

Evaluación de la susceptibilidad por deslizamientos en el yacimiento Punta Gorda, Moa, Cuba

Yuri Almaguer-Carmenates
Miguel Ángel Rodríguez-Díaz
María del Rosario-Moradas
Asel María Aguilar-Sánchez

Resumen

En los yacimientos lateríticos de cortezas de intemperismo de Moa ocurren deslizamientos que afectan las labores de minado. Por ello se evaluó, en el yacimiento Punta Gorda, la susceptibilidad a deslizamientos para el análisis de riesgos debido a inestabilidades de laderas. Mediante criterios geomorfológicos de fotointerpretación se inventariaron 21 deslizamientos con sus características morfológicas, direcciones preferenciales y litologías donde se produjeron, resultando el movimiento rotacional la tipología predominante. La susceptibilidad del terreno a la rotura se clasificó en cuatro clases: baja, media, alta y muy alta; el 25 % del área total estudiada clasifica como de susceptibilidad muy alta, lo que significa un elevado grado de propensión de los suelos lateríticos a los deslizamientos.

Palabras clave: Deslizamientos; cartografía; lateritas; análisis de riesgo; yacimiento Punta Gorda.

Ore body landslide risk assessment, Punta Gorda, Moa, Cuba

Abstract

Landslides occurring in Moa lateritic mines with weathering crusts are affecting mining activities. For that reason, the susceptibility of the area of Punta Gorda ore body to landslides was evaluated for a landslide risk assessment due to the instability of the slopes. By means of photointerpretation geomorphological criteria, the inventory reported 21 landslides having morphological characteristics, preferential and lithological directions where they occurred. The rotational movement is the prevailing typology. The soil susceptibility to fracture was classified into 4 categories: low, average, high and very high. 25 % of the total area under study has been classified to be very vulnerable. This indicates that the lateritic soils are highly prone to landslides.

Keywords: Landslides; cartography; laterites; risk analysis; Punta Gorda ore body.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el hombre, en el proceso de desarrollo económico, ha generado un cierto grado de vulnerabilidad, aumentando los riesgos de las actividades socioeconómicas. Bajo estas condiciones geoambientales, los deslizamientos constituyen un peligro geológico.

Dentro de los estudios de riesgos se analiza la susceptibilidad del terreno; en su evaluación frente a deslizamientos se aplican varias aproximaciones probabilísticas, las cuales se basan en la determinación de los factores que influyen en la inestabilidad del medio, caracterizados por mapas de factores condicionantes que se combinan para definir los distintos grados de predisposición, y se obtienen como resultado los mapas de susceptibilidad.

La presente investigación se realiza como parte de la aplicación de estas técnicas a la solución de problemas relacionados con deslizamientos desarrollados en yacimientos de cortezas lateríticas ferroniquelíferas y en un entorno minero-metalúrgico de gran importancia, desde el punto de vista socioeconómico para Cuba, como lo es el municipio de Moa.

La problemática consiste en la ocurrencia de deslizamientos en taludes y laderas en el yacimiento Punta Gorda, lo cual expone a riesgos la actividad minera, principalmente por la peligrosidad condicionada a la predisposición del terreno frente a las inestabilidades y la acción de agentes dinámicos como las intensas lluvias y la sismicidad del territorio.

El objetivo fue evaluar los niveles de susceptibilidad a los deslizamientos en el yacimiento Punta Gorda aplicando un Sistema de Información Geográfica que sirva de base a futuras evaluaciones de riesgo para prevenir o mitigar los daños derivados de estos fenómenos.

1.1 Características del yacimiento

El yacimiento Punta Gorda se ubica en Moa, en el extremo oriental de la provincia de Holguín, Cuba; forma parte del grupo orográfico Sagua-Baracoa, lo cual hace que el relieve sea predominantemente montañoso, principalmente hacia el sur, mientras al norte el relieve se hace más suave, disminuyendo gradualmente hacia la costa.

Geográficamente se encuentra limitado al norte por el océano Atlántico y la parte baja del curso del río Moa, al sur por la línea convencional que lo separa de los yacimientos Camarioca Norte y Camarioca Este, por el oeste está limitado por el río Los Lirios y el cañón del río Moa y por el este se separa del yacimiento Yagrumaje Norte por el río Yagrumaje, ubicándose en la margen izquierda del mismo (Figura 1).

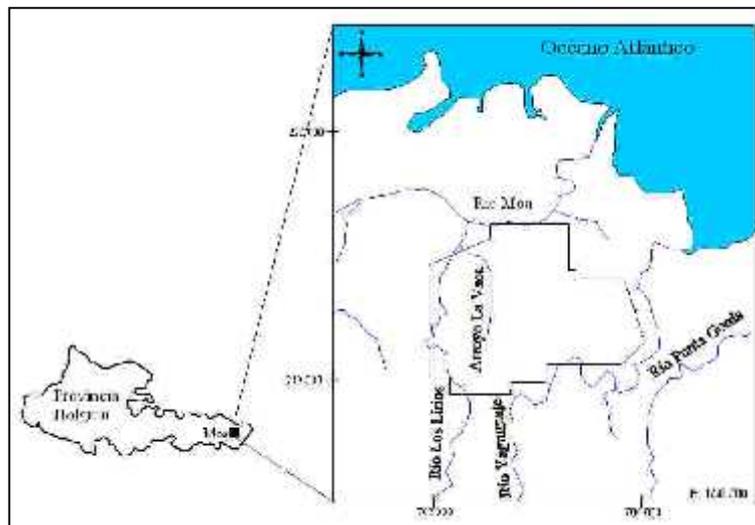


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

La red fluvial está representada por los ríos Moa (al norte), sus afluentes río Los Lirios (al oeste), arroyo la vaca (área central) y el río Yagrumaje (al este y sur). La fuente de alimentación principal de estos ríos y arroyos son las precipitaciones atmosféricas, desembocando las arterias principales en el océano Atlántico, para formar deltas cubiertos de sedimentos palustres y vegetación típica de manglar.

La mayor parte del yacimiento está ocupado por la zona de divisorias entre el río Yagrumaje y el arroyo La Vaca, presentando un relieve suavemente ondulado que alcanza una altura de 174 m hacia el sur, disminuyendo su altura al norte y nordeste hasta 20 m. La divisoria del río Yagrumaje presenta cotas que van de 174 m hasta 134 m, con una cima plana a suavemente ondulada.

La vegetación se caracteriza por la existencia de bosques de *Pinus cubensis* en las cortezas lateríticas y donde hay menores potencias de las mismas, matorrales espinosos, típicos de las rocas ultramáficas serpentinizadas. Las zonas bajas litorales están cubiertas por una vegetación costera típica, entre la que se destacan los mangles.

Geológicamente, y desde el punto de vista regional, el área se relaciona con el desarrollo de sistemas de arco insulares y cuenca marginal durante el Mesozoico, y a su extinción a fines del Campaniano Superior-Maestrichtiano. Debido a procesos de acreción tectónica se produce la obducción del complejo ofiolítico, según un sistema de escamas de sobrecorrimiento, sobre el borde pasivo de la plataforma de Bahamas.

Relativo a la morfotectónica, el área de estudio se encuentra ubicada en el bloque El Toldo, el que ha manifestado los máximos levantamientos relativos de la región. La litología está representada por rocas del

complejo máfico y ultramáfico de la secuencia ofiolítica, sobre las cuales se ha desarrollado un relieve de montañas bajas de cimas aplanadas ligeramente diseccionadas (Iturralde-Vinent 1990; Lewis & Draper 1990; Morris et al. 1990; Campos 1991; Rodríguez 1998).

