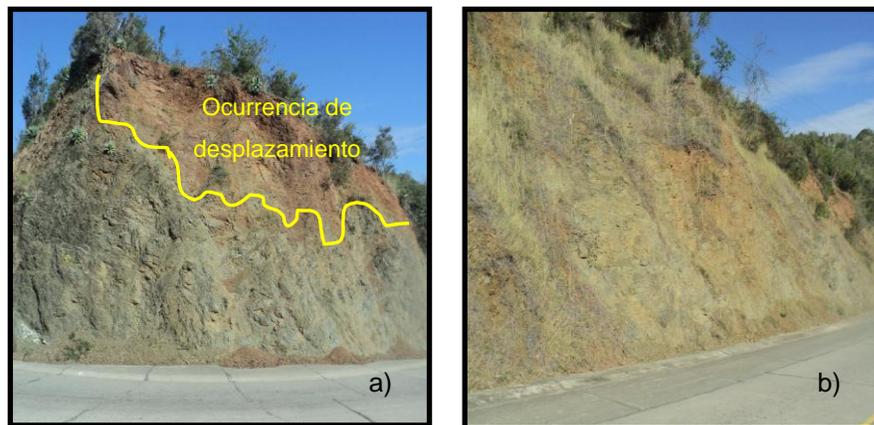


Fig. 26 a) y b) Talud con evidencias de deslizamiento y desprovisto de vegetación.

## Deslizamiento 4

*Ubicación:* cercano al poblado Veguita del Sur.

*Dimensiones y dirección de la ladera o talud:* Longitud aproximadamente de 250 m y altura aproximadamente 50 m figura 27.

*Litología:* Andesitobasaltos y basaltos, principalmente tobas y lavobrechas, andesidacitas, areniscas polimícticas, areniscas derivadas de granitoides e intercalaciones y lentes de calizas. Estas rocas se encuentran metamorfizadas en condiciones de muy bajo grado.

*Características estructurales:* Talud muy fracturado y agrietado, con grietas verticales como horizontales que provocan una fracturación intensa del macizo. Se determinaron tres familias de grietas con los siguientes elementos de yacencia:  $250^{\circ}/75^{\circ}$ ,  $10^{\circ}/62^{\circ}$  y  $240^{\circ}/35^{\circ}$

### Características del movimiento.

Inclinación de  $70^{\circ}$

*Tipo de movimiento:* Desprendimiento de rocas y flujos detríticos

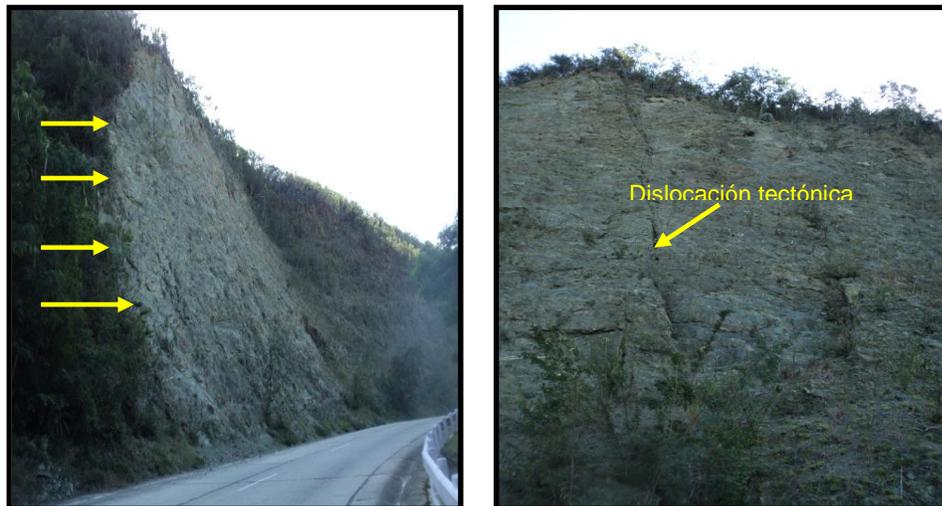


Fig. 27 a) Talud desprovisto de cobertura vegetal; b) grieta significativa en el talud.



## Deslizamiento 5

*Ubicación:* Localidad Las Güasimas.

*Dimensiones y dirección de la ladera o talud:* Longitud de 60 m, altura del talud 20 m

*Litología:* Andesitobasaltos y basaltos, principalmente tobas y lavobrechas, andesidacitas, areniscas polimícticas, areniscas derivadas de granitoides e intercalaciones y lentes de calizas. Estas rocas se encuentran metamorfozadas en condiciones de muy bajo grado, además pequeños bloques muy meteorizados.

*Características estructurales:* Talud muy inestable, figura 28 y 29.

### Características del movimiento.

Ángulo de inclinación del talud de 70°.

*Tipo de movimiento:* Flujos detríticos y desprendimiento de rocas



Fig. 28 Rocas expuestas a los agentes del intemperismo



Fig. 29 Cúmulo de sedimentos de suelo deslizado.

## Deslizamiento 6

*Ubicación:* Las Güasimas.

*Dimensiones y dirección de la ladera o talud:* Longitud del talud 30 m variando su altura entre 12 -15 m, la dirección del talud es de 260 y su inclinación de 50°

*Litología:* Andesitobasaltos y basaltos, principalmente tobas y lavobrechas, andesidacitas, areniscas polymícticas, areniscas derivadas de granitoides e intercalaciones y lentes de calizas. Estas rocas se encuentran metamorfizadas en condiciones de muy bajo grado, figura 30

*Características estructurales:* Talud con fracturación por intemperismo.

Características del movimiento.

*Dirección:* Las fracturas presentan una dirección N-S entre  $12^{\circ}$  y  $320^{\circ}$ .

*Tipo de movimiento:* Flujos detríticos



Fig. 30 a) Talud con evidencia de deslizamiento; b y c) cúmulos de material deslizado al borde de la vía. (Flujos detríticos).

## Deslizamiento 7

*Ubicación:* Ubicado en la localidad Las Güasimas.

*Dimensiones y dirección de la ladera o talud:* Longitud del talud 35 m con una altura de 30 m.

*Litología:* Andesitobasaltos y basaltos, principalmente tobas y lavobrechas, andesidacitas, areniscas polymícticas, areniscas derivadas de granitoides e intercalaciones y lentes de calizas. Estas rocas se encuentran metamorfizadas en condiciones de muy bajo grado, con fracturas de  $20^{\circ}$ , se observan espejos de fricción

260° E-W, se observa un brechamiento muy intenso relacionado con estos espejos de fricción, figura 31

*Características estructurales:* Talud fracturado.

*Características del movimiento.*

*Tipo de movimiento:* Desprendimiento de roca y en menor grado flujo detrítico.

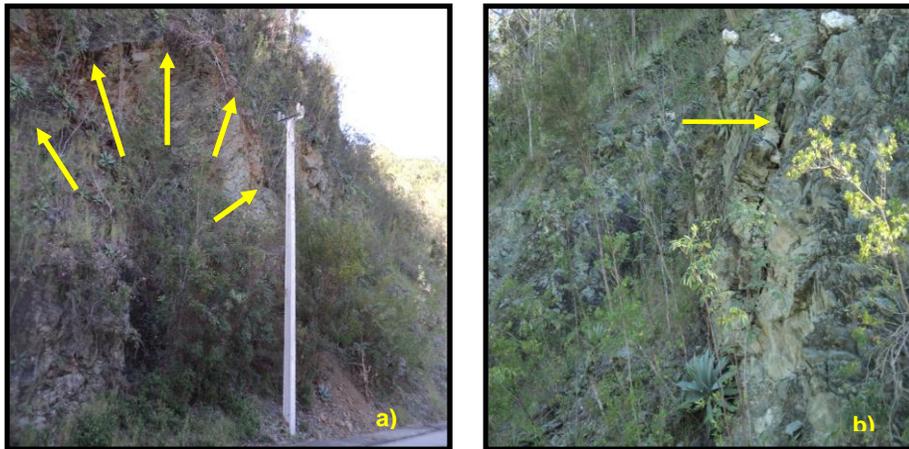


Fig.31 a) Evidencia de deslizamiento ocurrido; b) dislocación tectónica presente.

## **Deslizamiento 8**

*Ubicación:* Las Güasimas.

*Dimensiones y dirección de la ladera o talud:* Talud de aproximadamente 200 m de longitud y 20 m de altura, con un ángulo de 260/50°

*Litología:* Andesitobasaltos y basaltos, principalmente tobas y lavobrechas, andesidacitas, areniscas polimícticas, areniscas derivadas de granitoides e intercalaciones y lentes de calizas. Estas rocas se encuentran metamorfizadas en condiciones de muy bajo grado.

*Características estructurales:* El talud esta muy agrietado, las familias de grietas tiene yacencia: 210/10° y 260/80°, figura 32.

### Características del movimiento.

*Tipo de movimiento:* Predominan los desprendimientos aunque se observan también los flujos detríticos.



Fig.32 a) y b) Talud con escasa vegetación.

### **Deslizamiento 9**

*Ubicación:* Yumurí del Sur

*Dimensiones y dirección de la ladera o talud:* Longitud del talud 30 m, altura 20 m.

*Litología:* Andesitobasaltos y basaltos, principalmente tobas y lavobrechas, andesidacitas, areniscas polimícticas, areniscas derivadas de granitoides e intercalaciones y lentes de calizas. Estas rocas se encuentran metamorfizadas en condiciones de muy bajo grado.

*Características estructurales:* Talud fracturado, fractura  $360^{\circ}$  y  $20^{\circ}$ .

### Características del movimiento.

*Tipo de movimiento:* Desprendimiento de rocas y Flujos detríticos, figura 33.



Fig.33 Desprendimientos de rocas y Flujos detríticos

### **Deslizamiento 10**

*Ubicación:* Yumurí del Sur.

*Dimensiones y dirección de la ladera o talud:* Talud vertical de alrededor 30 m de altura y 50 m de longitud

*Litología:* Andesitobasaltos y basaltos, principalmente tobas y lavobrechas, andesidacitas, areniscas polimícticas, areniscas derivadas de granitoides e intercalaciones y lentes de calizas. Estas rocas se encuentran metamorfozadas en condiciones de muy bajo grado.

*Características estructurales:* Talud fracturado con grietas y fracturas muy bien desarrolladas.

#### Características del movimiento.

*Dirección:* Fracturas con una dirección de 315° y 345°

*Tipo de movimiento:* Flujos detríticos, figura 34

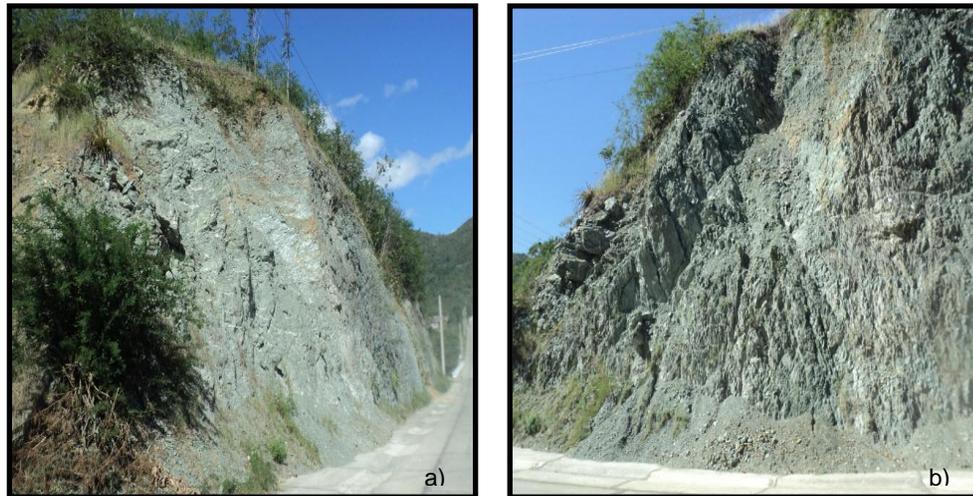


Fig. 35 a) Talud desprovisto de vegetación; b) Altos procesos erosivos.

### **Deslizamiento 11**

*Ubicación:* Yumurí del Sur.

*Dimensiones y dirección de la ladera o talud:* Talud vertical de alrededor 30 m de altura y 50 m de longitud

*Litología:* Andesitobasaltos y basaltos, principalmente tobas y lavobrechas, andesidacitas, areniscas polimícticas, areniscas derivadas de granitoides e intercalaciones y lentes de calizas. Estas rocas se encuentran metamorfozadas en condiciones de muy bajo grado.

*Características estructurales:* Talud fracturado con grietas y fracturas muy bien desarrolladas.

#### Características del movimiento.

*Dirección:* Fracturas con una dirección de  $315^{\circ}$  y  $345^{\circ}$

*Tipo de movimiento:* Flujos detríticos, figura 36.



Fig. 36 a) Evidencias de deslizamientos recientes; b) Flujos detríticos.

## Deslizamiento 12

*Ubicación:* Yumurí del Sur.

*Dimensiones y dirección de la ladera o talud:* Talud vertical de alrededor 30 m de altura y 35 m de longitud

*Litología:* Andesitobasaltos y basaltos, principalmente tobas y lavobrechas, andesidacitas, areniscas polimícticas, areniscas derivadas de granitoides e intercalaciones y lentes de calizas. Estas rocas se encuentran metamorfizadas en condiciones de muy bajo grado.

*Características estructurales:* Talud fracturado con grietas y fracturas muy bien desarrolladas.

### Características del movimiento.

*Dirección:* Fracturas con una dirección de 300° y 325°

*Tipo de movimiento:* Flujos detríticos, figura 37.

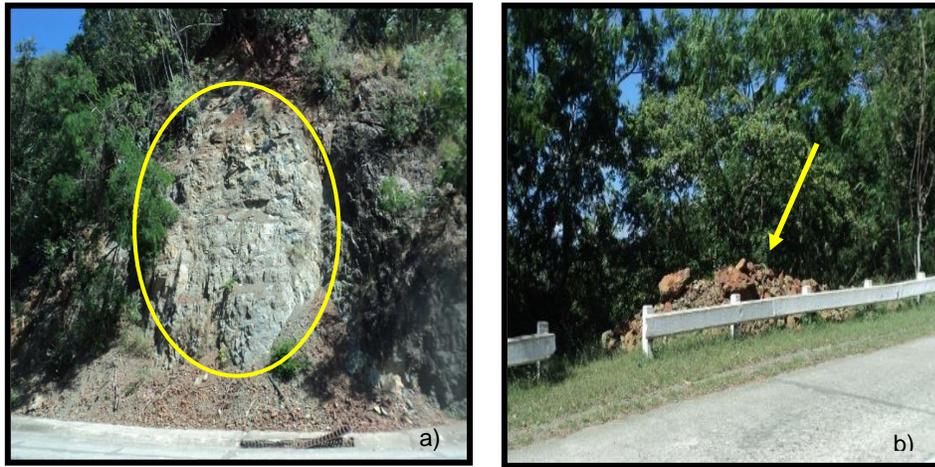


Fig. 37 a) y b) Talud con evidencia de deslizamiento y material acumulado al borde de la vía.

### **Deslizamiento 13**

*Ubicación:* Palma Clara.

*Dimensiones y dirección de la ladera o talud:* Talud vertical de alrededor 30 m de altura y 35 m de longitud

*Litología:* Andesitobasaltos y basaltos, principalmente tobas y lavobrechas, andesidacitas, areniscas polimícticas, areniscas derivadas de granitoides e intercalaciones y lentes de calizas. Estas rocas se encuentran metamorfozadas en condiciones de muy bajo grado.

*Características estructurales:* Talud fracturado con grietas y fracturas muy bien desarrolladas.

#### Características del movimiento.

*Dirección:* Fracturas con una dirección de  $200^{\circ}$  y  $325^{\circ}$

*Tipo de movimiento:* Flujos detríticos, figura 38.



Fig. 38 a) Evidencia de deslizamiento ocurrido; b) cúmulo de material deslizado.

### Deslizamiento 14

*Ubicación:* cercano al asentamiento Palma Clara.

*Dimensiones y dirección de la ladera o talud:* Talud muy inestable, con Longitud de 50 m, altura de 12 - 35 m y un ángulo aproximado de  $130^{\circ}/65^{\circ}$

*Litología:* Andesitobasaltos y basaltos, principalmente tobas y lavobrechas, andesidacitas, areniscas polimícticas, areniscas derivadas de granitoides e intercalaciones y lentes de calizas. Estas rocas se encuentran metamorfizadas en condiciones de muy bajo grado.

*Características estructurales:* Talud medianamente fracturado y agrietado, familia de grietas  $160^{\circ}/60^{\circ}$  y  $40^{\circ}/90^{\circ}$

#### Características del movimiento.

*Tipo de movimiento:* Flujo detrítico, figura 39



Fig. 39 Flujos de detríticos



## Deslizamiento 15

*Ubicación:* Palma Clara.

*Dimensiones y dirección de la ladera o talud:* Talud vertical de alrededor 30 m de altura y 50 m de longitud

*Litología:* Andesitobasaltos y basaltos, principalmente tobas y lavobrechas, andesidacitas, areniscas polimícticas, areniscas derivadas de granitoides e intercalaciones y lentes de calizas. Estas rocas se encuentran metamorfizadas en condiciones de muy bajo grado.

*Características estructurales:* Talud fracturado con grietas

Características del movimiento.

*Dirección:* Fracturas con una dirección de 310° y 345°

*Tipo de movimiento:* Flujos detríticos, figura 40.



Fig. 40 Flujos de detríticos

## Deslizamiento 16

*Ubicación:* La Guásima.

*Dimensiones y dirección de la ladera o talud:* Talud vertical de alrededor 30 m de altura y 50 m de longitud

*Litología:* Andesitobasaltos y basaltos, principalmente tobas y lavobrechas, andesidacitas, areniscas polimícticas, areniscas derivadas de granitoides e intercalaciones y lentes de calizas. Estas rocas se encuentran metamorfizadas en condiciones de muy bajo grado.

*Características estructurales:* Talud fracturado con grietas

*Características del movimiento.*

*Dirección:* Fracturas con una dirección de 310° y 345°

*Tipo de movimiento:* Flujos detríticos, figura 41.



Fig. 41 Flujos de detríticos

## **Deslizamiento 17**

*Ubicación:* Palma Clara.

*Dimensiones y dirección de la ladera o talud:* Talud vertical de alrededor 25 m de altura y 30 m de longitud

*Litología:* Andesitobasaltos y basaltos, principalmente tobas y lavobrechas, andesidacitas, areniscas polimícticas, areniscas derivadas de granitoides e intercalaciones y lentes de calizas. Estas rocas se encuentran metamorfizadas en condiciones de muy bajo grado.

*Características estructurales:* Talud fracturado con grietas, figura 42



Características del movimiento.

*Dirección:* Fracturas con una dirección de 280° y 335°

*Tipo de movimiento:* Flujos detríticos.



Fig. 43 Talud con evidencia de deslizamiento y material detrítico.

**Deslizamiento 18**

*Ubicación:* Cagüeybaje.

*Dimensiones y dirección de la ladera o talud:* Talud vertical de alrededor 25 m de altura y 30 m de longitud

*Litología:* Serpentinitas harzburgíticas, harzburgitas, Iherzolitas, dunitas y piroxenitas con diferente grado de serpentinización.

*Características estructurales:* Talud fracturado con grietas

Características del movimiento.

*Dirección:* Fracturas con una dirección de 280° y 335°

*Tipo de movimiento:* Flujos detríticos y desprendimientos de rocas, figura 44



Fig. 44 a) Deslizamiento rotacional; b) Desprendimientos de rocas.

### **Deslizamiento 19**

*Ubicación:* Cagüeybaje.

*Dimensiones y dirección de la ladera o talud:* Talud vertical de alrededor 25 m de altura y 30 m de longitud

*Litología:* Complejo magmático compuesto por: Serpentinitas harzburgíticas, harzburgitas, lherzolitas, dunitas y piroxenitas con diferente grado de serpentización.

*Características estructurales:* Talud fracturado con grietas, figura 45.

Características del movimiento.

*Tipo de movimiento:* Flujos detríticos y desprendimientos de rocas.



Fig. 45 Talud con intenso agrietamiento.



## Deslizamiento 20

*Ubicación:* Cagüeybaje.

*Dimensiones y dirección de la ladera o talud:* Talud vertical de alrededor 25 m de altura y 30 m de longitud

*Litología:* Complejo magmático compuesto por: Serpentinitas harzburgíticas, harzburgitas, lherzolitas, dunitas y piroxenitas con diferente grado de serpentinización.

*Características estructurales:* Talud fracturado con grietas

Características del movimiento.

*Tipo de movimiento:* Flujos detríticos y desprendimientos de rocas, figura 46.



Fig. 46 Talud con evidencia de deslizamiento

## Deslizamiento 21

*Ubicación:* Cagüeybaje.

*Dimensiones y dirección de la ladera o talud:* Talud vertical de alrededor 25 m de altura y 30 m de longitud

*Litología:* Serpentinitas harzburgíticas, harzburgitas, lherzolitas, dunitas y piroxenitas con diferente grado de serpentinización.

*Características estructurales:* Talud fracturado con grietas



Características del movimiento.