En el área aparecen tres grandes conjuntos litológicos:

- El basamento que revela una alta complejidad tectónica y mediana complejidad litológica. La litología que predomina es la peridotita serpentizada. Se localizan fajas de serpentinita foliada, esquistosa y budinada, que coinciden con las zonas de contacto entre mantos tectónicos imbricados.
- La corteza de meteorización residual que está desarrollada principalmente sobre peridotitas de tipo harzburgitas, serpentinitas y, en menor grado, gabro olivínico, plagioclasita y anfibolita.
- Las lateritas redepositadas (o sedimentarias) formadas por lateritas redepositadas, intercaladas en ocasiones con arcillas pardo oscuras con material carbonizado, lentes conglomeráticos y arenosos con fragmentos predominantes de ultramafitas y en ocasiones de gabros. También pueden presentarse algunos horizontes calcáreos con gran contenido de fauna.

1.1.1 Condiciones estructurales

Agrietamiento

En el área las principales direcciones del agrietamiento son: NS y NW, sin embargo, con menos frecuencia y en forma de abanico entre estas se manifiestan las direcciones N65°W, N45°W, N35°W, N23°W y N13°W, lo cual puede ser reflejo de un cambio gradual de la dirección principal de los esfuerzos que afectaron la región o pudieran relacionarse con un sistema Riedel de fallas transcurrentes que desplazaron los contactos entre los mantos de cabalgamiento.

Las grietas correspondientes a las direcciones NS y N-NW presentan signos de movimientos de cizallamiento a través de sus superficies, manifestándose con una densidad moderada en el terreno y rellenas de material serpentinitico. Aparece, además, otro sistema no reportado en el diagrama de roseta con rumbo NE-E, vertical y con densidad de agrietamiento alta.

El buzamiento de los sistemas de grietas presenta el siguiente comportamiento: familia (1) con acimut de buzamiento 226°, buzamiento horizontal relacionado con zonas de contacto entre mantos tectónicos;

familias (2) $063^{\circ}/45^{\circ}$ y (3) $268^{\circ}/41^{\circ}$, probablemente asociado a los sistemas de fallas de desplazamiento por el rumbo con dirección NW; familia (4) $015^{\circ}/89^{\circ}$ y (5) $042^{\circ}/88^{\circ}$, están relacionadas con los sistemas de fallas NW y NE.

Sistemas de fallas

Fueron reveladas varias estructuras disyuntivas de desplazamiento, las cuales se manifiestan en cuatro direcciones principales: NS, EW, $N45^{\circ}E$ y $N55^{\circ}W$ (Figura 2).

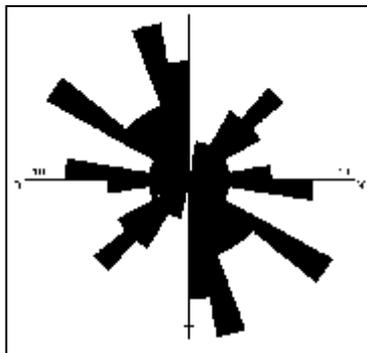


Figura 2. Diagrama de roseta de fallas en el yacimiento Punta Gorda.

El sistema con tendencia al rumbo EW, presenta buzamiento subhorizontal, pudiéndose relacionar con los planos de cabalgamiento de las estructuras tectónicas de la región, clasificándose este sistema como fallas de sobrecorrimiento; el plano de falla del sistema NS es vertical con signos de trituración a través del mismo; el sistema NW está activo, sin definirse el sentido del movimiento, y el sistema NE presenta cizallamiento.

1.1.2 Condiciones hidrogeológicas

Las aguas subterráneas siguen la morfología del terreno, con flujos predominantes hacia el norte en la mayor parte del área, pudiendo tener sentido diferente y hasta opuesto hacia los principales cursos de aguas superficiales. El gradiente varía entre $0,03^{\circ}$ y $31,7^{\circ}$ (De Miguel et al. 1998; De Miguel 2004; Blanco et al. 2004).

Las rocas acuíferas son las serpentinitas agrietadas y presentan un importante flujo lateral por la zona del contacto con la corteza laterítica. En las lateritas el movimiento del agua es fundamentalmente de ascenso capilar, que varía hasta los 25,5 m (De Miguel et al. 1998). La permeabilidad en las lateritas oscila entre 0,006 y 0,21 m/días.

Permeabilidad y potencia acuífera

- Lateritas. En sentido general, la permeabilidad en estas secuencias está entre 0,006 y 0,21 m/días, correspondiendo los valores más

altos a los horizontes de ocres inestructurales con perdigones, y los más bajos, a los ocres estructurales.

- Serpentinitas. Bajo este concepto se consideran a todas las ultramafitas serpentinizadas, serpentinitas, e incluso, pequeños cuerpos de gabro y/o diabasas presentes en el yacimiento de forma subordinada, incluyendo, además, las rocas lixiviadas. En sentido general, la permeabilidad en estas secuencias está entre 0,004 y 0,430 m/días, aunque en zonas de intensa trituración se pueden encontrar valores anómalos mayores de 2,00 m/días.

La potencia acuífera es de 27,6 m. Los más bajos corresponden a los drenes naturales y a la zona explotada. Los valores más altos corresponden a las áreas más elevadas del yacimiento.

2. METODOLOGÍA

Para realizar el análisis de susceptibilidad se partió de un modelo descriptivo que permite orientar la selección de parámetros que caracterizan las laderas así como su tratamiento y posterior interpretación, y que tiene las siguientes condiciones:

- La base de los taludes y las laderas en el yacimiento están constituidos por un substrato rocoso impermeable compuesto por rocas ultrabásicas serpentinizadas y, en menor medida, por básicas. Sobre este yace, en la mayor parte del área, una corteza laterítica residual y en el resto del área, de forma discordante, una corteza laterítica redepositada. De forma intercalada, aparecen arcillas formadas a partir de la meteorización de rocas básicas (gabros).
- Las cortezas lateríticas, por sus propiedades físicas y composición mineralógica, presentan gran capacidad de almacenaje, acumulando considerables cantidades de aguas que son transmitidas muy lentamente, manteniéndose con alta humedad durante todo el año. Esta situación aumenta el peso, las presiones intersticiales en los poros y disminuye las propiedades resistentes de los suelos.
- Las condiciones estructurales del sistema roca-suelo, junto a las propiedades geomecánicas, determinan los mecanismos y tipologías de deslizamientos desarrollados en el área.

De esta forma, en los lugares que convergen todas estas condicionantes, fallas, intenso agrietamiento, altas subpresiones en la corteza y presencia

de intercalaciones de arcillas formadas a partir de la meteorización de gabros, deben manifestarse roturas o inestabilidades.

2.1 Factores condicionantes utilizados en el análisis de susceptibilidad

Teniendo en cuenta los criterios de inestabilidad y los factores condicionantes, sobre la base de los reconocimientos de campo, se seleccionaron los factores utilizados en el análisis de susceptibilidad para su tratamiento mediante técnicas estadísticas (Tabla 1).

La utilización combinada de estos factores genera un mapa residual, que explica cuáles lugares son más o menos susceptibles al desarrollo de deslizamientos, a cada uno se le asigna un valor o significado, por su influencia de favorecer o reducir la posibilidad de rotura de los taludes y laderas, en función de la cantidad de área ocupada por deslizamientos en las clases de cada factor.

Por el tamaño del área del yacimiento (8,75 km²), el grado de estudio, las características de la información de base y del sistema Hardware-Software se utilizó como escala de trabajo 1:2 000.

Tabla 1. Relación de factores utilizados en el análisis de susceptibilidad

Factores de análisis de susceptibilidad del terreno a la rotura	Internos	Características intrínsecas	Factor litológico	Grupos lito-estructurales
			Factor tectónico	Fallas, grietas, diques
		Características extrínsecas	Factor geomorfológico	Pendiente umbral de deslizamientos
	Externos	Factor hidrogeológico		Subpresión de la corteza laterítica, nivel freático, gradiente crítico
		Factor de uso actual del suelo		Uso de suelo

2.1.1 Inventario de deslizamientos

El inventario se confeccionó a partir de campañas de reconocimiento de campo, a escala 1:2 000, ejecutadas desde el año 1997, en las cuales se describieron todos los deslizamientos desarrollados en el área. Para perfeccionar el cartografiado de los movimientos, fundamentalmente los de mayor extensión, se utilizó la técnica de interpretación fotogeológica a escala 1:36 000, utilizando los siguientes criterios de reconocimiento:

1. Laderas de altas pendientes con depósitos extensos de suelo y rocas es los pies de las mismas.
2. Presencia de líneas nítidas relacionadas con escarpes.

3. Superficies onduladas formadas por el deslizamiento de las masas de suelo desde los escarpes. Formas topográficas onduladas no naturales semejantes a una concha.
4. Depresiones alargadas.
5. Acumulación de detritos en canales de drenajes y valles.
6. Presencia de tonos claros donde la vegetación y el drenaje no han sido restablecidos.
7. Cambios bruscos de tonos claros a oscuros en las fotografías (tonos oscuros indican zonas húmedas).
8. Cambios bruscos de la vegetación, indicando variaciones en una unidad de terreno.

2.1.2 Factores de susceptibilidad

La información litológica se trabajó clasificando las rocas en grupos lito-estructurales, teniendo en cuenta sus susceptibilidades, resistencia y características litológicas (Tabla 2). El área se clasificó en cuatro clases: roca debilitada tectónicamente, representado por rocas ultrabásicas serpentinizadas y rocas básicas; roca con apariencia de suelo con estructura de la roca original, representada por la corteza laterítica residual; roca con apariencia de suelo con estructura sedimentaria, representada por la corteza laterítica redepositada, y materiales granulares, representada por los sedimentos aluviales.

Las características estructurales del macizo rocoso fueron analizadas a través la información de yacencia de grietas, fallas y diques de gabros; se midieron parámetros como abertura, espaciamiento, tipo de relleno, consistencia del relleno, continuidad, condiciones hidrogeológicas y característica de la superficie de la grieta. Las fallas se detectaron a través de reconocimiento de campo, análisis fotogeológico y procesamiento del modelo digital de elevaciones de superficie y del substrato rocoso. Este último sirvió para detectar estructuras enmascaradas por los procesos denudativos de superficie. La información estructural se utilizó en el análisis de los mecanismos y tipologías de movimientos de masas mediante la técnica de proyección estereográfica, comparando la posición relativa de las familias de grietas y las laderas y taludes.

Para evaluar la influencia de las condiciones hidrogeológicas sobre el desarrollo de deslizamientos se utilizó información de 43 pozos y se analizaron varias variables como el nivel de aguas subterráneas, la

dirección y gradiente de los flujos, y las subpresiones en la corteza laterítica.

El elemento geomorfológico utilizado es la pendiente umbral de deslizamientos, obteniendo un mapa clasificado en cuatro clases, 0°-9°, 10°-19°, 20°-40° y mayor de 40°. La influencia de la pendiente sobre el desarrollo de deslizamientos se determina comparando la cantidad de movimientos y la longitud de los escarpes de los deslizamientos desarrollados por cada clase de pendiente.

Tabla 2. Caracterización de los grupos lito-estructurales del área de estudio

Grupos lito-estructurales		Litologías	Factor litológico
			Características
1	Roca debilitada tectónicamente	Rocas ultrabásicas serpentinizadas Rocas básicas (gabro)	Muy susceptibles a la meteorización (amplio desarrollo de cortezas de intemperismo) Zonas trituradas e intensamente fracturadas con presencia de espejos de fricción y foliación secundaria Se manifiestan caídas de bloques, vuelcos y roturas en cuña Se comportan como rocas acuíferas
2	Roca con apariencia de suelo con estructura de la roca original	Corteza laterítica residual	Susceptibles a procesos de erosión laminar y en cárcavas El deterioro primario ocurre como lavado superficial y arrastre de granos con flujos de detritos, y deslizamientos como modos secundarios Los mecanismos secundarios están controlados, principalmente, por la estructura relíctica de la roca original y en menor medida por las propiedades físico-mecánicas de los materiales Presenta gran capacidad de almacenaje de agua, aunque la transmiten muy lentamente
3	Roca con apariencia de suelo con estructura sedimentaria	Corteza laterítica redepositada	Susceptible a procesos de erosión laminar y en cárcavas Los mecanismos secundarios están controlados por las propiedades físico-mecánicas de los materiales Presenta gran capacidad de almacenaje de agua, aunque la transmiten muy lentamente
4	Materiales granulares	Sedimentos aluviales (grava, arena y arcilla)	Susceptibles a la erosión fluvial

2.2 Metodología de valoración de la susceptibilidad

La técnica estadística aplicada en la investigación fue el análisis condicional que se empleó para evaluar la relación probabilística entre los factores condicionantes relevantes seleccionados y la ocurrencia de deslizamientos en el área.

El basamento teórico parte del teorema de Bayes, conforme al cual los datos de frecuencia, tales como área de deslizamientos o cantidad de deslizamientos, pueden ser usados para calcular probabilidades que dependen de la ocurrencia de eventos previos (Hansen 1984; Carrara et al. 1995; Corominas 1987, 1992; Van Westen 1994).

El análisis condicional, que fue usado por primera vez en la exploración de minerales sólidos e hidrocarburos, puede ser aplicado clasificando el área de estudio en unidades de condiciones únicas (UCU). La frecuencia de deslizamientos se determina por:

$$LF = \text{Área de deslizamientos} / \text{Área de UCU}$$

Como se mencionó anteriormente, de acuerdo al teorema de Bayes, LF es igual a la probabilidad condicional (P) de ocurrencia de deslizamientos (L) dado por el grupo de factores condicionantes, obteniéndose UCU, es decir:

$$P(L \text{ UCU}) = \text{Área de deslizamientos} / \text{Área de UCU}$$

Por comparación de las diferentes probabilidades condicionales de los diferentes factores para el área de investigación, con la probabilidad de deslizamiento media para el área total de trabajo (ER), es decir:

$$P(LER) = \text{Área de deslizamientos} / \text{Área total ER}$$

Es posible clasificar el área de trabajo en zonas de niveles diferentes de susceptibilidad, y más tarde reclasificado en clases apropiadas.

Modelo estadístico empleado

A partir de la base teórica del teorema de Bayes, y bajo varias aproximaciones probabilísticas, se seleccionó la siguiente ecuación para la valoración de las clases de los diferentes factores usados en el análisis de susceptibilidad (Almaguer & Guardado 2005):

$$Vc = \left[\left(\frac{X_l}{Y_l + G} \times \frac{X}{Y} \right) + \sum \left(\frac{X_n}{Y_n} \times \frac{X}{Y} \right) \right] \times 1000$$

Donde:

Vc: valor de la clase analizada

X_l: área ocupada por deslizamientos en la clase lito-estructural

Y_l: área de la clase del grupo lito-estructural

G_l: área ocupada por cuerpos de gabros en la clase lito-estructural

X_n: área ocupada por deslizamientos en la clase analizada

X: área total ocupada por deslizamientos

Y_n: área de la clase analizada

Y: área total de la zona de estudio.