*Dirección:* Fracturas con una dirección de 280° y 335°

*Tipo de movimiento:* Flujos detríticos y desprendimientos de rocas, figura 47 y 48.



Fig. 47 Agrietamiento moderado.



Fig. 48 Talud sin cobertura vegetal.

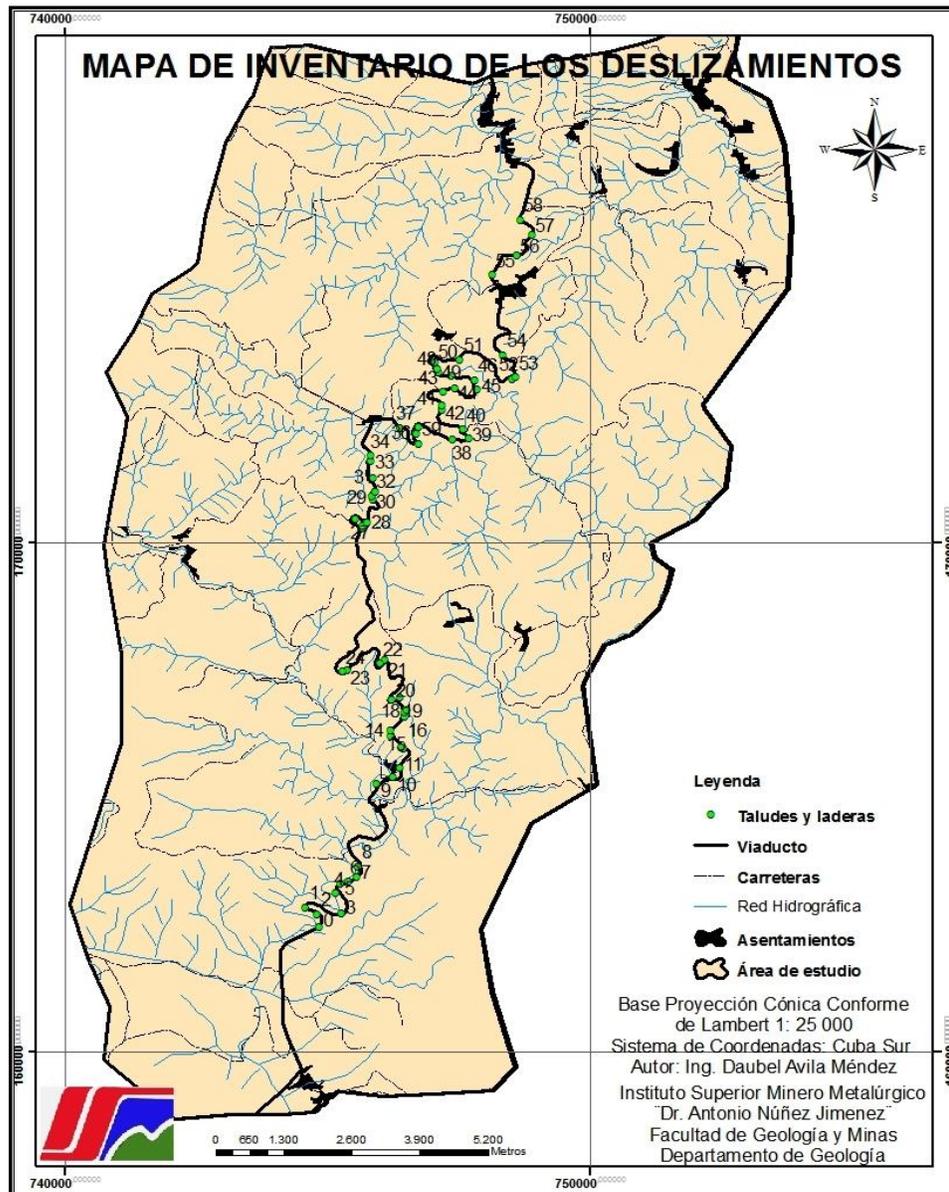


Fig.49 Mapa de inventario de deslizamientos descritos en el Vial La Farola (Escala original 1:100 000).

A continuación se presentan los perfiles trazados en cada punto descrito con ayuda del **SIG ArvGis** lo que nos da una visión del relieve presente en la zona.

### 4.3 Mecanismos y tipologías de los movimientos de ladera presentes en los taludes de la carretera.

Para realizar la descripción de los movimientos y las definiciones de los distintos mecanismos, se ha tomado como base los trabajos propuestos por Varnes (1978), Lontadze (1982), Hutchinson (1988), WP/WLI (1993), y Cruden y Varnes (1996).

#### Mecanismos relacionados con caída libre de la roca.

**Desprendimiento de rocas.** Todas las caídas se inician con un desprendimiento de suelo o roca de una ladera muy empinada, a lo largo de una superficie en la que poco o ningún desplazamiento cortante se desarrolla. El material desciende en caída libre, saltando o rodando, el movimiento es de muy rápido a extremadamente rápido (Cruden & Varnes, 1996), figura 50 y foto 1.

Los desprendimientos que ocurren en la zona, aunque son de menor magnitud que los deslizamientos, no dejan de ser un peligro potencial debido a la frecuencia con que ocurren y al tamaño de los bloques que caen. Como la causa fundamental de su origen es por efecto de la gravedad, se producen en cualquier momento y a cualquier hora del día.

En la carretera objeto de estudio es muy común la ocurrencia de este fenómeno debido a que los taludes presentan ángulos muy abruptos y el grado de alteración y fracturación que presentan las rocas que lo forman.

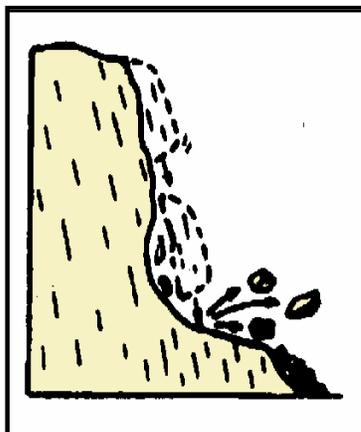


Fig. 50 Caída de rocas (Varnes, 1978)



Foto. 1 Desprendimiento de rocas

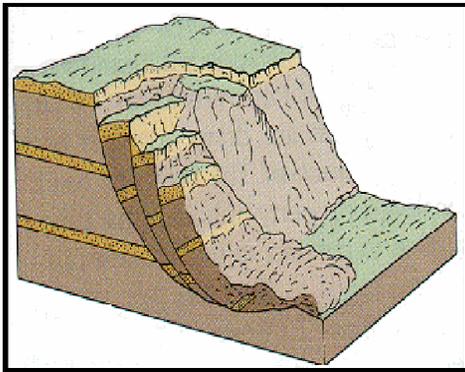
### ***Deslizamientos.***

Un deslizamiento es un movimiento ladera abajo de una masa de suelos o rocas, que ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de ruptura o zonas relativamente delgadas de intensa deformación cortante (Cruden & Varnes, 1996) y pueden ser rotacionales y traslacionales.

En los deslizamientos rotacionales, la masa se desplaza a lo largo de una superficie de ruptura plana o suavemente ondulada y superponiéndose a la superficie original del terreno.

En los deslizamientos traslacionales la masa desplazada puede también fluir, convirtiéndose en un flujo de detritos ladera abajo.

El deslizamiento rotacional que se observó durante el recorrido realizado se produjo por encontrarse las grietas orientadas en la misma dirección del talud y las fracturas ser casi perpendiculares a la carretera, figura 51 y foto 2.



*Fig. 51 Deslizamiento rotacional*



*Foto 2 Deslizamiento rotacional*

### **Flujos detríticos**

Es un movimiento espacialmente continuo, en el que las superficies de corte son de corta duración, espaciamiento corto y usualmente no se preservan; la distribución de velocidades en la masa que se desplaza se compara con la de un fluido viscoso (Cruden & Varnes, 1996), figura 52 y foto 3.

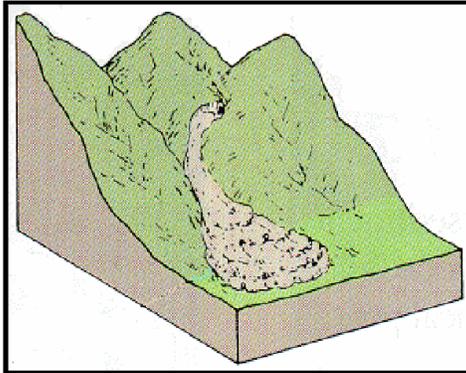


Fig. 52 Flujo de detritos (Skinner & orter, 1992).



Foto 3 Flujo de detritos

## **4.4 Caracterización de los Mapas Temáticos.**

El análisis de la susceptibilidad por deslizamientos se realizó a partir de los factores pasivos y disparadores existentes en el área de la investigación. A continuación se hará una explicación como influyen estos factores en la ocurrencia de estos fenómenos.

### **4.4.1 Factores Pasivos**

#### **Influencia del factor geomorfológicos.**

La pendiente del terreno es uno de los elementos geomorfológico más importante en el análisis de la susceptibilidad por deslizamiento el cual se obtuvo a partir del procesamiento del modelo digital del terreno, ver anexo 14. En el mismo se presenta la pendiente umbral de deslizamiento, la cual fue clasificada en 3 clases:  $0^{\circ}$  -  $6^{\circ}$ ,  $7^{\circ}$  -  $20^{\circ}$ ,  $21^{\circ}$  -  $47^{\circ}$ , sobre la base de la clasificación modificada de Van Zuidam (1986), en la cual se describen los procesos característicos y esperados en condiciones del terreno.



Tabla 16 Clases de pendientes según las condiciones del terreno.

Pendiente umbral de deslizamiento	Condiciones del terreno	Clase	Nro. de píxel	Susceptibilidad	% del área total
0° - 6°	Pendientes bajas	Baja	2462	Baja	8.61
7° - 20°	Pendientes moderadas	Media	11578	Media	40.50
21° - 47°	Pendiente muy fuerte	Alta	14545	Alta	50.88

Como se observa en la tabla 16 las pendientes predominantes en el área son las moderadas y las muy fuertes, a las que hay que prestarle mucha atención porque inciden directamente en la ocurrencia de deslizamientos de tierra. En la clase con ángulo de pendiente entre 21° - 47° se desarrollaron la mayor cantidad de deslizamiento (60%) descritos, mientras que a la clase de 7° - 20° se desarrollaron el 40%, no observándose deslizamientos en las pendientes con ángulos de 0° - 6°.

Una vez obtenida esta clasificación procedemos a la confección del Mapa de pendiente umbral de deslizamientos, ver anexo 6.

Como se puede observar en el mapa, las clases con mayores ángulos de pendiente son las que predominan en toda el área.

### **Influencia del factor estructural fallas.**

En el mapa tectónico se puede apreciar la complejidad tectónica alta del área, donde se observan la gran cantidad de fallas verticales y subverticales que provocan la fracturación intensa de las rocas que afloran en el talud así como su debilitamiento.

La influencia de la tectónica sobre la susceptibilidad del terreno se realizó con la utilización del SIG ArcGis, con ayuda del cual se determinaron las zonas donde existe una mayor densidad de fallas en Km x Km<sup>2</sup>, anexo 15, como se observa en la tabla la densidad media es la que predomina en el área, ocupando el 43 %.



Tabla 17. Caracterización del mapa de densidad tectónica con relación al desarrollo de los deslizamientos.

Densidad KmxKm <sup>2</sup>	Clases	Nro. de píxel	% del área total
0 – 10.32	Baja	30932	10.3
10.33 – 16	Media	49814	15.2
16.01 – 29.57	Alta	33622	34.4
32.40–40.10	Muy altas	65664	40.1

#### **Influencia del factor litológico.**

Este factor se evaluó a partir de la clasificación de Nicholson y Hencher (1997), los cuales proponen una clasificación de las rocas de acuerdo a grupos litoestructurales, teniendo en cuenta sus susceptibilidades, resistencia y características litológicas.

#### **De acuerdo con lo anteriormente dicho el área se clasificó en tres clases.**

- Primera clase formado por el grupo lito-estructural de roca fuertes masivas que ocupan casi el 35 % del área y esta formada por rocas andesito basalto, dioritas y granodiorita, Sierra del Purial.
- Segunda clase formada por las rocas del grupo lito-estructural de rocas fuertes discontinuas a las que pertenecen las rocas de la formación Charco Redondo y San Luis que aflora en pequeñas porciones del área representada por rocas terrígeno - clásticas y vulcanógenas.
- Tercera clase formada por dos grupos lito-estructurales: grupo lito-estructural roca débilmente tectónica que ocupan alrededor del 60 % del área y a la pertenecen las rocas del Grupo El Cobre formado por rocas vulcanógenas sedimentarias con predominio de las tobas andesito basalto y el grupo lito-estructural roca débil granular al que pertenece la formación San Ignacio.



Tabla 18. Clasificación de los grupos litoestructurales.

<b>Grupos lito-estructurales</b>	<b>Clases</b>	<b>Nro. de píxel</b>	<b>% del área total</b>
Roca débil granular	Baja	39810	34.81
Roca fuerte masivas y altamente alteradas	Media	5017	4.39
Roca altamente alterada y agrietadas tectónicamente	Alta	69541	60.80

Como se observa en el anexo 16, el grupo litoestructural que predomina en el área es el de roca altamente alteradas y debilitada tectónicamente, lo que se puede relacionar con la fracturación tan intensa que presentan las rocas que se observan en la mayoría de los taludes de la carretera.

#### **Influencia del factor humedad del terreno.**

Las intensas lluvias es un factor que se debe de tener en cuenta ya que influyen en el aumento de la humedad del terreno, **en nuestra investigación aplicamos** la metodología de Mora, R. et al, 2002, en la cual se tiene en cuenta los valores de la lluvia media mensual y la evaporación media mensual para la clasificación de las diferentes clases.



El cálculo se realizó de la siguiente forma:

Tabla: 19 Lluvia Media mensual en un período de 5 años (mm).

Pluviómetro	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total de Lluvia Media mensual (mm)
Veguita del Sur	1,20	6,80	7,60	15,20	35,10	26,80	15,50	30,30	20,15	44,50	12,00	5,50	<b>220,65</b>
Los Saos	1,30	4,10	12,13	10,08	40,05	28,30	19,50	30,25	20,02	60,10	20,10	6,21	<b>252,14</b>
Vega Jojó	3,15	5,00	7,10	16,20	50,31	35,24	15,15	32,21	20,20	60,21	16,25	8,15	<b>269,17</b>
La Farola	1,10	4,50	5,06	10,25	38,50	27,60	10,01	20,36	18,00	50,21	11,54	12,12	<b>209,25</b>
Paso Yumirí	2,00	6,32	12,34	15,15	30,25	23,24	20,12	16,21	10,10	50,86	15,12	7,07	<b>208,78</b>
Palma Clara	7,04	9,60	10,12	15,24	44,40	29,21	15,25	36,25	20,15	54,65	18,62	6,14	<b>266,67</b>
Mosquitero	5,21	6,15	12,35	15,65	65,24	23,54	17,42	19,05	30,30	65,12	9,02	11,10	<b>280,15</b>

Tabla 20 Cálculo de la evaporación mensual (mm) en base a los % de evaporación tomados del Atlas (1989)

Datos	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
% Evap. (Atlas 1989)	7,00	7,40	9,80	10,40	9,40	8,80	9,60	9,30	8,00	7,40	6,40	6,50
Evap mes (mm)	<b>0,97</b>	<b>2,54</b>	<b>5,15</b>	<b>8,72</b>	<b>21,09</b>	<b>14,76</b>	<b>10,36</b>	<b>14,39</b>	<b>9,89</b>	<b>23,77</b>	<b>6,35</b>	<b>3,18</b>

**Evap mensual=** Total media mensual \* % Evap / 100



Tabla: 21. Evaporación media mensual en un período de 5 años (mm).

Pluviómetro	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Evap media mensual (mm)
Veguita del Sur	0,12	0,70	0,93	2,57	3,60	4,19	2,62	4,36	2,88	3,60	0,80	0,45	<b>26,82</b>
Los Saos	0,10	0,22	1,15	1,25	3,70	2,58	2,15	3,29	1,54	5,21	1,11	0,54	<b>22,84</b>
Vega Jojó	0,23	0,45	0,50	2,00	5,24	2,80	1,65	1,48	1,08	4,35	1,08	0,45	<b>21,31</b>
La Farola	0,15	0,40	0,65	1,50	3,35	3,29	1,20	1,60	1,48	3,60	0,69	0,68	<b>18,59</b>
Paso Yumirí	0,20	0,36	0,90	0,80	3,30	2,45	1,15	1,64	0,85	3,54	1,48	0,78	<b>17,45</b>
Palma Clara	0,40	0,50	1,20	1,54	2,60	1,60	2,00	2,00	2,40	4,00	1,59	0,50	<b>20,33</b>
Mosquitero	0,20	0,45	1,00	1,85	4,00	2,80	1,60	1,50	2,20	3,90	1,00	0,60	<b>21,10</b>

Donde la Evap media mes (mm) = Lluv media mensual \* % Evap Coef (Atlas) / 100.



Tabla: 22 Lluvia media potencial Humedad.

<b>Nombre</b>	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>Lluvia media mensual (mm)</b>	<b>Evap media mensual (mm)</b>	<b>Lluvia media potencial Humedad (mm)</b>
Veguita del Sur	745 834	163 938	<b>220,65</b>	<b>26,82</b>	<b>193,83</b>
Los Saos	749 833	166 781	<b>252,14</b>	<b>22,84</b>	<b>229,30</b>
Vega Jojó	742 006	169 972	<b>269,17</b>	<b>21,31</b>	<b>247,86</b>
La Farola	745 097	170 719	<b>209,25</b>	<b>18,59</b>	<b>190,66</b>
Paso Yumirí	745 909	172 487	<b>208,78</b>	<b>17,45</b>	<b>191,33</b>
Palma Clara	748 601	174 057	<b>266,67</b>	<b>20,33</b>	<b>246,34</b>
Mosquitero	751 854	179 067	<b>280,15</b>	<b>21,10</b>	<b>259,05</b>

**Lluvia media potencial = Lluvia media mensual - Evaporación media mensual**

Tabla 23 Clasificación de la lluvia media potencial de humedad

Lluvia media potencial de humedad (mm)	Clases	Nro. de píxel	% del área total
190,66 – 193,83	Baja	37590	50
193,83 – 247,86	Media	40551	17
247,86 – 259,05	Alta	36227	33

Como se puede observar en la tabla en el área predominan las lluvias potenciales de la clase baja las cuales ocupan el 50 % del área de estudio, observándose además que los mayores valores de lluvia se encuentran hacia la parte norte del área.

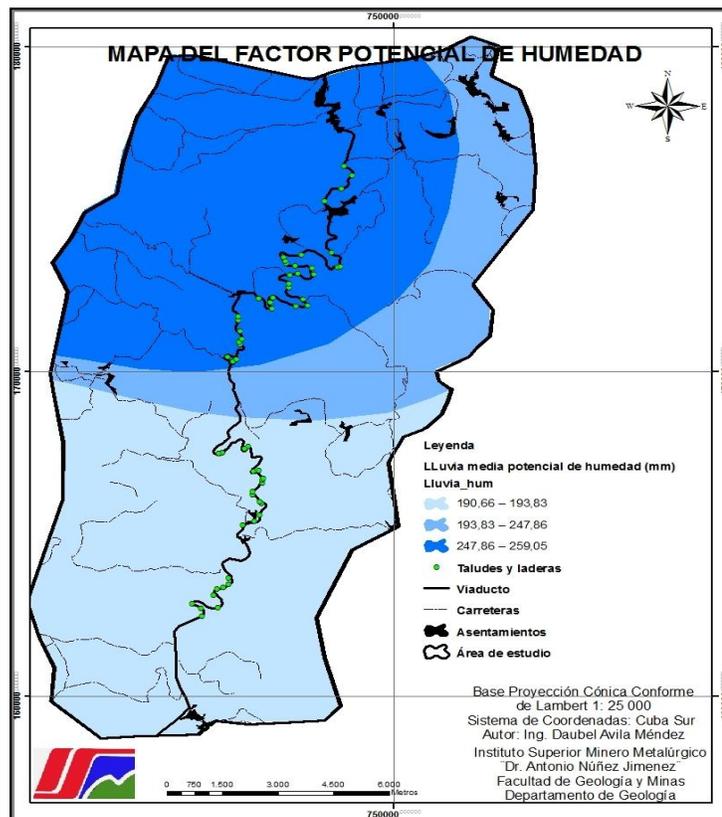


Fig. 53 Mapa del factor potencial de humedad.

### Influencia del factor de disparo sismicidad.

Los procesos geodinámicos contemporáneos influyen en la estabilidad de los taludes, como factor importante en la acumulación de tensiones que se traducen en deformaciones y rupturas del equilibrio del macizo rocoso de manera gradual o de forma rápida mediante la ocurrencia de sismos, los cuales constituyen uno de los principales factores catalizadores dinámicos de los fenómenos gravitacionales.