En la Figura 3 se muestra la aplicación del análisis condicional en ambiente SIG para la caracterización de los mapas temáticos de factores condicionantes y posterior valoración de susceptibilidad. La valoración de todos los factores se realizó en función de la cantidad de área ocupada por deslizamientos en cada clase, sin embargo, en el caso del factor litológico se realizó un análisis adicional, debido a la particularidad que presenta el yacimiento de poseer, además de las litologías aflorantes en superficie, la presencia de cuerpos de gabro, tanto en el substrato como intercalados en la corteza laterítica, de manera que fue preciso incluir la influencia de estos cuerpos en el análisis de susceptibilidad.

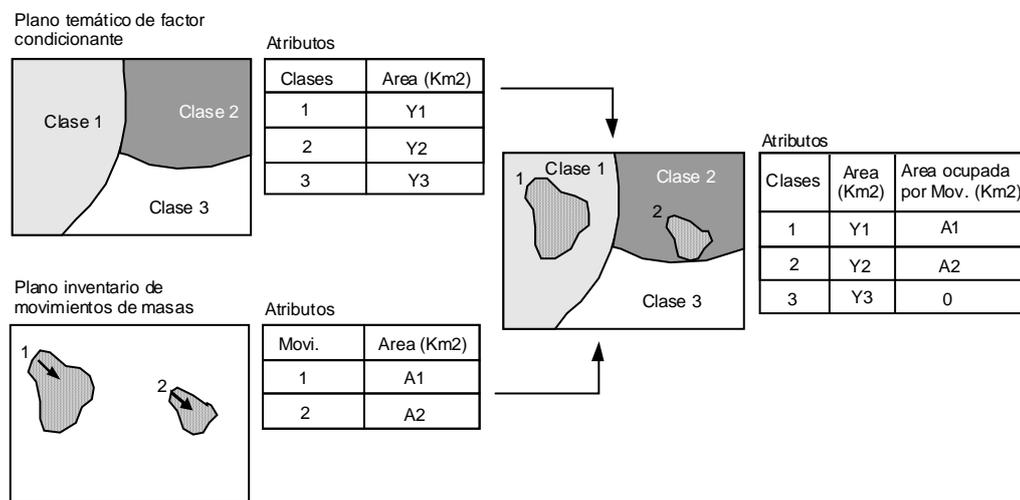


Figura 3. Procedimientos para la caracterización y combinación de factores condicionantes mediante técnicas SIG, a través del análisis de probabilidad condicional.

Una vez valoradas todas las clases de los factores analizados se procedió a la conversión, en formato ráster con tamaño de celda de 5x5 m, y la posterior reclasificación de cada mapa temático mediante el análisis de clúster, que es una técnica estadística multivariada que se usa para identificar o clasificar características similares en un grupo de observaciones. De esta forma, se determinaron las clases de susceptibilidad para cada factor, para las combinaciones entre estos y para la obtención del mapa final de susceptibilidad.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Existen diversas aproximaciones para evaluar el grado de susceptibilidad del terreno frente a los deslizamientos, la mayor parte de ellas basadas 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.

A continuación se muestran los resultados del análisis de los factores condicionantes y su influencia sobre las inestabilidades, y la aplicación de los métodos estadísticos en la cartografía de susceptibilidad del terreno al desarrollo de deslizamientos en el área investigada.

3.1 Descripción y cartografía de los deslizamientos

Los primeros trabajos realizados, con vista al análisis de la susceptibilidad del terreno, fueron de reconocimiento del área para ubicar y caracterizar los deslizamientos existentes y crear el mapa de inventario de los mismos (Figura 4).

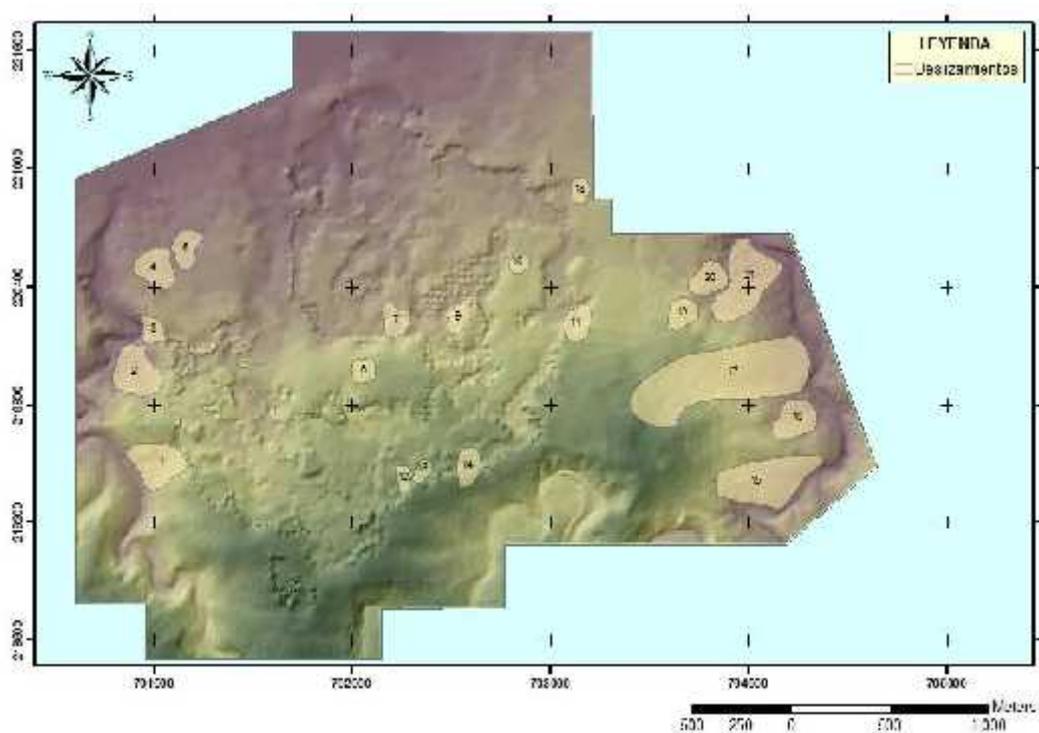


Figura 4. Inventario de deslizamientos en el yacimiento Punta Gorda (Escala 1:2 000).

3.1.1 Clasificación de los deslizamientos

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, 1984), Hutchinson (1988), WP/WLI (1993), y Cruden y Varnes (1996). Los mecanismos que se manifiestan en el área son de movimiento a través de una superficie de rotura definida, caída libre de la roca y movimientos de forma desorganizada. Las tipologías asociadas a estos mecanismos son movimientos rotacionales, traslacionales, en cuña, pequeños desprendimientos y corrientes de derrubios.

En los deslizamientos rotacionales la masa de suelo desplazada se divide en bloques o escalones que experimentan un giro según un eje situado

por encima de su centro de gravedad. El material de la cabecera de los escalones se inclina contra la ladera, generando depresiones paralelas a la corona del talud o ladera a través de la cuál se infiltran las aguas superficiales y pueden lograr reactivaciones. Generalmente hay presencia de agua y la parte frontal del cuerpo del deslizamiento evoluciona como una colada de suelo. En algunos casos este tipo de movimiento se desarrolla en laderas compuestas por roca serpentizada, en la cual el espaciado de las grietas es tan pequeño que le confiere un comportamiento tipo suelo (Almaguer & Guardado 2005, 2006).

Los desprendimientos representan un movimiento de ruptura y caída sorpresiva desde taludes, desmontes y laderas abruptas, localizados fundamentalmente en las vertientes de los valles de los ríos Los Lirios y Yagrumaje. En ocasiones, en laderas formadas por rocas serpentizadas, intensamente agrietadas, tiene lugar los fenómenos de derrumbes asociados con la alteración del material rocoso.

Las corrientes de derrubios se definen como movimientos rápidos de material detrítico con predominio de fracciones gruesas (arenas, gravas, bloques). En el área se reportan en vaguadas u hondonadas del terreno en los cauces de los ríos Los Lirios y Yagrumaje. Por la falta de cohesión, típico de la masa removida, los depósitos se dispersan en los pies de los taludes y laderas.

3.2 Descripción de los factores de susceptibilidad

3.2.1 Características litológicas

Para el análisis litológico el área de estudio se dividió en cuatro grupos lito-estructurales principales, los cuales, por orden de predominio, son: roca con apariencia de suelo con estructura de la roca original (lateritas residuales: 48,7 %), roca debilitada tectónicamente (rocas ultrabásicas serpentizadas: 26,8 %), roca con apariencia de suelo con estructura sedimentaria (lateritas redepositadas: 15,6 %) y materiales granulares (sedimentos aluviales: 8,8 %) (Tabla 3 y Figura 5).

Del análisis realizado de cada una de las litologías, y la comparación del mapa correspondiente con el inventario de deslizamientos (Tabla 3), las más afectadas son las lateritas residuales (0,456 km²) lo que constituye un 52,7 % del área total ocupada por deslizamientos; en segundo lugar, las rocas serpentizadas (0,21 km²) y las lateritas redepositadas (0,18 km²), lo que representa un 24,7 % y 21,7 %, respectivamente.

Tabla 3. Caracterización de los grupos lito-estructurales en relación al desarrollo de deslizamientos

Grupo lito-estructural	Litologías	Área (km ²)	% de área total	Área ocupada por cuerpos de gablo	% del área total ocupada por cuerpos de gablo	Área ocupada por deslizamientos	% del área total ocupada por deslizamientos
Roca debilitada tectónicamente	Serpentinitas de cauce	1,8031	20,6068	0,0079	5,4861	0	0
	Serpentinitas lixiviadas	0,5319	6,0861	0,0314	21,8055	0,2147	24,77
Roca con apariencia de suelo con estructura relictica de la roca original	Lateritas residuales	4,2700	48,7270	0,0635	44,0972	0,4568	52,70
Roca con apariencia de suelo con estructura sedimentaria	Lateritas redepositadas	1,3720	15,6560	0	0	0,1888	21,78
Materiales granulares	Sedimentos aluviales	0,7700	8,7860	0	0	0,0065	0,75

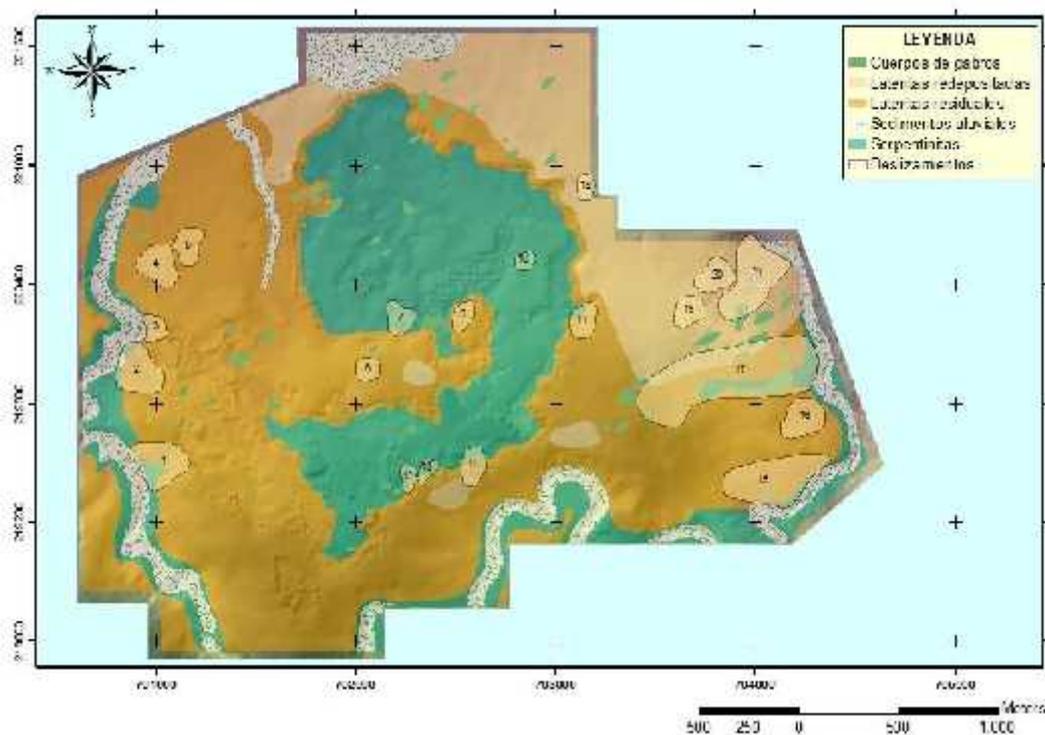


Figura 5. Mapa litológico del área (Escala 1:2 000).

3.2.2 Condiciones estructurales del macizo rocoso

Influencia del agrietamiento del macizo rocoso serpentinizado

Como se ha descrito anteriormente, el agrietamiento juega un papel decisivo en el desarrollo de los movimientos en el área de estudio,

influyendo sobre todo, en los mecanismos y tipologías de las roturas. A continuación se muestran dos ejemplos de tipologías de movimientos condicionados por la posición relativa de las familias de grietas y la dirección de los taludes o laderas. Como base, se toma el mapa de direcciones de agrietamiento confeccionado con las mediciones de elementos de yacencia tomadas en los bloques de explotación con afloramientos del substrato rocoso.

3.2.3 Condiciones hidrogeológicas

Influencia del nivel acuífero

El análisis se realiza a partir del mapa de niveles, clasificado en seis clases: 0 m, 5 m, 10 m, 15 m, 20 m y 25 m. Los niveles más bajos se distribuyen por toda el área. Los niveles de 5 m están distribuidos en la región central del área, con cierta alineación noreste-suroeste. Los niveles de 10 m aparecen hacia el este y oeste. Los restantes niveles por encima de 15 m solamente aparecen hacia el este y sureste del yacimiento.

Comparando el mapa del nivel acuífero con el inventario de deslizamientos (Tabla 4) se tiene que en los niveles mínimos y máximos no se reportan movimientos. En los 5 m y 20 m se desarrollan el 9,4 % y 9,3 %, respectivamente; en los 15 m el 23,3 % y a los 10 m se reporta el mayor porcentaje de área ocupada por deslizamientos: 57,9 %.

Tabla 4. Caracterización del mapa de niveles en relación al desarrollo de deslizamientos.

Nivel acuífero (m)	Área (km ²)	% del área total	Área ocupada por deslizamientos	% del área total ocupada por deslizamientos
0	1,208	13,80	0	0
5	3,208	36,66	0,082	9,45
10	2,878	32,89	0,502	57,90
15	1,128	12,89	0,202	23,29
20	0,288	3,29	0,081	9,33
25	0,038	0,44	0	0

3.2.4 Análisis del factor geomorfológico

El elemento geomorfológico utilizado en el análisis de susceptibilidad es la pendiente del terreno actual del área de estudio. Las clases utilizadas en el análisis se tomaron según las pendientes medidas en los trabajos de reconocimiento en el área de trabajo. El mapa muestra los rangos de pendientes umbrales de deslizamiento con cuatro intervalos: 0°-9°, 10°-19°, 20°-39° y >40° (Tabla 5 y Figura 6).