Utilizando el nivel actual de conocimiento que se tiene de las Zonas Sismogénicas de la región Oriental de Cuba y de sus niveles de potencialidad sísmica específica (ver figura 54), se han obtenido estimados de Peligrosidad Sísmica en términos de intensidad y otros parámetros dinámicos tales como la aceleración horizontal, tanto en forma de probabilidades, como de forma determinística. Este último se refleja en los períodos de repetibilidad o de recurrencia, de que determinados valores de intensidad sísmica puedan repetirse cada cierto número de años (Morejón, G., et. al, CENAI, 2006)

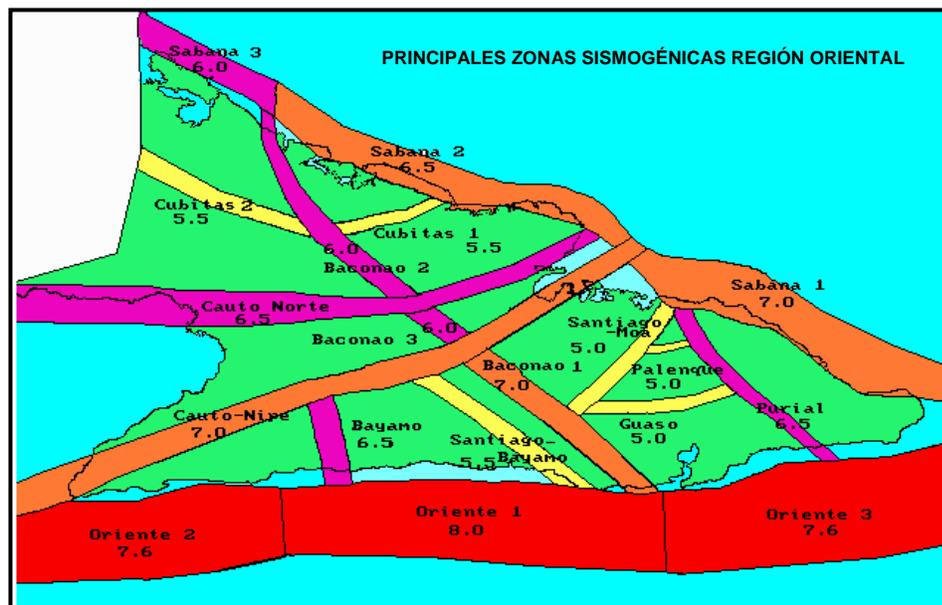


Fig.54 Zonas Sismogénicas de la región Oriental de Cuba. En cada zona se indica su valor de Magnitud máxima (Modificada por Chuy et al, 1997).

A continuación se presenta el mapa de peligrosidad de la provincia de Santiago de Cuba, donde se observa que los períodos de recurrencia (repetibilidad) de los valores de Intensidad Sísmica de 7.0 y 8.0 grados MSK son de una probabilidad del 15 % y tiempo de vida útil  $t = 50$  años, figura 55.

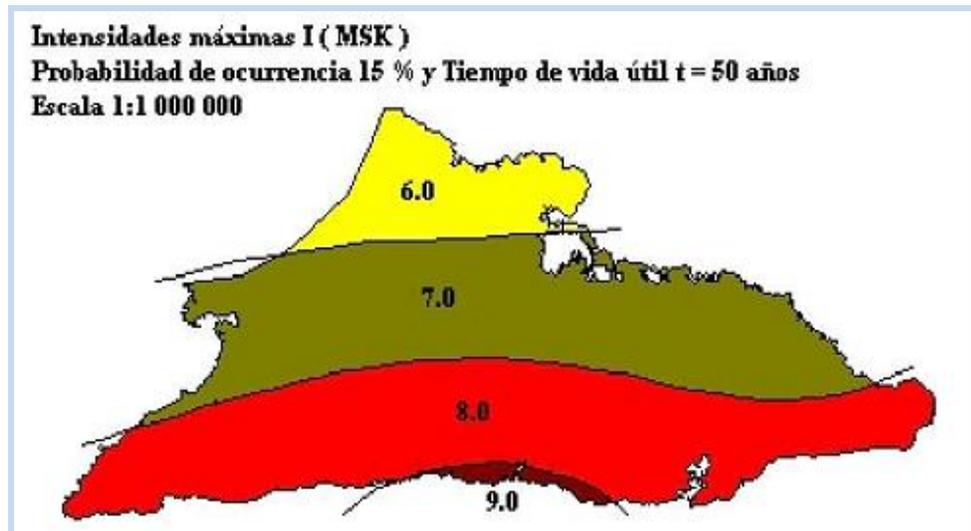


Fig.55 Mapas de los períodos de recurrencia (repetibilidad) de diferentes valores de la Intensidad Sísmica (Tomado de Chuy et al, 2000).

Sobre la base de lo anteriormente expuesto se utilizó el Mapas de los períodos de recurrencia (repetibilidad) de diferentes valores de la Intensidad Sísmica para la determinación de la influencia del factor disparo sismicidad, utilizando el período de recurrencia  $\geq 50$  años y  $\leq 50$  años por ser estos valores lo que afectan el área de estudio (ver figura 56).

Tabla 24. Clasificación del período de ocurrencia sísmica.

Período de ocurrencia (años)	Clases	Nro. de píxel	% del área total
$\leq 50$	Media	48227	42.34
$\geq 50$	Alta	65683	57.66

Como se puede observar en la tabla los períodos de ocurrencia  $\geq 50$  años son lo que predominan el área, ocupando el 57.66 % del área total y es este factor el elemento disparador que más influye en la ocurrencia de estos movimientos.

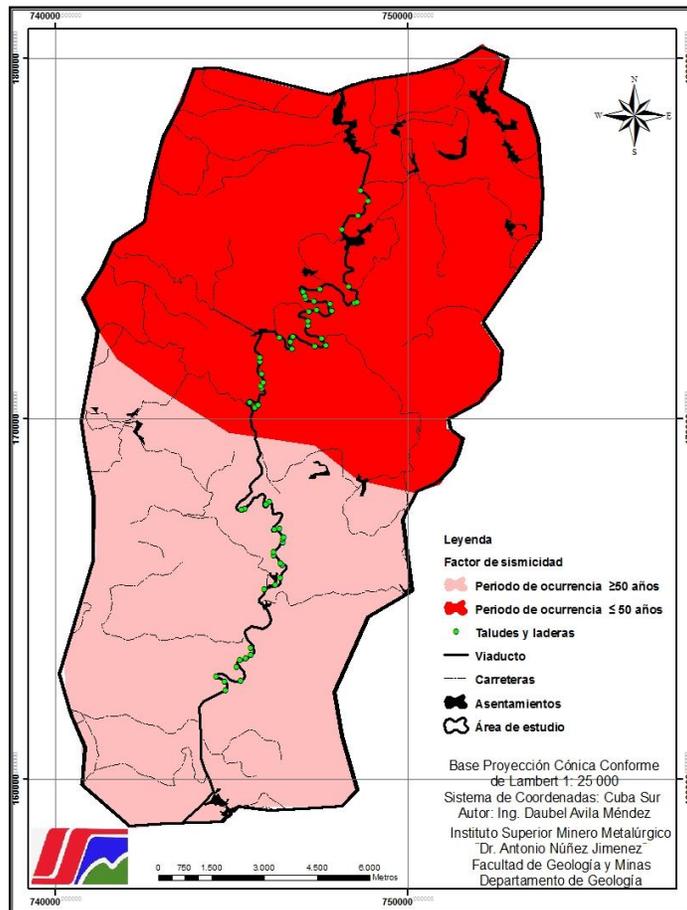


Fig. 56 Mapa del factor sismicidad

### **Influencia del factor disparo lluvia 24 horas.**

Para el análisis de este factor disparador se utilizó la metodología de Morra, R. et al (1992), en la cual se valora el parámetro de disparo por lluvia utilizando el valor de la lluvia máxima en 24 horas, período de retorno 100 años (mm) en nuestra investigación se utilizaron los valores de probabilidad de ocurrencia de lluvias máximas diarias en milímetros, del municipio Baracoa.



Tabla 25 Cálculo de la probabilidad de ocurrencia de lluvias máximas diarias en milímetros en el Área de estudio.

Probabilidad (%)	Veguita del Sur	La Guasima	Yumurí del Sur	Palma Clara	CagüeyBaje	El Chorrito	Paso Cuba
0.1	628	545	500	495	450	745	599
0.5	304	460	330	390	340	530	450
1	255	320	300	360	300	480	415
2	200	270	263	320	270	460	370
4	260	145	223	270	229	379	340
5	250	230	220	280	210	366	300
10	103	180	200	201	190	330	246
20	160	150	147	160	150	244	199
25	148	141	127	148	126	222	185
30	130	129	138	126	130	198	170
50	102	100	120	99	102	150	120

Nota: Estas probabilidades se corresponden con una lluvia que ocurre en un tiempo dado:



Tabla 26 Probabilidad de ocurrencia en un periodo determinado.

0.1%: una vez en 1000 años.	10 %: una vez en 10 años.
0.5%: una vez en 200 años.	20 %: una vez en 5 años.
1 %: una vez en 100 años.	25 %: una vez en 4 años.
2 %: una vez en 50 años.	30 %: aproximadamente una vez en 3 años.
4 %: una vez en 25 años.	50 %: una vez en 2 años.
5 %: una vez en 20 años.	

Para la utilización del factor de disparo por lluvia 24 horas se utilizaron los valores correspondientes a 1% de probabilidad y un período de retorno de 100 años en el municipio como se expresa en la metodología utilizada.

Tabla 27 Valores de Ocurrencia de Lluvias máximas (mm) un período de retorno de 100 años.

<b>Pluviómetro</b>	<b>Ocurrencia de Lluvias máximas (mm)</b>
Veguita del Sur	255
La Guasima	320
Vega Jojó	-
La Farola	-
Paso Yumurí	300
Palma Clara	360



Paso Cuba	415
-----------	-----

Utilizando los datos de la tabla anterior y con la aplicación de la clasificación (Mora, R. et al., 1992), obtenemos la siguiente clasificación.

Tabla 28 Clasificación de ocurrencia de lluvias máximas en 24 horas.

Ocurrencia de Lluvias máximas (mm)	Clases	Nro. de píxel	% del área total
255 – 360	Media	71481	62.50
360.01 – 480	Alta	42887	37.50

Podemos observar en el mapa que las lluvias medias ocupan el mayor % del área, observándose los valores altos de lluvias máximas concentradas en la parte central del área.

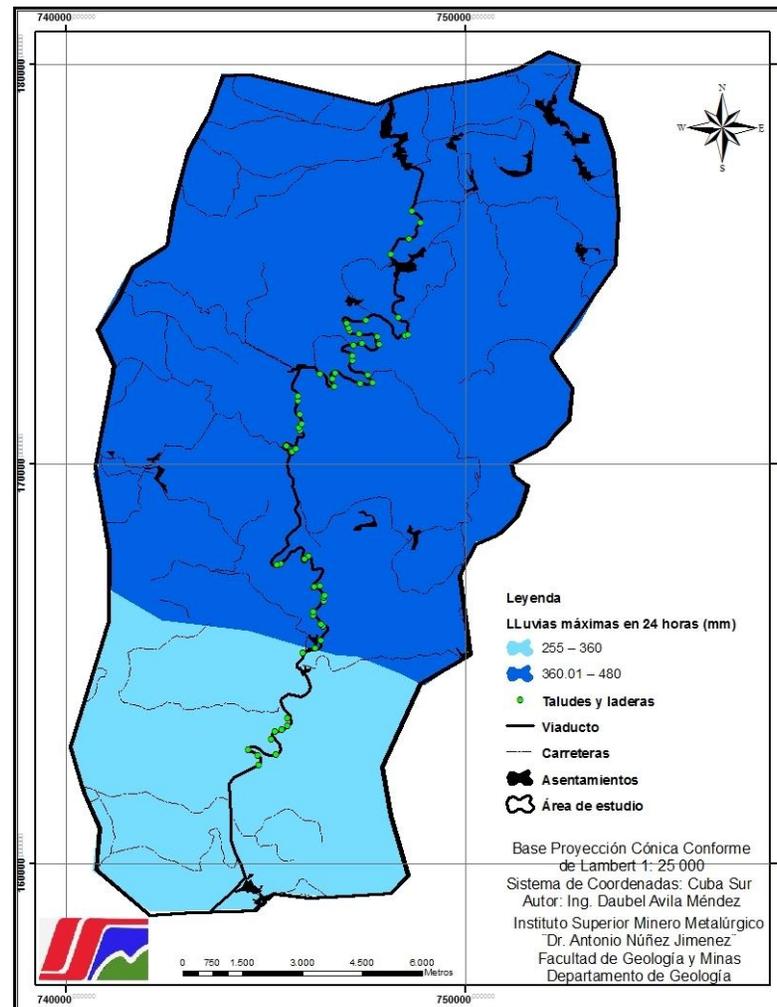


Fig. 57 Mapa del factor Lluvia 24 h



#### 4.5 Mapas de Susceptibilidad

Para la obtención de los mapas de susceptibilidad, se realizaron diferentes modelos con diferentes combinaciones de los factores pasivos y activos con el objetivo de ver el comportamiento de los mismos bajo diferentes condiciones.

Tabla 29 Caracterización de los Modelos de Susceptibilidad

<b>MODELO</b>				
<b>Tipo de Factor</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Clases</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>Factores Pasivos</b>	Pendiente	Baja	1	0.5
		Media	2	
		Alta	3	
	Tectónica	Baja	1	0.2
		Media	2	
		Alta	3	
	Litología	Baja	1	0.15
		Media	2	
		Alta	3	
	Humedad del terreno	Media	1	0.15
Alta		2		
Muy Alta		3		
<b>Factores Disparos</b>	Sismicidad	Media	1	0.6
		Alta	2	
	Lluvias en 24 h	Media	1	0.4
		Alta	2	



		Alta	2	
--	--	------	---	--

#### 4 Descripción del Modelo.

##### Modelo de factores pasivos

Este modelo se obtuvo por la combinación de los factores pasivos (pendiente umbral, litología, tectónica y humedad del terreno) (ver tabla 29), **obteniéndose 4 clases de susceptibilidad.**

Tabla 30 Clasificación de factores pasivos y disparadores

<b>MODELO</b>			
<b>Clases de susceptibilidad</b>	<b>Cantidad de Pixel</b>	<b>% Area Total</b>	<b>Cantidad de deslizamientos</b>
Baja	7351	22	1
Media	8792	23	15
Alta	6819	35	4
Muy Alta	5472	20	2

Como se puede apreciar en el Modelo\_1 pasivo la susceptibilidad alta es la que predomina en el área. Hacia la parte Norte en el tramo que va desde Veguita del Sur hasta Cagüeybaje se observa un predominio de una susceptibilidad de media a muy alta lo que coincide con lo observado durante los trabajos de campo, en ese tramo la carretera casi siempre ha sido afectada por estos procesos provocando la incomunicación de la vía.

##### Modelo de Susceptibilidad.



El mapa de susceptibilidad del terreno por deslizamientos, se obtuvo a partir de la combinación de los mapas de los factores pasivos y **disparadores** (ver tabla 28). Este mapa se clasificó en 4 clases (ver tabla 31), **donde se puede observar que la clase predominante es la alta.**

Tabla 31 Clasificación Susceptibilidad.

MODELO 1		
Clases de susceptibilidad	% Área Total	Cantidad de deslizamientos
Baja	25	2
Media	24	3
<b>Alta</b>	<b>25</b>	<b>4</b>
<b>Muy Alta</b>	<b>26</b>	<b>11</b>

Como se puede ver en el mapa, los valores de susceptibilidades bajas se concentran aproximadamente en los extremos norte y sur respectivamente del área de estudio, ellas ocupan el 25 % del área analizada, mientras que los valores de susceptibilidad de media a alta, ocupan alrededor del 24 y 25 % del área total, en el tramo que va desde el poblado Veguita del Sur hasta el poblado las Güasimas y desde Palma clara hasta Cagüeybaje se observan zonas de alta probabilidad a la ocurrencia de deslizamientos, lo cual se pudo apreciar durante los trabajos de campo en los deslizamientos 1 y 6 donde se aprecia el mal estado que presenta todo el talud de la carretera encontrándose muy fracturado y fragmentado, sin embargo los valores de susceptibilidades muy altas ocupan el 26. % del área y se localizan entre los poblados Las Güasimas y palma Clara del área de estudio donde los factores disparadores de sismicidad e intensas lluvias tienen valores de clase alta.

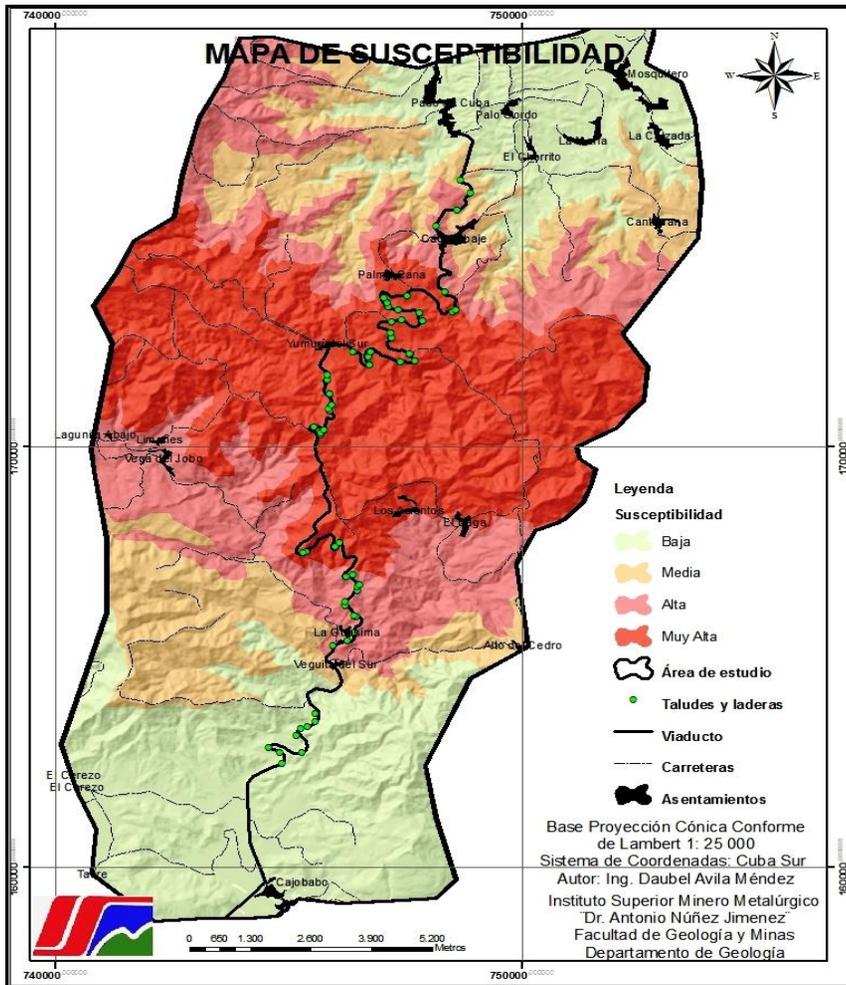


Fig. 58 Modelo I. Susceptibilidad del terreno a los deslizamientos.



#### 4.6. Validación del modelo de susceptibilidad mediante el cálculo de estabilidad.

Para la modelación de los diferentes movimientos se utilizó el programa RocFall, las variables de entrada fueron: velocidad horizontal, velocidad vertical y masa del fragmento de roca de 1000 kg.

##### Condiciones de cálculo.

El fragmento de roca que se desprende de los taludes se asume como una esfera con una densidad que varía entre 2,50 y 3,21 g/cm<sup>3</sup>; para los propósitos del cálculo se utilizan las siguientes variables:

Velocidad horizontal (Vh): 13 m/s

Velocidad vertical (Vv): 13 m/s

Velocidad angular  $\omega_0$ : 0 m/s

Radio de inercia:

$$r = \sqrt[3]{\frac{3m}{4\pi\gamma}}$$

Momento de inercia:

$$I = \frac{2mr^2}{5}$$



La velocidad angular del fragmento de roca **se calculada** bajo las leyes que gobiernan la trayectoria de un proyectil. La diferencia estriba donde la velocidad es transformada de componentes horizontales y verticales a componentes normales y tangenciales.

El fragmento de roca inicia su caída en la localización  $X_1, Y_1$ , el cuál coincide con el primer vértice del talud; la velocidad inicial es de  $V_h: 13 \text{ m/s}$  y  $V_v: 13 \text{ m/s}$ . los parámetros necesarios para el cálculo son determinados y la ecuación cuadrática es resuelta para encontrar el tiempo de intersección con el segundo segmento del talud, a partir de la siguientes ecuaciones:

$$q = \frac{(Y_2 - Y_1)}{(X_2 - X_1)}$$

$$a = \frac{1}{2} g$$

$$b = V_{y0} - qV_{x0}$$

$$c = Y_0 - Y_1 + q(X_1 - X_0)$$

$$t = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Donde:

q: tangente al segmento del talud.

a: coeficiente cuadrático en la ecuación cuadrática.



b: coeficiente lineal en la ecuación cuadrática.

c: constante en la ecuación cuadrática.

Al obtener el tiempo  $t$  de intersección, se determina el punto de intersección y velocidad de pre intersección por sustitución de  $t$  en las ecuaciones:

$$X_I = V_{X0}t + X_0$$

$$Y_I = \frac{1}{2}gt^2 + V_{Y0}t + Y_0$$

$$V_{XB} = V_{X0}$$

$$V_{YB} = V_{Y0} + gt$$

Donde:

$X_1$ : localización horizontal del primer vértice del segmento del talud.