Tabla 5. Caracterización del mapa de pendiente umbral en relación al desarrollo de deslizamientos

Clases de pendientes umbrales	Descripción	Área (km ²)	No. deslizamiento	% de la cantidad total de deslizamientos	Longitud total ocupada por escarpes (m)	% de la longitud total de escarpes
0° – 9°	Baja	3,72	4, 5, 6, 9, 15, 17, 18	35	770	28,20
10° – 19°	Media	3,83	1, 2, 3, 13, 14, 16, 19, 20	40	1450	53,11
20° – 39°	Alta	1,12	10	5	130	4,76
≥ 40°	Muy alta	0,08	7, 8, 11, 12	20	380	13,91

Como se muestra en la tabla, la clase donde se desarrollan más movimientos (ocho) es entre 10° y 19°, lo que representa el 40 % del total. Le continúa la clase entre 0° y 9°, con un 35 % del total. En las dos clases se desarrolla el 75 % de todos los deslizamientos inventariados, dentro de los cuales se encuentran los de mayor extensión, ocurridos en las áreas no afectadas por la actividad minera. Esto contradice lo que se pensaba hasta el momento en torno a la influencia de las altas pendientes sobre el desarrollo de deslizamientos. No obstante, un 20 % de los deslizamientos se desarrollan en áreas de pendientes mayores de 40°, formadas por la modificación del terreno por la actividad minera, pero son los movimientos de menor extensión espacial.

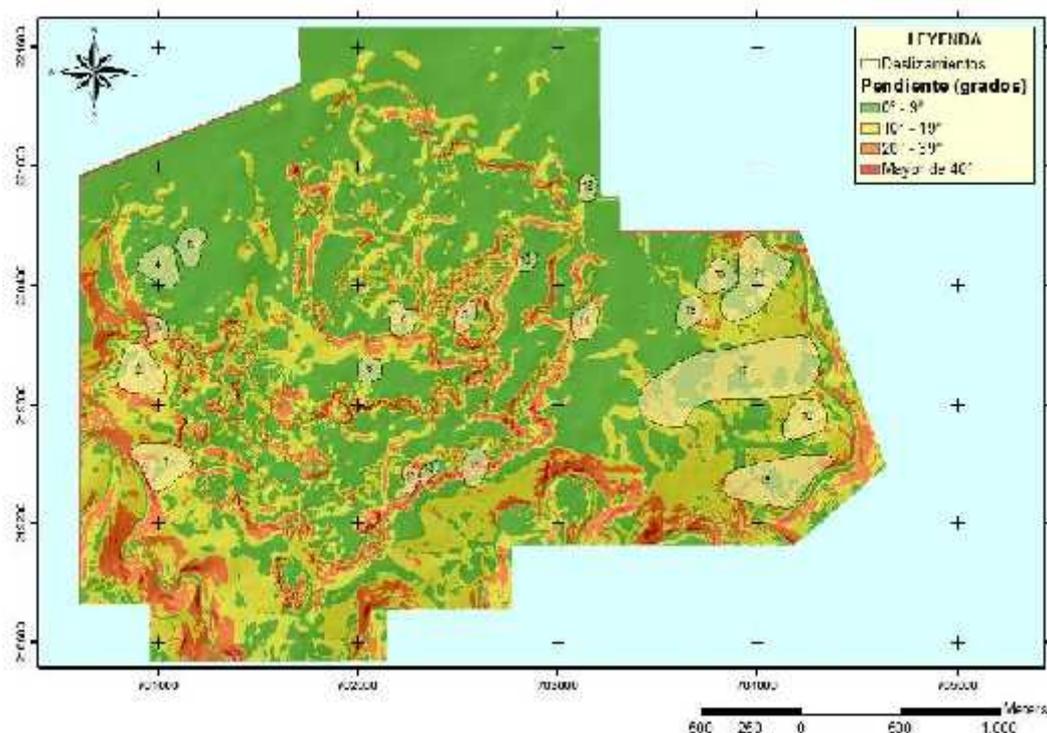


Figura 6. Mapa de pendientes del terreno (Escala 1:2 000).

3.2.5 Análisis del factor geotécnico

Para el análisis de las condiciones geotécnicas del terreno se confeccionó el mapa de tipo de suelo. Los limos arcillosos de alta plasticidad (MH) ocupan 4,27 km², lo que representa el 48,76 % del área total. Se distribuyen hacia el oeste, sur y sureste del yacimiento. Las arenas limosas (SM) ocupan 3,17 km², el 36,21 % del área. Estas se distribuyen hacia la parte central, norte y noreste del yacimiento.

El resto del área está ocupada por roca fresca, arenas y gravas, relacionadas espacialmente con los cauces de los ríos presentes en el área (Tabla 6 y Figura 7).

Tabla 6. Caracterización del mapa de tipo de suelo en relación al desarrollo de deslizamientos

Clases de tipo de suelo y roca	Área (km ²)	% del área total	Área ocupada por deslizamientos	% del área total ocupada por deslizamientos
Arena limosa (SM)	3,17	36,21	0,24	27,34
Limo arcilloso de alta plasticidad (MH)	4,27	48,76	0,46	52,70
Gravas, arenas y limos (GC)	0,77	8,76	0,01	0,75
Roca (R)*	0,55	6,26	0,17	19,21

(R)*: Simbología seleccionada por el autor.

Del análisis de los movimientos de masas se tiene que el 52,7 % se desarrolla en los limos arcillosos de alta plasticidad. En las áreas ocupadas por las arenas limosas, los deslizamientos ocupan el 27,34 % del área total de movimientos. El 19,2 % afecta las áreas ocupadas por roca serpentizada y el 0,75 % a las gravas y arenas. Estas últimas se relacionan con los materiales arrastrados en los frentes de los movimientos.

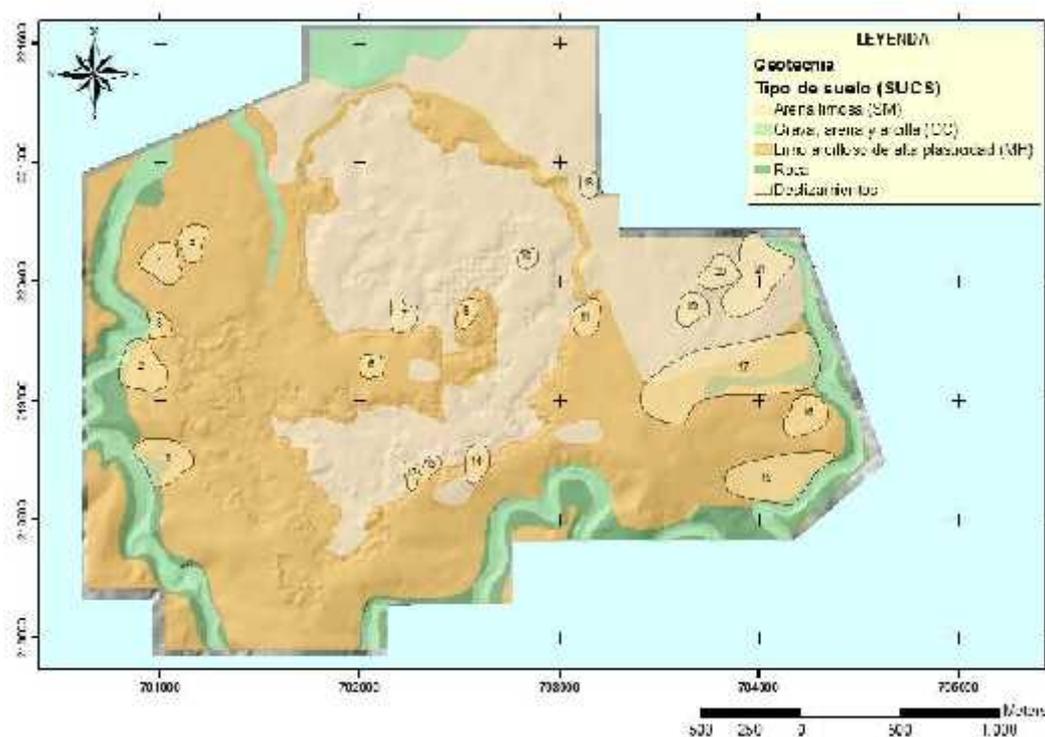


Figura 7. Mapa geotécnico del área de estudio (Escala 1:2 000).