$Y_1$ : localización vertical del primer vértice del segmento del talud.

$V_{XB}$ : velocidad horizontal de la roca antes del impacto.

$V_{YB}$ : velocidad vertical de la roca antes del impacto.

Luego las velocidades  $V_{XB}$  y  $V_{YB}$  son transformadas en componentes normales y tangenciales a cada segmento del segmento del talud:



$$V_{NB} = (V_{YB}) \cos(\theta) - (V_{XB}) \sin(\theta)$$

$$V_{TB} = (V_{YB}) \sin(\theta) + (V_{XB}) \cos(\theta)$$

Donde:

$V_{NB}$ : velocidad normal a la línea antes del impacto.

$V_{TB}$ : velocidad tangencial a la línea antes del impacto.

Y la velocidad después del impacto del fragmento de roca es determinada por la ecuación:

$$V_{CHECK} = \sqrt{V_{XA}^2 + V_{YA}^2}$$

Donde:

$V_{CHECK}$ : velocidad del fragmento de roca entra cada segmento del talud.

**Resultados del cálculo para cada inestabilidad inventariada:**

### Movimiento 1

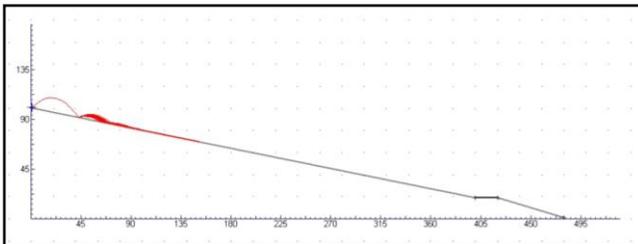


Fig.59. Modelación de la ladera

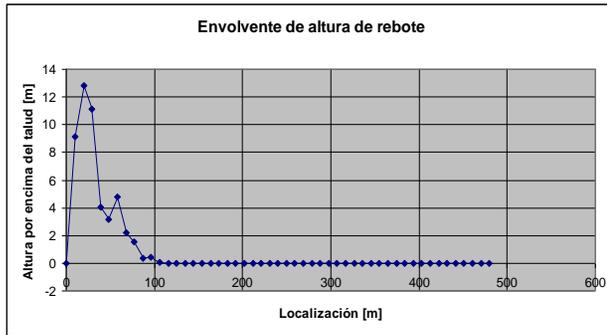


Fig.60 Modelación del desprendimiento de roca.

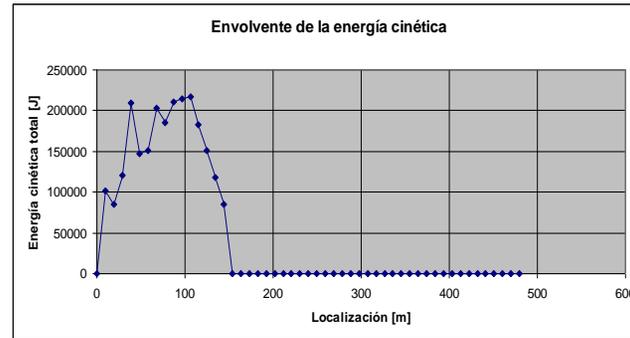


Fig. 61 Modelación de envoltura de altura de rebote de los fragmentos de rocas. por la pendiente, el talud no tiene cobertura

La energía cinética adquiere los valores más elevados en la parte superior del talud donde ocurre el desprendimiento, adquiriendo valores de 200 KJ y a partir de los 150 m cuesta abajo se anula la energía, lo que significa que los fragmentos ruedan sobre la superficie pudiendo en ocasiones no llegar hasta el pie del talud.

Este movimiento coincide con lo observado en el campo y con los resultados del Modelo1 de susceptibilidad, en el cual presenta una clase Alta de susceptibilidad al deslizamiento del terreno.

## Movimiento 2

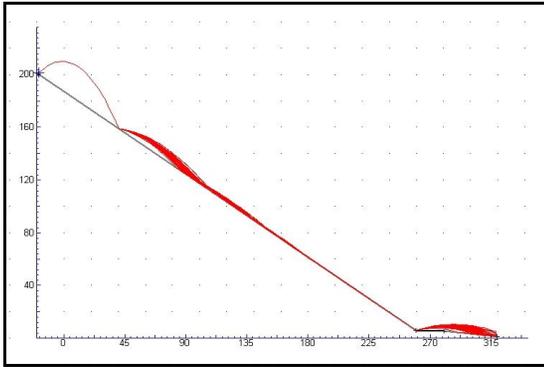


Fig.62 Modelación de la ladera

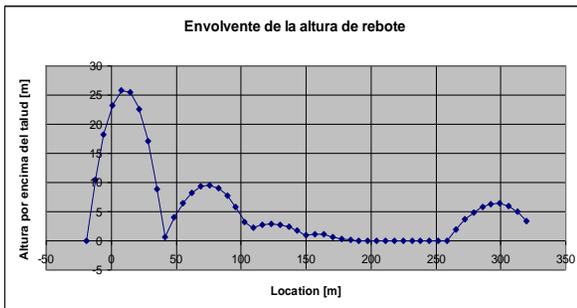


Fig.63 Modelación de envoltorio de altura de rebote de los fragmentos de rocas.

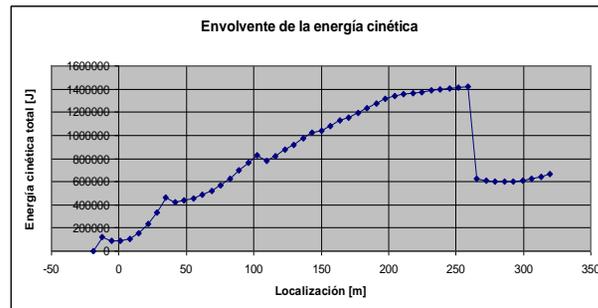


Fig.64 Modelación de envoltorio de energía cinética de los fragmentos de rocas.

La altura de rebote es máxima entre el punto de partida y los primeros 100 m, llegando entre 10 y 25 m de altura, sin embargo al llegar al pie del talud junto a la carretera manifiesta un rebote hasta llegar a los 7 m de altura por encima de la carretera.



Con relación a la energía cinética existe un aumento progresivo a medida que los fragmentos descienden hasta el pie del talud, variando desde 0 hasta 1400 Kj, lo cual indica una alta energía de impacto en el pie o sobre la carretera, para que los fragmentos caigan y se libere la energía.

La comparación de este modelo con los resultados del mapa de susceptibilidad podemos señalar que en el modelo 1 ese punto tiene una clase alta de susceptibilidad.

### Movimiento 3.

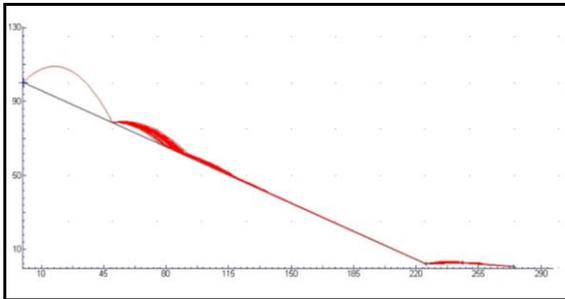


Fig. 65 Modelación de la ladera

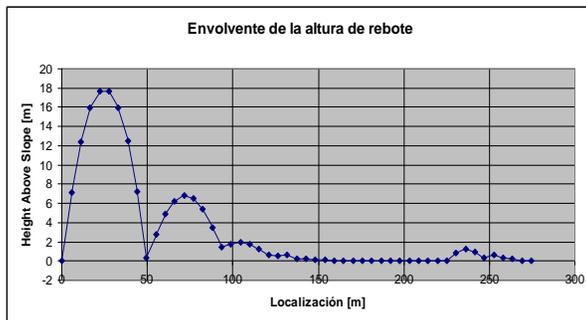


Fig.66 Modelación de envoltorio de altura de rebote de los fragmentos de rocas.

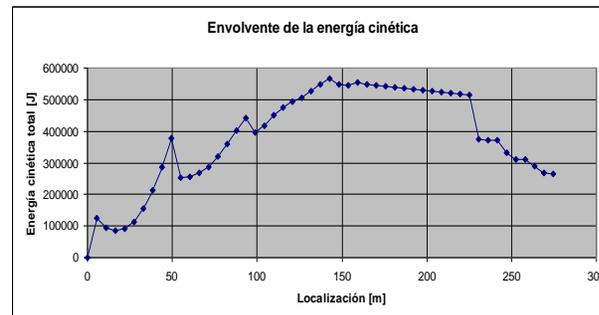


Fig.67 Modelación de envoltorio de energía cinética de los fragmentos de rocas.



Las mayores alturas de rebote, se manifiestan en los puntos de partida de los fragmentos variando entre 6 y 18 m desde el punto de partida hasta unos 90 m ladera abajo y por encima de la carretera, manifestándose alturas de casi 10 m.

Con relación a la energía cinética ocurre un aumento significativo entre los 5 y 125 m, variando entre 100 y 550 KJ, este último valor se manifiesta en el pie del talud, lo que significa que los fragmentos de roca llegan con una gran energía a la carretera.

Como medida de mitigación se puede poner una pantalla dinámica que permita la atenuación de la energía de los fragmentos de roca conjuntamente con una zanja colectora.

Si comparamos este modelo con los resultados obtenidos en el mapa de susceptibilidad nos damos cuenta que este punto tiene una clase alta de susceptibilidad lo que reafirma el grado de peligrosidad que presenta este tramo.

#### **Movimiento 4.**

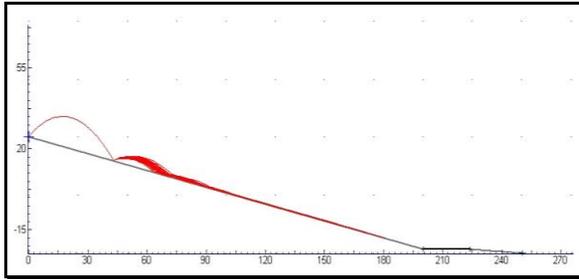


Fig.68 Modelación de la ladera

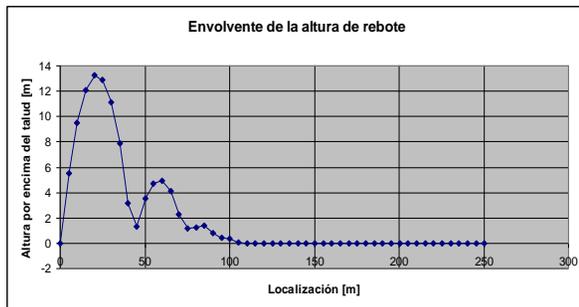


Fig.69 Modelación de envoltorio de altura de rebote de los fragmentos de rocas.

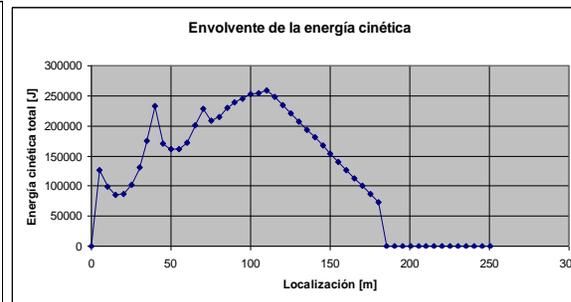


Fig.70. Modelación de envoltorio de energía cinética de los fragmentos de rocas.

El rebote de los fragmentos se manifiesta fundamentalmente entre el punto de salida de estos y los 60 m pendientes abajo, a partir de 100 m hasta el borde de la carretera los fragmentos ruedan sobre la superficie del talud.

Con relación a la energía cinética, los fragmentos manifiestan una energía considerable desde el punto de partida hasta los 180 m ladera abajo, disminuyendo bruscamente hasta el 180 m correspondiente al pie del talud con la carretera, disminuyendo a cero, lo cual indica que los fragmentos pueden llegar arrastrándose con muy poca energía lo cual no significa alta peligrosidad de riesgo.



En este punto el modelo difiere del resultado obtenido de los modelos 1 de susceptibilidad así como de la descripción del campo, este punto se considera de muy alta peligrosidad para la ocurrencia de desprendimiento de rocas.

### Movimiento 5.

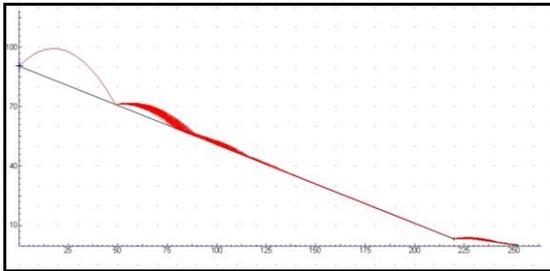


Fig.71 Modelación de la ladera

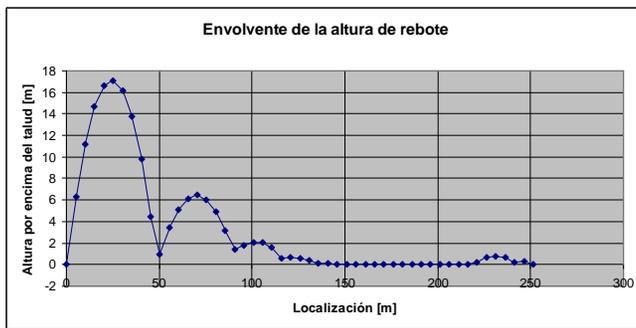


Fig.72 Modelación de envolvente de altura de rebote dos fragmentos de rocas.

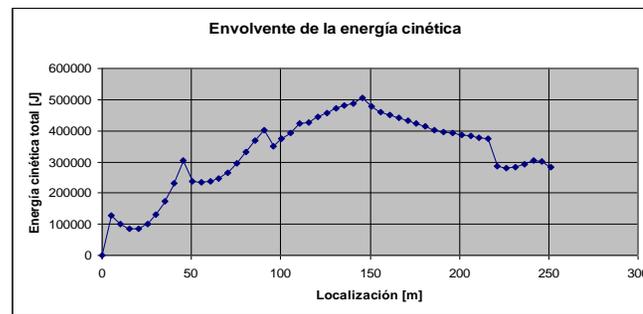


Fig.73 Modelación de envolvente de energía cinética de los fragmentos de rocas.



El movimiento presenta una altura de rebote máxima a los 25 m del punto de partida (Figura 4.5.3), llegando hasta 15 m de altura sobre el nivel del talud, desde los 50 m comienza a disminuir hasta llegar a cero en los últimos 50 m, antes de llegar al pie del talud, sin embargo manifiesta un pequeño rebote de 1m por encima de la carretera.

La energía cinética total varía entre los 100 y 500 KJ desde el punto de partida hasta los 150 m cuesta abajo del talud, a partir de ese punto manifiesta un pequeño descenso al llegar al pie del talud hasta los 390 m, y mientras cruza la carretera presenta una energía cinética total de 300 KJ, lo cual le confiere una peligrosidad considerable debido a la velocidad de los fragmentos.

Este movimiento coincide con lo observado en el campo y con los resultados del Modelo1, en el cual presenta una clase de susceptibilidad muy alta.

### Movimiento 6.

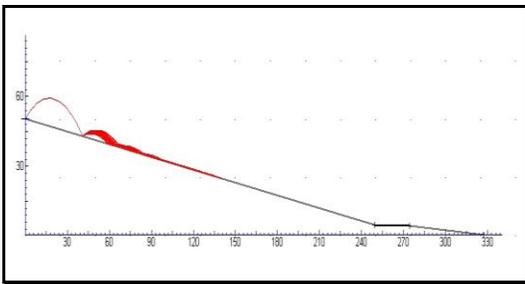


Fig.74 Modelación de la ladera

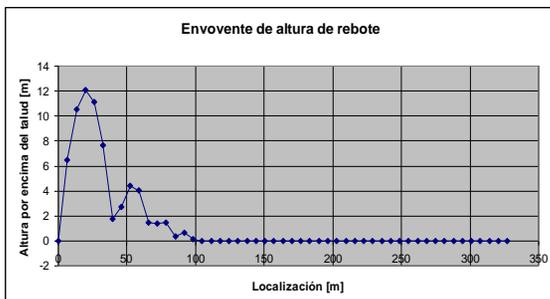


Fig.75 Modelación de envolvente de altura de rebote de los fragmentos de

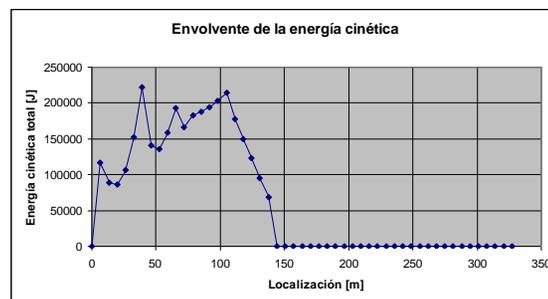


Fig.76 Modelación de envolvente de energía cinética de los fragmentos de



Las mayores alturas de rebote se manifiestan en la parte superior del talud, entre el punto de partida y los 50 m de pendiente abajo.

La energía cinética adquiere los valores más elevados entre el punto de partida y los 15 m cuesta abajo, hasta que los fragmento empiezan a arrastrarse hasta la superficie del talud, pudiendo llegar al pie de la carretera.

Este movimiento coincide con lo observado en el campo y con los resultados del Modelo1 de susceptibilidad, en el cual presenta una clase muy alta de susceptibilidad.

### Movimiento 7.

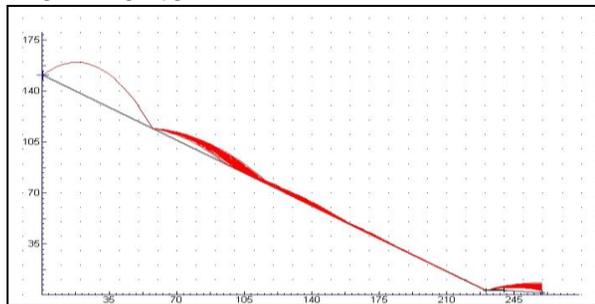


Fig.77. Modelación de la ladera

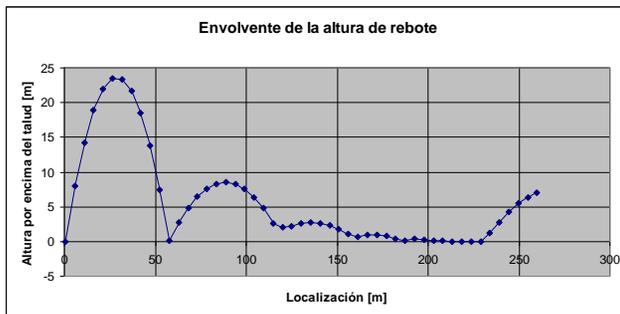


Fig.78 Modelación de envolvente de altura de rebote de los fragmentos de rocas

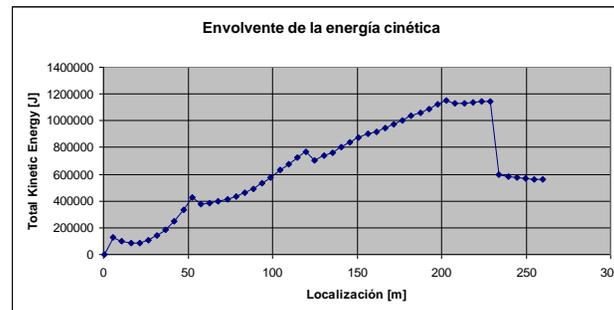


Fig.79. Modelación de envolvente de energía cinética de los fragmentos de rocas.



En el movimiento, la altura de rebote alcanza un valor máximo a los 24 m a unos 25 m del punto del desprendimiento disminuyendo hasta 0 m en el pie del talud, donde vuelve a rebotar nuevamente adquiriendo alturas máximas de 7 m, lo cual provoca puntos salten por encima de la carretera y dañen por impacto la misma .

La energía cinética manifiesta un comportamiento ascendente de 100 KJ hasta 1200 KJ al impactar el pie del talud, donde ocurre una disminución hasta 600 KJ pero significativamente porque genera peligrosidad y riesgo por impacto en la carretera.

Este movimiento coincide con lo observado en el campo y con los resultados del Modelo1, en el cual presenta una clase muy alta de susceptibilidad.

### Movimiento 8.

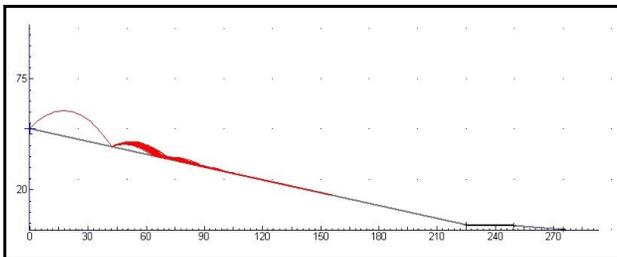
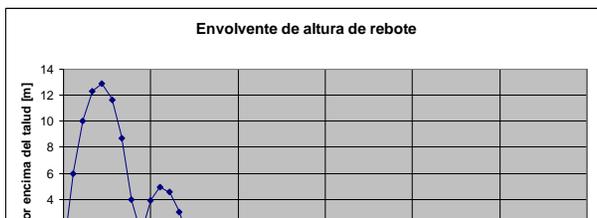


Fig.80 Modelación de la ladera





En el movimiento, la altura de rebote se manifiesta entre el punto de salida y los primeros 8 metros, variando desde 2 hasta 13 m, a partir de los 100 m del punto de partida los fragmentos se arrastran, pudiendo llegar a la base del talud.