3.2.6 Análisis del factor uso del suelo

Haciendo un análisis del uso del suelo en el área de trabajo se tienen cinco clases fundamentales: zonas de vegetación natural (4,74 km²), distribuidas en la periferia del yacimiento, predominando hacia el este; áreas reforestadas (1,94 km²) y áreas minadas (1,62 km²), ubicadas en la parte interna del área; zonas de depósitos de mineral (0,28 km²) y red vial (0,16 km²) (Tabla 7 y Figura 8).

Tabla 7. Caracterización del mapa de uso de suelo en relación al desarrollo de deslizamientos

Clases de uso del suelo	Área (km ²)	% del área total	Área ocupada por deslizamientos (km ²)	% del área total ocupada por deslizamientos
Áreas minadas	1,62	18,50	0,11	13,34
Áreas reforestadas	1,94	22,22	0,10	11,28
Caminos mineros	0,16	1,84	-	-
Depósitos de mineral	0,28	3,16	-	-
Vegetación natural	4,75	54,27	0,65	75,33

De acuerdo al desarrollo de deslizamientos, el uso de suelo más afectado es la zona cubierta con vegetación natural, afectada por 0,65 km² de área ocupada por movimientos de masas, lo cual representa el 75 % del área total de deslizamientos inventariada; esto refleja la inestabilidad del terreno debido a sus condiciones naturales. En segundo lugar, se tienen las áreas minadas, en las que existe 0,11 km² de área ocupada por deslizamientos (13,34 %) y las zonas reforestadas con 0,09 km². En las

áreas ocupadas por la red vial y los depósitos de mineral no se reportan movimientos.

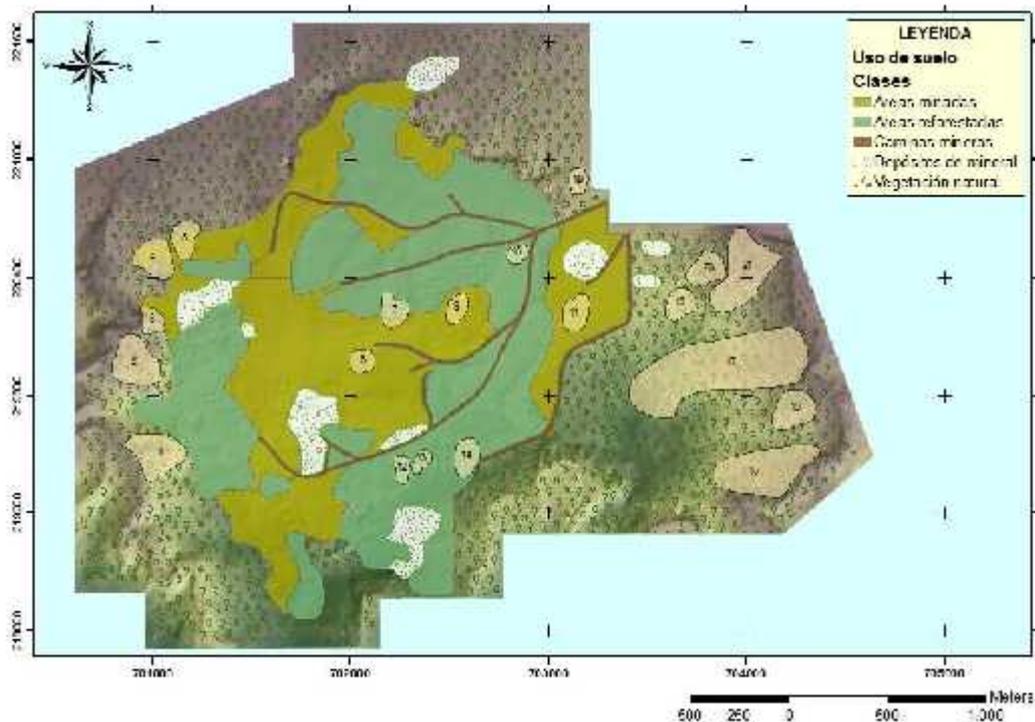


Figura 8. Mapa de uso del suelo (Escala 1:2 000).

3.3 Descripción del mapa de susceptibilidad

El mapa de susceptibilidad del terreno a la rotura obtenido en la investigación está clasificado en cuatro clases: Susceptibilidad baja, media, alta y muy alta (Figura 9). Las mismas se describen a continuación:

- Susceptibilidad baja: ocupa un área de 3,35 km² (38,33 % del área total). De forma espacial se distribuye en la parte central del área, relacionado con las zonas reforestadas. Además, se relaciona con las zonas periféricas, ocupadas por sedimentos aluviales de los ríos Yagrumaje, Los Lirios, Moa y arroyo La Vaca.
- Susceptibilidad media: ocupa un área de 3,03 km² (34,63 % del área total). Se distribuye al sur del área, en forma de franja alargada de dirección este-oeste en la parte central, al norte y en pequeñas zonas al este y oeste del área.
- Susceptibilidad alta: ocupa un área de 1,49 km² (0,13 % del área total). Se localiza hacia el oeste, noreste y al este-sureste donde presenta su mayor acumulación en forma discontinua y alineada con dirección noreste-suroeste. Existen pequeños parches al suroeste y en la parte central del área.

- Susceptibilidad muy alta: ocupa un área de 2,23 km² (25,54 % del área total). Su distribución es bien localizada y se relaciona espacialmente con la clase anterior. Aparece al oeste, noreste, suroeste y al este-sureste, presenta su mayor acumulación en forma continua y alineada en dirección noreste-suroeste.

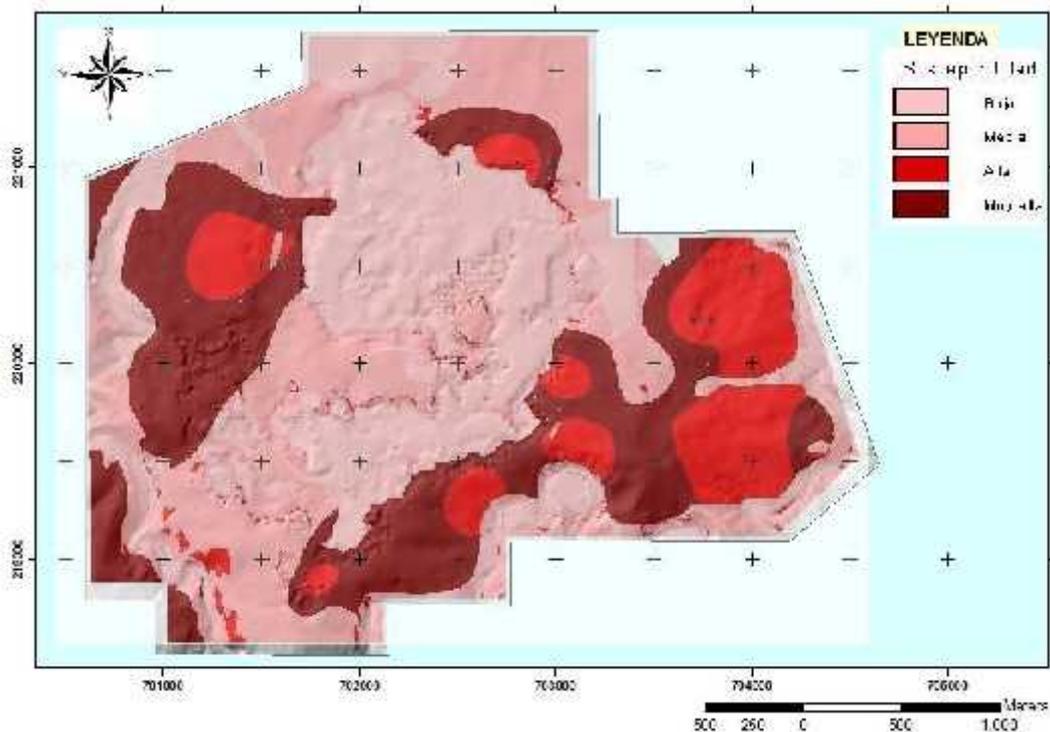


Figura 9. Mapa de susceptibilidad por deslizamientos (Escala 1:2 000).

4. CONCLUSIONES

En el yacimiento Punta Gorda han ocurrido 21 deslizamientos donde el mecanismo predominante es de rotura a través de una superficie definida, y la tipología asociada, de deslizamiento rotacional; en menor medida, las roturas traslacionales y en cuña. Además, ocurren movimientos por caída libre de la roca y de forma desorganizada, como los desprendimientos y corrientes de derrubios, asociados espacialmente a laderas muy inclinadas en las vertientes de los ríos y arroyos presentes en el área.

El análisis de los factores de susceptibilidad demuestran que el área se caracteriza por una alta complejidad tectónica y la presencia de cuatro horizontes ingeniero-geológicos diferenciados por sus propiedades físicas y comportamiento mecánico, así como por su conducta frente a los fenómenos de deslizamientos, en los cuales, con la profundidad, disminuye la fricción interna y aumentan los valores de humedad; estas características contribuyen a la inestabilidad de los taludes debido a la

disminución de la resistencia al corte de los suelos y rocas y, en otros casos, al aumento de las tensiones movilizadoras en el talud.

La susceptibilidad del terreno a la rotura en la zona estudiada se clasifica en clases baja, media, alta y muy alta; como resultado relevante la clase de susceptibilidad muy alta ocupa el 25 % del área total estudiada, lo que significa un alto grado de predisposición de los suelos lateríticos a los deslizamientos

5. REFERENCIAS

- ALMAGUER, Y. & GUARDADO, R. 2005: Caracterización geotécnica del perfil de meteorización de rocas ultrabásicas serpentinizadas en el territorio de Moa, Cuba. *Minería y Geología* 21(3): 534.
- , 2006: Tipologías de movimientos de masas desarrollados en el territorio de Moa, Cuba. *Minería y Geología* 22(1): 618.
- BLANCO, J. L. & LLORENTE, E. 2004: Investigación ingeniero-geológica e hidrogeológica de la Base Minera Punta Gorda. Archivos de la Subdirección de Minas, Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, julio.
- CAMPOS, M. 1983: Rasgos principales de la tectónica de la porción oriental de las provincias de Holguín y Guantánamo. *Minería y Geología* 1(2): 51-75.
- CARRARA, A.; CARDINALI, M.; GUZZETTI, F. & REICHENBACH, P. 1995: GIS technology in mapping landslide hazard. En: CARRARA, A.; GUZZETTI, F. (editor) *Geographical information systems in assessing natural hazards*. Kluwer, Dordrecht, Netherlands, 135-175.
- COROMINAS, J. 1987: Criterios para la confección de mapas de peligrosidad de movimientos de ladera. *Riesgos Geológicos. Serie Geología Ambiental*. IGME, Madrid, 193-201.
- COROMINAS, J. 1992: Movimientos de ladera: predicción y medidas preventivas. En: *Primer Congreso Iberoamericano sobre Técnicas aplicadas a la Gestión de emergencias para la Reducción de Desastres Naturales*. Valencia, 55-77.
- CRUDEN, D. M. & VARNES, D. J. 1996: Landslide types and processes. En: TURNER, A. A. K. AND SCHUSTER, R. L. (editor) *Landslides. Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, Special Report. National Academy Press, Washington D. C., 36-75 p.
- DE MIGUEL, C. 2004: Investigación ingeniero-geológica e hidrogeológica de la Base Minera Punta Gorda. Informe hidrogeológico conclusivo. Archivos de la subdirección de Minas, Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, octubre.
- DE MIGUEL, C.; GUARDADO, R.; RIVERÓN, B.; BLANCO, J.; RODRÍGUEZ, A.; BATISTA, J.; ALMAGUER, Y. & PÉREZ, R. 1998: Proyecto de investigaciones hidrogeológicas del yacimiento Punta Gorda. Informe. Departamento de Geología. Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- HANSEN, A. 1984: Landslide hazard analysis. En: BRUNDSSEN, D. AND PRIOR, D. B. (editor) *Slope Stability*. John Wiley and Sons, N. J., 523-602.

- HUTCHINSON, J. N. 1988: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. En: BONNARD, Ch. (editor) 5th Int. Congr. on Landslides, Lausanne, 1, 3-35 p.
- ITURRALDE-VINENT, M. 1990: Las ofiolitas en la constitución geológica de Cuba. *Ciencias de la Tierra y del Espacio* (17): 8-26.
- LEWIS, J. L. & DRAPER, G. 1990: Geology and tectonic evolution of the northern Caribbean margin. *The Caribbean region the geology of North America*. H.
- MORRIS, A. E.; TANER, I.; MEYERHOFF, H. A. & MEYERHOFF, A. A. 1990: Tectonic evolution of the Caribbean region; alternative hypothesis. *The geology of North America*. H.
- RODRÍGUEZ, A. 1998: Estudio morfotectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluación de riesgos de génesis tectónica. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico, 134 p.
- VAN WESTEN, C. J. 1993: Application of Geographic Information System to landslide hazard zonation. *ITC-Publications* 15, Enschede, 45 p.
- VARNES, D. J. 1984: Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. *Natural Hazards* 3: 63. UNESCO, Paris.
- VARNES, D. J. 1978: Slope movement types and processes. In: *Landslides analysis and control*. Special Report 176: 11-33.
- WP/WLI. 1993: Multilingual landslide glossary. The Canadian Geotechnical society. Bitech Publishers Ltd.

Yuri Almaguer-Carmenates yalmaguer@ismm.edu.cu
Profesor Auxiliar. Doctor en Ciencias Geológicas.
Centro de Estudios del Medio Ambiente.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba.

Miguel Ángel Rodríguez-Díaz mangelrd@uniovi.es
Doctor en Ciencias. Profesor Titular
Departamento de Explotación y Prospección de Minas.
Universidad de Oviedo, España.

María del Rosario-Moradas mmoradas@uniovi.es
Profesora Titular. Doctora en Ciencias.
Dpto. de Explotación y Prospección de Minas.
Universidad de Oviedo, España.

Asel María Aguilar-Sánchez. aselaguilars@gmail.com
Investigadora. Máster en Conservación de Patrimonio.
Instituto. Baustoffe, Zurich, Suiza.