La energía cinética total hay máximos valores entre 1.5 m del punto de partida hasta 150 m ladera abajo, a partir de ese punto la energía cinética se anula, lo cual provoca que los fragmentos a veces no lleguen al pie del talud, o se depositen sin ninguna peligrosidad para la carretera.

Esto coincide con los resultados de los modelos 1 donde en este punto está clasificado con una clase alta de susceptibilidad.

### **Movimiento 9.**

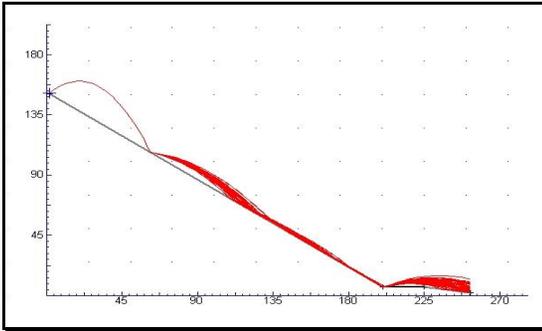


Fig. 83 Modelación de la ladera

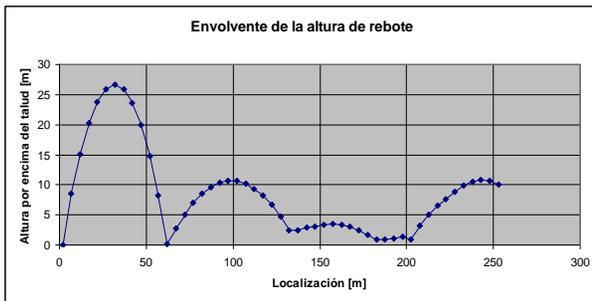


Fig.84 Modelación de envoltorio de energía cinética de los fragmentos de rocas.

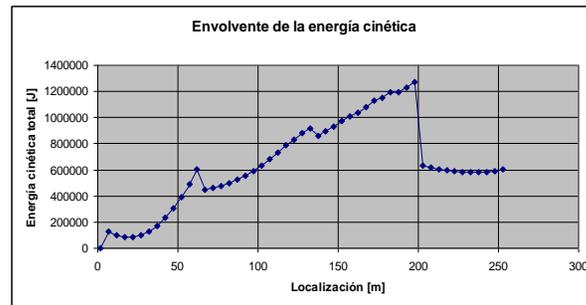


Fig.85 Modelación de envoltorio de altura de rebote de los fragmentos de rocas.

El rebote se manifiesta a lo largo de todo el talud, variando entre 4 y 27 m, los valores más altos se manifiestan en la parte más alta del talud donde se desprenden los fragmentos, sin embargo al llegar al pie del talud manifiestan rebote de hasta 11 m de altura pasando por encima de la carretera.



En la energía cinética ocurre un aumento en la medida en que los fragmentos van descendiendo hasta llegar alrededor de los 1200 KJ en el pie del talud, generando un fuerte impacto y rebote en la carretera, este impacto afecta el estado de la vía.

Comparando este resultado con los Modelo 1 de susceptibilidad comprobados que este punto en ambos modelos tienen una clasificación muy alta a los desprendimientos de rocas en el talud.

Como medida de mitigación se puede poner una pantalla dinámica que permita la atenuación de la energía de los fragmentos de roca conjuntamente con una zanja colectora.

### Movimiento 10.

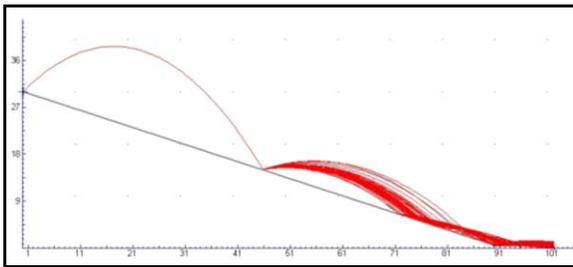


Fig.86 Modelación de la ladera

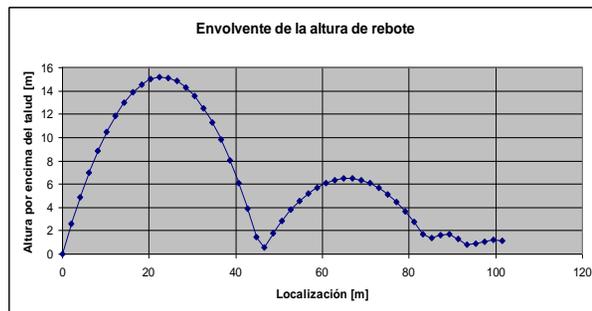


Fig.87 Modelación de envoltorio de altura de rebote de los fragmentos de rocas.

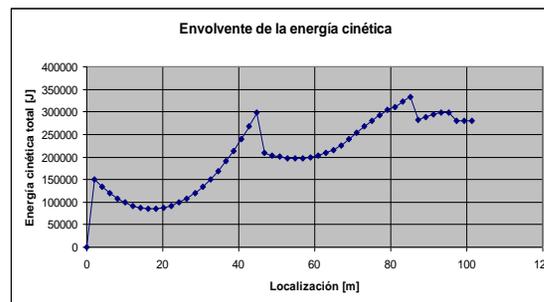


Fig.88 Modelación de envoltorio de energía cinética de los fragmentos de rocas.



La altura de rebote que se manifiesta en el talud es máxima en los primeros 20 m del punto de partida, llegando hasta 15 m de altura y así disminuyendo en la misma medida que van descendiendo los fragmentos ladera abajo, al llegar al pie del talud manifiestan un pequeño rebote entre 30 y 50 m de altura rodando por encima de la carretera.

Con relación a la energía cinética, ocurre un comportamiento interesante, manifestándose un aumento desde los 2 m del punto de partida con un valor de 150 KJ hasta los 80 m en el pie del talud, con un valor aproximado de 350 KJ y luego disminuyendo solamente 10 KJ, mientras pasa por encima de la carretera, lo que indica que la peligrosidad en este punto está condicionada a la velocidad de arrastre de los fragmentos no siendo tan importante las alturas de rebote.

Como medida de mitigación se puede poner una pantalla dinámica que permita la atenuación de la energía de los fragmentos de roca conjuntamente con una zanja colectora.

Este modelo coincide con lo observado en el campo y con los resultados de los modelos 1 de susceptibilidad que reflejó una alta susceptibilidad a la ocurrencia de desprendimiento de roca.

#### **4.7 Propuesta del plan de medidas para mitigar o prevenir los deslizamientos.**

El tramo de la carretera estudiada se considera muy susceptible a la ocurrencia de deslizamientos de tierra, lo que se ve demostrado con los resultados obtenidos en la presente investigación, lo que hace necesario la implantación de medidas que permitan mitigar la ocurrencia de estos fenómenos.

1. Como medida de mitigación: poner una pantalla dinámica que permita la atenuación de la energía de los fragmentos de roca conjuntamente con una zanja colectora.



2. Reforestar todos los taludes que se encuentran desprovistos, utilizando pastos y arbustos.
3. Modificación de la pendiente del talud en los casos más críticos, para el mejoramiento de las condiciones de estabilidad.
4. Remoción de los fragmentos salientes del talud para garantizar el apoyo de los estratos con juntas planas.

## CONCLUSIONES

- 1 Con la revisión documental de las metodologías existentes se pudo clasificar los factores condicionantes y de disparos en clases, las que permiten valorar su influencia en la ocurrencia de deslizamientos en el área.
- 2 Con la aplicación de la secuencia lógica de operaciones se determinó la clasificación de la susceptibilidad en baja, media, alta y muy alta, predominando la muy alta.
- 3 Se pudo determinar como tramo más susceptible: Permite determinar los tramos más susceptibles del vial para el diseño de proyecto de soluciones a esta problemática
- 4 Con la utilización del SIG ArcGIS se pudo obtener el mapa de susceptibilidad a los deslizamientos el cual fue clasificado en 4 clases baja, media, alta y muy alta.

Entre los factores desencadenantes se puede observar que la litología, las intensas lluvias tienen una mayor incidencia en la ocurrencia

- 5 En el tramo de carretera de estudiado se producen frecuentemente diferentes tipos de movimientos de ladera como son: deslizamientos, desprendimiento de rocas, flujos detríticos, los cuales están condicionados por factores pasivos (pendiente,



tectónica, litología, humedad) y factores desencadenantes (sismicidad y intensas lluvias), siendo estos últimos los que más inciden en la ocurrencia de los mismos.

- 6 La ubicación geográfica de este vial permite que la misma se vea afectada por procesos catalizadores como son las intensas lluvias, muchas veces provocadas por fenómenos meteorológicos como son los ciclones y los huracanes y el efecto de los sismos ocurridos en la región sur oriental, siendo otro de los factores que condicionan la ocurrencia de los fenómenos de deslizamientos.
- 7 El mapa final de susceptibilidad del terreno por deslizamientos nos muestra las zonas susceptibles para que ocurran estos movimientos, clasificándose en áreas de baja, media, alta y muy alta susceptibilidad, las cuales están condicionadas por la influencia de los factores condicionantes, donde las zonas más susceptibles se localizan en la parte norte del área.



## **RECOMENDACIONES**

1. Realizar un estudio de peligrosidad y riesgo en el vial La Farola a deslizamientos obtenidos a partir de análisis integrados de los factores que condicionan y provocan las roturas o inestabilidades de laderas.
2. Realizar un plan de gestión de riesgos y desastres por deslizamientos en vial la farola.
3. Proponer soluciones significativas con el objetivo de solucionar el problema presentado entre ella:
  - ✓ Realizar revestimiento de la superficie ya afectada.
  - ✓ Modificación de la pendiente del talud en los casos de susceptibilidad muy alta.
  - ✓ El revestimiento del talud rocoso con mallas metálicas de triple torsión.
  - ✓ Realizar estructuras de contención y sostenimientos.



## BIBLIOGRAFIA

- ALMAGUER Y., (2001) *"Análisis de estabilidad de taludes a partir de la evaluación geomecánica del macizorocoso"*. Tesis de maestría. Departamento de Geología. 110 p.
- ALMAGUER Y. (2003), *"Calculo de estabilidad de taludes en cortezas lateríticas"*. Memorias del I Taller Internacional Ingeotaludes. Moa.
- ALMAGUER Y. (2002), *"Estabilidad de taludes en el macizo rocoso serpentizado del territorio de Moa"*. Curso Iberoamericano de Aplicaciones Geomecánicas y Geoambientales al Desarrollo Sostenible de la Minería. Ediciones Panorama Minero. 69-84 p.
- ALMAGUER Y. (2005), *"Metodología de cartografía de susceptibilidad a la rotura en cortezas lateríticas en el territorio de Moa, Cuba"*. Memorias del Taller Internacional de Riesgos Geodinámicos y Cierre de Minas (CYTED). Santa Cruz de la Sierra.
- ALMAGUER Y. (2005b), *"Métodos de cartografía de susceptibilidad y peligrosidad por el desarrollo de deslizamientos"*. Memorias del II Taller internacional Ingeotaludes. Moa.



- ALMAGUER Y. (2005a), *Valoración de la susceptibilidad del terreno en yacimientos lateríticos de Moa, Cuba*. Memorias del Taller Internacional de Peligrosidad y Riesgos por Movimientos de Masas (Red A4D, CYTED). Guayaquil, Ecuador.
- ALMAGUER Y. (1998), "*Análisis ingeniero-geológico e hidrogeológico del yacimiento Punta Gorda*". Trabajo de diploma. Departamento de geología, ISMM. 105 p.
- ALMAGUER Y, Guardado R. (2003). "*Análisis de estabilidad de taludes a partir de la evaluación geomecánica del macizo rocoso serpentizado de la región de Moa*". CD Congreso Geología y Minería. ISBN 959-7117-11-8.
- ALMAGUER Y., Guardado R. (2005a). "*Caracterización geotécnica del perfil de meteorización de rocas ultrabásicas serpentizadas en el territorio de Moa*", Cuba. Geología y Minería, XX (1 y 2).
- ALMAGUER Y., Guardado R. (2005). "*Mecanismos de movimientos de masas desarrollados en el territorio de Moa, Cuba*". Primera Convención de Ciencias de la Tierra. Habana. ISBN 959-7117-03-7.
- ALMAGUER Y., Guardado R. (1970). "*Tipologías de movimientos de masas desarrollados en el territorio de Moa, Cuba*". Geología y Minería, XX (1 y 2). 2005b.
- ALVAREZ, H, L S. (1970) "*Intensidad Sísmica de Cuba. Atlas Nacional de Cuba, La Habana*", 20pp.
- ARANGO, E., Zapata, J. Fernández, B. y Reyes, C. (1997). "*Evaluación del Peligro Geológico sobre la carretera Granma, entre las localidades de Chivirico y Río Macío, en el municipio Guamá*". Provincia de Santiago de Cuba. Informe de Investigación, Fondos del CENAI, 40pp.
- REYES, C., Chuy, T. (2001). "*Atlas de peligros Naturales del Municipio Guamá*". CENAI. 65 p.
- BATISTA, Y. (2009), "*Evaluación del riesgo por deslizamiento del municipio Bartolomé Masó. Provincia Granma*". Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa (Tesis master) 98 p.



CARRARA, A., "Geomathematical assessment of regional landslide hazard". 4th Int. Conf. Applic. Stat.

CARRARA, A., "Landslide hazard mapping by statistical methods. A "black box" approach". Workshop on

NATURAL, (1988) *Disasters in European Mediterranean Countries, Perugia*. 21 ( 2), 187-222 p.

CASTELLANOS, E., "Processing SRTM DEM data for national landslide hazard assessment". VI Congreso de Geología. La Habana, Cuba, 5-8 de abril. (Memorias). España. Madrid, 113-123.

COROMINAS, J. (1987), "Criterios para la confección de mapas de peligrosidad de movimientos de ladera". Riesgos Geológicos. Serie Geología Ambiental. IGME, Madrid. 193-201 p.

COROMINAS, J. (1989), "Clasificación y reconocimiento de los movimientos de laderas". Curso sobre Estabilidad de taludes y laderas naturales". Barcelona. Monografía No.3. Sociedad Española de Geomorfología.

COROMINAS, J. y Moya, J. (1992). "Movimientos de Laderas: Predicción y Medidas Preventivas". 1er Congreso Iberoamericano sobre técnicas aplicadas a la Gestión de emergencias para la reducción de desastres naturales. Universidad Politécnica. Valencia, España, pp55-77.

COROMINAS, J.; R. Copons; J. M. Vilaplana; J. Altimir y J. Amigó. (2003), "Integrated landslide susceptibility analysis and hazard assessment in the principality of Andorra". *Natural Hazards* 30: 421–435 p.

COMISIÓN Ad hoc. (1992): "Zonas sismogeneradoras del Oriente Cubano". Fondos del CENAIIS.

CHANG, J. L., V. Suárez; E. Castellanos; K. Núñez y J. Moreira. (2005). "Análisis de riesgos por deslizamientos. Contribución a partir del estudio de la migración de los radioelementos naturales". V Taller Internacional de Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente.

CHUY, T. J. (2003), "Macrosísmica de Cuba: su aplicación en los estimados de peligrosidad sísmica". *Minería y Geología*. (1-2): 43-50 p.



- DÍAZ DÍAZ, J.L. (1989). Relieve. Morfoestructural 1: 2 000 000, IV. En: *Nuevo Atlas Nacional de Cuba*. La Habana: Academia de Ciencias de Cuba
- DÍAZ DÍAZ, J.L.; et al (1986). "Los principios básicos de la clasificación morfoestructural del relieve cubano y su aplicación en la región centro-oriental de Cuba". La Habana: Academia de Ciencias de Cuba. 60 p.
- DONATI L. y Turrini M. C. (2002). "An objective method to rank the importance of the factors predisposing to landslides with the GIS methodology: application to an area of the Apennines (Valnerina; Perugia, Italy)". *Engineering Geology*. 63, 277-289 p.
- ESCOBAR, E. M., "Variantes geofísicas en la solución de algunas tareas de valoración de la vulnerabilidad sísmica". VI Congreso de Geología. La Habana, Cuba, 5-8 de abril. (Memorias).
- GRUPO DE CARTOGRAFÍA DIGITAL Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOLÓGICA. (2001). *Mapa Geológico de Oriente 2001*. La Habana: Instituto de Geología y Paleontología.
- GRUPO DE CARTOGRAFÍA DIGITAL Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOLÓGICA. (2001). *Mapa Tectónico de Oriente*. La Habana: Instituto de Geología y Paleontología.
- GUARDADO R.; Y. Almaguer; Y. Hernández; J.R. Tamayo y J. Pea Guy. (2001). "Estabilidad de taludes en suelos lateríticos del yacimiento Punta Gorda aplicando criterios de rotura". *GEOBRASIL* (ISSN 1519-5708). 12-24 p.
- GUARDADO, R. y Y. Almaguer., "Evaluación de riesgos por deslizamiento en el yacimiento Punta Gorda, Moa, Holguín". *Minería y Geología*. 17(1): 49-60. 2001
- GUARDADO, R.; A. Kempena Y A. Martínez. (2000). "Cartografía y evaluación del impacto geoambiental a través de un sistema de información geográfica". *Minería y Geología*. 17 (3-4): 23-31 p.



HERVÁ, J., Barredo, J. (2001). "*Elaboración de mapas de susceptibilidad de deslizamiento mediante SIG*", teledetección y métodos de evaluación multicriterio. Aplicación a la depresión de Tirajana (Gran Canaria). V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables Madrid, 27- 30 Noviembre.

*Léxico Estratigráfico de Cuba* (2013). La Habana: Centro Nacional de Información Geológica

KUZOVKOV, G., Arseniev, Y. (1997). "*Levantamiento Geológico 1:100 000 Sierra Maestra Sur*". Empresa Geominera de Oriente, Santiago de Cuba.

MATOS, G L.; M. I. De la Cruz y R. Guardado. (2005). "*Estudio de evaluación de los riesgos geológicos en los taludes de los yacimientos lateríticos*". VI Congreso de Geología. La Habana, Cuba, 5-8 de abril. (Memorias).

MEDINA, A., Escobar, E., Ortíz, G. Ramírez, M., Díaz, L., Móndeolo, F., Montejo, N., dúguez, H., Guevara, T y Acosta, J. (1999), "*Reconocimiento geólogo-geofísico de la cuenca de Santiago de Cuba, con fines de Riesgo Sísmico*". Empresa Geominera de Oriente, Santiago de Cuba.32pp.

MEDINA, Y. (2007), "*Deslizamientos e impactos ambientales de los huracanes Mitch y Stan, en Guatemala*". Jornadas Internacionales sobre Gestión del Riesgo de Inundaciones y Deslizamientos de Laderas. Brasil.

MORA, Ch. (2004). "*Evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento del cantón de san José, provincia de San José, Costa Rica*". 9 p.

MORA, S. y Vahrson, W. G. (1994). "Macrozonation methodology for landslide hazard determination". Bull. Of the Assoc. Eng. Geology. XXXI (1), 49-58 p.



- PEDROSO E., Fundora M., González Y., Guerra M., Jaimez E., Silvestre E., González B. E., David L., Llanes C., Suárez E. y Hernández Y. (2005). "*Peligros, vulnerabilidad y riesgos geológicos, geofísicos y tecnológicos. Caso estudio en el municipio Playa*". VI Congreso de Geología y Minería. Simposio de sismicidad y riesgos geológicos.
- REYES P., Ríos Y., Vega N., Arango E. (2005). "*Peligro geológico de la red vial de las provincias orientales para caso de sismos de gran intensidad*". VI Congreso de Geología y Minería. Simposio de sismicidad y riesgos geológicos.
- ROCAMORA E. (2005). "*Evaluación de los fenómenos de desprendimientos de bloques en las laderas verticales. Casos de estudio*". VI Congreso de Geología y Minería. Simposio de sismicidad y riesgos geológicos.
- SANTACANA, N. (2001). "*Análisis de la susceptibilidad del terreno a la Formación de deslizamientos superficiales y Grandes deslizamientos mediante el uso de Sistemas de información geográfica. Aplicación a la cuenca alta del río Llobregat*". Tesis doctoral. UPC. Barcelona.
- SHARPE, C.F.S. (1938). "*Landslides and their control*". Academia & Elsevier, Prague. 205 p.
- SPIRIDONOV, A.I. (1981). "*Principios de la Metodología de las Investigaciones de Campo y el Mapeo Geomorfológico*". La Habana: Ministerio de Educación Superior. 658 p.
- SEISDEDOS, G.; Reyes, C. R.; Guasch, F.; Avich, B. et al (2001). "*Atlas de Peligros Naturales del municipio Guamá, provincia de Santiago de Cuba*". Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. Editorial Academia, 93 pp.
- SUÁREZ J. (1998). "Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales". Ed. Ingeniería de suelos Ltda. Colombia. 547p.
- VAN WESTEN, C.J. (1993). "Application of Geographic Information System to landslide hazard zonation". ITC- Publications nº 15 ITC, Enschede. 45 p.



VAN WESTEN C.J., "GIS in landslide hazard zonation: a review, with examples from the Andes of Colombia". En: M.F. Price and D. I Heywood (Editors) Mountain Environments and Geographic

VARNES, D.J. (1984). "Landslide hazard zonation: a review of principles and practice". Natural Hazards. nº 3. UNESCO, Paris. 63 p.

VARNES, D.J. (1978). "Slope movement types and processes. In: Landslides analysis and control". Special Report. 176, 11-33 p.

VEGA M. B. (2005). "Obtención del mapa de erosión de suelos a escala 1:250 000 en el ambiente de un SIG". VI Congreso Cubano de Geología y Minería. Geomática.

VILAPLANA, J. M.; R. Pallás; M. Guinau; E. Falgás y X. Alemany. (2002). "Propuesta para una cartografía de peligrosidad geológica asociada a los movimientos de ladera en el noroeste de Nicaragua". Serie Geográfica (10):109-119.

VIÑA Bayés y A. Graña González. Carsología. (1989). "Nuevo Atlas Nacional de Cuba". Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de Cuba, V, 1.

ZAPATA, J. A., J. R. Del Pino y R. Matos. (2005). "Régimen sísmico de las principales zonas sismoactivas de la región oriental de Cuba". Período 1979 - 2004. SALIDA 03 Proyecto Territorial 44-07/04 Modelación de los potenciales impactos ambientales negativos sobre la comunidad y el entorno por terremoto severo en Santiago de Cuba. Reporte de Investigación. Fondos del CENAI. 33 pp.



*Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez"*  
*Facultad de Geología y Minería. Departamento de Geología*

---



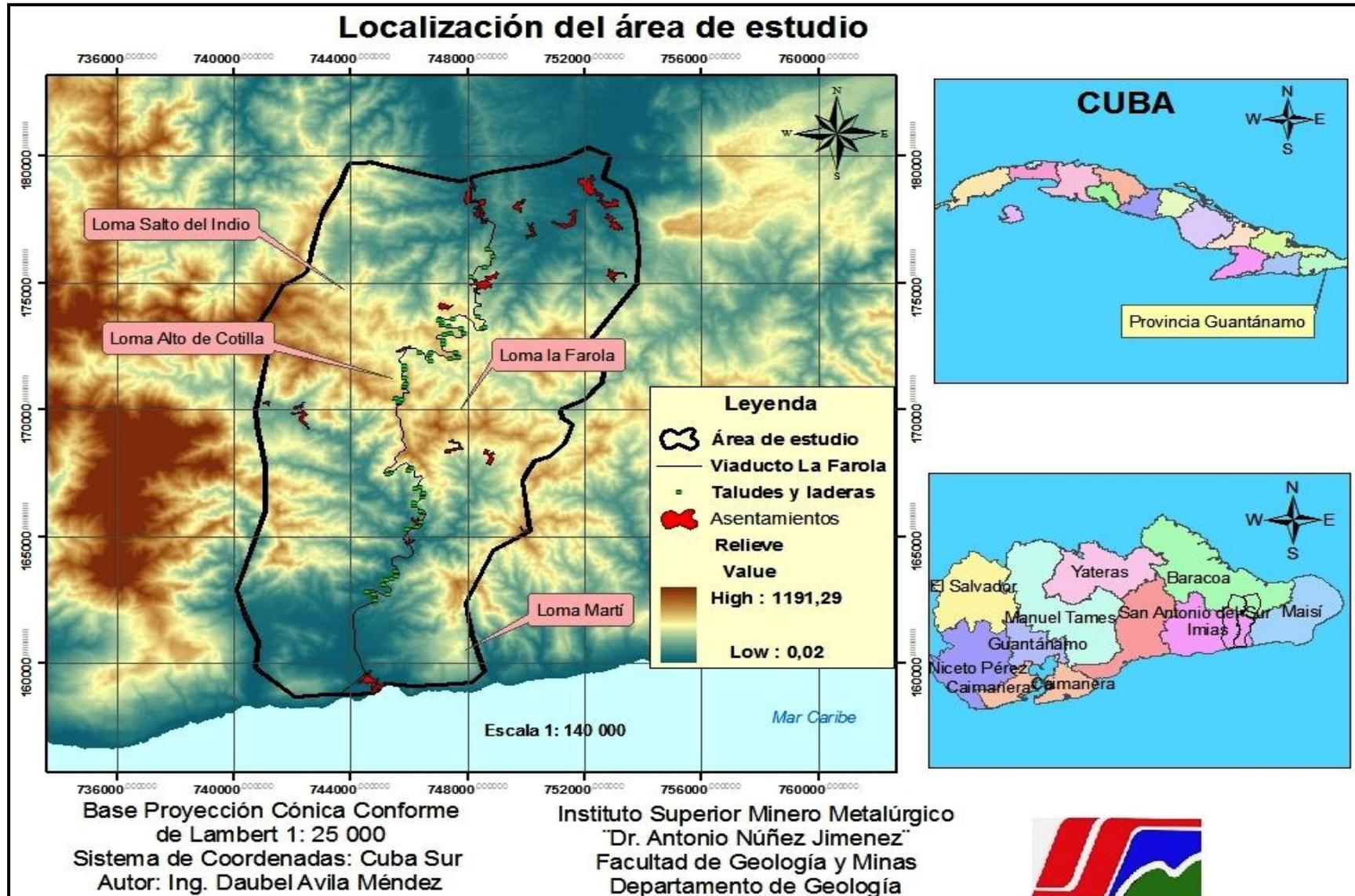
*Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez"*  
*Facultad de Geología y Minería. Departamento de Geología*

---

# **ANEXOS**



### Anexo 1. Localización espacial del área de estudio





*Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez"*  
*Facultad de Geología y Minería. Departamento de Geología*

---

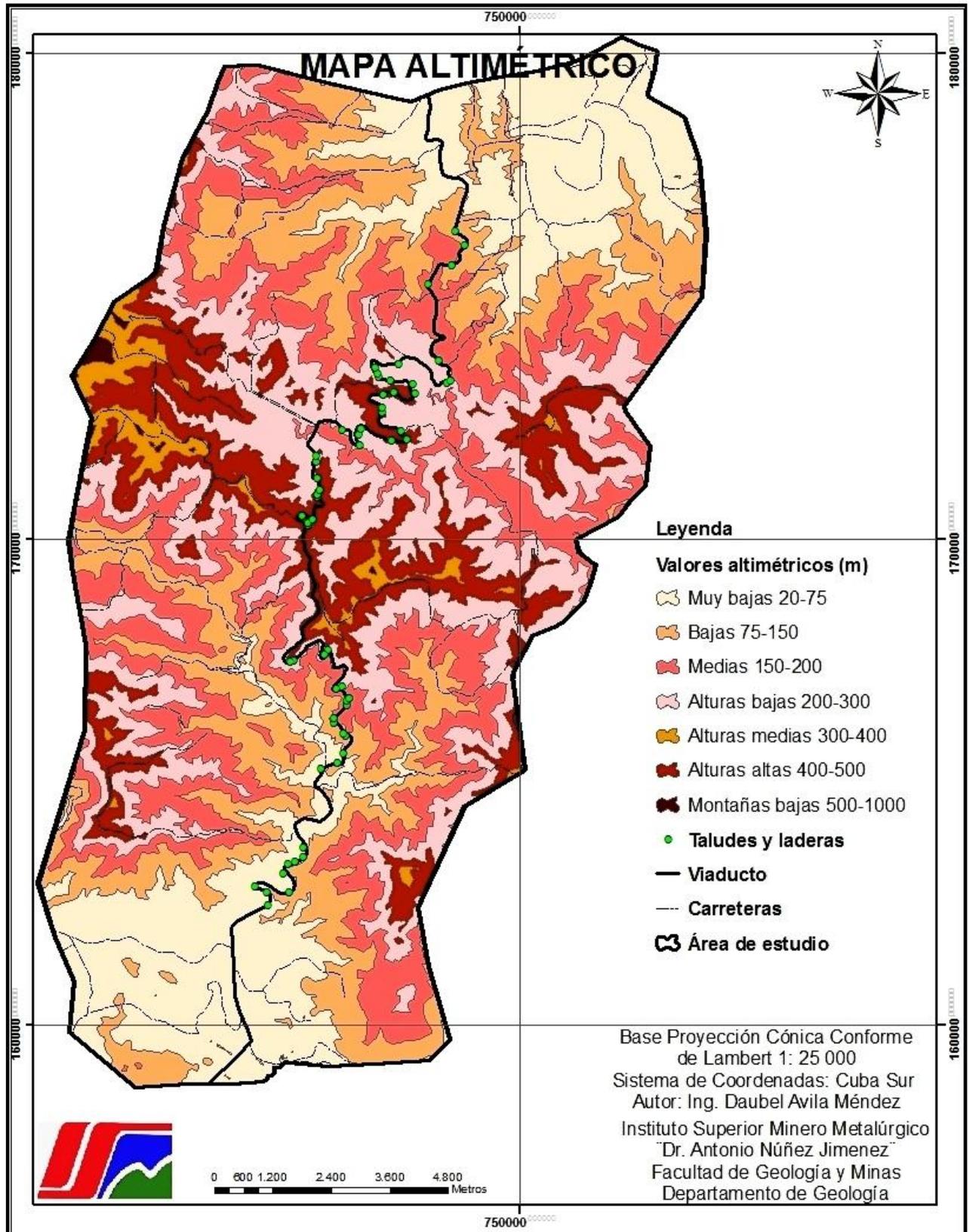


## Anexo 2. Perfil Topográfico del vial la farola





### Anexo 3. Mapa altimétrico del área de estudio





*Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez"*  
*Facultad de Geología y Minería. Departamento de Geología*

---

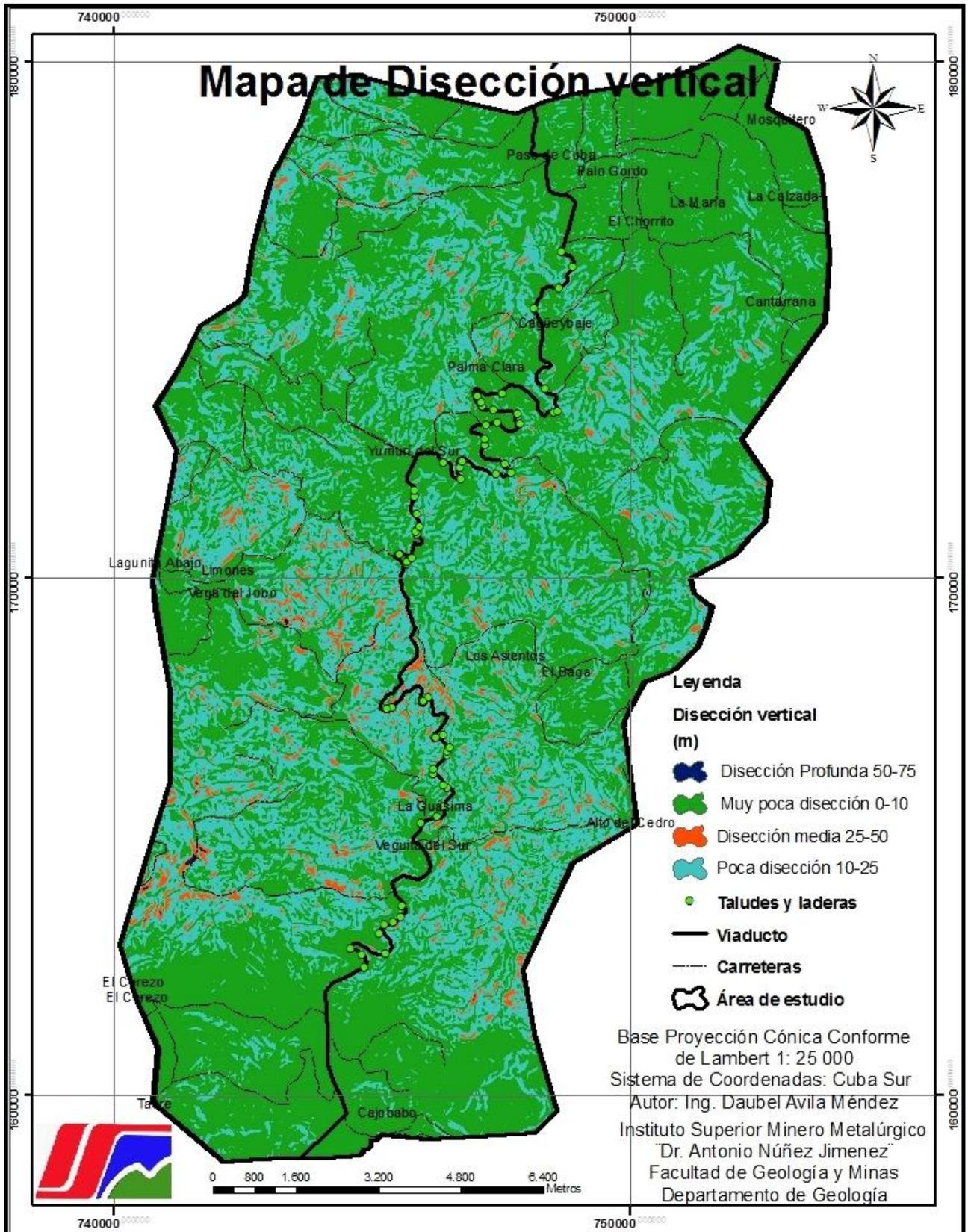


*Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez"*  
*Facultad de Geología y Minería. Departamento de Geología*

---



### Anexo 4. Mapa de disección vertical o profundidad de disección (m)





*Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez"*  
*Facultad de Geología y Minería. Departamento de Geología*

---

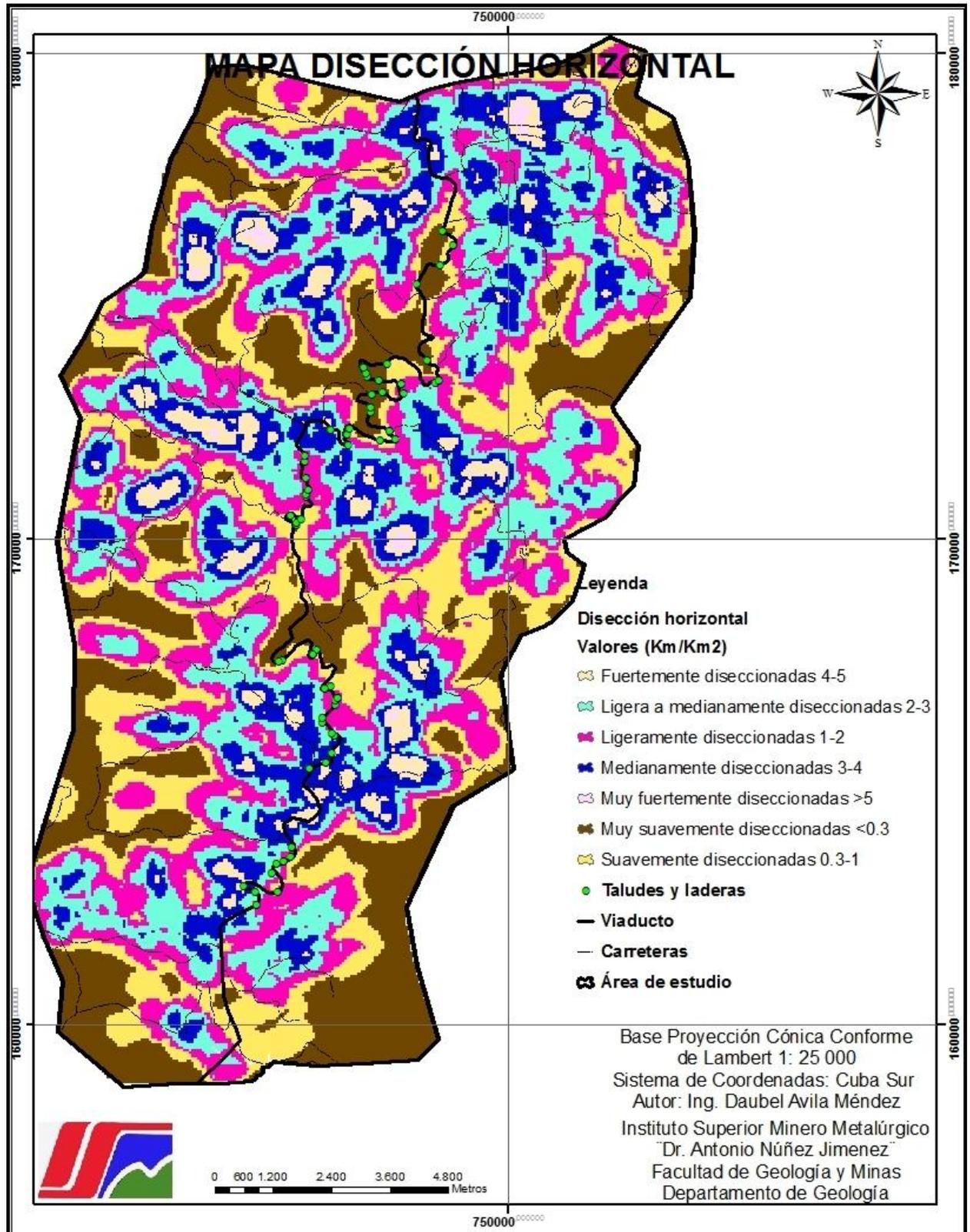


*Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez"*  
*Facultad de Geología y Minería. Departamento de Geología*

---

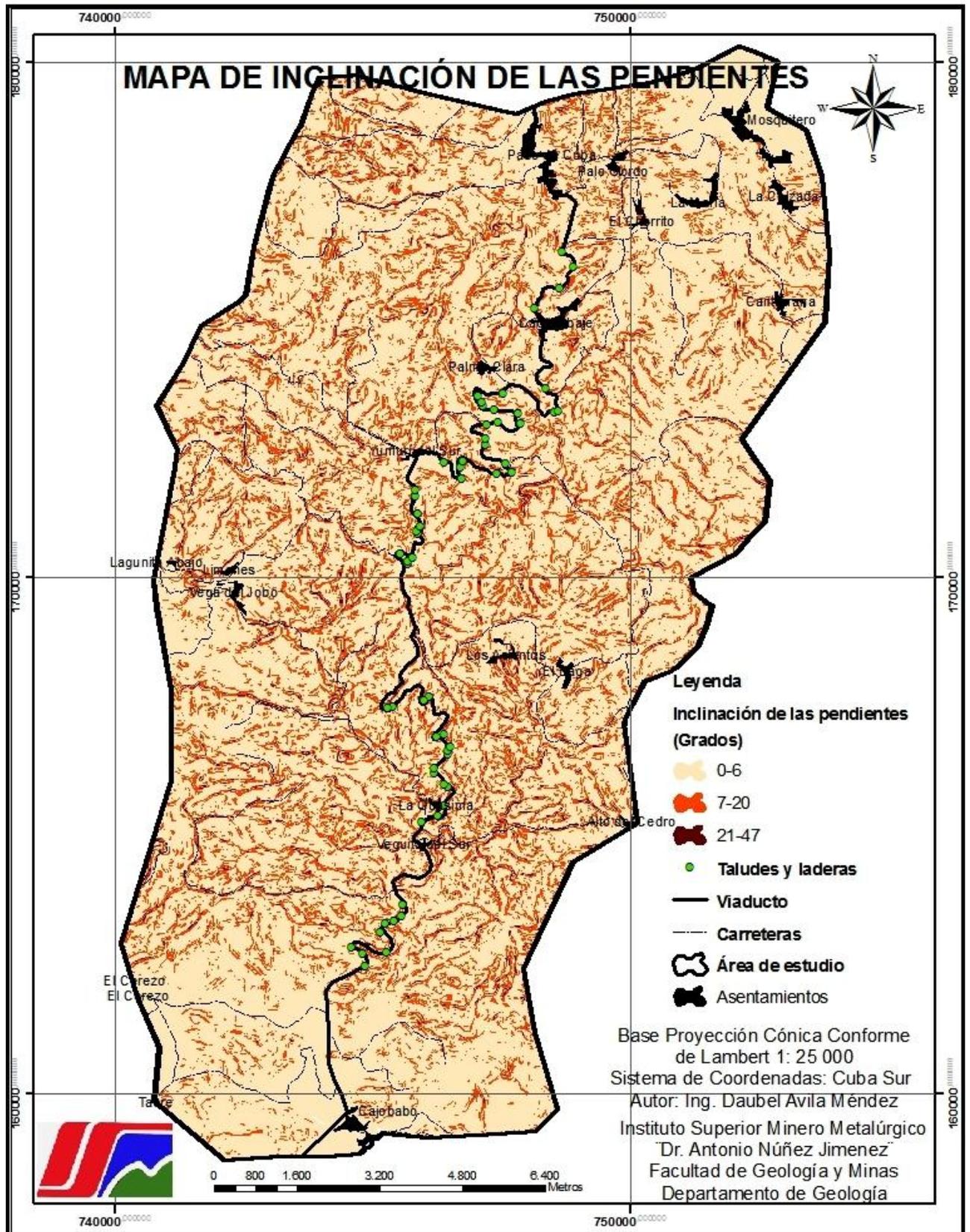


### Anexo 5. Mapa de disección horizontal



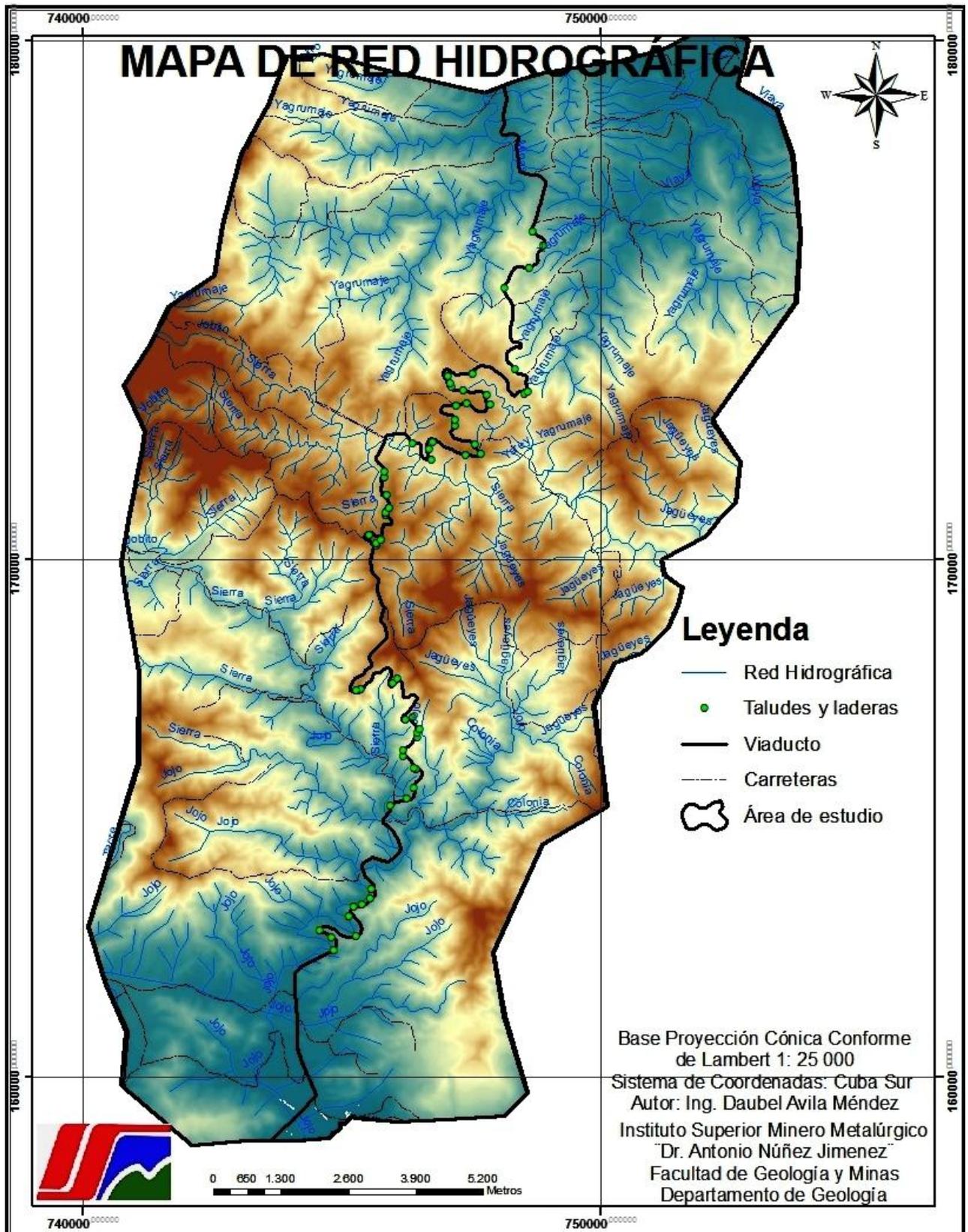


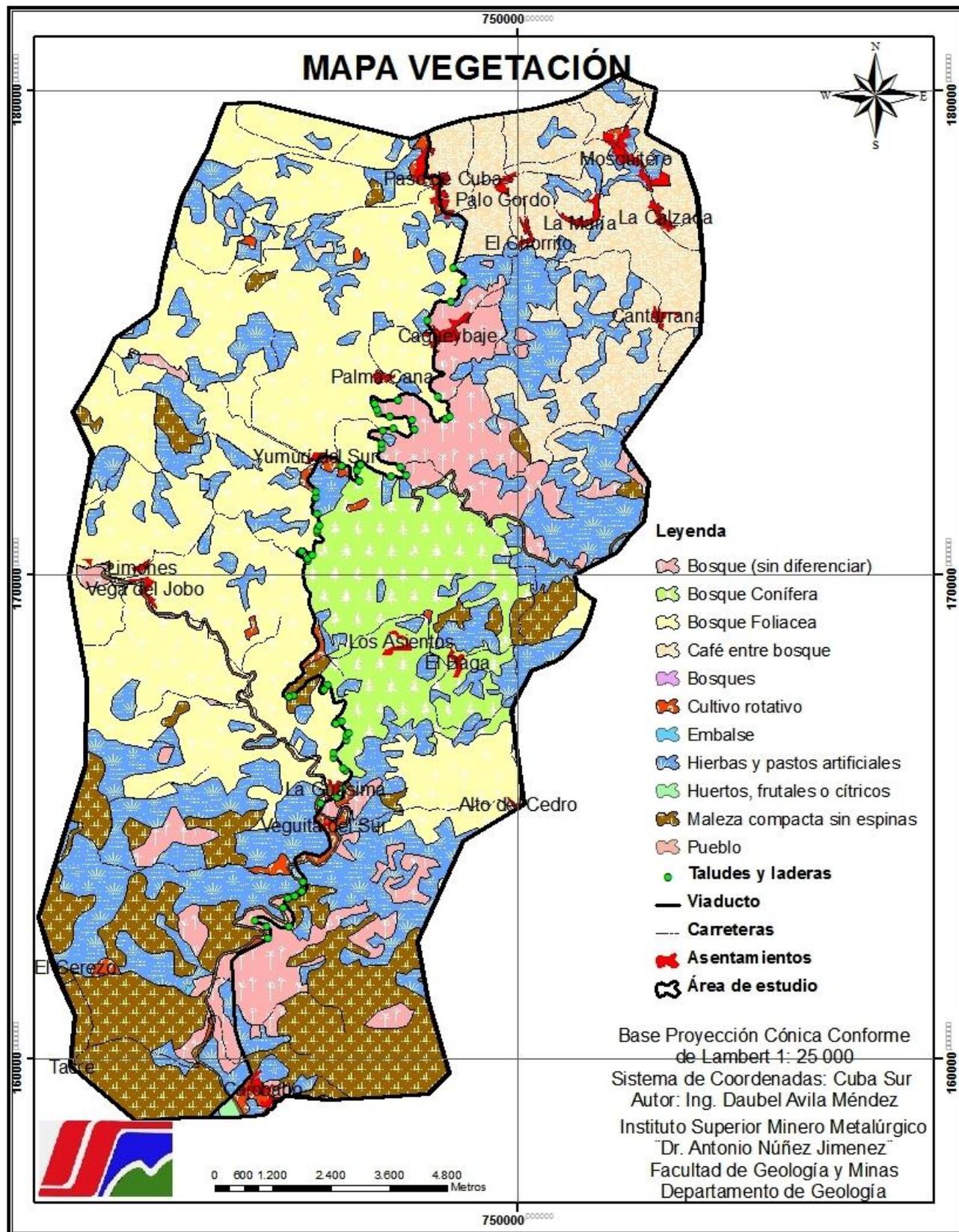
Anexo 6. Mapa de inclinación de las pendientes del área de estudio.





### Anexo 7. Mapa de la red hidrográfica





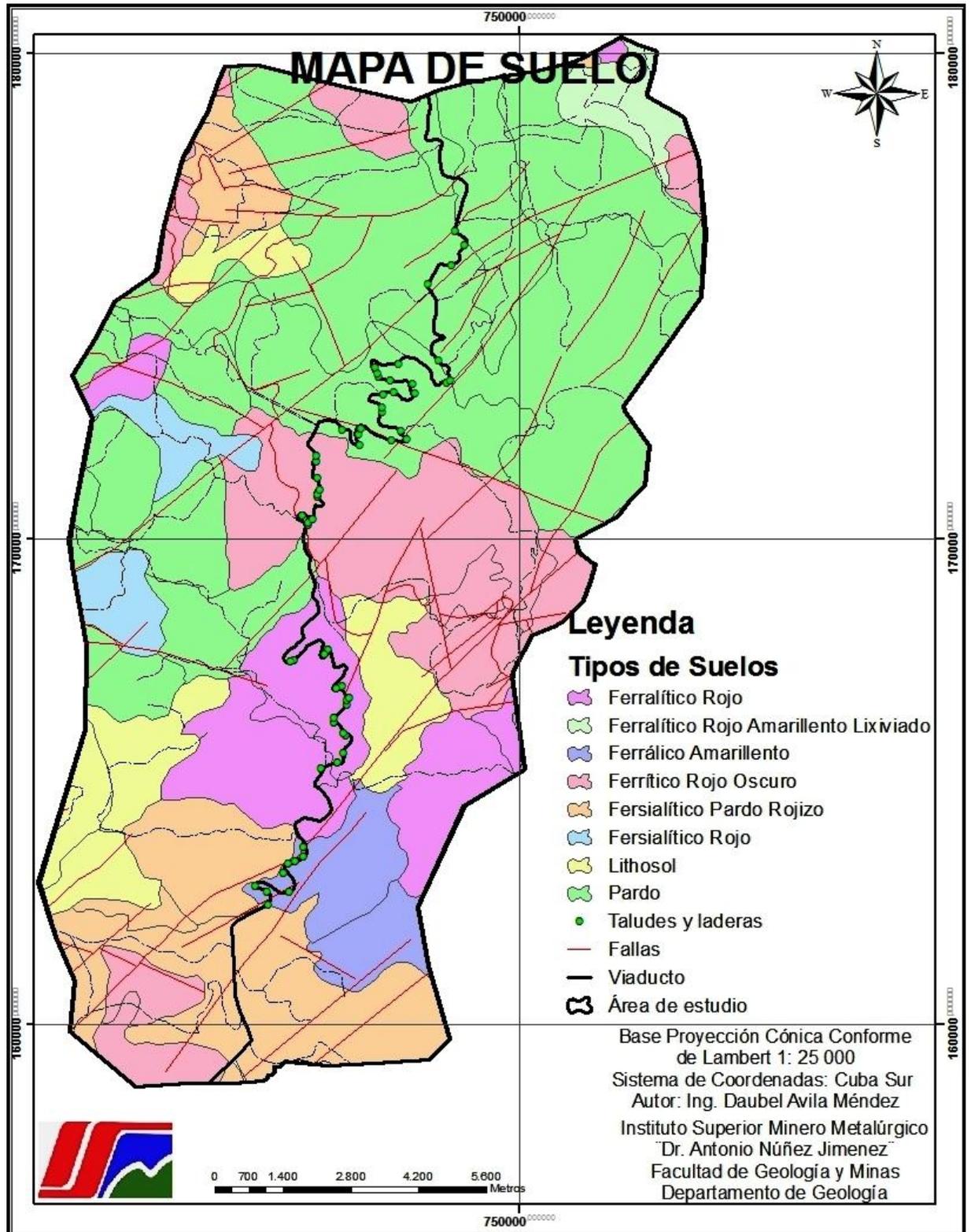


*Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez"*  
*Facultad de Geología y Minería. Departamento de Geología*

---

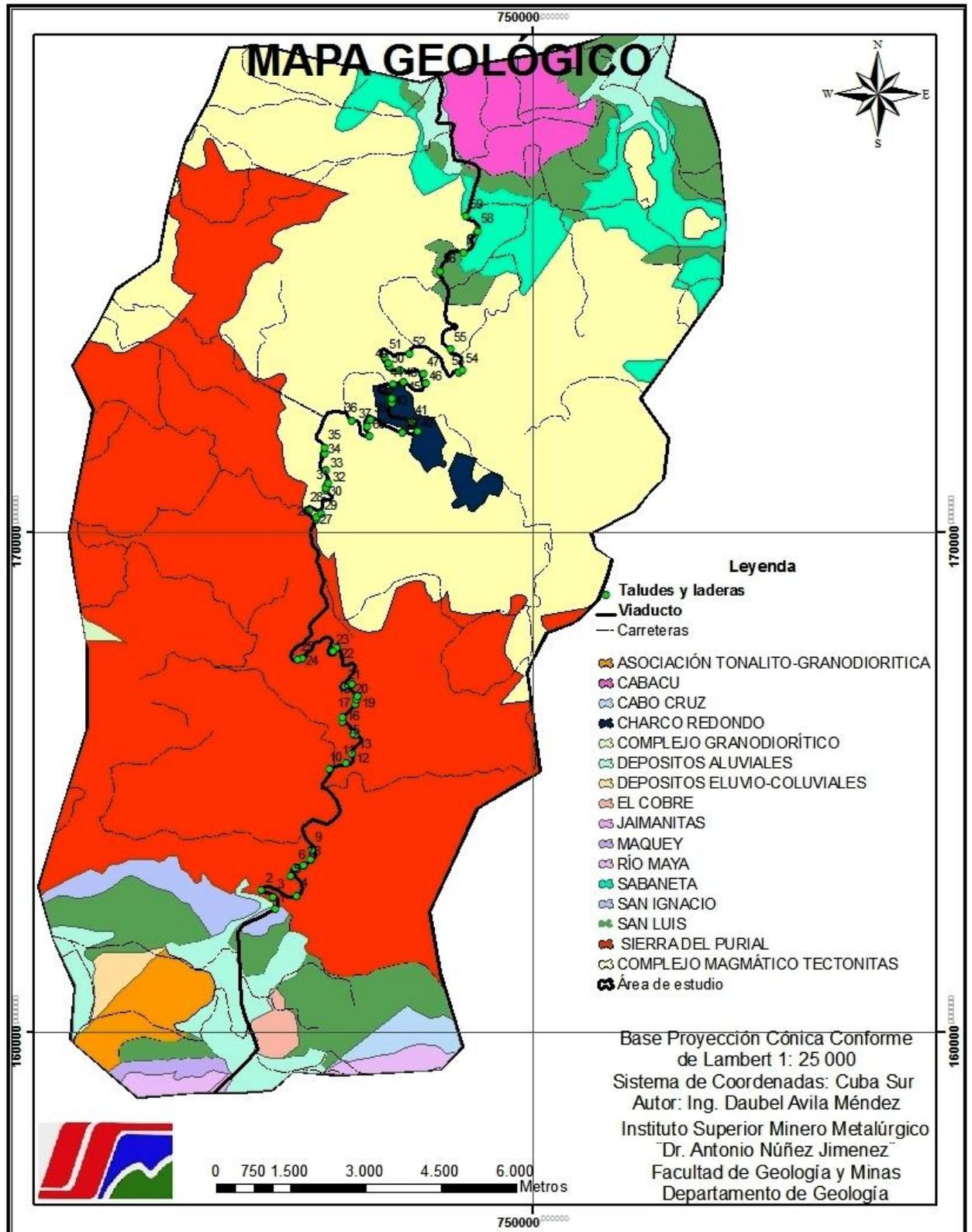


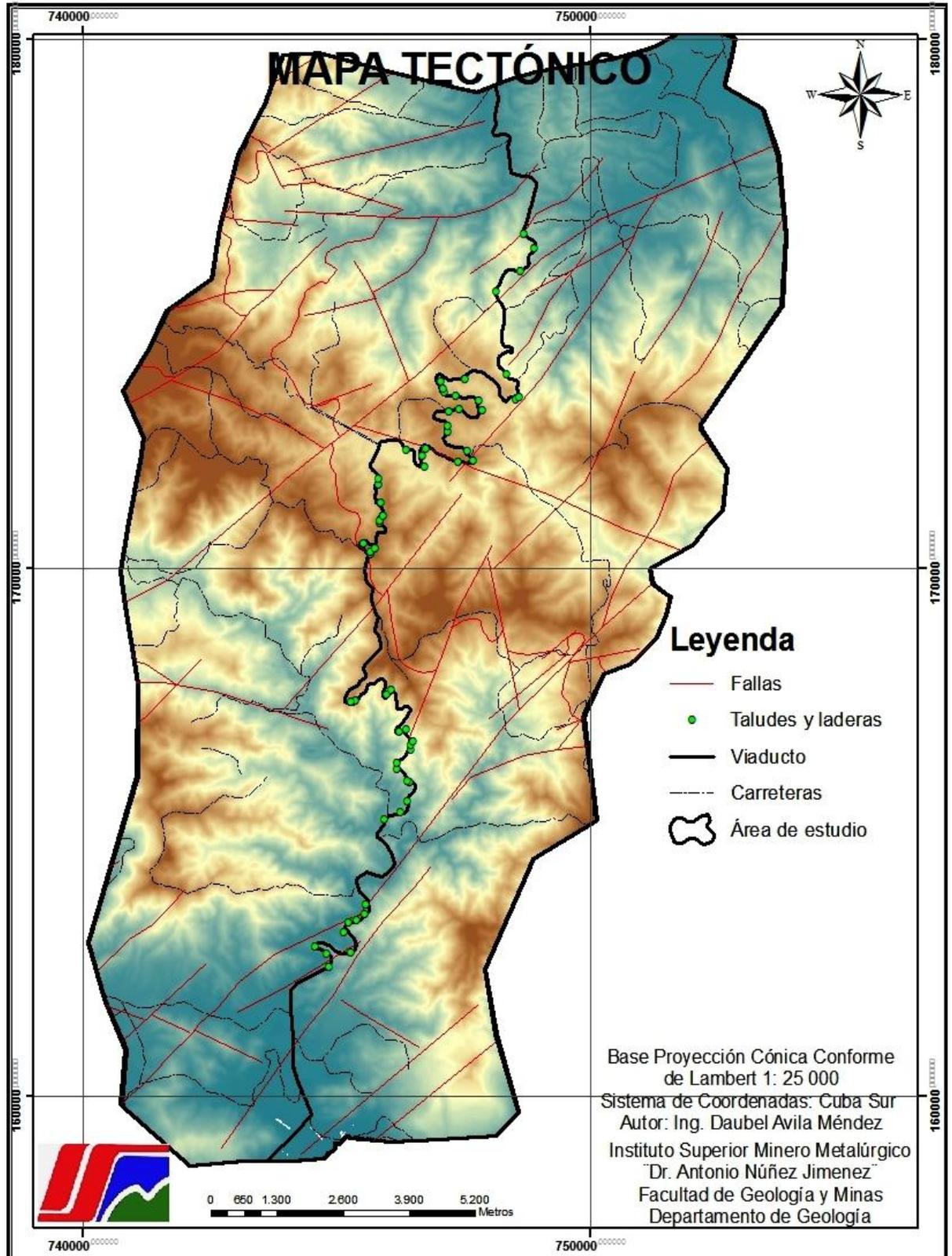
### Anexo 9. Mapa de Tipos de Suelos del área de estudio





### Anexo 10. Mapa Geológico del área de estudio

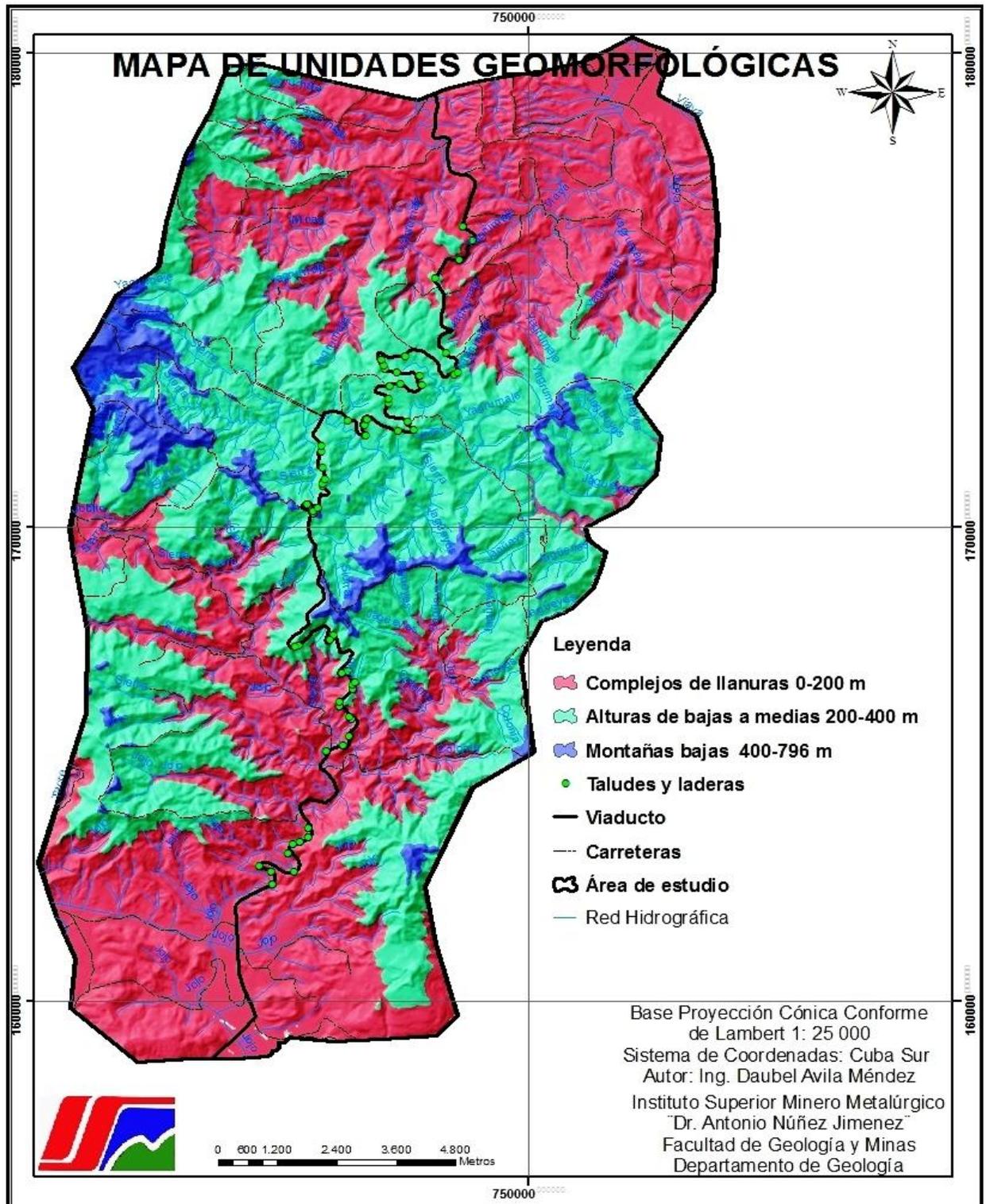




Anexo 11. Mapa Tectónico



## **Anexo 12. Mapa de unidades geomorfológicas**





*Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez"*  
*Facultad de Geología y Minería. Departamento de Geología*

---

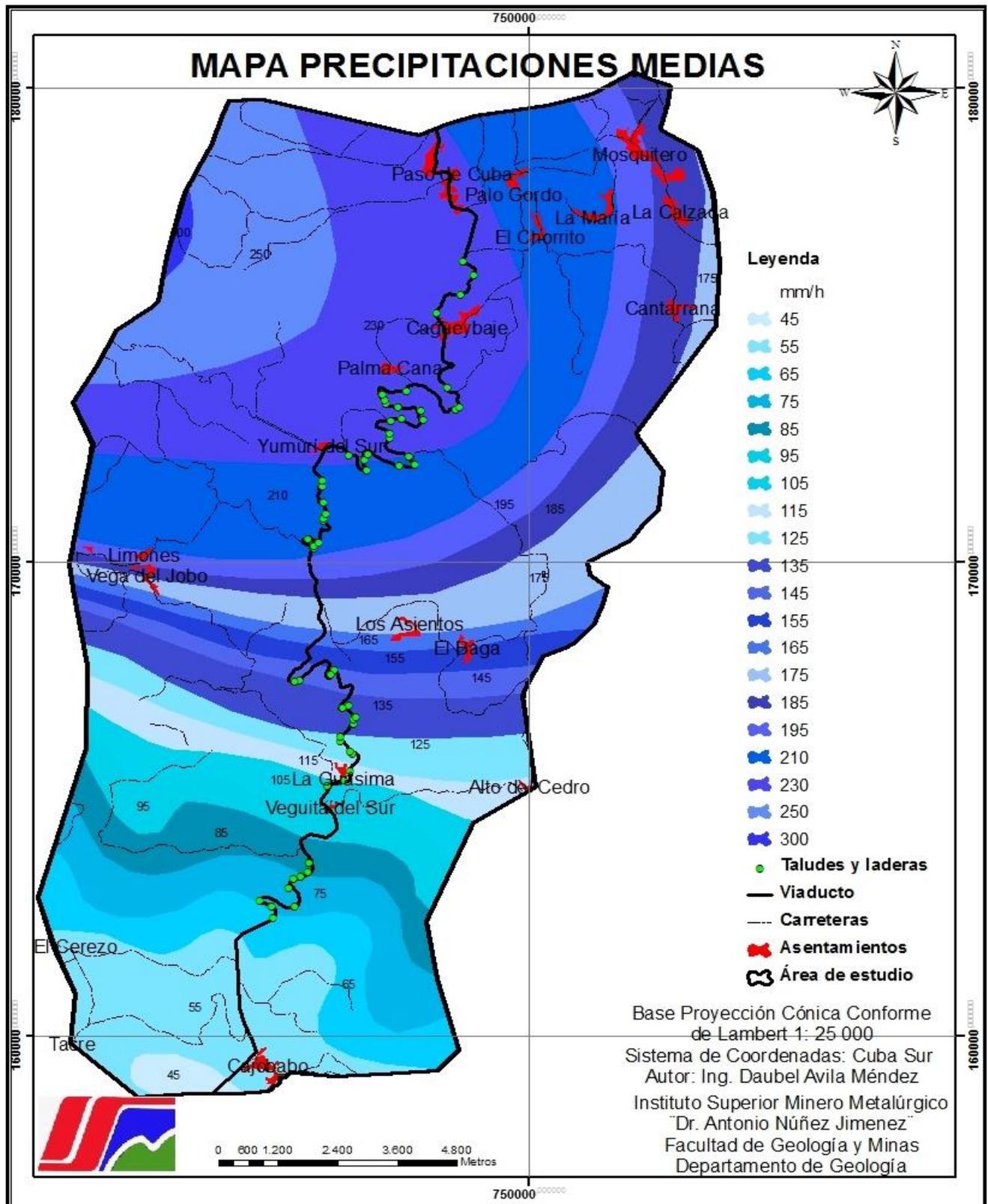


*Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez"*  
*Facultad de Geología y Minería. Departamento de Geología*

---

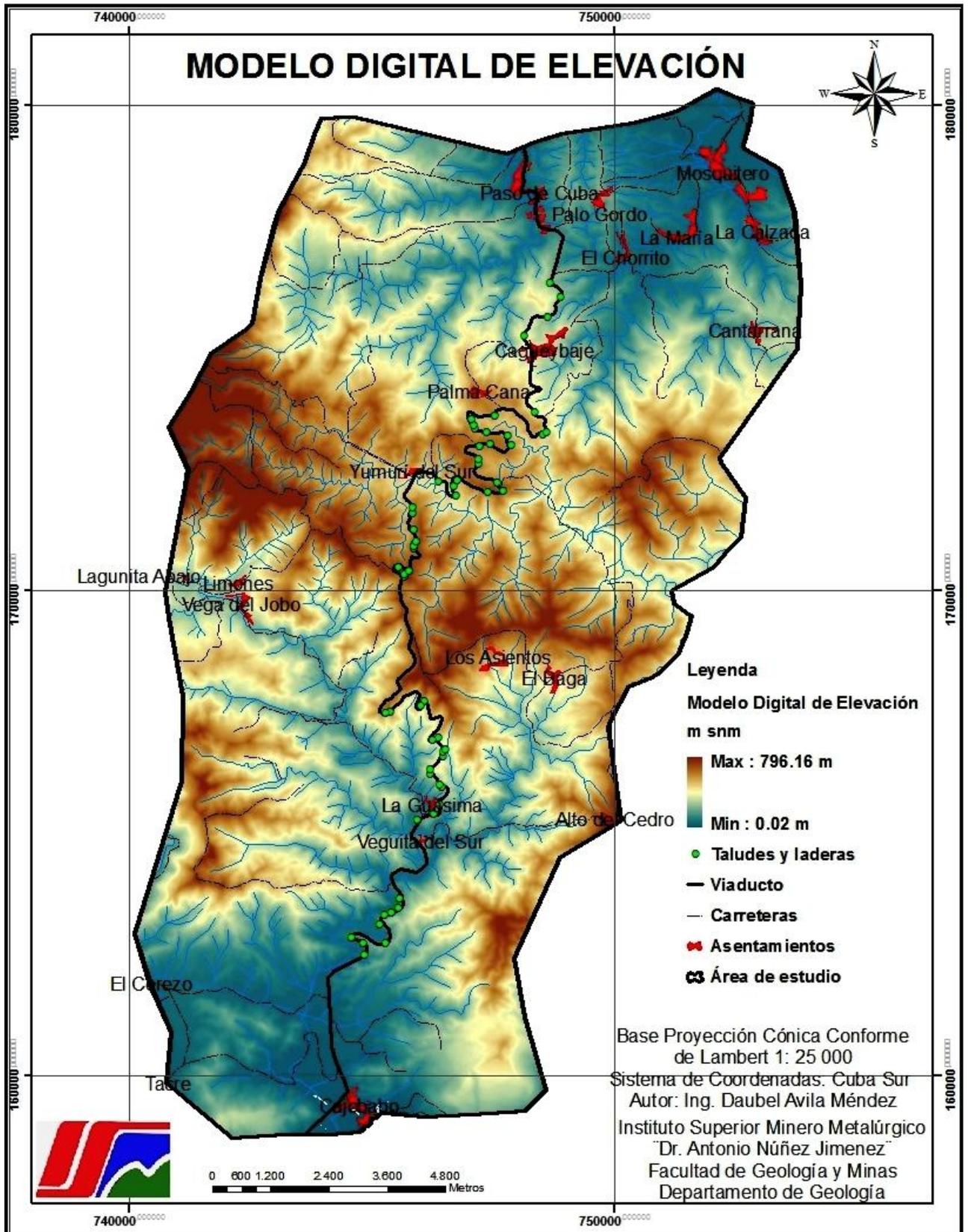


### Anexo 13. Mapa Precipitaciones media





## **Anexo 14. Modelo Digital de Elevación del área de estudio**



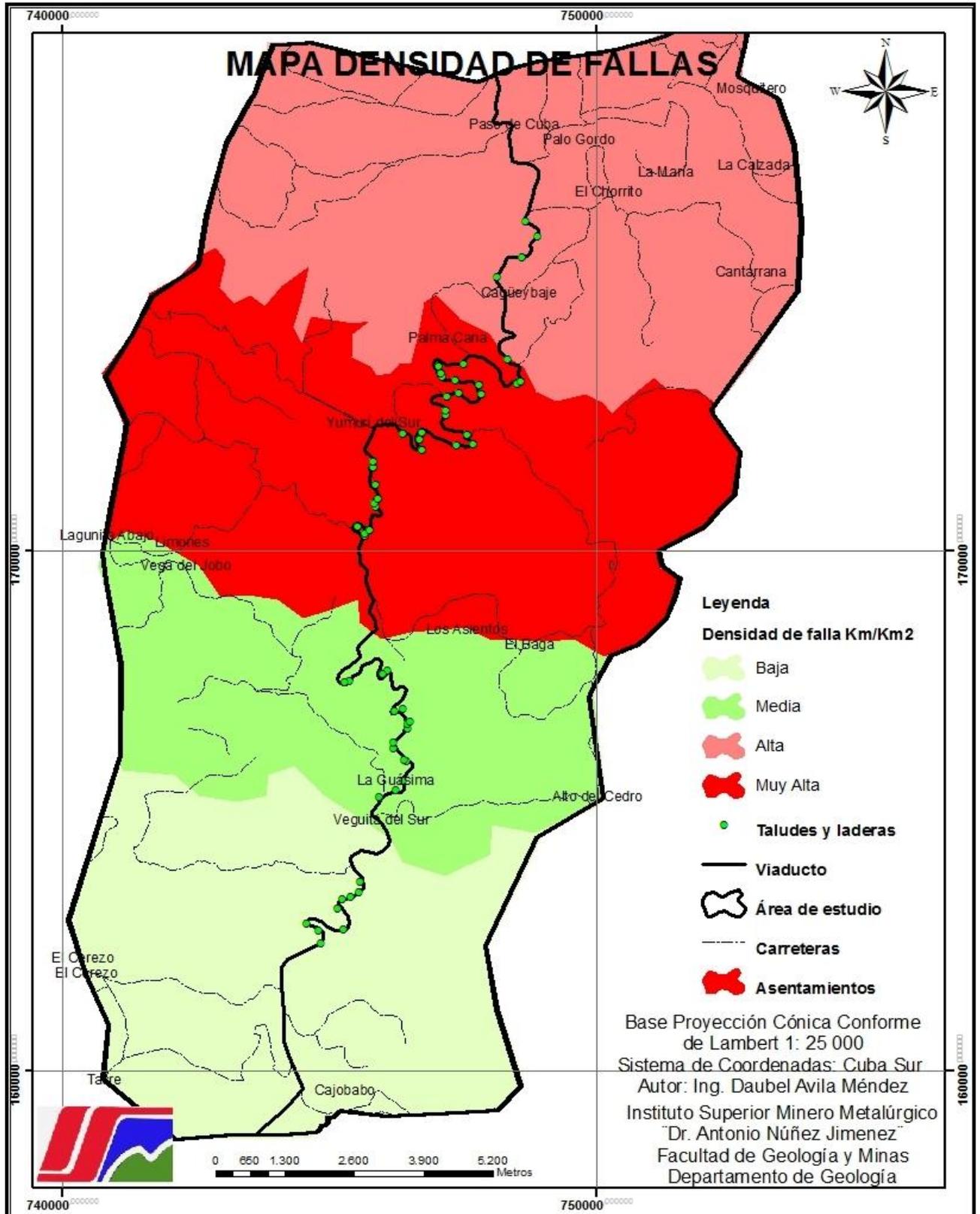


*Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez"*  
*Facultad de Geología y Minería. Departamento de Geología*

---

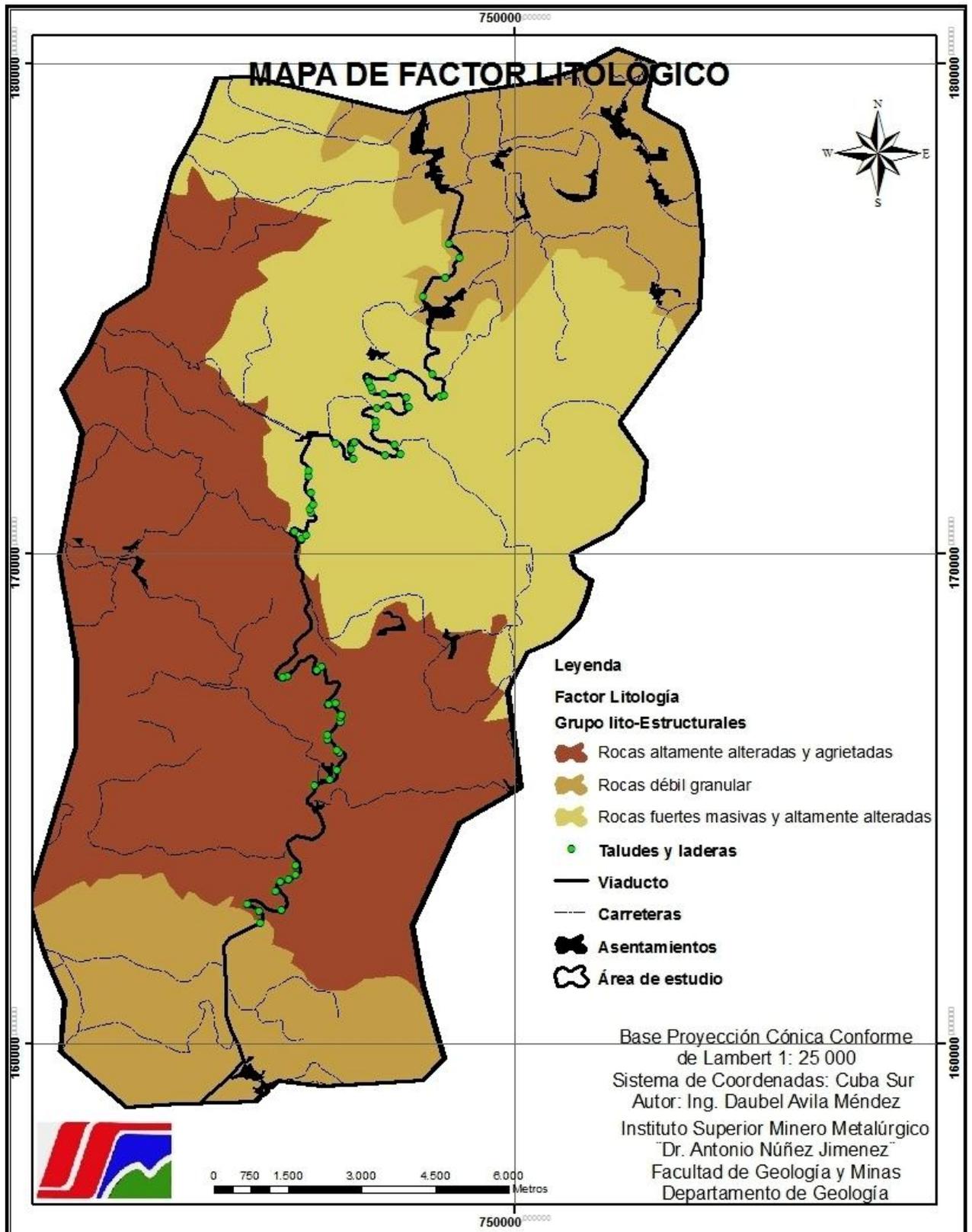


Anexo 15. Mapa de densidad de falla.





## **Anexo 16. Mapa de Factor Litológico.**





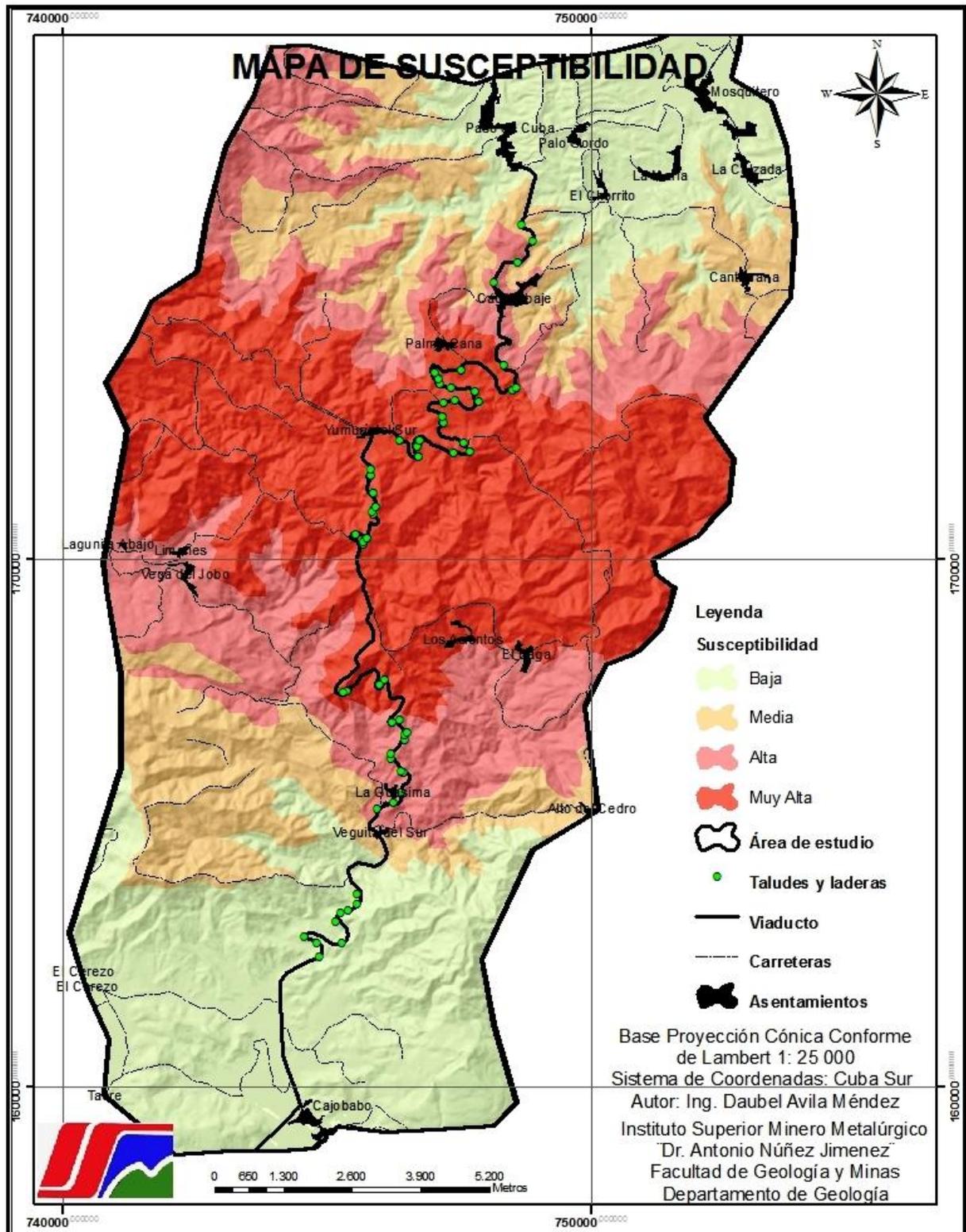
*Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez"*  
*Facultad de Geología y Minería. Departamento de Geología*

---



*Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez"*  
*Facultad de Geología y Minería. Departamento de Geología*

---





*Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez"*  
*Facultad de Geología y Minería. Departamento de Geología*

---



*Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez"*  
*Facultad de Geología y Minería. Departamento de Geología*

---